

Jörn Kohlus

Die Erkundung von Biotopen und kulturhistorischen Spuren im Wattenmeer mittels Radar- und optischer Fernerkundung

Text zum Vortrag im März 2014 für die Gesellschaft für Tönninger Stadtgeschichte e.V.

Jörn Kohlus¹, Kerstin Stelzer², Martin Gade³

¹Landesbetrieb f. Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein, Nationalparkverwaltung

²Brockmann Consult, Geesthacht

³Universität Hamburg, Hamburg)

1 Einleitung und Fragestellungen

Die dargestellten Untersuchungen entstammen vorwiegend den Forschungsprojekten OFEW (Brockmann-Consult 2007), DeMarine-Umwelt Teilprojekt 4 (2008-2011) und DeMarine-2 (2012-2015) mit dem Teilvorhaben SAMOWatt zur Fernerkundung im Watt und wurden hier speziell um einige Beobachtungen in und um Eiderstedt ergänzt.

Die Forschungsprojekte sind motiviert durch die Anforderungen an das Umweltmonitoring, das stark von den Anforderungen der europäischen Union geprägt ist. Insbesondere hier zu nennen sind die Flora-Fauna-Habitatrichtlinie von 1992 mit dem NATURA2000 Programm, die Wasserrahmenrichtlinie (WRRL; 2000) und die Meeresstrategierahmenrichtlinie (MSRL; 2008) – bzw. deren Umsetzungen in nationales Recht. Diese Richtlinien fordern, dass die Mitgliedsstaaten regelmäßige Informationen über Habitate und Umweltqualitäten schützenswerter Gebiete, wie z. B. dem Wattenmeere, an die Europäische Union (EU) berichten (Kohlus et al. 2009).

Frühere Versuche zur Nutzung der Satellitenfernerkundung für ein operables Umweltmonitoring im Wattenmeer wurden vorwiegend mangels geeigneter Bilddaten aufgegeben (Kohlus 1998). Nun lassen die Weiterentwicklung der Sensoren und Verfahren und die Zunahme der Satelliten sowie ein Nachlassen der Preise für die Bilder darauf hoffen, dass die Satellitenfernerkundung auch für die Umweltforschung im Wattenmeer zweckmäßig eingesetzt werden kann.

Aber nicht nur die Natur ist im nordfriesischen Wattenmeer geschützt, sondern es ist auch voller Kulturspuren und eines der größten Grabungsschutzgebiete. Von Wattsedimenten abgedeckt blieben Reste der Siedlungen und Spuren des Kulturlandes auf großen Flächen erhalten und werden bei flächiger Abtragung der Sedimente wieder sichtbar. Mit der Sichtbarkeit sind die Kulturspuren nicht mehr gegenüber den erosiven Kräften von Strömungen und Wellen geschützt. Ihre endgültige Vernichtung ist absehbar, es sei denn, sie werden bei einem Wandel der Entwicklung wieder abgedeckt. Aber auch bei der Planung von Eingriffen, z. B. der Entnahme von Sedimenten, ist an den Schutz der Kulturspuren – offen liegend oder abgedeckt – zu denken. Eine kostengünstige, häufige – die Zeiten der offenen Exposition treffende – sowie flächendeckende Beobachtung ist daher zweckmäßig. Auf luftgestützte Fernerkundung wird hierbei seit langem zurückgegriffen, die Nutzung von Satellitenbildern spielte bisher keine Rolle.

1 Fernerkundung im Watt

Seit 2009 ist das europäische Wattenmeer als Welterbe (CWSS 2008b) ausgezeichnet, unter anderem, da es eine der letzten naturnahen Großlandschaften Europas ist. Es konnte sich als ein solches Refugium nicht zuletzt daher erhalten, weil es eine schlecht zugängliche Landschaft ist. Die Kartierarbeiten im Watt sind durch die Tide auf jeweils etwa drei Stunden je Tidephase beschränkt. Viele Gebiete sind schwer zugänglich und können nur

mittels kostenintensiver Mehrtagesreisen mit Stützpunkt auf den Inseln mit dem Risiko ungeeigneter Witterung kartiert werden. Einige Wattflächen lassen sich noch kostenaufwendiger nur per Schiff erreichen. Die Biotope, wie z.B. Seegraswiesen, sind einige Kilometer lang und breit und schon daher nur mit großem Aufwand einzumessen. Andererseits sind die benthischen Lebensräume vor allem durch Sedimentunterschiede zu differenzieren, die mittels lokaler Detailparameter erfasst werden; Einsinktiefe, Morphologie, Grabung zur Bestimmung der Redoxtiefe, Fingerprobe der Körnung oder auch Laborauswertung dienen zur Bestimmung. Kaum anders verhält es sich bei der Aufnahme von Siedlungsspuren im Wattenmeer (Abb. 1). Die Nutzung der Fernerkundung im Watt mit dem hohen Aufnahmearbeit für Kartierungen drängt sich nahezu auf.



Abb. 1: Aspekte der Kartierungen: Fingerproben, Einsink-tiefe, Geländeprotokoll, Witterung

Trotzdem mag es angesichts der randlichen Lage des Gebietes verwundern, dass der vielleicht erste zivile Fernerkundungseinsatz mit Senkrechtaufnahmen in Deutschland (1928) – Luftbilder für archäologische Aufnahmen vermuteter Reste der untergegangenen Siedlung Runghold – im Wattenmeer unternommen wurde (Hansa Luftbild 1940). Inzwischen werden seit langem Luftbilder zur Beobachtung der Morphologie im Wattenmeer verwendet.

Insbesondere wurde immer wieder versucht, mittels Luftbildserien per Wasserliniendetektion Höhenmodelle des Watts abzuleiten (z. B. Niedermeier et al., 2000, 2005, Heygster et al. 2010, Wegner 1979).

Erstmals publizierte E. Dennert-Möller (1982) über den Versuch, Sedimente mittels LANDSAT Bildern im deutschen Wattenmeer zu bestimmen. Im Rahmen der Ökosystemforschung Wattenmeer wurden unterschiedliche Sensoren und Skalen von Fernerkundungsaufnahmen hinsichtlich der Sedimente, der Benthosbesiedlung und Chlorophyllmenge (Doerffer & Murphy 1989, Kleeberg 1990) ausgewertet. Schritte bis hin zu einem operationellen Einsatz der Fernerkundung blieben aber außer Sicht. Günstigere Konditionen, verbesserte Verfahren und neue Konzepte zur Klassifikation rückten diesen Aspekt erst im ersten Jahrzehnt des 21. Jh. ins Bild. Im Rahmen von OFEW (2005-2007; Stelzer et al. 2007) wurden Klassifikationsverfahren mit linearer spektraler Entmischung und wissensbasierten Entscheidungsbaum für Bilder unterschiedlicher optischer Satellitensensoren eingesetzt. Im Projekt DeMarineUmwelt (und hier das Teilprojekt Wattenmeer) als Teil des europäischen GMES-Programmes (Global Monitoring for Environment and Security; 2012 in Copernicus umbenannt, www.copernicus.eu) konnten den verbesserten Klassifikationsverfahren spezifisch erstellte Bodendaten gegenübergestellt werden. Dabei werden auch hochauflösende Radarbilder auf ihre Eignung hinsichtlich eines Wattenmeermonitorings analysiert. Sie werden neben wissensbasierter Information in die Bildanalysen optischer Daten einbezogen und erbrachten hierbei deutliche Verbesserungen (Stelzer et al. 2010), insbesondere für die Identifizierung von Muschelbänken. Im Rahmen des Projektes wurden auch LIDAR-Daten der schleswig-holsteinischen Landesvermessung auf ihre Eignung für das Muschelmonitoring untersucht (Müller 2013). Für landesgeschichtliche Zwecke wurden diese Laserhöhenvermessungen in Schleswig-Holstein ausführlich von Pöhlmann (2009)

verwendet, im Beitrag werden erste spezielle Auswertungen für den Raum Tönning und Eiderstedt aufgezeigt.

Im laufenden Projekt SAMOWatt werden diese Arbeiten aktuell fortgesetzt. Insbesondere stehen hier die Fragen nach der Sensitivität der Klassifikationsverfahren und der Vergleichbarkeit der Ergebnisse über die Zeit im Fokus.

2 Systeme, Sensoren, in situ Verfahren – Monitoring

Entscheidend für die Nutzung der Fernerkundung in einem Umweltmonitoring ist es, dass die von der Fernerkundung gelieferten Daten mit einer hohen Zuverlässigkeit über mehrere Jahre verfügbar sind. Bei der Datenverfügbarkeit im Wattenmeer ist dabei zu berücksichtigen, dass nur Bilddaten der trocken gefallenen Gebiete zur Niedrigwasserzeit nutzbar sind. Zusammen mit der häufigen Wolkenbedeckung führt dies insbesondere bei den optischen Daten (Stelzer & Brockmann 2006) dazu, dass im Verhältnis zu den Überflügen nur wenige Daten genutzt werden können. Im Mittel gibt es von den hochaufgelösten Sensoren 3-4 gute Aufnahmen im Jahr, wenn man die Daten verschiedener Sensoren verwendet. Seit Start des Landsat-8 (Mai 2013) hat die Verfügbarkeit guter Daten zugenommen. Beim LANDSAT erfolgt die Erfassung eines Gebietes meist in 2 Orbits, so dass im Mittel ca. 50 Aufnahmen je Gebiet im Jahr gemacht werden. Dies zeigt, wie stark die Aufnahmebedingungen die Verfügbarkeit guter Aufnahmen einschränkt.

Kosten und Aufwand für die Fernerkundung stehen qualitativen Verbesserungen und Kostenreduktion bei der Umweltbeobachtung gegenüber und sind zu bewerten. Zu beachten ist auch, dass die räumliche Auflösung der Größenordnung der zu beobachtenden Objekte genügen muss.

Aus Sicht des Berichtswesens zur Umweltbeobachtung sollten Flächen in einer Größe von unter 0,5 ha noch identifiziert werden können. Dies macht Bilddaten von Systemen wie z. B. MERIS mit

einer Auflösung von 300 m zur Beobachtung von Wattbiotopen weitgehend ungeeignet.

Neue höchstauflösende Daten optischer Satelliten wie Quickbird oder Worldview 1 bis 3 sind für perspektivische Nutzungen interessant, haben aber für ein operationelles Monitoring zu hohe Kosten. Zudem können Bilder – wie auch bei anderen Satelliten – nicht spezifisch für Niedrigwassersituationen geordert werden. Daten der Spot-Satelliten wurden genutzt, aber aufgrund der kostenfreien Datenbereitstellung über das Archiv des United States Geological Survey (USGS Earth Explorer; earthexplorer.usgs.gov) konzentrierte sich das Interesse auf LANDSAT Daten. Mit großem Interesse wird die Verfügbarkeit von Bildern der europäischen Sentinel-Mission

(<http://www.spaceairbusds.com/de/programme/sentinelb3k.html>) erwartet, für die die bisherigen Auswertungsverfahren gut anpassbar sein sollten.

Tab. 1: Side Aperture Radaraufnahmen, die für die Untersuchungen verwendet wurden (aus Gade et al. 2014)

Satellit / Sensor	Bodenpixelgröße	Polarisation	Anzahl verwendeter Bilder
ENVISAT ASAR	12,5 m	VV	23
ERS-2 SAR	12,5 m	VV	23
ALOS-PALSAR	6,25 m	HH, HV	4
	12,5 m		15
	100 m		2
RADARSAT-2	1,6 m	HH	1
TerrarSAR-X (TSX)	0,5 m	VV, HH	20
	0,75 m		9
	1,25 m		6
	1,0 m		17

Gegenüber den bisher beschriebenen optischen Bildern haben Radarbilder den großen Vorteil, dass die Wolkendecke durchdrungen werden kann, und zudem auch kein Tageslicht benötigt wird. Radarsystem benutzen nicht das Sonnenlicht sondern senden ein aktives Signal elektromagnetischer Wellen in Zentimetergrößenordnung und empfangen die Rückstreuung. Während bei optischen Satelliten kaum eine Handvoll qualitativ gut nutzbarer Aufnahmen zu Niedrigwasserzeiten über das Jahr erwartet werden kann, liegt daher die Anzahl bei Radarsystemen deutlich höher.

Bei der Auswertung von Radarbildern hinsichtlich der Oberflächenstruktur von Wattgebieten wurden drei Strategien verfolgt:

- Bilder einzelner Sensoren, z.T. über eine größere Zahl von Aufnahmen gemittelt - wurden mit in situ, d.h. im Feld erhobenen, Daten abgeglichen

- ebenso Bildpaare unterschiedlicher Polarisation

- Bilder verschiedener Sensoren und Frequenzen wurden insbesondere mittels Inversion des Integral Equation Models (IEM) (Fung et al. 1992) ausgewertet (Gade et al. 2014).

Zur Antragsphase des laufenden Projektes waren noch fünf relevante Satellitensysteme verfügbar von denen drei in den Jahren 2011 und 2012 zum Teil unerwartet ausfielen: ERS 1 und 2 sowie ALOS 2011 und ENVISAT 2012. Im Rahmen des Projektes konnte eine größere Zahl von TerraSAR-X Bildern genutzt werden und schließlich auch einzelne Aufnahmen des Systems RADARSAT 2 (Tab. 1). Während aktuell Daten des C- und X-Bandes verfügbar sind, ging mit den funktionsunfähig gewordenen Satelliten der Zugriff auf Daten des L-Bandes verloren. Eine Auswertung aktueller Aufnahmen mittels IEM mit direkter Vergleichbarkeit zu in situ Daten war daher nicht möglich. Aus der Sicht eines operativen Monitorings wird hierdurch deutlich, dass sich nur Verfahren dauerhaft etablieren lassen, für die mehrere alternative Plattformen die Bereitstellung geeigneter Bilddaten sicherstellen.

Abb. 2: Bestimmung der Bodenfarbe (Foto: Kohlus 2010)



Teil der DeMarine-Projekte ist auch die Verifikation der Ergebnisse mit Monitoringdaten des Trilateralen Monitoring Application Programms (CWSS 2008a) sowie die Erfassung von in situ Daten für wissensbasierte Verfahren und die Qualitätskontrolle der Ergebnisse. Schon im ersten DeMarine Umwelt Teilprojekt Wattenmeer wurde ein Geländeprotokoll zur Erfassung der Eigenschaften der Wattgebiete entwickelt, das spezifisch auf Faktoren ausgerichtet ist, die sich in Fernerkundungsdaten niederschlagen können. Exposition, Wasserbedeckung, Bodenfarbe (Abb. 2) nach einer eigens entwickelten Skala, Sedimenttypen – Schlick, Sand, Schill, Torfe u. a., Sedimenteigenschaften über die Körnung, Einsinktiefen bis zur Lage der Redoxschicht werden erfasst. Parameter mit Wirkung auf die Bodenrauigkeit gehen gerade in Hinblick auf die Nutzung von Radarsystemen ein: Höhe und Ausrichtung von Rippeln und anderen Bodenstrukturen. Jeweils mehrere Parameter werden zur Charakterisierung von relevanten Lebensräumen – z. B. Muschelbänken, Seegraswiesen oder Sandwatten – erfasst.

Aufgrund der engen zeitlichen Beschränkungen der Geländearbeit durch die Tide und der schwierigen Fortbewegung wurde bei dem Protokoll auch darauf geachtet, dass die Erfassung zügig und unter den gegebenen Außenbedingungen möglich ist.

Während Monitoringdaten aus vieljährigen Programmen, wie zum Beispiel eine Karte der Anwesenheitshäufigkeit von Seegraswiesen (Reise & Kohlus 2008), als wissensbasierte Information direkt in die Klassifikation mittels Entscheidungsbäumen einmünden, werden die im Rahmen des Projektes erfassten in situ Daten unterschiedlich genutzt. So kann ein Teil der Felddaten aus dem Projekt ebenso wie die Daten aus den Monitoringprogrammen direkt zur Optimierung der Klassifikation verwendet werden, während sich ein anderer Teil für statistische Qualitätsprüfungsverfahren nutzen lässt.

3 Identifizierung von Lebensräumen

Zentrale Motivation der Forschungsprojekte war ein verbessertes und effektiveres Monitoring des Wattenmeeres mittels Fernerkundungstechnologie. Im Mittelpunkt steht dabei die Beobachtung von Biotopen.

Seegräser und Grünalgen

Die beiden heimischen Seegrasarten *Zostera marina* und *Z. nana* starben nach einer Pilzinfektion während der dreißiger Jahre im größten Teil des Nordseewattenmeeres aus (Reise et al. 1998), nur Restbestände verblieben im Nordfriesischen Wattenmeer und dem dänischen Gebiet. Inzwischen erholen sich die selten gewordenen Bestände. Als Weidegrund und Struktur bilden Seegraswiesen – in Nordfriesland inzwischen wieder mehrere Quadratkilometer große, eigene Habitate, die ein wichtiger Faktor des Stoffhaushaltes (Asmus & Asmus 1998) sind.

Abb. 3: Seegraswiese zwischen Festland und Gröde (Foto: Kohlus 2014)



Seegräser sind empfindlich gegenüber mechanischer Beschädigung, morphologischen Veränderungen und Eutrophierung. Der Zustand und die Größe der Seegrasbestände gehen daher auch bei der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) und der Meeresstrategie-rahmenrichtlinie (MSRL) als Qualitätsfaktoren für den Umweltzustand ein (BMU 2012). Die Bestände werden seit Anfang der 90er Jahre per Interpretation von Flugbeobachtungen erfasst. Zusätzlich gibt es seit einigen Jahren eine Bodenkartierung höherer Genauigkeit, bei der allerdings nur ein Sechstel des Gebiets des schleswig-holsteinischen Wattenmeeres erfasst wird bzw. jedes Teilgebiet nur alle sechs Jahre neu kartiert werden kann. Bei der Flugkartierung werden Gebiete von mehr als 20% und 60% Vegetationsbedeckung, bei der Bodenkartierung wird die 5% Deckungsgrenze und die 20% Grenze erfasst, sowie die 60% Grenze durch Transekte per Interpolation gewonnen (u.a. Dolch et al 2013). Unterschiede bei den Ergebnissen ergeben sich nicht nur aus den Methoden und Ungenauigkeiten, sondern auch aufgrund des starken Zuwachses innerhalb der Vegetationsperiode. Die

Befliegungen werden daher dreimal im Jahr durchgeführt, um mit hoher Sicherheit den Zeitpunkt der Maximalausdehnung zu treffen – denn letztlich ist nur dieser Zustand über die Jahre vergleichbar. Bei den Flügen werden auch die Matten der makrophytischen Grünalgen kartiert. Anders als das Seegras wird ihre Entwicklung durch einen hohen Nährstoffeintrag gefördert. Bei einer Bewertung des Eutrophierungszustandes gehen sie daher als Gegenspieler bei der Bewertung des Meereszustandes ein. Ebenso wie das Seegras lassen sich diese Pflanzen vorwiegend auf den vor Strömung und Wellen geschützten Watten finden – Gebiete mit typischerweise schlickigen oder weichen feinsandigen Sedimenten.

Die schwierige Kartiersituation bei Seegras und Grünalgen, die große Ausdehnung der Biotope und dass der Parameter vor allem über die Oberflächendeckung erfasst wird, sowie die starke zeitliche Veränderlichkeit lassen die Satellitenfernerkundung als prädestiniertes Mittel für ein Monitoring erscheinen.

Für Seegras und Grünalgen konnten zuverlässige Klassifikationen auf Basis optischer Satellitenbilder erstellt werden. Allerdings ist das Reflektanzsignal in den Bändern der Satellitensysteme von Grünalgen und Seegras in der gegebenen spektralen Auflösung der verfügbaren Sensoren fast identisch und insbesondere bei einem Mischsignal mit Sediment nicht zu unterscheiden (Brockmann & Stelzer 2008), DeMarine Jahresberichte (<http://www.demarine-umwelt.de/lr/web/guest/projektdokumente>). Die Vorkommen beider Artgruppen liegen in ähnlichen Gebieten und können im Einzelfall auch überlappen. Bei der Klassifikation mittels Entscheidungsbaum lassen sich räumliche Zusatzinformationen – die wie weitere Kanäle bereitgestellt werden – einfach nutzen. So kann eine Karte der Häufigkeit der Anwesenheit eines Seegrasbestandes in die Klassifikation einfließen und einen Grad der Bestätigung für die Klassifikation liefern und die Trennung von Makroalgen- gegenüber Seegrasbeständen verbessern. Die zusätzliche Nutzung von Radardaten erbrachte bisher keine klare Qualitätssteigerung. Vom Seegras oder den Algen selbst geht

keine substanzielle unterschiedliche Radarrückstreuung aus. Die Habitate des Seegrases dagegen zeigen sehr unterschiedliche Ausprägungen der signalwirksamen Rauigkeit (Kempe 2014), die allerdings keinen eindeutigen Rückschluss erlauben.

Grundsätzlich sind optische Satellitenbilder für das Seegrasmonitoring und damit auch als Stütze von Bewertungsverfahren besser geeignet. Allerdings muss die Klassifikation den Bedeckungsgrad mit Seegras unabhängig von den jeweiligen Aufnahmebedingungen wiedergeben. Es sollten zwei Dichteklassen differenzierbar sein und diese Dichten müssen bezifferbar sein. Die Sensitivität und Differenzierbarkeit von Bedeckungsgraden gegenüber Seegrasvorkommen zu beschreiben ist Teil des laufenden Vorhabens.

Letztendlich verbleibt das Problem des Bildangebotes. Besonders in den späten Sommermonaten – die typische Zeit des jährlichen Maximalvorkommens von Seegräsern und Makroalgen – ist die Wolkendecke für eine effektive Auswertung doch häufig zu dicht. Kleinräumig können gute Zeitreihen von Aufnahmen entstehen, allerdings nicht in der kompletten Abdeckung des Nordfriesischen Wattenmeeres.

Sedimente und Benthos

Sedimente sind prägend für die großflächigen Habitate im Wattenmeer. Sie werden als Sand-, Misch- und Schlickwatt angesprochen und zeichnen sich durch eine signifikant unterschiedliche Besiedlung aus. Die Besiedlung wird aber zusätzlich durch die Länge des Trockenfallens, die Intensität der Sedimentumlagerung, Sedimentation oder Erosion sowie Strömungs- und Wellenexposition beeinflusst.

Es gibt größere Gebiete, denen die Aussage „recht stabil in Zusammensetzung und Struktur“ zugeordnet werden kann. Oft gibt es aber für eine solche Aussage nicht genügend bodenerhobene Vergleichsdaten und letztlich können sich die Bedingungen auch auf größeren Flächen zügig verändern. Im Bereich

der Außenelbe, aber auch der Außeneider, können deutliche morphologische Änderungen über Jahresfrist beobachtet werden. Andere Systeme sind über Jahre stabil, um dann innerhalb kurzer Zeit massive Veränderungen zu erfahren.

Wiederum sind es Größe und Erreichbarkeit, die den Einsatz von Fernerkundungsverfahren zur Beobachtung wünschenswert machen. Die Klassifikation mit optischen Daten erbringt seit langem – und durch die Weiterentwicklung der Methoden auch verbesserte – plausible Ergebnisse. Die Grundprobleme, dass die Wirkung der Feuchtigkeit auf die Klassifikation schwer bemessbar ist, dass nicht eindeutig sichergestellt werden kann, dass Schlick, Mischwatt oder Sand entsprechend der Sedimentzusammensetzung von Bild zu Bild identisch klassifiziert werden, bleiben. Zum jetzigen Zeitpunkt ist es noch unbestimmt, welche Schwellwerte der Körnungszusammensetzung und mit welcher Exaktheit sie zu den Grenzen der Sedimenttypen im Bild führen.

Im Rahmen des laufenden Projektes konnten neben optischen Daten auch Radarbilder genutzt werden. Auch die Radarbilder liefern Hinweise zur Körnungszusammensetzung, die Bearbeitung mittels IEM konnte diesen Eindruck verstärken. Im laufenden Projekt wurden aber die Radardaten noch nicht in Kombination mit den optischen Bildern zur Verbesserung der Auswertung eingesetzt (Abb. 4).

Das Potential der Radarfernerkundung ist hier sicherlich nicht ausgeschöpft. Eine visuelle Interpretation aus dem Beobachtungsraum nördlich von Pellworm zeigt, dass gerade auch kleinräumige und spezielle Sedimentausprägungen detektiert werden können.

Klassifikation des Wattenmeeres

Nordfriesland

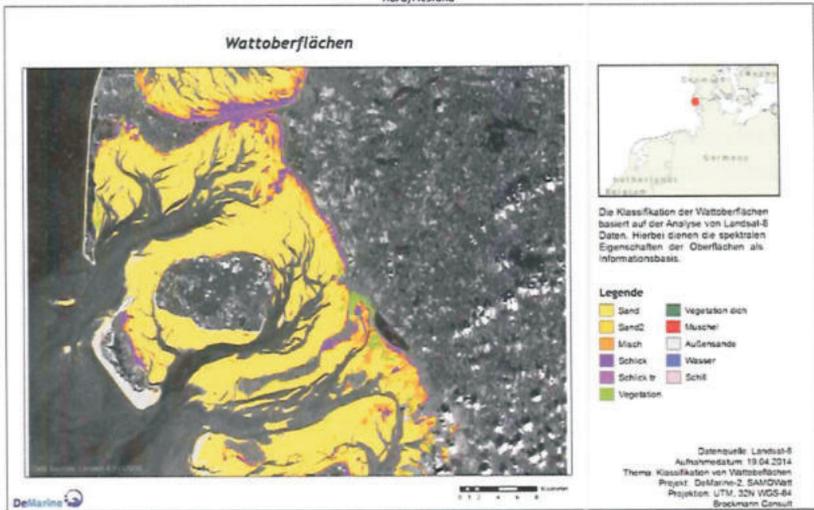


Abb. 4: Klassifikation von Sedimenten und Biotopen mittels optischer Daten

Die Oberflächen schlickiger Sedimente sind oft sehr glatt und nicht selten von einem dünnen Wasserfilm überzogen. Das summarische Albedo wird auch durch Kleinformen beeinflusst, so verläuft der Abfluss hoch liegender schlickiger Flächen in engen und steil berandeten Rinnen. Nicht allein das – hier niedrige – Flächensignal sondern die Kombination mit strukturellen Merkmalen kennzeichnet die Schlickgebiete.

Sandflächen zeigen eine hohe Albedo in optischen Daten, in exponierten Bereichen können sie auch eine starke Radarrückstreuung zeigen, wenn sich beispielsweise Rippelfelder ausbilden. In anderen Bereichen werden bei der Radarrückstreuung nur mittlere und z.T. geringe Reflektanzwerte erreicht.

Schilffelder und -streifen fallen durch höhere Radarrückstreuung auf. Auch im optischen Signal zeigen sie meist eine sehr hohe Rückstreuung. Andersherum zeigen Strukturen aus Torfen und

Vegetationsresten hohe Radarrückstreuung und eine niedrige Albedo im sichtbaren Bereich.

Es wird deutlich, dass Radarinformationen einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der räumlichen Erfassung und Klassifikation von Sedimenten leisten können (Abb. 8). Darüber hinaus liefern die Radardaten Informationen über die Mobilität des Sedimentes, d.h. insbesondere der im Außenbereich typischen Sände: Umlagerungsstrukturen wie Rippel schlagen sich deutlich im Signal nieder und durch die witterungs- und tageszeitunabhängigen Daten stehen zeitlich dichtere Aufnahmen zu Verfügung, so dass sich veränderliche Bereiche sichtbar machen lassen.

Muschelbänke

Eulitorale Muschelbänke werden im Rahmen des Muschelmonitorings seit vielen Jahren erfasst. Muschelbänke bilden eigenständige Habitate im Wattenmeer. Noch vor zehn Jahren wurden sie ausschließlich durch die einheimische Miesmuschel gebildet. Bis zum Winter 2013/2014 gab es in Nordfriesland kaum noch eine Muschelbank, die nicht vorwiegend durch die durch Kultivierung eingeschleppte pazifische Auster geprägt war. Statt Größen von 6 bis 8 cm erreicht diese fremde Art mehrere Dezimeter Länge und hat eine Schalendicke kaum geringer als eine Miesmuschel groß ist. Sie ist auch um ein vielfaches größer als die in Schleswig-Holstein ausgerottete europäische Auster und die ausgewachsenen Tiere sind zu massiv gebaut um von lokalen Arten als Nahrung genutzt zu werden. Sie bilden nahezu felsartige Bänke. Diesen Bänken ist in das naturgemäß fast steinfreie Welterbe Wattenmeer eine ganze Zahl von Hartsubstratbesiedlern gefolgt und beeinflusst nicht nur die Biologie sondern fällt auch dem Besucher ins Auge: z. B. die ebenfalls eingeschleppten asiatischen Seescheiden, Brotschwämme und auch Blumentiere haben massiv zugenommen. Diese deutliche Veränderung etablierte sich erst in der Zeit der hier vorgestellten Fernerkundungsprojekte. Die im Projektzeitraum von den Sensoren erfassten

Signale der Muschelbänke waren mithin vorwiegend von der großen pazifischen Auster bestimmt.

Schon nach den ersten visuellen Betrachtungen von Radaraufnahmen des niedersächsischen Wattenmeeres ließen sich dort gut Muschelbänke erkennen. Muschelbänke in Schleswig-Holstein waren dagegen meistens nicht zu erkennen. Dies traf insbesondere für verschlickte Vorkommen oder Bänke ohne *Fucus*-Bestand zu. Unerwartet häufig stießen wir im Projekt darauf, dass sich Ergebnisse der niedersächsischen Küste nicht auf das schleswig-holsteinische Gebiet übertragen ließen.

Aus den Feldbeobachtungen ergeben sich eine Reihe von Eigenschaften, die eine Detektion mittels Fernerkundung, insbesondere durch RADAR einfach machen sollten:

- die Bänke bestanden vorwiegend aus den massiven Schalen der Austern
- sie sind gegenüber der Umgebung räumlich erhoben, z.T. bis deutlich über 50 cm
- die Oberfläche ist rau auf unterschiedlichen Skalenebenen: statt Sandkörnern schneidend scharfe Schalenkanten, statt rundlichen Rippeln kantige Schalen, statt durchgehenden Flächen ein abrupt wechselndes Relief.

Für Radarsignale gilt, dass die Rückstrahlung vor allem durch Rauigkeit, Exposition und Material geprägt werden. Diese Eigenschaften sind neben der Lauflänge ebenso Hauptauswirkungen auf Lasersignale bei LIDAR-Aufnahmen. G. Müller (2013) untersucht ausführlich die Möglichkeiten der Detektion mittels der uns damals vorliegenden LIDAR-Daten. Anders als eine der a priori Annahmen, dass sich die Rauigkeit statistisch bei den mehr als neun Messpunkten je Quadratmetern niederschlagen sollte, fand Müller heraus, dass die Detektion vor allem durch die Signalstärke – der materialbedingten Reflektion - ermöglicht wird. Hierbei mag eine Rolle spielen, dass die LIDAR-Daten aus untrennbaren Mehrfachüberfliegungen resultierten.

Bei späteren Radaraufnahmen in der Projektlaufzeit wurden die Muschelbänke auch in den Radaraufnahmen deutlicher sichtbar.

Bisher nur im niedersächsischen Gebiet konnte die Detektion durch Kopplung optischer Satellitendaten mittels Radardaten deutlich verbessert werden (Abb. 5).

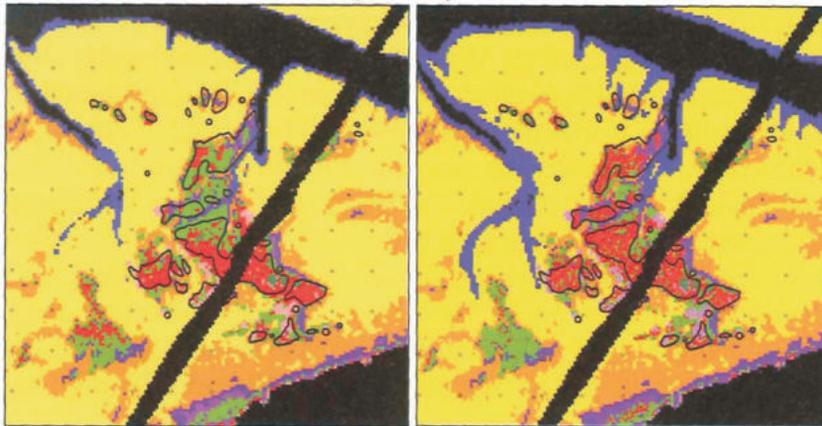


Abb. 5: Klassifikation der Muschelbank im Norderneyer Rückseitenwatt nur mit optischen Daten (links) und mit Kombination Optik und SAR Daten

Im milden Winter 2013/14 wurden die Bestände der pazifischen Auster in Schleswig-Holstein massiv geschädigt und wir fanden bei Feldkartierungen 2014 viele heranwachsende Miesmuscheln, die die Oberfläche prägten. Fast alle im Projekt betrachteten Muschelbänke in Schleswig-Holstein waren jahrelang stark von Tangen (*Fucus sp.*) überwachsen. Nach dem Winter 2013/2014 war dieser Überwuchs massiv reduziert. Bei einer Feldkartierung im Rahmen des Miesmuschelmonitorings beeinträchtigt der Bewuchsgrad die Detektion nicht – für die optische Fernerkundung dürfte er aufgrund seines starken Vegetationssignals deutliche Auswirkungen haben.

Abb. 6: Zuwachs des Überwuchses durch Seetang (*Fucus sp.*) bei der Muschelbank Steenodde/Amrum von April (rechts) bis August 2014 (links) (Fotos: Kohlus 2014).



Bei einer spätsommerlichen Kartierung durch Kohlus und Sertdere konnte zwar ein Zuwachs (Abb. 6) an *Fucus sp.* beobachtet werden, aber die starken Veränderungen im Winter 2013/2014 werden nicht innerhalb eines Jahres ausgeglichen, die *Fucus*-Bedeckung blieb geringer als in den Vorjahren.

Die Muschelbank vor Steenodde war seit Jahren nicht mehr aktiv und nicht mehr im Fokus des Muschelmonitorings (Büttger & Nehls 2011). Es waren ungeklärte Muschelklassifikationen aus Fernerkundungsdaten, die uns das Gebiet wieder erkunden und die aktive Besiedlung wieder entdecken ließen. Heute wird sie wieder beim Muschelmonitoring betrachtet. Ein klares Votum für das Potential der Fernerkundung.

4 Auf der Spur der Vergangenheit

Große Teile des nordfriesischen Wattenmeeres (Meier et al. 2013) waren bis in das 14. Jh. hinein eine besiedelte Sumpflandschaft, weitgehend im Schutz von Geestrücken und Sandhaken wie wohl auch weiter westlich gelegener Marschen. Immense Zerstörungen,

vermutlich den Tod der meisten Bewohner und den Untergang großer Landgebiete brachte die erste „Grote Mandränke“ von 1362. Von einem Sumpfland wandelte sich das Gebiet in eine verinselte Landschaft mit Bruchwäldern, Mooren und ausgedehnten Marschen (Abb. 7). Fortschreitende Erosion, steigender Meeresspiegel, Landabsenkung durch den Salztorfabbau (Bantelmann et al. 1995), eine Serie heftiger Sturmfluten (1610, 1630, 1631) als auch ungenügende Küstenschutzmaßnahmen – wohl u.a. in Folge des dreißigjährigen Krieges – schufen die Voraussetzung dafür, dass bei der zweiten „Grotten Mandränke“ 1634 erneut viele Siedlungen und Deiche zerstört wurden und dass die Gebiete nicht wieder geschützt werden konnten.



Abb. 7: Skizzen der Land-Meer-Verteilung seit dem Mittelalter an der Westküste Schleswig-Holsteins (Kohlus).

Der heute vorwiegend vom Energieverbrauch getriebene Klimawandel und Meeresspiegelanstieg bedingt Anpassungsmaßnahmen des Küstenschutzes, die sogar in unserem reichen Land eine Herausforderung darstellen. Anderswo wird der Meeresspiegelanstieg Menschen absehbar Existenz, Heimat und Staat nehmen (Bauer 2010). So mag dem Untergang des intensiv und profitabel genutzten niedrigen Küstengebietes Nordfrieslands als Negativszenario bald nicht nur als kulturhistorischer Schatz und Grabungsschutzgebiet ein neues Interesse zukommen.

Genauso wie für Seegräser oder Sedimente gilt hierbei, dass die Beobachtung und Erhebung dieser Spuren immens aufwendig ist. Hinzu kommt die möglicherweise nur kurzzeitige Sichtbarkeit der Strukturen.

Mit dem Ziel der Identifizierung von Habitaten wurden die ersten vorliegenden Aufnahmen des TerraSAR X aus dem Wattenmeer analysiert und zeigten lineare Strukturen im Watt vor Pellworm (Kohlus & Gade 2009). Durch Kartierungen vor Ort und im Abgleich mit Auswertungen des Landesamtes für Archäologie in Schleswig-Holstein von Luftbildern (Binder et al. 2011) des Muschelmonitorings (Büttger & Nehls 2011) zeigte sich schnell, dass es sich nicht um Artefakte in den Radarbildern handelte.

Vor allem sind die im Radarbild sichtbaren Strukturen auf Entwässerungssysteme, auf veränderte Sedimente in den früheren Abflussrinnen oder an relativ stabilen morphologischen Strukturen an ihrem Rande zurückzuführen. Diese Strukturen wiederum verweisen auf Feldgrenzen, Deich- und Wegeführung. Sobald sie freigelegt sind unterliegen sie einem erosiven Einfluss und werden in absehbarer Zeit zerstört (Abb. 8).

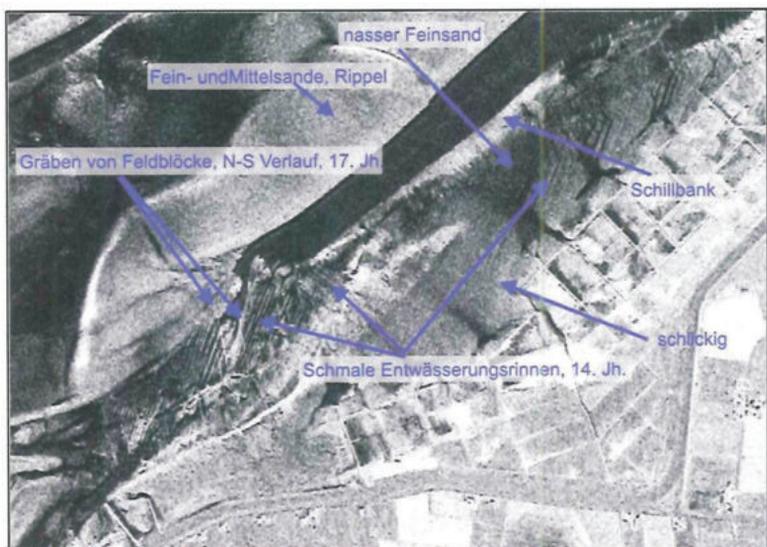
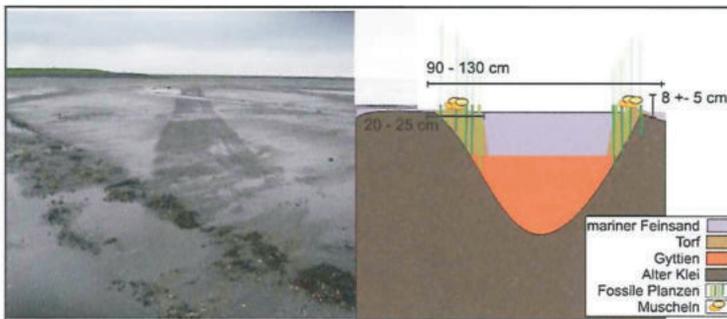


Abb. 8 Ausschnitt von 2,8 * 2 km aus einer TerraSAR-X Aufnahme im hochauflösenden Modus vom 3.9.2009, © DLR 2009. Im Bild zeigen sich Unterschiede der Sedimente wie auch Spuren der Entwässerungssysteme aus dem 14. Jh. (vor der ersten Mandränke) und dem 17. Jh. (vor der zweiten Mandränke).

Diese Strukturen lassen sich nicht nur mittels TSX identifizieren, sondern auch in Bildern des RadarSat2 (Gade et al. 2014). Hochauflösende Radarbilder sind somit geeignet, zahlreiche georeferenzierte Bilder der untergegangenen Landschaft zu erhalten und eine Übersicht über die freiliegenden Bereiche und deren zeitliche Entwicklung zu gewinnen. Radarbilder lassen sich so als eine Art Frühwarnsystem über den Fundzugang im Wattenmeer einsetzen (Binder et al. 2011, Gade et al. 2013, Kohlus 2013).

Abb. 9: Fundsituation der Entwässerungsrinnen sowie Skizze des Aufbaues und Größen. Einige Gräben wurden zur Melioration genutzt. (Foto: Kohlus 2012).



Diese anthropogenen Spuren lassen sich einfacher beschreiben als meist unregelmäßige und diffus begrenzte Naturerscheinungen. Auf der Grundlage einfacher Feldmessungen lässt sich anhand dieser Strukturen zeigen, dass sich nur in einer horizontalen Dimension deutlich über die Auflösungsgrenze reichende Oberflächenformen mittels Radarbildern identifizieren lassen, selbst wenn alle anderen Merkmale wie Rauigkeit, Höhe und die zweite Flächendimension unter der Auflösungsgrenze liegen (Abb. 9).

Der Einfluss der unterschiedlichen Faktoren unterhalb der Auflösungsgrenze kann bisher nicht bestimmt werden.

Wenn diese Überlegung zutrifft, wird aber auch nachvollziehbar, warum sich bei der morphologisch-sedimentologischen Auswertung zeigt, dass sich Flächen mit Kleinformen unter der Auflösungsgrenze unterschiedlich im Radarsignal präsentieren.

5 Landschafts- und Stadtgeschichte via LIDAR

Anlass für die bundesweit von den Ländern vorgenommenen Laserbefliegungen war eine Erhöhung der Genauigkeit bei der Flächenerfassung für die Landwirtschaftsförderung durch die Europäische Union. Die für Schleswig-Holstein vom Landesamt für Vermessung und Geoinformation (LVerGeo) 2005 beauftragte Befliegung liefert mindestens neun Lasersignale je Quadratmeter.

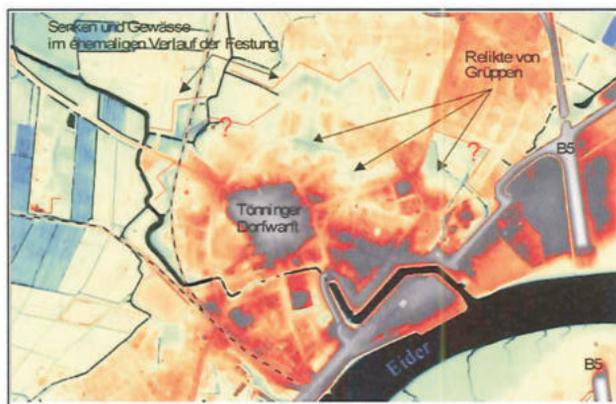


Abb. 10: Der frühere Verlauf von Festungsteilen zeigt sich im Höhenrelief u. a. in Senken und Entwässerungsrinnen im Stadtgebiet von Tönning. (Auswertung und Interpretation des DGM2, LVerGeo SH, 2005). Dunkelrot gibt hohe Flächen, Blau die niedrigsten Gebiete im Bild wieder.

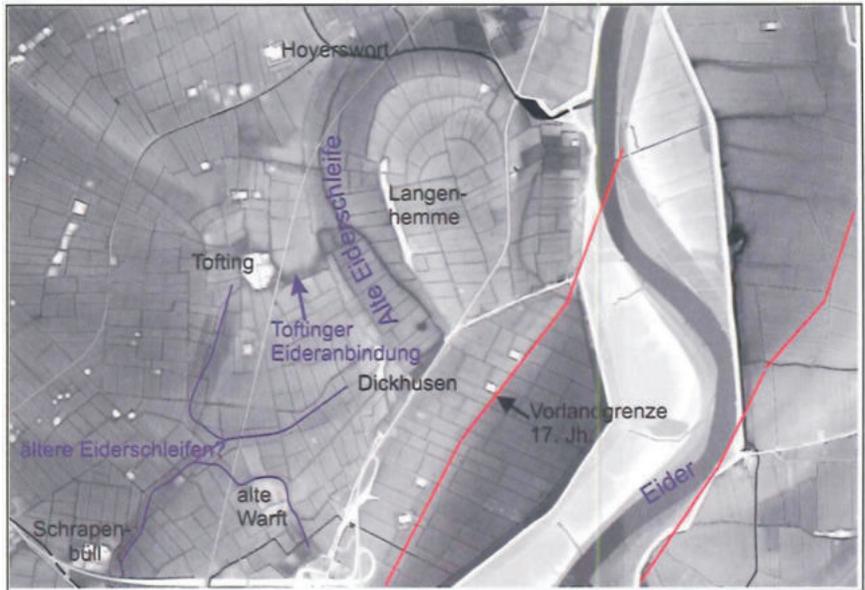
Bei den hier gezeigten Auswertungen wurden lediglich die Daten des digitalen Geländemodells (DGM2) verwendet, die die aktuelle Oberfläche wiedergeben und bei dem Gebäude per Algorithmus relativ grob eliminiert wurden. Poelmann (2008, 2009) und Arnold (u.a. 2011) nutzten zur Identifizierung frühgeschichtlichen Anlagen die Originaldaten, aus denen sich auch Vegetationshöhen und anderes anhand von Reflektionshorizonten ableiten lassen. Seit diesen ersten archäologischen Auswertungen der Daten in Schleswig-Holstein sind sie zu einem der häufigst genutzten Mittel der räumlichen Interpretation und Grundlage der Illustration von Fundgebieten geworden. Die hochauflösenden Daten erlauben sowohl die Nutzung bei der Betrachtung einzelner Objekte (Abb. 10 und 11) aber können auch zum Verständnis mesoskaliger räumlicher Strukturen (Abb. 12, Abb. 13) erfolgreich genutzt werden.

Für Abbildung 10 wurden das relevante Höhenspektrum mittels einer geeigneten Farbzuoordnung und Kontrasteinstellung hervorgehoben. Dass sich Spuren des Verlaufs der Stadtfestung sowie alte Grüppensysteme im Relief der heutigen Stadt erhalten haben, wird erst in einer solchen Übersicht fein vermessener Höhen deutlich. Im Vergleich mit Luftbildern lässt sich erkennen, dass sich u. a. die Führung von Gräben, die Ausrichtung von Pflanzungsreihen an diesen historischen Strukturen weiterhin orientieren, dass sich hier Baulücken häufen und bis heute (Garten-)Wege den Verläufen folgen. Deutlich erkennbar in den Laserhöhendaten ist auch, dass sich der Bereich der alten Kernstadt Tönning auf einer ausgedehnten Großwarft befindet und damit den bekannten alten Dorfwarften Tofting und Großolwersum entspricht.

Das Höhenbild im Gebiet zwischen Tönning und Rothenspieker (Abb. 11) vermittelt Aspekte der Landschaftsgenese und macht auch die Wahl von Siedlungslagen verständlich. Im 1613 bedachten Süderfriedrichskoog (Kunz & Panten 1997, Kunz et al. 1997) zeichnet sich die Vorlandkante des ausgehenden 16. Jh./beginnenden 17. Jh. deutlich ab. Das alte Eiderbett – Abb. 11. in Rot skizziert - dieser Zeit setzt sich nach Norden fort, es ist im

heutigen Dithmarschen als breites dunkles Band, überlagert von den hellen (=hohen) heutigen Eidervorländern, zu erkennen.

Abb. 11: *Landschaftliche Entwicklung im Gebiet Tofting (Interpretation des DGM2 des LVerMGeo SH 2005)*



Die alte Eiderschleife zeigt sich nicht bzw. kaum im ehemaligen Vorland des Süderfriedrichkooges, sie ist ein Landschaftsrelikt aus der Zeit weit vor dem 16. Jh.. Bis heute folgen Entwässerungssysteme alten Verläufen der Eider. Der Vorfluter und frühere Hafen Rothenspieker lehnt sich ihrem Verlauf an. Die heute vermutlich ausgedünnte Reihensiedlung Langenhemme ist, als später weiter erhöhter Siedelplatz, auf einem Flusswall zu erkennen.

Bis in das 19. Jh. hinein waren die Wasserläufe für den Warenverkehr der wichtigste Transportweg und außerhalb trockener Sommerzeiten und vereister Wintertage oft der einzige. Die sich bis in die römische Kaiserzeit nachvollziehbare Besiedlung

(Bantelmann 1975, Bantelmann et al. 1996) von Tofting (Bantelmann 1955) wird verständlich: Nicht nur hohe Marsch sondern auch die deutlich sichtbare Senke mit einer Wasserrinne, die den Siedelplatz mit der alten Eider verbindet, schufen einen vergleichsweise sichere aber auch verkehrsgünstige Lage. Der Siedlungsplatz selbst war verkehrstechnisch günstig mit einem Wasserverlauf direkt mit der Eider, dem Meer und der Welt verbunden. Diese Interpretation des detaillierten Höhenreliefs der Laserscanaufnahme bestätigt frühere Einschätzungen und per Grabung nachgewiesene Ergebnisse.

Weitere Schleifen und Niederungen von Abflusssystemen ähnlichen Alters oder älter können in den Laserscanbildern angenommen werden und sind in Abb. 11 als potentielle ältere Eiderschleifen bezeichnet. Unter der Voraussetzung, dass diese Niederungen als Wasserwege nutzbar waren, ergibt sich ein Verkehrsnetz zwischen höheren – und aus ihrer Form der anthropogenen Genese zuzuordnenden – Lagen, bis z. T. heute genutzten Siedlungsplätzen.

Dass die „älteren Eiderschleifen“ (ggf. Priele) älter sind als die „Alte Eiderschleife“ bestätigt sich im Höhenbild dadurch, dass die randlichen Sedimentablagerungen des Flusslaufes, die Flusswallbildung, den alten Rinnenverlauf bei Dickhusen abtrennt. Ob die aus dem Höhenbild abgeleitete plausible Annahme, dass Tofting, Schrapenbüll, die Tönning zugrunde liegende Großwarft und die namenlose „alte Warft“ am Ellwörter Weg irgendwann ein verbundenes Siedlungsnetz bildeten, kann nur mittels lang bewährter bodenständiger archäologischer Arbeit bestätigt werden.

Anhand der Abbildungen 10 und 11 konnte gezeigt werden, dass das laservermessene Höhenrelief ergänzende oder sogar völlig neue Einschätzungen historischer wie archäologischer Raumprägung ermöglicht.

In den fein auflösenden Höhendaten wird aber auch die geologische Genese von Eiderstedt neu nachvollziehbar und besser verständlich. Bis heute wird auf die Darstellung und Erklärung von

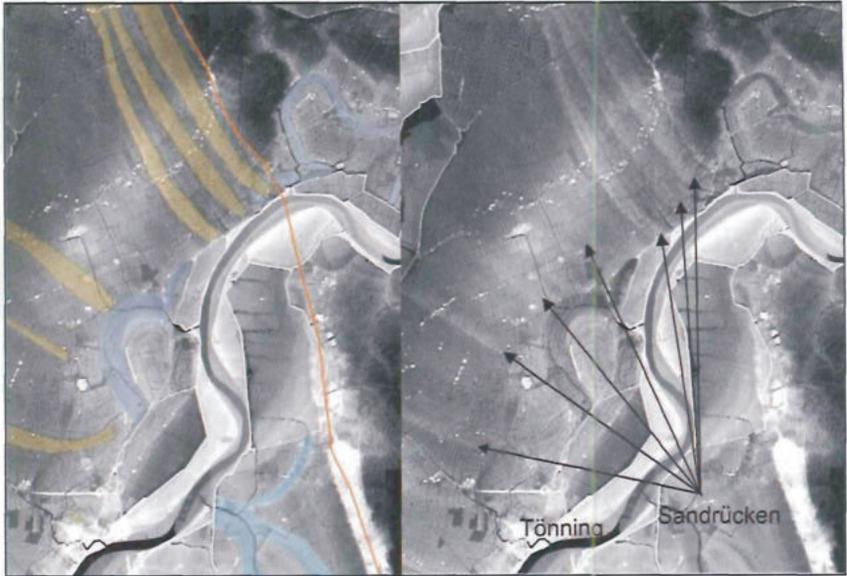


Abb. 12: Umschwenkende Höhenstruktur von der nordsüdlich verlaufenden fossilen Dithmarscher Küste zum west-östlichen sandigen Zentralrückens Eiderstedts (Interpretation des DGM2 des LVerMGeo SH 2005). Alte Nehrungsküste (orange Linie), Sand- und ggf. Marschrücken (gelb), alte Fluss Schleifen (blau).

Dittmer (1952) zurückgegriffen, wenn es darum geht, die fast rechtwinklig zueinander verlaufenden Sandstrukturen von Ausgleichsküste und wallartigen Sandrücken Dithmarschens und den von Ost nach West gerichteten Sandrücken in der Mitte Eiderstedts als Grundstruktur für die Marschenbildung Eiderstedts heranzuziehen. Der Sedimentkörper wird meist als Haken einer Nehrung gedeutet, die sich einem westlich von Eiderstedt postuliertem Geestkern anschloss (Meier 2006). Auf das östliche Eiderstedt und eine Verknüpfung zum Sandrücken bei Witzwort

wird in der Literatur (u.a. Falk 2001, Fischer 1956 S. 92ff) nicht oder nur wenig ausführlich Bezug genommen. Es selbst wird als Fortsetzung der dithmarscher Nehrungsküste gesehen.

Das Laserhöhenbild (Abb. 12) zeigt uns nun, dass die Längsstruktur des Witzworter Sandrückens nicht allein steht. Eine Staffel von Höhenrücken, hier ohne geologische Prüfung als Sand- bzw. westlich ggf. Marschrücken interpretiert, vermitteln einen langfristig kontinuierlichen marinen Sedimentationsprozess von Ost nach West.

In einem größeren Kontext (Abb. 13) ist zu erkennen, dass sich hier die wallartige Sedimentablagerungen vor dem Dithmarscher Donn bzw. der „Lundener Nehrung“ weiter vorsetzt und die Staffel im Norden weiter auffächert. Während die ältesten den Nehrungshaken anliegenden erhöhten Strukturen Süd-Nord gerichtet sind und sich bis in das Gebiet von Nordstrand fortsetzen, biegen die westlichen jüngeren Rücken im Norden immer stärker nach Westen ab. Ihr Verlauf legt sich dem westlich gelegenen zentralen Sandrücken Eiderstedts an.

Die Entstehung der alten Marschen des östlichen Eiderstedts ist daher im Kontext mit jenen fossilen strandwallartigen Sedimentkörpern zu sehen, die heute zwar von jüngeren Anlagerungen überdeckt sind, sich aber, aufgrund unterschiedlicher Setzungsraten der Sedimente, immer noch im Lidar-Bild als erkennbare langgestreckte Erhebungen bis an die Oberfläche durchpausen. Die Strukturen ähneln denen im angrenzenden Dithmarscher Gebiet westlich des Donns sehr und legen nahe, dass hier gemeinsame oder zumindest ähnliche Prozesse wirkten. Es stellen sich neue Frage zum Verlauf der Eider, zum Wechselspiel der Landbildung mit der angenommen Hakenbildung und Ausbildung des Eiderstedter Sandrückens.

Andere Skalen und Kontrastsetzungen geben Hinweise auf weitere Prozesse und Aspekte der Genese. Eine Entschlüsselung wird aber letztendlich nur mittels geologischer Untersuchungen und Datierungen möglich werden. Die Fernerkundung vermittelt Zusammenhänge, die sich aus der Nähe nicht oder nur schwer

wahrnehmen lassen. Sie kann damit weitere Untersuchungen anstoßen oder lokale Prospektionen einen Kontext geben. Laserscanbilder bieten keinen Blick in die Vergangenheit, sie zeigen die aktuellen Höhenstrukturen. Die alten wallartigen Akkumulationskörper sind überdeckt von Marschen und die Bedeichung hat die Landschaft weiter überformt. Im Bild geht die gesamte landschaftliche Historie ein, einschließlich der aktuellen Eingriffe durch den Menschen. Und manche besonders deutlich auf ältere geologische Prozesse hinweisende Bildstrukturen sind vor allem durch Straßenverläufe oder Deiche geprägt – die aber offensichtlich oft bis heute in Beziehung zu historischen und geologischen Strukturen stehen.

Abb. 13: *Analoge und korrespondierende Strandwallbildung Dithmarschens und Osteiderstedt. Durch Linien sind einzelne erkennbare Strukturverläufe hervorgehoben.*



6 Schlussfolgerungen

Während Satelliten-Fernerkundung für ein Monitoring im Watt noch in den neunziger Jahren zu wenig Bildmaterial lieferte und auch die Kosten sehr hoch lagen, hat sich das Angebot an Daten so verbessert, dass eine operative Nutzung dieser Technik greifbar wird. Lange Jahre beschränkte sich die Projektförderung auf technologische Vorhaben und bestenfalls wurden experimentelle – also nicht an den Aufgaben der Nutzer angepasste - Verifikationen der Analyseergebnisse ermöglicht. Durch die enge Kopplung von Bodenerfassung und Bildanalyse wurde es in den im Rahmen von Copernicus laufenden Projekten möglich, die konkrete Verwendbarkeit der Satelliten-Fernerkundung für das Umweltmonitoring im Umfeld rechtlicher Vorgaben zu prüfen und dabei Fortschritte zu machen.

Ob und wie sich die Ergebnisse der bisherigen Vorhaben auf die Technik und Daten der – kostenfreien – Sentinel-Satelliten übertragen lassen, wird eine der entscheidenden Fragen bei der Einführung in eine operationelle Nutzung für das Wattenmeermonitoring sein. Dies gilt sowohl für das C-Band SAR auf Sentinel-1 als auch für den multispektralen Sensor MSI auf Sentinel-2.

Das Potential der Radarfernerkundung ist sicherlich nicht ausgeschöpft. Die Beziehungen von morphologischen Strukturen zum Radarsignal sind bisher nicht geklärt. Welche Aussagen über Lebensräume sich aus solchen erkennbaren Strukturen erzielen lassen, konnte bisher nicht bearbeitet werden. Wiederum konnten die Muster und Strukturen der Radarbilder noch nicht mit technischen Verfahren analysiert und per Klassifikation nutzbar gemacht werden.

Fortschritte, eine statistisch hohe Treffergenauigkeit im Vergleich klassifizierter Fernerkundungsdaten zu Bodenbeobachtung, wurden gemacht. Die Ergebnisse liefern überzeugende plausible Ergebnisse.

Die Nutzung von Fernerkundungsdaten im Umweltmonitoring ist nicht nur ein technologisches Problem, sondern benötigt eine Anpassung der Konzepte im Monitoring; die zugrunde liegenden Feld- und Labormethoden lassen sich durch die fernerkundlichen Messungen nicht nachahmen. Aber offensichtlich liefert die Satellitenfernerkundung für viele Gebiete verifizierbar richtige Informationen für große Teile des Wattenmeeres. Wie lassen sich diese „zuverlässig erkannten“ Gebiete eingrenzen? Im Falle, dass wissenschaftliche Information in die Klassifikation einfließt, ergibt sich hier die umgekehrte Frage: ab welcher Abweichung der Bildinformation muss von einem qualitativen Wechsel am Boden ausgegangen werden und die eingehende a priori (wissenschaftliche) Information verneint werden?

Die Bildanalysen – per Klassifikation mit einem Algorithmus oder visueller Auswertung – liefern auch jenseits zuverlässig erkannter Gebiete überzeugende plausible Ergebnisse. Während wir im persönlichen Leben unsere Entscheidungen bei komplexen Fragen vorwiegend auf Plausibilität stützen, genügen Plausibilität und hohe Trefferquoten nicht wissenschaftlichen Prinzipien und sind insbesondere nicht justizierbar. Die Handlungsgrundlage für ein operationelles Umweltmonitoring ist aber fast ausschließlich eine rechtliche Veranlassung. Bei den im Rechtsgefüge akzeptierten Verfahren werden geeignete akzeptierte Parameter „gemessen“. Diese Maßzahlen werden in Folge meist komplex zueinander in Beziehung gesetzt, und das Ergebnis wird dann einer Sollgröße gegenübergestellt. Damit Fernerkundungsdaten in diesen Prozess operativ einfließen können, muss beschreibbar sein, für welchen Parameter unter welchen Konditionen mit welchem Fehlerwert Aussagen erzielt werden können. Die Sensitivität und Fehlergröße gegen die Beobachtungsparameter zu spezifizieren ist auch ein entscheidender Schritt, um die Ergebnisse erdnahe Fernerkundung und Bodenmessungen mit den Daten aus der Satellitenfernerkundung verbinden zu können.

Die hohe Auflösung heutiger Satellitendaten ermöglicht auch ihre Nutzung zur Identifizierung lokaler Sonderstrukturen. Besonders

bei Muschelbänken – vorwiegend von der großen pazifischen Auster gebildet – wurde deutlich, wie sehr sich die Ergebnisse durch die Kopplung von optischen mit Radardaten verbessern lassen.

Über die Entdeckung, dass auf Radarbildern die Strukturen historischer Besiedlung und Landnutzung erkennbar sind, galt es zu berichten. Stehen regelmäßig großflächige Satellitenradarbilder der ehemals besiedelten Gebiete bereit, können neue Wege der archäologischen Landschaftserkundung beschritten werden. Statt von Zufallsfunden und Gelegenheiten abhängig zu sein, lassen sich Konzepte entwickeln, die auf systematischen Beobachtungen beruhen. Einfach einsichtig ist die Verwendung im Sinne eines Frühwarnsystems, das neue freiliegende und dann von der Erosion bedrohte Fundgebiete frühzeitig identifiziert.

Aus der Möglichkeit per Laser flächige Höhendaten zu gewinnen kann die hydromorphologische Modellierung von Flachwassergebieten profitieren. Das feine Relief ermöglicht auch Abschätzungen der Ausprägung von Wattgebieten. Im Beitrag konnte gezeigt werden, dass im Gebiet der Marschen sowohl historisch-bauliche Strukturen neu zuzuordnen und identifizierbar werden aber auch dass sich Grundstrukturen der Landschaftsgenese neu erschließen. Es zeigt, wie Fernerkundung bestehende Vorstellungen verändern kann.

Unsere Erfolge fußen auf den am Boden gewonnenen Kenntnissen. Die Fernerkundung kann die Effizienz der Arbeit vor Ort massiv erhöhen und auch neue Zusammenhänge vermitteln, sie ersetzt aber nicht die Arbeit der Fachwissenschaften vor Ort. Die Erfolgsstrategie ist eine engen Verzahnung und Zusammenarbeit von Fernerkundung, Modellierung, Bodenbeobachtung und Laboranalysen. Dass eine solch verzahnte Arbeit heute per Copernicus-Programm der europäischen Union gefördert wird, hat unsere Arbeit möglich gemacht.

Quellen

- **Arnold, V. (2011):** Durch Laserscandaten sichtbar gemacht – Urgeschichtliche Ackersysteme in historisch alten Waldstandorten Schleswig-Holsteins. In: Archäologische Nachrichten, H. 17, S. 102-106.
- **Asmus, H. & R. Asmus (1998):** Muschelbänke und Seegraswiesen im Stoffhaushalt des Watts. In: Landesamt für das Schleswig-Holsteinische Wattenmeer und Umweltbundesamt (Hrsg., Bearb. Kohlus, J. & H. Küpper): Umweltatlas Wattenmeer Bd. 1 - Nordfriesisches und Dithmarscher Wattenmeer, S. 138-139, Stuttgart.
- **Bantelmann, A. (1955):** Tofting, eine vorgeschichtliche Warft an der Eidermündung. Neumünster.
- **Bantelmann, A. (1975):** Die frühgeschichtliche Marschen-siedlung beim Elisenhof in Eiderstedt Landschaftsgeschichte und Baubefunde. Neumünster.
- **Bantelmann, A., R. Kuschert, A. Panten, and T. Steensen (1995):** Geschichte Nordfrieslands, Boyens, Heide, 472 S.
- **Bauer, S. (2010):** „Klimaflüchtlinge“ nach Kopenhagen - Rechtliches Konzept, politische Folgen, normative Überlegungen. Gutachten f. Diakonisches Werk der EKD e.V. für die Aktion „Brot für die Welt“, Stuttgart, 36 S.
- **Binder, K., Kohlus, J. & M. Gade (2011):** Landschaften auf dem Meeresgrund - GIS als Integrationselement. In: Traub, K.-P., Kohlus, J. & T. Lüllwitz (Hrsg.): Geoinformationen für die Küstenzone. Band 3. Norden & Halmstad (S), S. 265-276.
- **Brockmann, C. und K. Stelzer (2008):** Optical Remote Sensing of Intertidal Flats. In: Barale, V. & M. Gade, (Eds): Remote Sensing of the European Seas. Heidelberg
- **Brockmann Consult (2007):** Operationalisierung von Fernerkundungsmethoden für das Wattenmeermonitoring – summary. [http://www.brockmannconsult.de/ofew/pdf/OFEW_Summary_1.0.pdf]
- **Büttger, H. & G. Nehls (2011):** Luftbilderfassung eulitoraler Miesmuschelbestände im Nationalpark Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer. In: Traub, K.-P., Kohlus, J. & T. Lüllwitz (Hrsg.): Geoinformationen für die Küstenzone. Band 3 - Beiträge des 3. Hamburger Symposiums zur Küstenzone und Beiträge des 8. Workshops

zur Nutzung der Fernerkundung im Bereich der Bundesanstalt für Gewässerkunde/Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes sowie ausgewählte Beiträge vom 20. Jahres-treffen der AG GIS-Küste, Themenschwerpunkt 'Archäologie und Küste'. Norden & Halmstad (S), S. 65-73.

- **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktor-sicherheit (BMU, Hrsg., 2012)**: Beschreibung eines guten Umweltzustands für die deutsche Nordsee - nach Artikel 9 Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie. http://www.meeresschutz.info/index.php/berichte.html?file=tl_files/meeresschutz/berichte/GES_Nordsee_120716.pdf

- **CWSS – Common Wadden Sea Secretariat (Ed., 2008a)**: TMAP Handbook - TMAP guidelines for an integrated Wadden Sea monitoring. Version 0.9, May 2008.

- **CWSS – Common Wadden Sea Secretariat (Ed., 2008b)**: Nomination of the Dutch-German Wadden Sea as World Heritage Site. Vol. One, Wilhelmshaven, 163p.

- **Dennert-Möller, E. (1982)**: Erstellung einer Sedimentkarte der nordfriesischen Wattgebiete aus LANDSAT-Bilddaten. In: Bildmessung und Luftbildwesen, Nr. 50.

- **Dittmer, E. (1952)**: Die nacheiszeitliche Entwicklung der schleswig-holsteinischen Westküste. Veröffentl. d. Geol. Inst. der Universität Kiel.

- **Doerffer, R. & D. Murphy (1989)**: Factor analysis and classification of remote sensed data for monitoring tidal flats. In: Helgol. Meeresuntersuchungen 43, S.275-293.

- **Dolch, T. , Buschbaum, C. & Reise, K. (2013)**: Seegras-Monitoring im Schleswig-Holsteinischen Wattenmeer 2013 - Forschungsbericht zur Bodenkartierung von Seegrasbeständen in ausgewählten Gebieten. Alfred Wegner Institut, List.

- **Falk, G. (2001)**: Die Paläogeomorphologie ausgewählter Standorte der schleswig-holsteinischen Nordseeküste im Früh- und Mittelholozän. Dissert. Fachbereich 07 – Umwelt und Gesellschaft der Technischen Universität Berlin.

- **Fischer, O. (1956)**: Eiderstedt. Das Wasserwesen an der schleswig-holsteinischen Westküste, Teil III, Das Festland, Bd. 3.

- **Fung, A. K., Li, Z. & K. S. Chen (1992)**: Backscattering from a randomly rough dielectric surface. IEEE Geosci. Remote Sensing. Lett. 1, p75-77.

- **Gade, M., Stelzer, K., Melchionna, S. & J. Kohlus (2014):** Multi-Frequency SAR Data Help Improving the Monitoring of Intertidal Flats on the German North Sea Coast. *J. Estuarine, Coastal and Shelf Science*, PII:S0272-7714(14)00019-5, DOI:10.1016/j.ecss.2014.01.007.
- **Gade, M., Stelzer, K. & J. Kohlus (2013):** Towards an Improved Classification System of Intertidal Flat Surfaces Based on Satellite Optical and Radar Data. Vortrag und abstract (p. 63), 33rd EARSeL Symposium 3. - 6. June 2013, 6th Workshop on Remote Sensing of the Coastal Zone, Matera, It..
- **Hansa Luftbild (1938):** Luftbild und Vorgeschichte. Berlin.
- **Heygster, G., J. Dannenberg, and J. Notholt (2010):** Topographic Mapping of the German Tidal Flats Analyzing SAR Images With the Waterline Method. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 48, 3, 1019-1030.
- **Kemme, L. (2014):** Zeitliche Variation von RADAR Rückstreuungseigenschaften im Wattgebiet der deutschen Nordseeküste, MSc-Arbeit, Universität Hamburg.
- **Kleeberg, U. (1990):** Kartierung der Sedimentverteilung im Wattenmeer durch integrierte Auswertung von Satellitendaten und Daten der Wattenmeerdatenbank (WADABA) der GKSS. Thesis; Univ. Trier, 113 S..
- **Kohlus, J. (2013):** Stones in the National Park Wadden Sea Schleswig-Holstein ? High resolution radar satellite images as task force system in extremely active morphologic areas. , *OpenArch*, 23. Sept. 2013, Albersdorf.
- **Kohlus, J., Diederichs, B., Kazakos, W. & C. Heidmann (2009):** Von den Metadaten zum Bericht. In: Traub, K-P., Kohlus, J. & T. Lüllwitz (Hrsg.): *Geoinformationen für die Küstenzone - Band 2, Beiträge des 2. Hamburger Symposiums zur Küstenzone und Beiträge des 7. Strategie-Workshops zur Nutzung der Fernerkundung im Bereich der BfG/Wasser- und Schifffahrtsverwaltung*; S.137 - 152, Norden, Halmstad.
- **Kohlus, J. & M. Gade (2009):** Multi-Sensor Remote Sensing of historical landuse areas in the German Wadden Sea. Abstract, „4th EARSeL Workshop on Remote Sensing of the Coastal Zone“. Chania, Crete, Greece.