

Satellite-derived bathymetry

Multispektrale Satellitenbilddatenauswertung zur Detektion von Tiefenänderungen flacher Gewässerböden

Ein Beitrag von PETER GRABBERT

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass auf Grundlage der satellitengestützten Bathymetrie (SDB) eine anlassbezogene Seevermessung, bei der Gebiete je nach Dynamik unterschiedlich intensiv vermessen werden, prinzipiell möglich ist. Die Grundlage für die SDB bilden Sentinel-2-Daten und daraus abgeleitete Bandkombinationen. Für die Tiefenschätzung selbst wurden mehrere Verfahren gegenübergestellt, wobei die besten Ergebnisse mit einem Convolutional Neuronal Network (CNN) mit Abweichungen von <26 cm für 95 % der Messungen erzielt werden konnten. Im Anschluss wurde eine Änderungsanalyse auf Grundlage dieser Tiefenschätzungen mit verschiedenen Verfahren durchgeführt, wobei zur Detektion die Hauptkomponentenanalyse (HKA) und für Verschiebungsrichtungen der 2,5D-Least-Square-Tracking-Algorithmus (2,5D-LST) die vielversprechendsten Ergebnisse erzielten.

satellitengestützte Bathymetrie | Änderungsanalyse | CNN | HKA | 2,5D-LST
satellite-derived bathymetry | change detection | CNN | PCA | 2.5D-LST

This work shows, that satellite-derived bathymetry (SDB) allows in principle the sea survey in a more targeted manner, in which the measurement frequency depends on the dynamics of an area. Sentinel-2 data and band combinations derived from it are the basis of the SDB. For the depth estimation itself, several methods were compared, whereby the best results were achieved with a Convolutional Neuronal Network (CNN) with a deviation of <26 cm for 95 % of the measurements. Subsequently, a change analysis based on these depths was performed using different methods, with the principal component analysis (PCA) for detection and the 2.5D least square tracking (2.5D-LST) algorithm for displacement directions generating the most promising results.

Autor

Peter Grabbert hat seine Masterarbeit an der TU Dresden geschrieben. Seit April ist er beim BSH in Rostock beschäftigt.

peter.grabbert@bsh.de

Motivation und Zielstellung der Arbeit

Zuverlässige und genaue Informationen über die Tiefe der Meeressgewässer sind für zahlreiche und teilweise sicherheitsrelevante Anwendungen notwendig. Diese bathymetrischen Daten werden unter anderem für die Navigation, für das Flächenmanagement (z. B. die Ausweisung von Schifffahrtswegen, Windkraftanlagen etc.), für die Planung von Ausbaggerungen und für Aufgaben im Umweltmonitoringbereich gebraucht. Auch die Überwachung der Änderung der Gewässertopographie ist extrem bedeutsam und stellt im Bereich der Schifffahrt einen sicherheitskritischen Aspekt dar. Weiterhin gilt es, Erosionsgefahren, die durch den Meeresspiegelanstieg, durch Landhebungen oder -senkungen oder im Zuge von Bauarbeiten entstehen, zu überwachen.

Bisher werden bathymetrische Messungen hauptsächlich per schiffgestützter Echolotmessung durchgeführt. Diese sind zeitaufwendig und teuer. Daher ist die zeitliche Abtastrate nur sehr gering und beträgt für einige Gebiete der Nord- und Ostsee 20 Jahre und seltener. Unterstützen kann

hier die satellitengestützte Bathymetrie (satellite-derived bathymetry, SDB), welche eine Tiefenmessung aus multispektralen Satellitendaten ermöglicht. Dafür werden die reflektierten Lichtanteile im optischen Spektrum und im nahen Infrarotspektrum (NIR) miteinander verglichen. Da Wasser die Lichtanteile in Abhängigkeit der Wellenlänge unterschiedlich stark unterdrückt, kann aus dem Verhältnis dieser Lichtanteile zueinander ein Rückschluss auf die Gewässertiefe gezogen werden. Dafür muss allerdings der Gewässergrund sichtbar sein, sodass SDB nur für flache Gewässerabschnitte (ca. <10 m für die Ostsee) durchgeführt werden kann. Besonders diese flachen Küstenabschnitte unterliegen jedoch großen Veränderungen und sind von großer Relevanz für viele Anwendungen (z. B. Schifffahrt). Die Genauigkeit der SDB-Messungen (rund einige Dezimeter) ist zwar deutlich geringer als die der klassischen Echolotmessungen (rund einige Zentimeter), sie liegen aber in wesentlich höherer zeitlicher und räumlicher Auflösung vor. Ebenso sind die Kosten weitaus geringer und auch entlegene Regionen können ohne Mehrauf-

wand vermessen werden. Weiterhin findet kein direkter Eingriff in das Messgebiet statt, was insbesondere in Naturschutzgebieten von Vorteil ist.

Am BSH wird untersucht, inwiefern die Veränderungen der Meeresbodentopographie in Betrag und Richtung robust, genau und automatisiert mittels SDB erfassbar ist. Das Gesamtziel ist dabei, dass die teuren Echolotmessungen nur noch situationsabhängig in den Gebieten durchgeführt werden müssen, in denen die SDB-Analyse bereits eine Veränderung detektiert hat. Auch ist es möglich, die zeitlich wie räumlich sehr hoch aufgelösten Daten direkt für Anwendungen wie Strömungsanalysen oder im Umweltmonitoring zu nutzen, da diese häufig nicht auf cm-genaue Daten angewiesen sind.

Hintergrundwissen zur satellitengestützten Bathymetrie

Im Gegensatz zur Atmosphäre unterscheidet sich im Wasser das Durchdringungsvermögen in dem VIS-NIR-Spektralbereich deutlich. Je kurzwelliger und energiereicher die elektromagnetischen Wellen sind, desto tiefer können diese in den Wasserkörper eindringen. Daraus folgt, dass in sehr flachen Wasserschichten die Anteile im VIS-NIR-Spektrum weitgehend gleichverteilt sind, aber in tiefen Wasserschichten der Blau-Anteil des Lichts überproportional vertreten ist (Chiang et al. 2011). Dieser Umstand wird genutzt, um aus dem Verhältnis zwischen dem grünen und dem blauen Anteil die Tiefe abzuleiten. Nach Stumpf et al. (2003) kann so aus dem Verhältnis der natürlichen Logarithmen des blauen und des grünen Farbanteils ein annähernd linearer Zusammenhang zur Gewässertiefe hergestellt werden.

Das Testgebiet für die bathymetrischen Betrachtungen dieser Arbeit befindet sich westlich und südlich von der Insel Fehmarn in der deutschen Ostsee. Das Gebiet ist durch flache Gewässerabschnitte geprägt, die augenscheinlich SDB-geeignet erscheinen. Die Sichttiefe in diesem Teil der Ostsee beträgt außerhalb der brandungsbedingten Trübung ungefähr 10 m (Leimer 2020). Herausfordernd ist hier der unterschiedliche Bewuchs des Seegrundes, da dieser einen enormen Einfluss auf die gemessene Reflektanz hat. Für die dynamische Untersuchung ist insbesondere ein mutmaßliches Abtragungs- und Anlagerungsgebiet von Interesse, was im Rahmen dieser Arbeit näher untersucht werden soll (vgl. Abb. 1). Diese veränderlichen Gebiete bestehen zum Großteil aus hellen Sandflächen, die für SDB sehr vorteilhaft sind. Allerdings sind diese Gebiete häufig von starken Trübungen durch mitgetragene Sedimente betroffen, die mit den Abtragungs- und Anlagerungsprozessen im direkten Zusammenhang stehen.

Als Datengrundlage wurden die Bilder der Sentinel-2-Satelliten genutzt. Diese besitzen jeweils

einen multispektralen Sensor mit insgesamt 13 Farbkanälen, wobei insbesondere die »Farben« Coastal Blue (Band 1), Blau (Band 2), Grün (Band 3), Rot (Band 4) und Nahes Infrarot (Band 5 und 8) genutzt wurden. Weiterhin bietet die Sentinel-2-Mission mit einer Auflösung von bis zu 10 m × 10 m die derzeit hochauflösetesten kostenfreien multispektralen Satellitendaten, wobei jeder Erdschnitt mindestens alle fünf Tage abgelichtet wird.

Die Satellitenszenen müssen vorprozessiert werden. Dabei sind zunächst nur Szenen mit einer sehr geringen Wolkendecke auszuwählen, wobei bereits atmosphärisch korrigierte Szenen genutzt wurden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die anschließenden Prozessierungsschritte automatisiert. Dazu gehören unter anderem der Zuschnitt der Szenen auf das Untersuchungsgebiet, ein Resampling aller Bänder auf ein einheitliches Raster (10 m × 10 m) und die Glättung der Daten mittels Filterung. Weiterhin war es notwendig, einen Datensatz zu den Referenziefen aus den punktuellen Echolotmessungen (Daten vom BSH) zu errechnen. Zur Korrektur wurden zum einen Trübungsparameter mit Hilfe des Prozessors Case-2 Regional CoastColour (C2RCC) berechnet (Kyrlyuk und Kratzer 2019). Zum anderen wurde ein Datensatz von Knauer et al. (2019) zu den Untergrundtypen aufbereitet.

Ableitung der Gewässertiefe

Das bisher am BSH genutzte Verfahren basiert auf einem linearen Regressionsmodell. Dabei wird versucht, mit einer einzelnen Einflussgröße x das Verhalten der Zielgröße y zu beschreiben. Das grundlegende funktionale Modell einer linearen Regression entspricht dabei dem der Geradengleichung. Dieser Ansatz wurde in dieser Arbeit



Abb. 1: Sentinel-2-Szene des Untersuchungsgebiets bei Fehmarn für die bathymetrischen Betrachtungen. Das violett markierte Gebiet ist verstärkt Anlagerungs- und Abtragungsprozessen unterworfen und wurde daher für die Änderungsanalyse genutzt

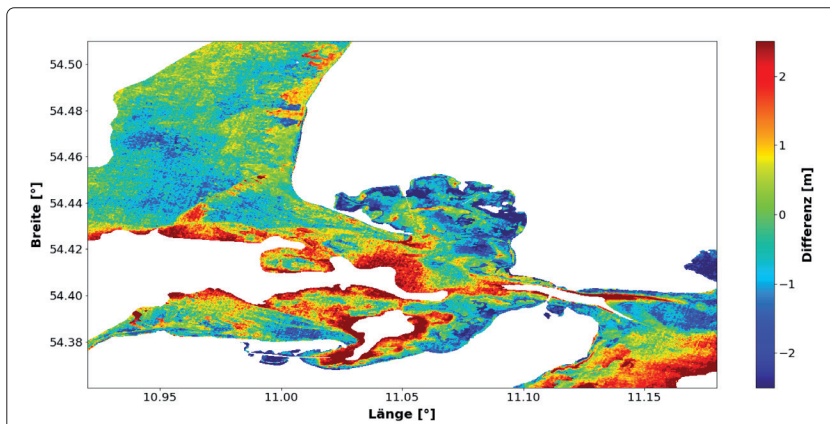


Abb. 2: Dargestellt ist die Differenz zwischen der Referenztiefe und der geschätzten Tiefe durch die MLR

zur multiplen lineare Regression (MLR) erweitert. Der Unterschied ist nun das Hinzunehmen mehrerer Einflussparameter x_i , um weiterhin eine Zielgröße y zu schätzen. Es handelt sich weiter um eine Form der linearen Regression, sofern die zu schätzenden Parameter nur als Linearkombination in das funktionale Modell eingehen (Niemeier 2008, Kap. 11). Im Zuge dieser Arbeit wurden nun insgesamt 24 Bandinformationen (Farbwerte, Farbwertverhältnisse, Trübungsparameter etc.) gleichzeitig betrachtet, wobei allerdings eine Schätzung pro Untergrundtyp durchzuführen ist. Das Ergebnis der Auswertung ist in [Abb. 2](#) dargestellt. Die geschätzten Tiefen vermitteln ein mit sichtbaren Unsicherheiten behaftetes Ergebnis. Die Genauigkeit in den tieferen Wasserflächen ist deutlich geringer als in flacheren Bereichen. Es sind klare Kantenbildungen an den Untergrundklassengrenzen zu erkennen. Die Differenzen zu den Referenztiefen betragen für 95 % der Pixel unter 1,9 m; und für 67 % der Messungen unter 77 cm. Allerdings gibt es deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Untergrundtypen. So werden helle Bodentypen wie Sand (Median: 34 cm) deutlich besser geschätzt als dunkle Ty-

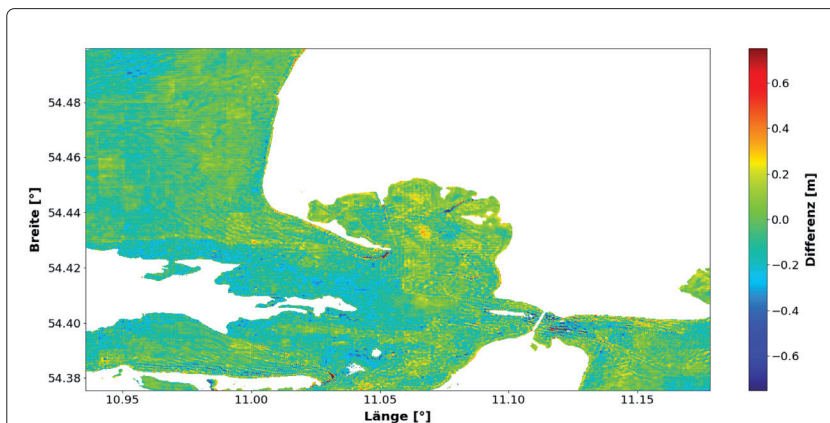


Abb. 3: Zu sehen ist die Differenz zwischen der Referenztiefe und der geschätzten Tiefe durch ein CNN, welches auf dem Satellite-UNet basiert

pen wie Seegras (Median: 73 cm) oder Muscheln (Median: 82 cm).

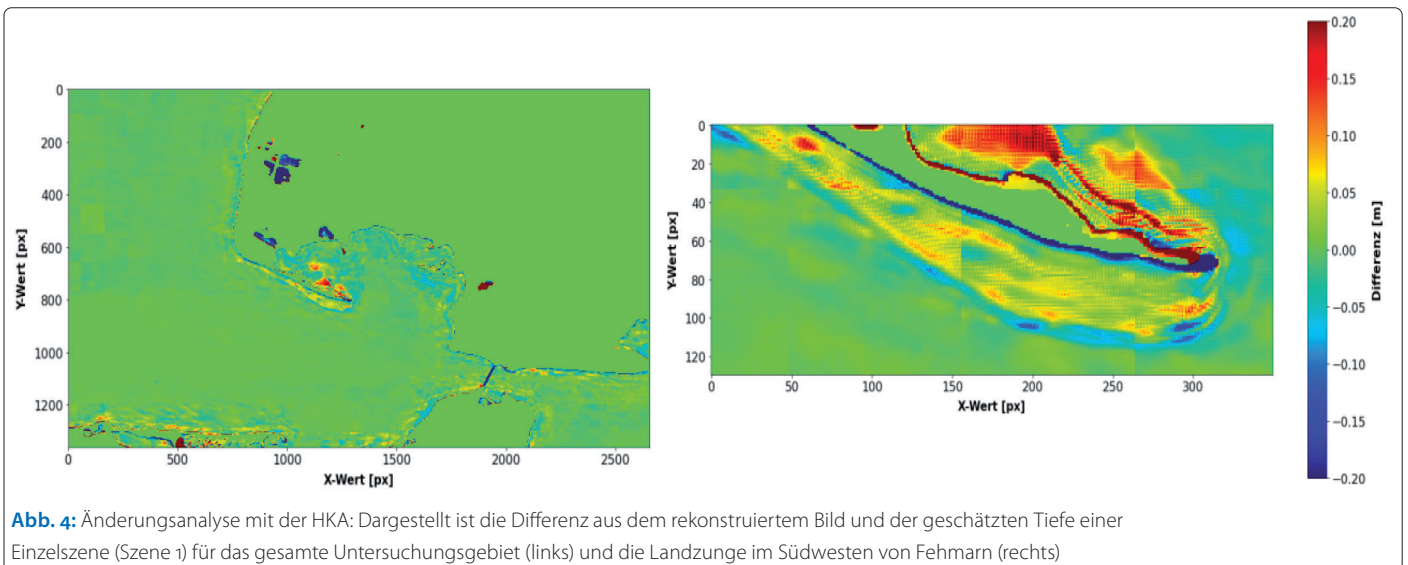
Um die Ergebnisse zu optimieren, wurden andere Regressionsmethoden getestet. Die vielversprechendsten Resultate konnten dabei mit einem Convolutional Neuronal Network (CNN) erreicht werden. Das CNN ermöglicht die Auswertung bildbasierter Daten und stellt Zusammenhänge zwischen mehreren Inputlayern (gleiche Bandinformationen wie bei der MLR) und einem Outputlayer (Gewässertiefe) her (LeCun et al. 1998). Auf der Grundlage des CNNs Satellite-UNet konnten die besten Resultate erzielt werden (vgl. [Abb. 3](#)). Die Tiefenschätzung ist für alle Tiefenbereiche und alle Untergrundklassen der MLR deutlich überlegen. Die Differenz zu den Referenztiefen ist über weite Teile im Bereich weniger Dezimeter. So ist die Differenz für 95 % aller Messwerte geringer als 26 cm, wobei die mittlere Abweichung 10 cm beträgt. Größere Abweichungen treten hauptsächlich in Küstengebieten auf. Darüber hinaus sind Gebiete mit mutmaßlicher Änderung (Landzunge und Schifffahrtsrinne) deutlich im Differenzbild erkennbar. Einige kleinere Abweichungen sind vermutlich auf Untergrundänderungen zurückzuführen.

Analyse der zeitlichen Veränderung

Grundlage der Änderungsanalyse ist die oben dargestellte Tiefenschätzung mittels CNN für insgesamt 17 Zeitpunkte in den Jahren 2015 bis 2021. Im Folgenden werden Verfahren untersucht, die eine systematische Veränderung über diesen Zeitraum detektieren können.

Die Hauptkomponentenanalyse (HKA) erlaubt die Komprimierung aller 17 Gesamtszenen zu einer »mittleren« Szene mit n Bändern, die nur einen gewissen Prozentsatz der ursprünglichen Information enthält. Diese n Informationsbänder, die Hauptkomponenten (HK), der »mittleren« Szene können konstante Bereiche sehr gut und veränderliche Bereiche deutlich schlechter rekonstruieren. Dadurch sind die Differenzen des Rekonstruktionsbildes zu den einzelnen Szenen in den veränderlichen Bereichen besonders groß (Handl 2010, Kap. 5). Als Input wurden sieben Bänder (Geschätzte Tiefe, Farbkanäle, Verhältnisse der Farben zueinander) zu den je 17 Zeitpunkten betrachtet. Die Ergebnisse in [Abb. 4](#) zeigen in den überwiegenden Teilen der Szene keine Veränderung. Jedoch sind in einigen Küstenabschnitten und insbesondere dem Gebiet der erwarteten Änderung deutliche Differenzen erkennbar.

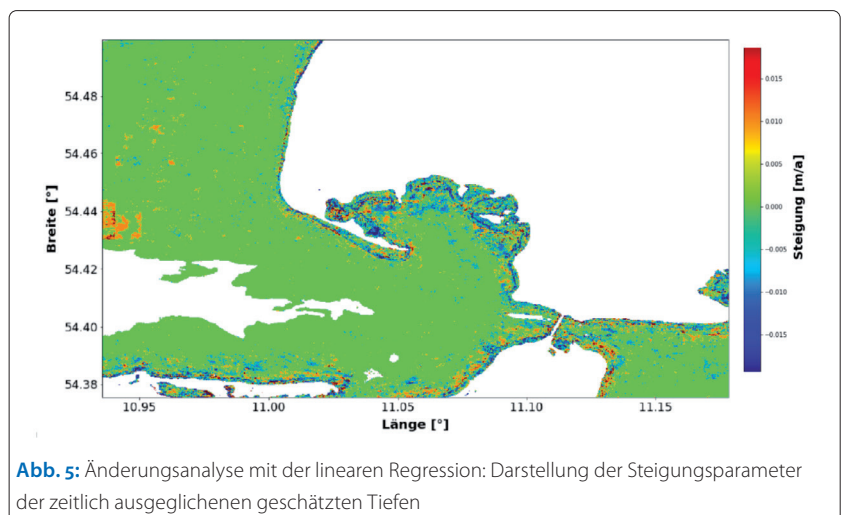
Ein weiterer Ansatz ist, dass mittels einer linearen Regression die geschätzten Tiefen über die Zeitachse linear ausgeglichen werden. Zur Ausreißereliminierung wird der RANSAC-Algorithmus genutzt. Der Steigungsparameter der Geraden gibt nun an, ob eine systematische Änderung vorliegt.



Werte nahe null weisen auf ein konstantes Gebiet und Werte verschieden von null auf ein dynamisches Gebiet hin. Vorteilhaft ist, dass über die Steigung auch direkt eine interpretierbare Einheit (Änderung in Meter pro Jahr) abgegriffen werden kann. Mittels diese Methode werden deutliche Änderungen in der Nähe einiger Küstengebiete insbesondere in dem Gebiet mutmaßlicher Änderungen erkannt (vgl. Abb. 5). Weiterhin wird in weiten Teilen der Szene keine Änderung detektiert, was den Erwartungen entspricht. Das Ergebnis zeigt jedoch kein sehr homogenes Bild. Es liegen Pixel mit großer vermuteter Änderung direkt neben als unbewegt angenommenen Pixeln. Nichtsdestoweniger ist mit einer entsprechenden Glättung ein deutliches Signal zur Änderung ableitbar. Es gibt allerdings auch Bereiche, die wahrscheinlich fälschlich als veränderlich betrachtet werden. Dazu gehören insbesondere Bereiche im nordwestlichen Teil der Szene, wo die Abweichungen höchstwahrscheinlich durch eine Änderung im Untergrund verursacht wurden. Eine weitere unplausible Änderung wird ganz im Westen der Szene detektiert. Diese ist auf das Gebiet einer Subszene (entstanden bei der Tiefenschätzung durch das CNN) begrenzt und könnte mit einer schlechteren Tiefenbestimmung in dieser Subszene im Zusammenhang stehen.

Mit Hilfe des 2,5D-LST-Algorithmus (Westfeld et al. 2013) kann sowohl der Betrag als auch die Richtung der Bewegung ermittelt werden. Dabei wird versucht, ein Pixel und dessen Nachbarschaft (Patch) in einem zweiten Bild wiederzufinden. Dafür wird das Patch mit einer Sechs-Parameter-Affintransformation angepasst, um die Veränderungen der Nachbarschaft berücksichtigen zu können. Die Besonderheit ist, dass neben einem Grauwertband (arithmetisches Mittel aus Blau, Grün und Rot) auch ein Tiefenband in dem Trackingverfahren genutzt wird. Im Ergebnis werden die

Translationsparameter bestimmt, aus welchen die Geschwindigkeit berechnet werden kann. Zusätzlich liegt mit der Standardabweichung auch eine Genauigkeitsinformation vor. Allerdings ist dieser Algorithmus sehr rechen- und damit zeitaufwendig. Um diesen Aufwand zu reduzieren, wurden unter anderem Tests mit reduzierter Bildauflösung, Reduzierung der betrachteten Parameter in der Affintransformation, Reduzierung der Patchgröße und der Berechnung in nur jedem n-ten Pixel durchgeführt. Die Abb. 6 zeigt die geschätzten »Bewegungsrichtungen« und die Geschwindigkeit der Pixel. In Wirklichkeit wird allerdings die Landzunge in dieser Richtung wachsen bzw. abgetragen und sie wird sich eher nicht als Ganzes »bewegen«. Ein Wachstum der Landzunge in südöstlicher Richtung ist, wie erwartet, deutlich zu erkennen. Nichtsdestoweniger ist das Ergebnis stellenweise inhomogen und verrauscht. Auch ist problematisch, dass in den dynamischsten Gebieten (z. B. südlich der Landzungenspitze) die Auswertung scheiterte und keine Bewegung abgeleitet werden konnte. Diese nichtschätzbaren



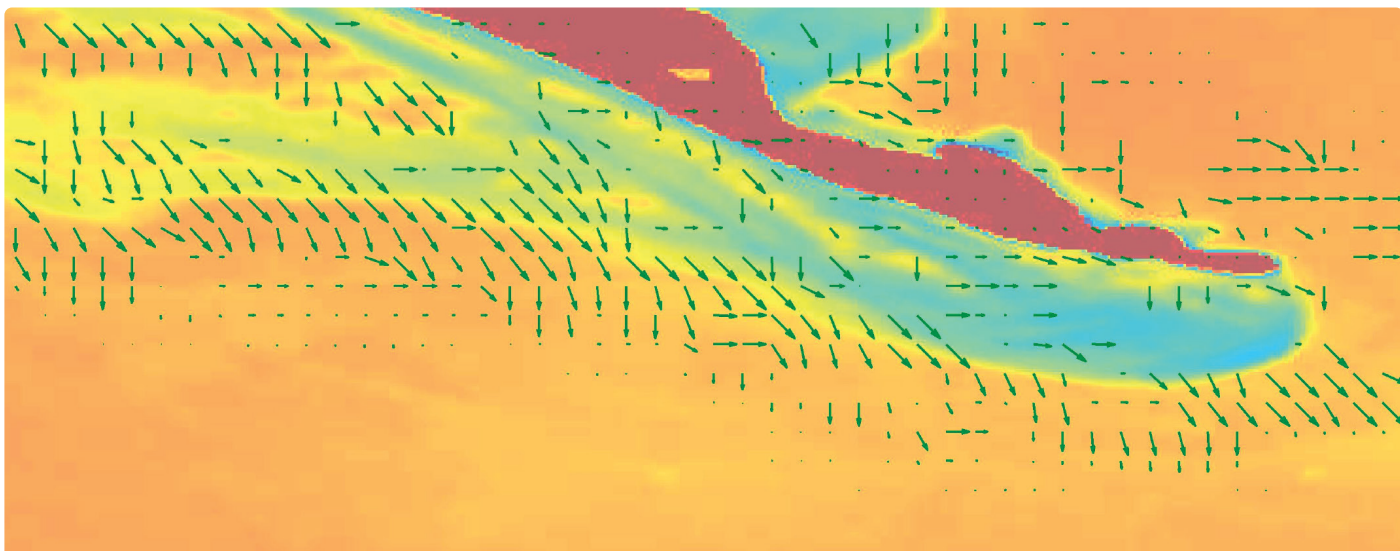


Abb. 6: Änderungsanalyse mit dem 2,5D-LST-Algorithmus für die Landzunge im Südwesten von Fehmarn: Die Pfeile zeigen die Bewegungsrichtung mit der zugehörigen Geschwindigkeit (einheitenlos) und im Hintergrund ist die Intensität des Grauwertbandes zur Orientierung abgebildet

Gebiete bleiben in den getesteten 2,5D-LST-Konfigurationen weitgehend bestehen.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Verfügbarkeit von kostenfreien Fernerkundungsdaten beflügelte die Entwicklung von satellitengestützten Monitoringprogrammen enorm. Der Vorteil ist dabei die globale Abdeckung, die hohe Wiederholrate und die kostengünstige Datenbeschaffung und -auswertung. So wird das Potenzial zunehmend auch in der Bathymetrie erkannt und genutzt. Neue Methoden wie CNNs optimieren die erreichbaren Tiefengenauigkeiten, wie in dieser Arbeit gezeigt werden konnte. Der Trend geht weiterhin zu höher aufgelösten Satellitenbildern und zu mehr Rechenkapazität, was die Möglichkeiten der SDB in Zukunft weiter vergrößern wird. In dieser Arbeit konnten 95 % der Tiefen mit einer Abweichung von weniger als 26 cm bestimmt werden. Um diese Ergebnisse weiter zu verbessern, bieten sich folgende Schritte für anschließende Arbeiten an:

- Verbesserung des CNN: Die Auswertung mit dem CNN kann noch deutlich optimiert werden. Insbesondere die Auswertung in größeren Subszenen, mit mehr (und künstlichen) Testbildern lassen eine Genauigkeitssteigerung erwarten.
- Ausschluss veränderlicher Gebiete für das Training: In dieser Arbeit wurden auch die veränderlichen Gebiete in die Trainingsphase mit einbezogen. Dies führt aber dazu, dass in diesem Gebiet fehlerhafte Referenzwerte für das Training genutzt werden, da die Referenziefen aufgrund ihres Alters die tatsächliche Tiefe zum Aufnahmezeitpunkt nicht korrekt wiedergeben. Aufgrund des geringen Anteils der veränderlichen

Gebiete an den gesamten Trainingsdaten (< 5 %) ist dies bisher nicht vordergründig gewesen.

- Beachtung des Untergrunds: Eine effiziente Berücksichtigung des Untergrunds kann über zwei Wege erfolgen. Die aufwendigere, aber mutmaßlich bezüglich der Genauigkeit bessere Lösung wäre eine vorgeschaltete Schätzung der Untergrundtypen. Dem Autor ist kein Datensatz bekannt, der die Anforderungen an die SDB für die gesamte Ostsee erfüllt und es kann somit auf keine bereits existierenden Daten zurückgegriffen werden. Die vorgeschaltete Klassifizierung kann beispielsweise über den in Knauer et al. (2019) beschriebenen Weg erfolgen, welcher auch Sentinel-2-Daten für die Klassifizierung nutzt.
- Berücksichtigung der Trübung: Die Trübungskorrektur wird derzeit mit dem C2RCC-Prozessor durchgeführt. Dieser ist jedoch rechenintensiv und führt zu teils verräuschten Ergebnissen. Es bietet sich daher an, einen alternativen Algorithmus zu suchen bzw. zu entwickeln, um die Trübungsparameter zu bestimmen.
- Weitere Automatisierung: Im Zuge einer Weiterentwicklung wäre eine Automatisierung vorangehender Schritte wie der Download und die Auswahl der Satellitenszenen sinnvoll.

Insbesondere die Änderungsanalyse mit SDB-Daten steht noch am Anfang der Entwicklung. Mit dieser Arbeit konnten vielversprechende Ergebnisse und erste Schritte einer automatischen Änderungsdetektion erreicht werden. Für eine durchgreifende und robuste Auswertung gilt es allerdings noch einige Herausforderungen zu bewältigen, was zukünftigen Arbeiten vorbehalten ist. //

Literatur

- Chiang, John. Y.; Ying-Ching Chen; Yung-Fu Chen (2011): Underwater image enhancement: using wavelength compensation and image dehazing (WCID). In: Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems, DOI: 10.1007/978-3-642-23687-7_34
- Handl, Andreas (2010): Hauptkomponentenanalyse. In: Multivariate Analysemethoden. Springer, Berlin, Heidelberg, DOI: 10.1007/978-3-642-14987-0_5
- Knauer, Kim; Knut Hartmann; Andreas Müller (2019): Bericht zur satellitengestützten Klassifizierung der Sedimente und Besiedlung im Flachwasser der schleswig-holsteinischen Ostsee. Auftragsstudie vom Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume, Vergabenummer ZB-Uo-18-0773000-4122.1
- Kyryliuk, Dmytro; Susanne Kratzer (2019): Evaluation of Sentinel-3A OLCI products derived using the Case-2 Regional CoastColour processor over the Baltic Sea. Sensors, DOI: 10.3390/s19163609
- LeCun, Yann; Léon Bottou; Yoshua Bengio; Patrick Haffner (1998): Gradient-based learning applied to document recognition. Proceedings of the IEEE, DOI: 10.1109/5.726791
- Leimer, Volkmar (2020): Satellite-derived Bathymetry – Potential für Anwendungen in der Seevermessung. Machbarkeitsstudie Satellitengestützte Bathymetrie, BSH
- Niemeier, Wolfgang (2008): Ausgleichsrechnung, 2. Auflage. De Gruyter, Berlin, DOI: 10.1515/9783110206784
- Stumpf, Richard P.; Kristine Holderied; Mark Sinclair (2003): Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. Limnology and Oceanography, DOI: 10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547
- Westfeld, Patrick; Hans-Gerd Maas; Oliver Bringmann et al. (2013): Automatic techniques for 3D reconstruction of critical workplace body postures from range imaging data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.08.004



OBTAIN COMPREHENSIVE HYDROGRAPHIC DATA IN DEEP WATER AND COASTAL REGIONS

We draw on our vast experience and extensive resources, including a fleet of dedicated survey vessels and airborne systems, to deliver a high-quality service that meets your data objectives.

To find out more visit
[fugro.com](https://www.fugro.com)