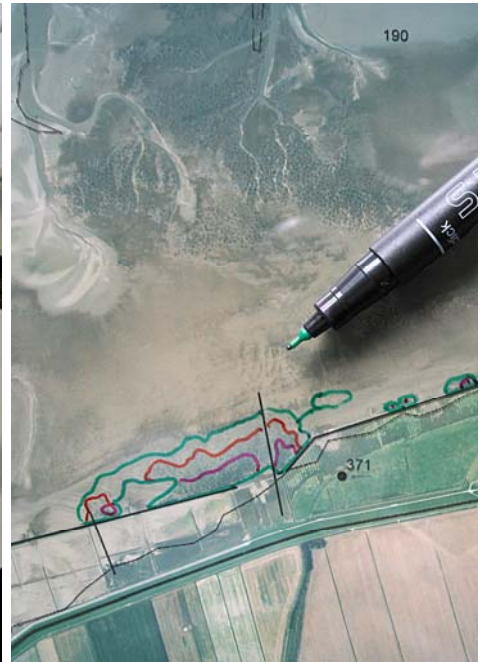




**Erfassung der Seegrasbestände im
niedersächsischen Wattenmeer
über visuelle Luftbildinterpretation
- 2008 -**

Niedersächsischer Landesbetrieb
für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
Betriebsstelle Brake/Oldenburg

Dipl. Biol. Kerstin Kolbe

Erfassung der Seegrasbestände im niedersächsischen Wattenmeer über visuelle Luftbildinterpretation - 2008 -



Niedersachsen

Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft,
Küsten- und Naturschutz (NLWKN)
Am Sportplatz 23
26506 Norden

Projektleitung:

Dr. Wilfried Heiber
NLWKN
Betriebsstelle Brake/Oldenburg
AB 3.4 Flussgebietsmanagement
Übergangs- und Küstengewässer
Ratsherr-Schulze-Str. 10, 26122 Oldenburg
Tel.: 0441-799-2052
Fax: 0441-799-2730
wilfried.heiber@nlwkn-ol.niedersachsen.de

Dr. Marc Herlyn
NLWKN
Betriebsstelle Brake/Oldenburg
AB 3.4 Flussgebietsmanagement
Übergangs- und Küstengewässer
An der Mühle 5, 26548 Norderney
Tel.: 04932-916-161
Fax: 04932-1394
marc.herlyn@nlwkn-ny.niedersachsen.de

Verfasserin:

Dipl. Biol. Kerstin Kolbe
NLWKN
Betriebsstelle Brake/Oldenburg
AB 3.4 Flussgebietsmanagement
Übergangs- und Küstengewässer
An der Mühle 5, 26548 Norderney
Tel.: 04932-916-167
Fax: 04932-1394
kerstin.kolbe@nlwkn-ny.niedersachsen.de

Norderney, den 26.8.2011

Zitiervorschlag:

Kolbe, K. (2011) Erfassung der Seegrasbestände im niedersächsischen Wattenmeer über visuelle Luftbildinterpretation - 2008. NLWKN, Küstengewässer und Ästuare 4. 35 S.

Titelbild:

Luftbilddauswertung am Stereoskop (WILD Aviopret APT2)

Verzeichnisse

Inhalt	1
Tabellen	2
Abbildungen	2

Inhalt

1 Einleitung.....	1
2 Untersuchungsgebiet und Methode	2
2.1 Material und technische Ausstattung	2
2.2 Vorgehensweise bei der Luftbilddauswertung	3
2.2.1 Vorbereitung	3
2.2.2 Visuelle Interpretation der Luftbilder am Stereoskop.....	4
2.2.3 Hochzeichnen der identifizierten Seegrasbestände	4
2.2.4 Übertragung der Interpretationsergebnisse ins GIS	8
3 Ergebnisse.....	9
3.1 Darstellung der 2008 kartierten Seegrasbestände	9
3.1.1 Emsmündung bis Leyhörn	9
3.1.2 Randzel	10
3.1.3 Juister Inselwatt	10
3.1.4 Itzendorfplate und Norder Watt.....	11
3.1.5 Lütetsburger Plate bis Neßmersiel	12
3.1.6 Neßmersiel bis Dornumersiel (Dornumer Watt).....	13
3.1.7 Dornumersiel, Benersiel bis Neuharlingersiel	14
3.1.8 Neuharlingersiel bis Harlesiel	14
3.1.9 Harlesiel bis Schillig	14
3.1.10 Schillig, Horumersiel bis Hooksiel.....	15
3.1.11 Jädebussen	16
3.1.12 Westküste Butjadingen	18
3.1.13 Hoher Weg	19
3.1.14 Ostküste Butjadingen – Wesermündung	20
3.1.15 Wurster Küste und Eversand	21
3.1.16 Knechtsand	22
3.1.17 Neuwerk	22
3.2 Gesamtfläche und räumliche Verteilung der auf Luftbildern identifizierten Seegrasbestände	23
3.3 Übereinstimmung mit Ergebnissen der Geländearbeit	24
3.3.1 Fläche und Position bei Beständen mit >5 % Gesamtbedeckung.....	24
3.3.2 Fläche und Position bei Beständen mit >20 % Gesamtbedeckung.....	26
3.3.3 Bewuchsdichte	26
4 Einsatz alternativer Methoden.....	28
4.1 Visuelle Interpretation von Luftbildern am Bildschirm	28
4.2 Erfassung von Seegras durch Klassifizierung der Farbwerte von digitalen Luftbildern.....	29
5 Diskussion	30
6 Zusammenfassung / Empfehlungen	33
7 Quellen	34

Tabellen

Tab. 2.1:	Spezifikationen der Luftbilder.....	3
Tab. 2.2:	Beschreibung der bei der Luftbildauswertung eingesetzten Dichteklassen	5
Tab. 3.1:	Flächengrößen der Seegrasbestände 2008 nach Luftbildinterpretation.....	23
Tab. 3.2:	Vergleich von Flächengrößen und Positionen der Seegrasbestände aus der In-situ-Kartierung 2008 (Adolph 2010) und der Luftbildanalyse – Gesamtbedeckung im Gelände >5 % vs. Dichtekategorien A+B+C+D der Luftbild-Analyse.....	25
Tab. 3.3:	Vergleich von Flächengrößen und Positionen der Seegrasbestände aus der In-situ-Kartierung 2008 (Adolph 2010) und der Luftbildanalyse – Gesamtbedeckung im Gelände >20 % vs. Dichtekategorien A+B der Luftbild-Analyse	26
Tab. 3.4:	Kalibrierung der Dichteklasse aus der Luftbildkartierung mit den Vor-Ort-Aufnahmen.....	27
Tab. 3.5:	Mittlere Dichte der Seegrasbestände in einzelnen Wattgebieten. Vergleich der Ergebnisse der Luftbildanalyse mit Berechnungen aus der Geländekartierung (Adolph 2010)	27

Abbildungen

Abb. 2.1:	Übersicht über das Bearbeitungsgebiet und Lage der Bildmitten der Luftbilder 2008	2
Abb. 2.2:	Ausschnitt aus der Arbeitskarte mit Blattschnitt-Gitter und Ansicht einer Einzelfolie	3
Abb. 2.3:	Luftbildauswertung am Stereoskop - Übertragen der Bestandsgrenzen auf Folie	4
Abb. 2.4:	Beispiele für die Strukturen und Farben von Seegras auf Luftbildern	6
Abb. 2.5:	Beispiele für die Strukturen und Farben von Algen, Sedimentrelief, Diatomeen und Muschelbank auf Luftbildern	7
Abb. 2.6:	Darstellung einer digitalisierten Seegrasfläche als Polygon mit Stützpunkten	8
Abb. 3.1:	Seegrasvorkommen Emsmündung – Hund, Paapsand und Rysumer Nacken – 2008.....	9
Abb. 3.2:	Seegrasvorkommen Randzel – 2008.....	10
Abb. 3.3:	Seegrasvorkommen Norder Watt und Itzendorfplate – 2008	11
Abb. 3.4:	Seegrasvorkommen Ostermarscher, Hilgenrieder und Neßmer Watt – 2008.....	12
Abb. 3.5:	Seegrasvorkommen Dornumer Watt – 2008	13
Abb. 3.6:	Seegrasvorkommen Westerburer Watt, Benser Watt – 2008	14
Abb. 3.7:	Seegrasvorkommen Wanger Watt, Horumersiel und Hooksiel – 2008	15
Abb. 3.8:	Seegrasvorkommen Jadebusen West – Arngast Sand – 2008.....	16
Abb. 3.9:	Seegrasvorkommen Jadebusen Süd und Ost – Schweiburger Watt, Seefelder Watt – 2008	17
Abb. 3.10:	Seegrasvorkommen Butjadingen West – Solthörner Watt – 2008	18
Abb. 3.11:	Seegrasvorkommen Hoher Weg – 2008.....	19
Abb. 3.12:	Seegrasvorkommen Butjad. Ost/Wesermündung – Burhaver und Waddenser Plate – 2008.....	20
Abb. 3.13:	Seegrasvorkommen Wurster Watt und Eversand (Schwarze Gründe) – 2008.....	21
Abb. 3.14:	Seegrasvorkommen Knechtsand Watten, Spiekaer Barre – 2008	22
Abb. 3.15:	Position und Form werden im GIS durch den Centroid (Schwerpunkt) des entsprechenden Polygons repräsentiert.	24
Abb. 4.1:	Digitale Luftbilder der Seegraswiese im Ostermarscher Watt, 2009	28
Abb. 4.2:	Klassifikationen aus digitalen Luftbildern	29

Erfassung der Seegrasbestände im niedersächsischen Watt 2008 über visuelle Luftbildinterpretation

1 Einleitung

Seegraswiesen der Arten *Zostera noltii* (Zwergseegras) und *Zostera marina* (Echtes Seegras) sind im Ökosystem Wattenmeer von besonderer Bedeutung als Lebensraum, Laichhabitat, Kinderstube und Nahrungsquelle. Durch ihre strömungsreduzierende und sedimentstabilisierende Wirkung schaffen sie Erhöhungen des Wattbodens, die sowohl von Endo- als auch von Epifauna-Arten bevorzugt besiedelt werden. Die Pflanzen selbst werden von Ringelgänsen und Enten beweidet, bieten aber auch Schutzraum und Nahrung für Fischbrut, kleine Krebstiere und Schnecken (z.B. Meerassel *Idothea* und Wattschnecke *Hydrobia*). Die Blattoberfläche von Seegraspflanzen wird von verschiedenen Epiphyten-Arten besiedelt, die wiederum den Schnecken als Nahrung dienen.

Der Biotoptyp „Seegraswiese des Eulitorals“ gilt als „stark gefährdet“ (Riecken et al. 1995) und wird rechtlich von verschiedenen nationalen und internationalen Vorschriften und Vereinbarungen erfasst: Angesichts des deutlichen Rückgangs der Seegrasvorkommen seit den 1950er Jahren (den Hartog & Poldermann 1975, De Jonge & De Jong 1992, Kastler & Michaelis 1997) wurde die „Vergrößerung der Fläche und natürlichere Verteilung und Entwicklung von natürlichen...Seegras (*Zostera*)-Wiesen“ als gemeinsames Ziel im ersten Trilateralen Wattenmeerplan von 1997 verabschiedet (CWSS 1998). Seegras ist eine der biologischen Komponenten bei der Bewertung der Küstengewässer gemäß der EG-Wasserrahmenrichtlinie (EU 2000) und wird als charakteristischer ökologischer Bestandteil der Küstengewässer auch von den Belangen der EG-Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (EU 2008) berührt. Hieraus leitet sich die Notwendigkeit ab, die Verbreitung von Seegras im Wattenmeer regelmäßig zu kontrollieren und zu dokumentieren. Die Überwachung der Seegrasbestände an der deutschen Nordseeküste ist daher in den nationalen und internationalen Monitoring-Programmen verankert (Trilaterales Wattenmeermointoring TMAP, Bund-Länder-Messprogramm BLMP; ARGE BLMP 2011).

In Niedersachsen wird seit 1993 im 6-Jahres-Rhythmus eine Gesamterfassung des eulitoralen Seegrasbestandes im Gelände durchgeführt. Einige ausgewählte Standorte werden zudem seit 2006 jährlich untersucht. Bei diesen personell, zeitlich und logistisch aufwendigen In-situ-Untersuchungen werden Lage und Ausdehnung der Seegrasvorkommen sowie Angaben zu ihrer Artenzusammensetzung und Bewuchsdichte erfasst. In begrenztem Umfang werden die In-situ-Untersuchungen durch Luftbildinterpretationen unterstützt.

Nicht nur wegen des hohen Aufwandes, mit dem Feldarbeiten im ausgedehnten Wattengebiet verbunden sind, wurden die Möglichkeiten der Luftbildinterpretation bei der biologischen Wattkartierung in Niedersachsen seit Mitte der 1970er Jahre in unregelmäßigen Abständen immer wieder ausgelotet (Obert 1982, Michaelis 1987, Dijkema et al. 1989, Millat 1996, Herlyn 2005). Luftbilddauswertungen eröffnen die Chance auf zeitlich synchrone Aufnahmen großer Flächen auch in kurzfristigen Wiederholungen und erlauben z.B. die nachträgliche Datenerhebung aus historischem Bildmaterial.

Miesmuschelbestände (*Mytilus edulis*) im Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer werden schon heute jährlich routinemäßig anhand von analogen Echtfarben-Luftbildern - ergänzt durch In-situ-Untersuchungen - kartiert (Millat 1996). Die Kartierung von Seegras aus Luftbildern hingegen ist mit einigen Schwierigkeiten verbunden. Als besonders problematisch gelten die Unterscheidung von Seegras und Grünalgen, die Einschätzung des Bedeckungsgrades, sowie die Erkennung dünn besiedelter Seegraswiesen (Davison 1998). Zusätzlich erschweren die ungleichmäßige Wasserbedeckung und Lichtreflexe auf den Wattflächen die Identifizierung und Abgrenzung der Strukturen (Stelzer et al. 2007).

Dennoch ist die Luftbildinterpretation weltweit eine bevorzugte Standardmethode für Seegraskartierungen (McKenzie et al. 2003, Dekker et al. 2006, Young et al. 2010). In den Niederlanden wird die jährliche Seegrasüberwachung an ausgewählten Standorten mittels Luftbildinterpretation durchgeführt (CWSS 2006), und im Rahmen eines Praxistests 2007 wurde diese Methode auch in Niedersachsen an 5 *Zostera*-Standorten exemplarisch erfolgreich erprobt (Ritzmann & Herlyn 2007, Ritzmann 2007). Eine Standardmethode für die flächendeckende Seegraskartierung aus Luftbildern wurde hingegen für das Wattenmeer noch nicht entwickelt.

In jüngerer Zeit werden auch Anstrengungen unternommen, satellitengestützte Fernerkundungsdaten für die Kartierung von Seegrasbeständen zu nutzen (Stelzer et al. 2007, Kutser et al. 2009). Wegen der geringeren räumlichen Auflösung im Vergleich mit Luftbildern eignen sich Satellitendaten aber (noch) nicht für Detailbetrachtungen. Auf die Qualität der thematischen Daten aus automatisierten Klassifizierungsmethoden bezogen stellt u.a. die Unterscheidung verschiedener Vegetationstypen (z.B. Makroalgen, Seegras, Schlickgras) noch eine größere Hürde dar, die bislang nur durch eine manuelle Nachkorrektur anhand visueller Bildinterpretation und Einbeziehung von Potentialkarten und Ground-Truth-Daten überwunden werden kann (Stelzer et al. 2007, Roelfsema et al. 2009, Young et al. 2010).

Für die vorliegende Arbeit wurde das analoge Bildmaterial einer flächendeckenden Watten-Befliegung vom August/September 2008 in Hinblick auf Seegrasvorkommen visuell ausgewertet. Die typischen Erscheinungsformen von Seegrasbeständen und ähnlichen Strukturen (Algen, Miesmuscheln etc.) auf Luftbildern werden gezeigt. Die identifizierten Seegrasbestände wurden in ArcView digitalisiert, ihre Fläche berechnet und den Ergebnissen der Felduntersuchungen aus dem gleichen Jahr gegenübergestellt. Ergänzend werden anhand von Beispielen die Möglichkeiten der thematischen Klassifizierung digitaler Bilddaten kurz umrissen.

2 Untersuchungsgebiet und Methode

Das Untersuchungsgebiet umfasst nahezu das gesamte niedersächsische Wattenmeer zwischen Ems und Elbe. In Abb. 2.1 ist eine Übersicht über die Bildmitten der verwendeten Luftbilder und die Lage der im Gelände aufgenommenen Messpunkte der Kartierung 2008 (Adolph 2010) dargestellt. Die visuelle Interpretation der Luftbilder erfolgte am Stereoskop, die weitere Auswertung wurde mit ArcView 9.2 durchgeführt (s.u.).

2.1 Material und technische Ausstattung

Die vorliegende Auswertung basiert auf einem Satz von 455 analogen, nicht entzerrten Echtfarben-Luftbildern im Maßstab 1 : 20.000 vom 31.8.2008 und 11./12.09.2008, der das gesamte niedersächsische Wattenmeer abdeckt (Abb. 2.1). Die Einzelbilder von 23 cm x 23 cm (entspr. 4,6 km x 4,6 km) weisen eine Längsüberlappung von 60% und eine Querüberlappung von 30% auf. Dadurch sind sie zur stereoskopischen Betrachtung geeignet.

Die Auswertung der Luftbilder erfolgte am Stereoskop (Aviopret WILD APT 2) (Abb. 2.3). Als weitere technische Ausstattung wurden Overheadfolien, Folienstifte 0,4 mm, Drucker, Scanner und ein PC mit installiertem Bildbetrachtungs und -bearbeitungsprogramm (IRFAN VIEW; GIMP) sowie GIS-Software (ESRI ArcView 9.2) benötigt.

Für die korrekte Interpretation der Luftbilder wurden die Ergebnisse der Seegraskartierung 2008 (Adolph 2010), der Makroalgenkartierung 2008 (NLWKN) sowie die GIS-Karte der Miesmuschelbestände 2008 (NLPV-WHV 2011) zum Vergleich herangezogen.

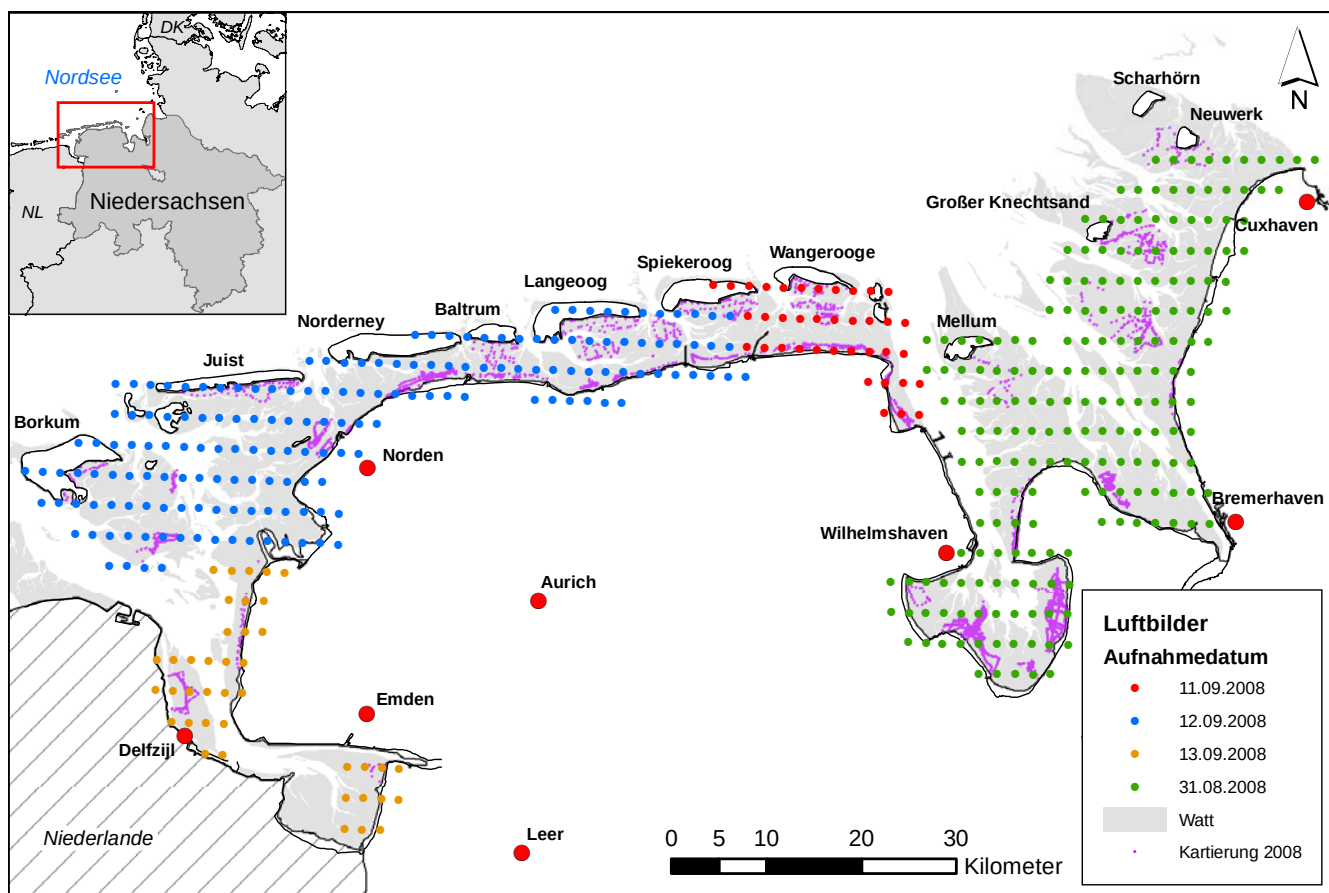


Abb. 2.1: Übersicht über das Bearbeitungsgebiet und Lage der Bildmitten der Luftbilder 2008 und die im Gelände aufgenommenen Messpunkte (Kartierung 2008: Adolph 2010)

2.2 Vorgehensweise bei der Luftbildauswertung

2.2.1 Vorbereitung

Als Grundlage zur Übertragung von Informationen aus der visuellen Luftbild-Interpretation ins GIS wurde eine digitale Arbeitskarte mit einigen Geobasisdaten (Deichlinie, Buhnen, Wattkonturen etc.) hergestellt. Diese Karte wurde mit einem Blattschnitt-Gitter aus rechteckigen Gitterzellen mit den Kantenlängen 3,5 x 5 km² überzogen (Abb. 2.2). Die einzelnen Gitterzellen wurden im Maßstab 1:20.000 auf DIN-A4-Overheadfolie im Hochformat ausgedruckt.

Tab. 2.1: Spezifikationen der Luftbilder

Aufnahmedatum	31.8./11.-12.9.2008
Rohmaterial	Farbnegative
Medium zu Auswertung	analoge Luftbilder – Kontaktabzüge (455 Stück) - Nicht entzerrt
Farbraum	Echtfarben
Maßstab	1 : 20.000 (1 mm entspr. 20 m)
Größe	23 x 23 cm (4,6 x 4,6 km ² ; 21,16 km ²)
Überlappung längs (LÜ%)	± 60 %
Überlappung quer (QÜ%)	± 30%
Kamera	ZEISS RMK TOP 15
Brennweite (f)	153
Film	Agfa AVIPHOT COLOR X 100 PE

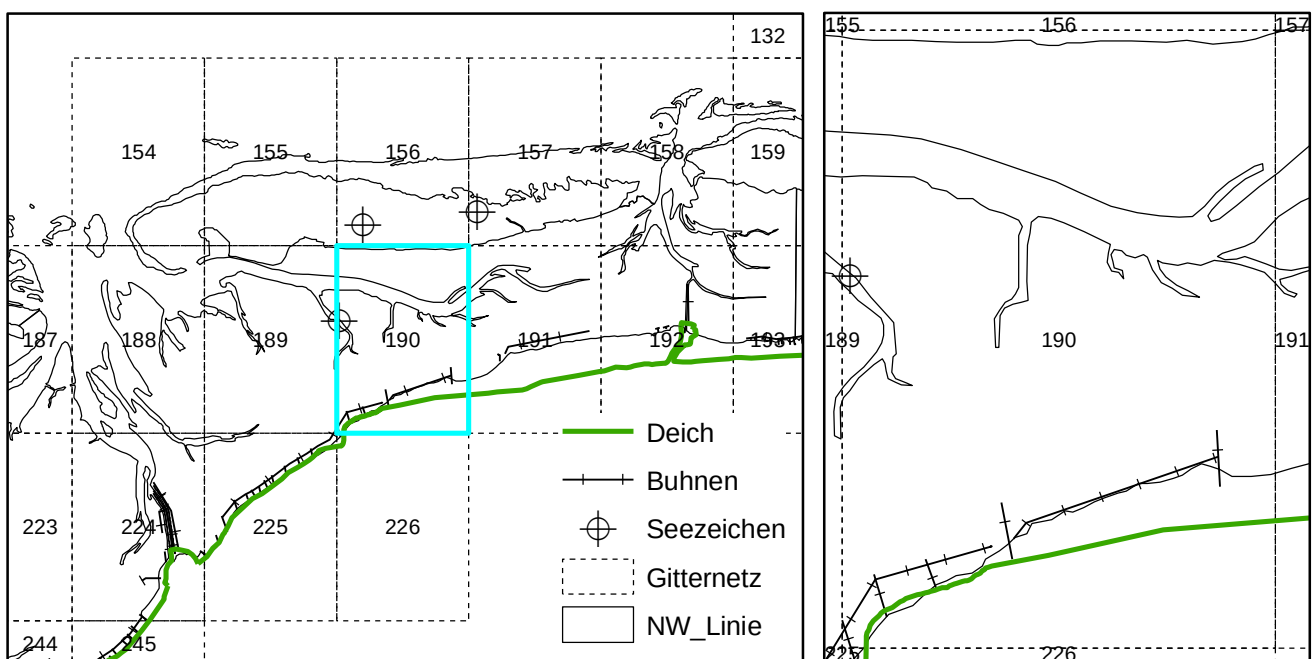


Abb. 2.2: Ausschnitt aus der Arbeitskarte mit Blattschnitt-Gitter und Ansicht einer Einzelfolie



Abb. 2.3: Luftbildauswertung am Stereoskop - Übertragen der Bestandsgrenzen auf Folie

2.2.2 Visuelle Interpretation der Luftbilder am Stereoskop

Für die stereoskopische Betrachtung werden jeweils zwei Luftbilder mit sich überschneidenden Bildinhalten nebeneinander auf die Arbeitsbühne des Stereoskops gelegt und so ausgerichtet, dass der Überschneidungsbereich dem Betrachter als dreidimensionales Bild erscheint (Abb. 2.3).

Die visuelle Interpretation der Luftbilder stützt sich in erster Linie auf die Zuordnung von Farbe, Struktur/Textur und, bei stereoskopischer Betrachtung, Relief. Die Seegraswiesen auf den Wattflächen erscheinen als unregelmäßige Strukturen von mehr oder weniger grünlichem Farbton und wolkiger bis streifiger Textur (Abb. 2.4). Dabei ist die Farbigkeit stark von der Beleuchtung der Aufnahme abhängig. Die Grüntöne des Seegrases können aufgrund von direkter Sonneneinstrahlung oder Einschattung durch Wolkenbedeckung stark variieren. So reicht die mögliche Farbpalette von leuchtend grün über dunkelgrün bis hin zu dunkelgrau. Eine Orientierung am Farbton ist hilfreich, um auf einem Foto verschiedene Florenbestände (z.B. Seegras, Algen, Schlickgras) voneinander zu unterscheiden. Bereits zwischen zwei Fotos desselben Bestandes gibt es aber unter Umständen starke Unterschiede im Farbton identischer Florenbestände.

Innerhalb einer dichten Seegraswiese gibt es außer im Bereich von Prielverläufen auf den Luftbildern kaum Hinweise auf vorhandenes Relief. In den weniger dicht bewachsenen Außenbereichen der Wiesen sind in der stereoskopischen Ansicht Bultenbildung oder Auskolkungen stellenweise deutlich sichtbar. Hier kann man aus dem Relief bzw. der Textur auf Seegras schließen, ohne dass die Farbigkeit einen deutlichen Hinweis gibt (s. Abb. 2.4: Butjadingen West).

Ähnliche Strukturen wie Seegras weisen auf Luftbildern Muschelbänke (auch Brutfall) und Makroalgenbestände auf, beide können überdies Mischbestände mit Seegras bilden. Auch Diatomeenbeläge und dunkle Sände sowie stark strukturierte Misch- und Schlickwatten lassen sich allein aufgrund der Erscheinung im Luftbild nicht immer eindeutig von Seegras abgrenzen (Abb. 2.5). Der Vergleich mit den Ergebnissen früherer Kartierungen – auch z. B. Miesmuschelkartierungen – und aktuellen In-situ-Untersuchungen (Ground-Truth-Daten) ist, neben der Erfahrung des Bearbeiters, hier unverzichtbar.

Bei der vorliegenden Arbeit wurden zunächst einige Luftbilder bekannter Seegrasbestände als Übungsmaterial genutzt, um den Blick zu schulen. Die eigentliche Auswertung erfolgte dann zunächst nur anhand der visuellen Interpretation ohne Berücksichtigung der Ground-Truth-Daten. Diese wurden erst nach abgeschlossener Luftbildinterpretation für den Methodenvergleich herangezogen.

2.2.3 Hochzeichnen der identifizierten Seegrasbestände

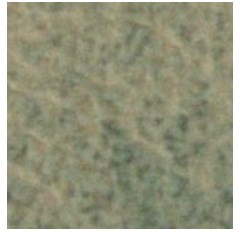
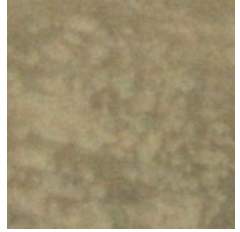
Da die Luftbilder nicht entzerrt sind, werden jeweils möglichst nur die zentralen Bereiche der Fotos ausgewertet. Die auf den Luftbildern identifizierten Seegrasflächen werden auf die vorbereiteten Folien (vgl. 2.2.1) durchgezeichnet, die anhand der aufgedruckten Geobasisinformationen auf dem Luftbild positioniert werden (Abb. 2.2). Die Positionierung der Folie fällt leichter, wenn Landsituation auf den Fotos abgebildet ist. Eine weniger gute Orientierung ist im freien Watt anhand von Prielverläufen und stellenweise Seezeichen möglich. Als zusätzliche Orientierungshilfe können aktuelle GIS-Karten der Miesmuschelbestände herangezogen werden. (Vorzugsweise dieje-

nigen, die aus der Auswertung der gleichen Luftbildreihe entstanden sind).

Beim Hochzeichnen der Bestände auf die Folie führen neben der schwierigen visuellen Interpretation (s.o.) die Verzerrung des Fotos gegenüber der projizierten Karte und die Strichstärke des Folienstiftes zu Ungenauigkeiten. Die Linienstärke des Stiftes, je nach Andruck und Schreibwinkel zwischen 0,5 – 1 mm, entspricht bei dem hier verwendeten Maßstab von 1 : 20.000 zwischen 10 und 20 m im Gelände! Es muss deshalb Sorgfalt darauf gelegt werden, den Zeichenstift immer außen um den identifizierten Seegrasbestand herumzuführen. Das heißt: Die Innenkante der Linie entspricht der Außengrenze der See-

graswiese. So bleibt der Seegrasbereich immer vollständig sichtbar und wird nicht an den Rändern durch die Zeichenlinie verdeckt. Zwischen zwei Dichtebereichen innerhalb einer Wiese wird die Linie jeweils auf dem Bereich mit geringerer Dichte geführt. Die verschiedenen Dichtebereiche werden mit geeigneten Signaturen (oder farblich) gekennzeichnet. Eine Einschätzung der Bedeckung kann anhand von Farbtiefe und Textur erfolgen. In der vorliegenden Arbeit wurden 4 Dichteklassen gebildet: A: „sehr dicht“, B: „dicht“, C: „locker“ D: „sehr locker“ (Tab. 2.2).

Tab. 2.2: Beschreibung der bei der Luftbildauswertung eingesetzten Dichteklassen

Code	Dichte	Beschreibung	Beispiel
A	„sehr dicht“	Dichte, kräftig grün gefärbte Beete, die stellenweise zu größeren Flächen verschmelzen. Fläche der Zwischenräume meist kleiner als besiedelte Fläche. Nach entsprechender Absicherung (Ground Truth) sicherer Hinweis auf Seegrasvorkommen.	
B	„dicht“	Erkennbar grün gefärbte Beete mit $\pm$ großen Zwischenräumen. Nach entsprechender Absicherung (Ground Truth) sicherer Hinweis auf Seegrasvorkommen.	
C	„locker“	Kleinräumige Strukturen (s. „D“) verschmelzen zu größeren Flächen. Stellenweise leichte Grünfärbungen erkennbar. Deutliches Merkmal am Rand von dichteren Wiesen; sonst nur auf Grund von Felduntersuchungen als Hinweis auf Seegras zu deuten. Unsicher!	
D	„sehr locker“	Meist helle $\pm$ kreisförmige Strukturen von wenigen Metern Durchmesser. Nur am Rand von dichter besiedelten Wiesen oder auf Grund von Felduntersuchungen als Hinweis auf Seegras zu deuten. Sehr unsicherer Nachweis!	 — 25 m

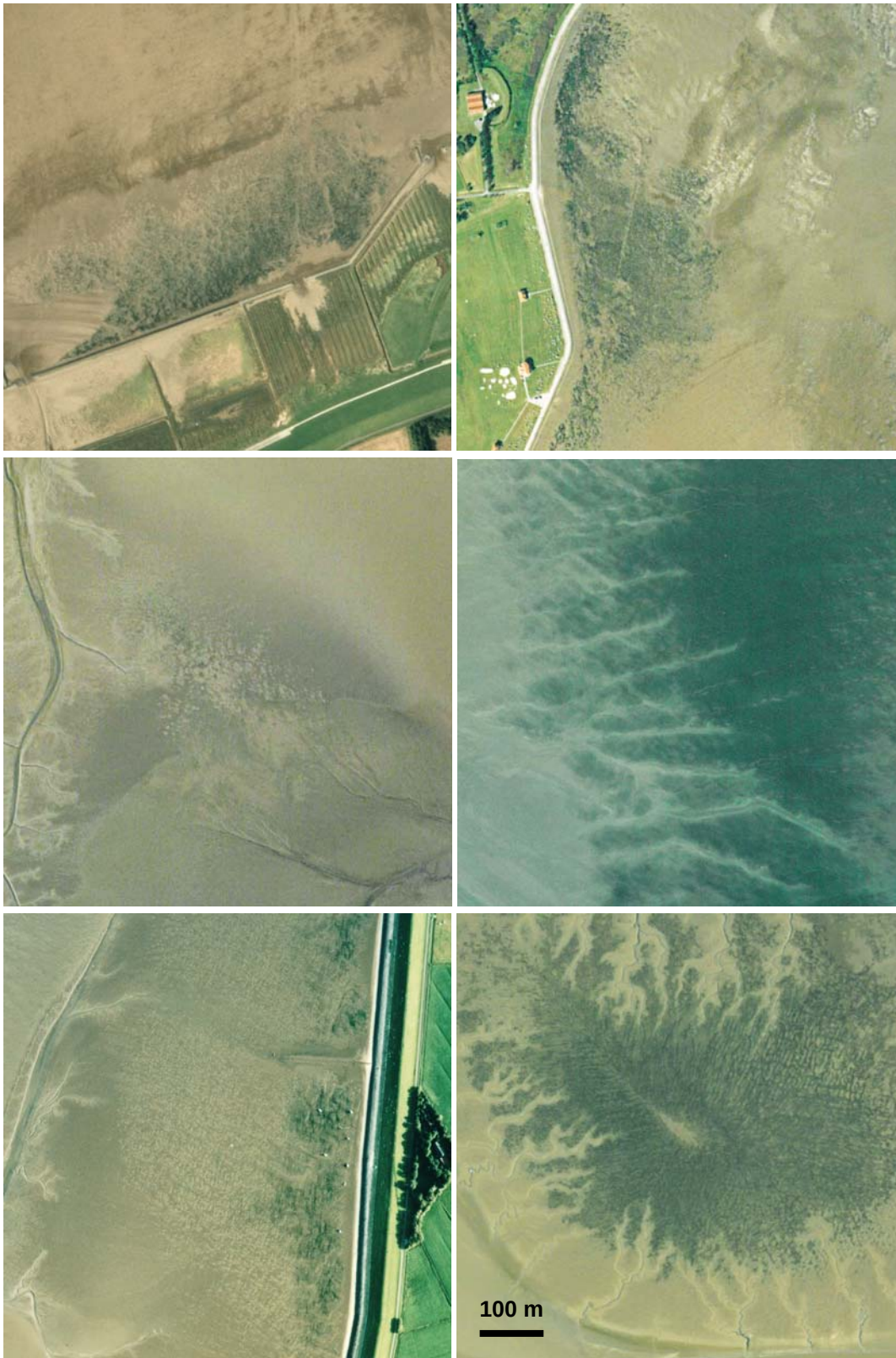


Abb. 2.4: Beispiele für die Strukturen und Farben von Seegras auf Luftbildern
(Vergrößerung entspr. Maßstab 1:10.000)

Ober:	Ostermarscher Watt („Lütetsburger Plate“)	Horumersiel
Mitte:	Hooksiel	Seefelder Watt
Unten:	Butjadingen West	Burhaver Plate

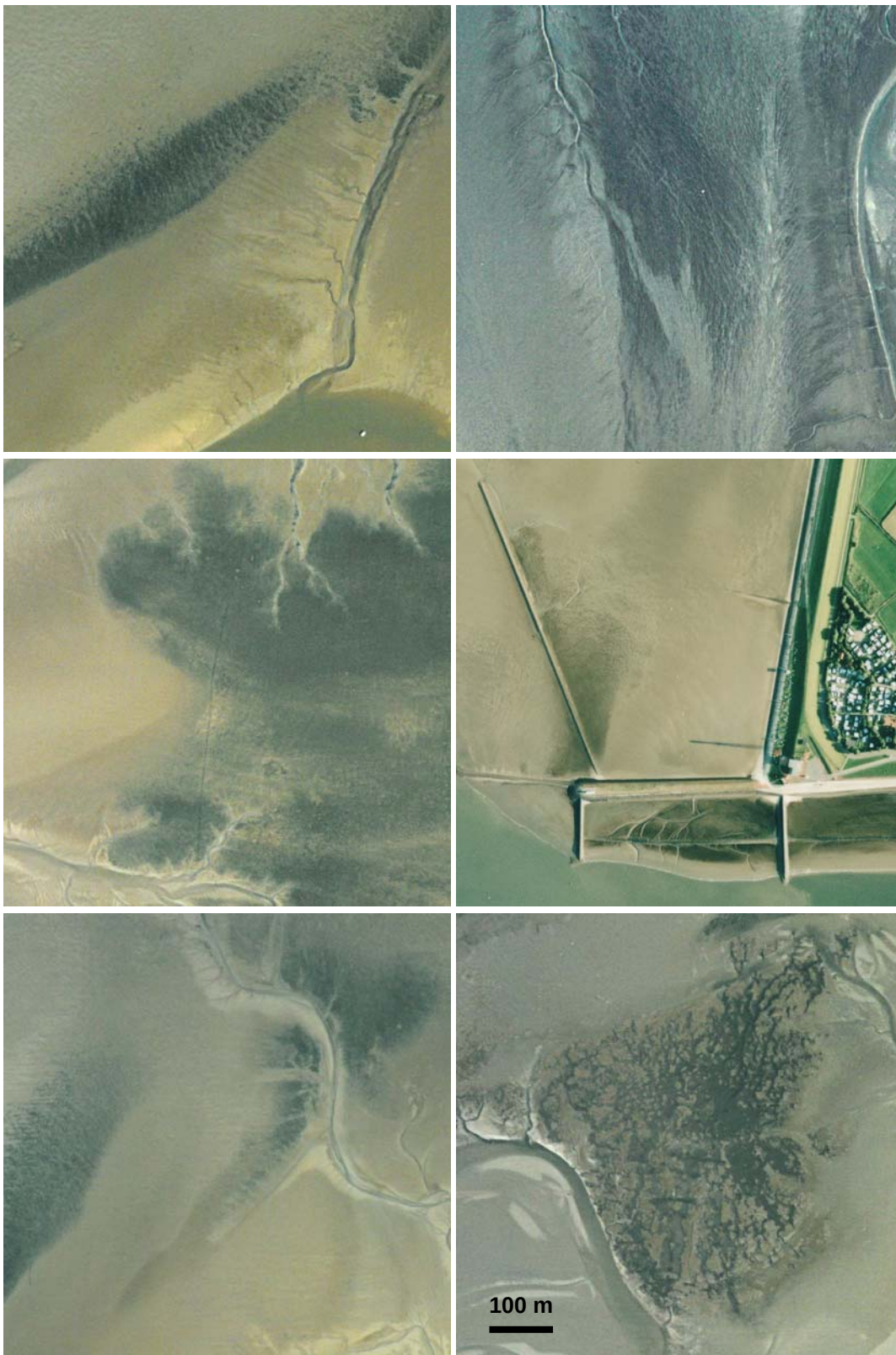


Abb. 2.5: Beispiele für die Strukturen und Farben von Algen (jeweils links), Sedimentrelief (rechts oben), Diatomeen (rechts Mitte) und Muschelbank (rechts unten) auf Luftbildern (Vergrößerung entspr. Maßstab 1:10.000)

Oben:	bei Neuwerk	Jadebusen
Mitte:	Wanger Watt	Eckwarderhörne
Unten:	Großer Knechtsand	Randzel

2.2.4 Übertragung der Interpretationsergebnisse ins GIS

Die fertig gezeichnete Folie wird eingescannt (jpg, 300 dpi, Farbe) und in ArcView mit Hilfe der vier Eckpunkte der „Blattschnitt-Gitterzelle“ georeferenziert. Nun kann die Digitalisierung der eingezeichneten Seegrasflächen am Bildschirm erfolgen. Hierbei werden die Stützpunkte der Polygone auf den Innenrand der auf die Folie gezeichneten Linie gesetzt. Die von den Linien überlagerte Fläche in Seegraswiesen mit verschiedenen Dichtebereichen wird dadurch jeweils dem Bereich geringerer Dichte zugeschlagen. Für die vorliegende Arbeit wurden alle Polygone im Stringmodus mit einem Punktabstand von 10 m im Bildmaßstab 1 : 2.000 digitalisiert (Abb. 2.6). Die Attributierung der einzelnen Polygone enthält u.a. Angaben zum ausgewerteten Luftbild (Bild_Datum, Bild_Linie, Bild_Nr), zum Ort und zur Dichteklasse des *Zostera*-Bestandes (Code s. Tab. 2.2).

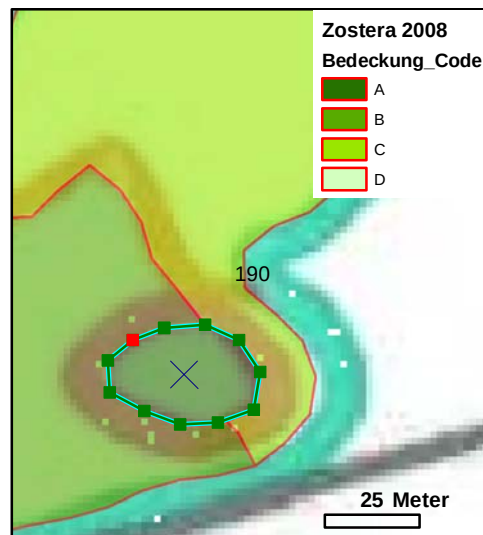


Abb. 2.6: Darstellung einer digitalisierten Seegrasfläche als Polygon mit Stützpunkten - mit der gescannten Folie 190 im Hintergrund (Ausschnitt im Maßstab 1 : 2.000)

Die Darstellung der digitalisierten Seegraswiesen (rote Kontur) ist transparent eingestellt, so dass die auf der Folie gezeichneten, breiten Linien durchscheinen.

X = digitalisierte Seegrasfläche mit Bedeckung „A“ – Der Abstand der hier sichtbar gemachten Stützpunkte der Flächenbegrenzung entspricht 10 m im Gelände.

3 Ergebnisse

Die Seegraskartierung aus Luftbildern soll die folgenden Fragen klären:

- Wie groß war der Gesamtbestand an Seegras 2008 im niedersächsischen Watt auf Grundlage der Luftbildinterpretation?
- Wie waren die Bestände auf Grundlage der Luftbildinterpretation verteilt?
- Wie ist die Übereinstimmung der Luftbildanalyse mit den Ergebnissen der Kartierung im Gelände in Bezug auf Flächengröße, Position und Bewuchsdichte?

3.1 Darstellung der 2008 kartierten Seegrasbestände

In Anlehnung an die Darstellung der Ergebnisse der Geländekartierung (Adolph 2010) werden die Ergebnisse der Luftbildkartierung im Folgenden für die einzelnen Küstenabschnitte von West nach Ost dargestellt. Dabei werden die Ergebnisse der Geländekartierung entsprechend berücksichtigt. Die detaillierte Auswertung der einzelnen Aspekte (Fläche, Dichte, Lage) erfolgt in den Kapiteln 3.2 und 3.3 ab S. 23.

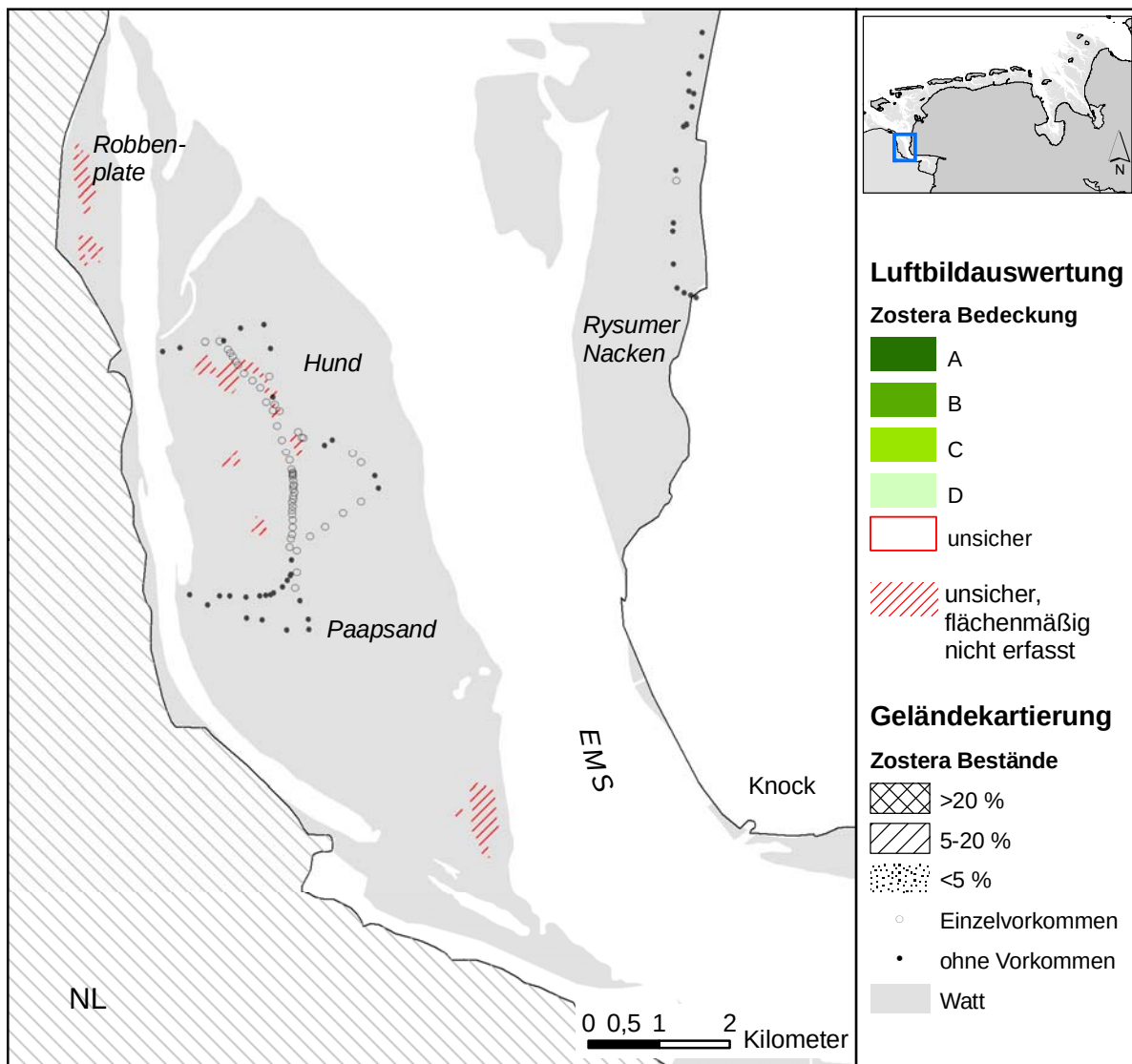


Abb. 3.1: Seegrasvorkommen Emsmündung – Hund, Paapsand und Rysumer Nacken – 2008

3.1.1 Emsmündung bis Leyhörn

Auf den Watten der Emsmündung – Dollart, Hund / Paapsand und Rysumer Nacken (Abb. 3.1) – bis hin zur Leybucht (Leyhörn) wurden auf den Luftbildern keine Seegrasbestände sicher flächenmäßig identifiziert. Stellenweise wurden seegrasverdächtige Struk-

turen registriert, von denen sich einige räumlich decken mit im Gelände kartierten Einzelvorkommen von *Zostera marina*. Auf der Robbenplate an der niederländischen Küste sind vermutlich auch *Mytilus*-Bänke an den Strukturen beteiligt.

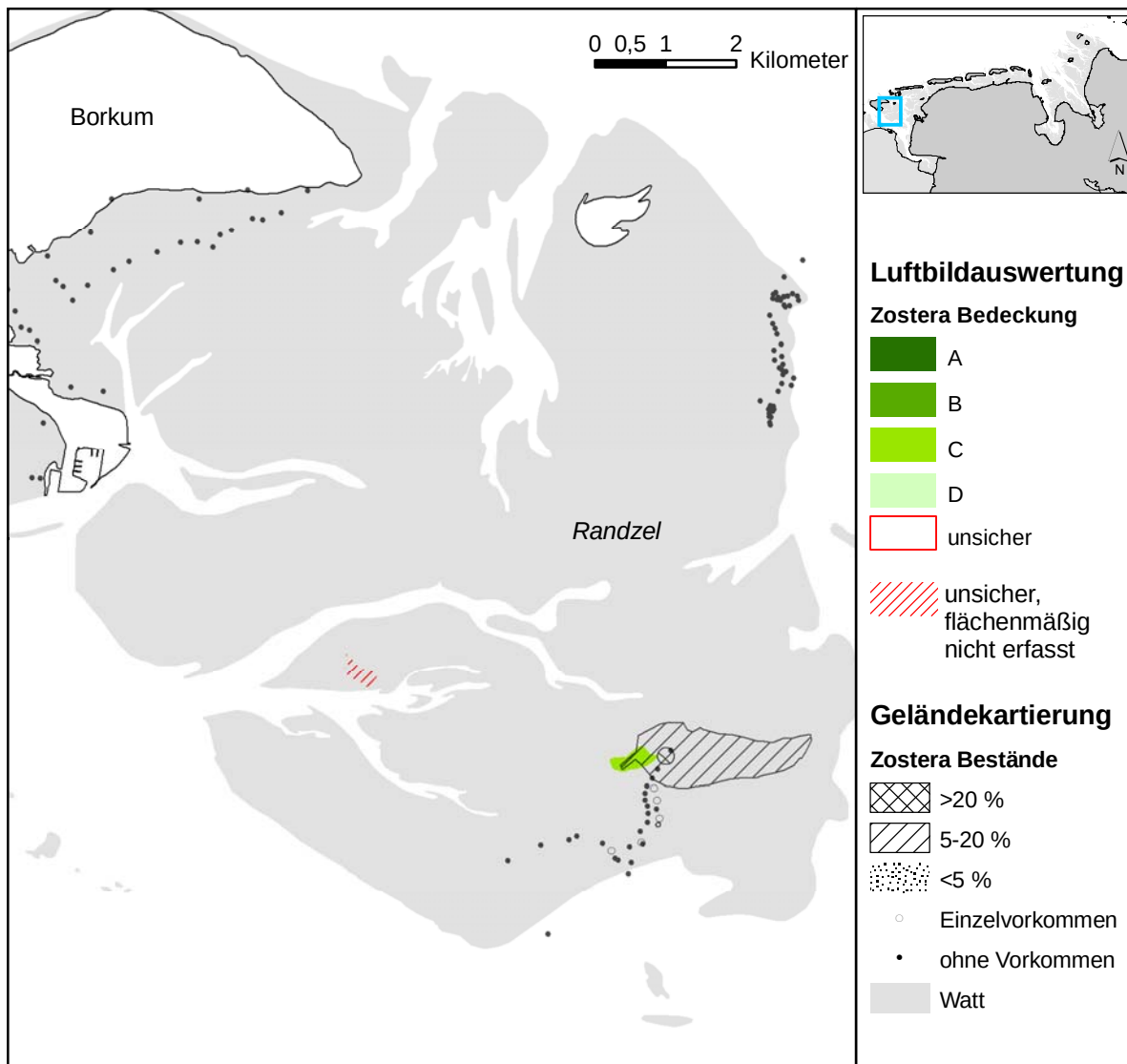


Abb. 3.2: Seegrasvorkommen Randzel – 2008

3.1.2 Randzel

Auf den Luftbildern vom Randzel (Borkumer Watt) wurde ein Seegras-Bestand der Kategorie C von 0,135 km² Größe identifiziert (Abb. 3.2). Er grenzt westlich an das Dichtezentrum der vor Ort eingemessenen Seegraswiese an. Die östlich sich anschließende Seegraswiese wurde auf dem Luftbild jedoch nicht erkannt. Über eine auffällige Struktur knapp 4 km nordwestlich kann wegen fehlender In-situ-Untersuchungen keine genauere Aussage gemacht werden.

3.1.3 Juister Inselwatt

Auf den Luftbildern vom Juister Inselwatt und dem Nordland bei Memmert wurden keine Seegrasstrukturen erkannt. Auch bei der Geländekartierung sind hier nur wenige Einzelnachweise erfolgt.

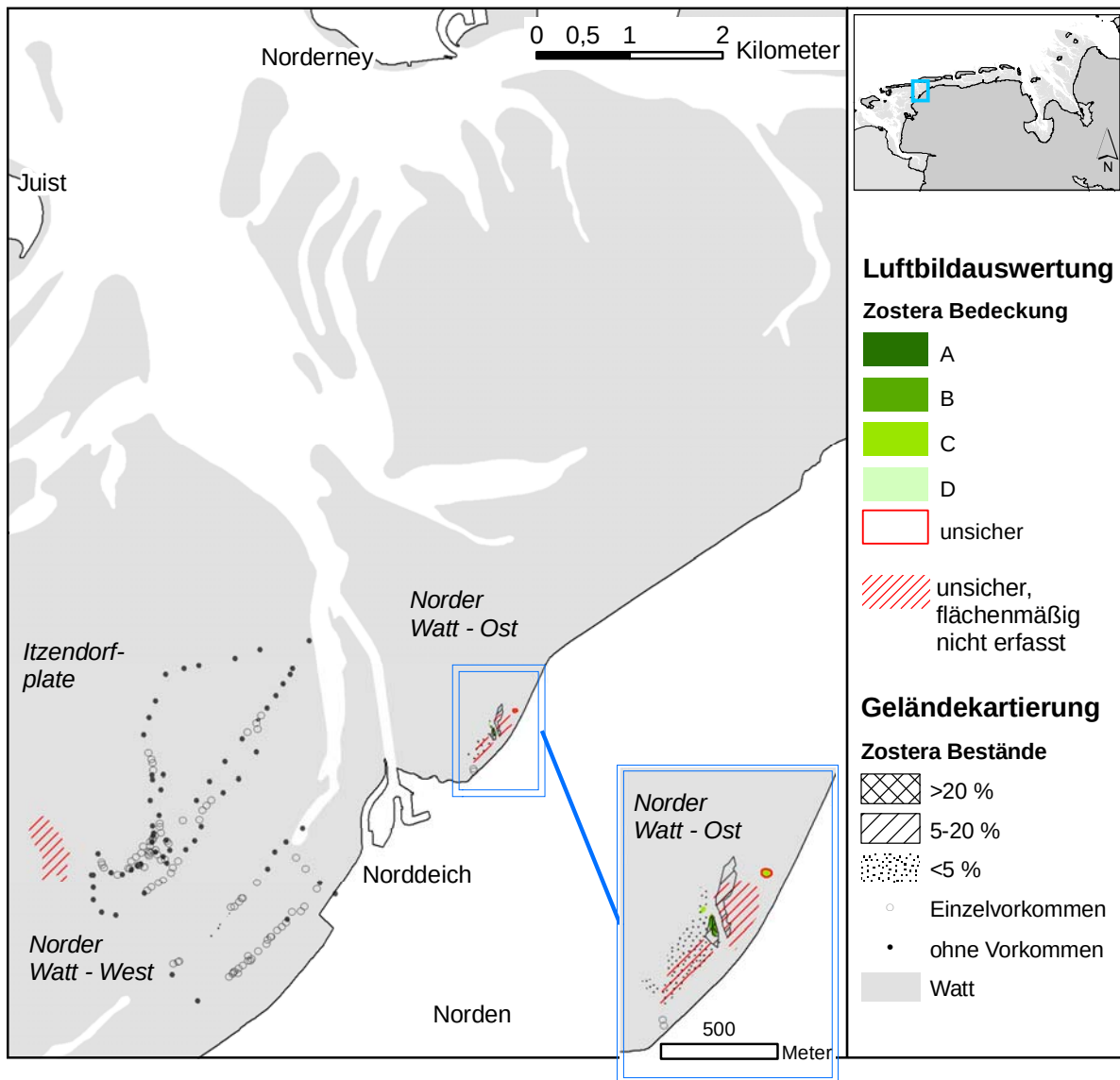


Abb. 3.3: Seegrasvorkommen Norder Watt und Itzendorfplate – 2008

3.1.4 Itzendorfplate und Norder Watt

Auf den Luftbildern aus dem Bereich westliches Norder Watt und Itzendorfplate wurde nur eine seegrasverdächtige Struktur westlich der im Gelände kartierten Vorkommen registriert (Abb. 3.3). Die Fläche, auf der im Gelände gehäuft Einzelvorkommen - und auch ein kleiner Bestand von 0,001 km² Fläche - verzeichnet wurden, erschien auf den Luftbildern hingegen unauffällig.

Im östlichen Norder Watt wurden im Bereich der im Gelände kartierten Seegraswiese auf dem Luftbild seegrasverdächtige Strukturen ausgemacht und insgesamt 0,004 km² Seegrasbestand der Dichtekategorien B und C identifiziert (Abb. 3.3). Davon wurden 0,001 km² als unsicherer Nachweis eingestuft. Die 0,002 km² der Kategorie B decken sich weitgehend mit dem dichteren Kern des bekannten Seegrasbestandes.

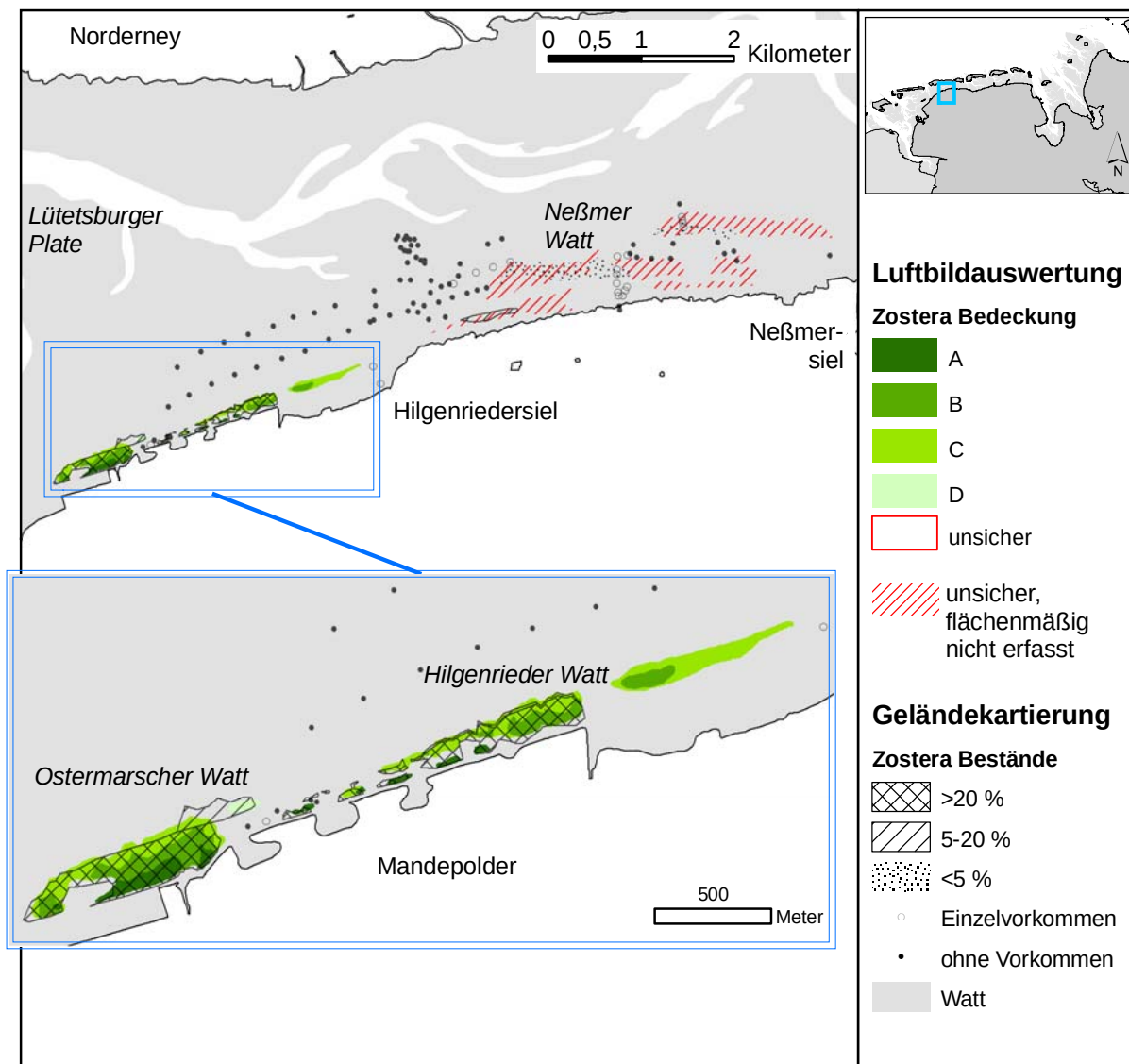


Abb. 3.4: Seegrasvorkommen Ostermarscher, Hilgenrieder und Neßmer Watt – 2008

3.1.5 Lütetsburger Plate bis Neßmersiel

Der Seegrasbestand auf dem Ostermarscher- und Hilgenrieder Watt (einschl. „Lütetsburger Plate“) ist auf den Luftbildern sehr gut erkennbar (Abb. 3.4). Es konnten 9 getrennte Wiesen mit insgesamt 0,27 km² Fläche identifiziert werden. Dabei waren alle 4 Dichtekategorien vertreten. Die im westlichen und mittleren Abschnitt gelegenen Wiesen decken sich räumlich gut mit den Ergebnissen der Kartierung vor Ort. Die weiter östlich gelegene Wiese (Detailkarte Abb. 3.4) war bei der Geländekartierung 2008 nicht aufgenommen worden.

Im Abschnitt Neßmer Watt konnte aus der Luftbildinterpretation kein sicherer Nachweis für Seegras erfolgen. Die seegrasverdächtigen Strukturen konnten räumlich nicht klar abgegrenzt werden. Die flächige Übereinstimmung dieser Strukturen mit vor Ort eingemessenen Seegrasbeständen (<5 % - 20 % Dichte) ist hier nicht durchgängig gegeben. So wurde ein kleiner Bestand von 0,033 km², der aus der Bodenkartierung bekannt ist, auf den Luftbildern nicht sicher gefunden.

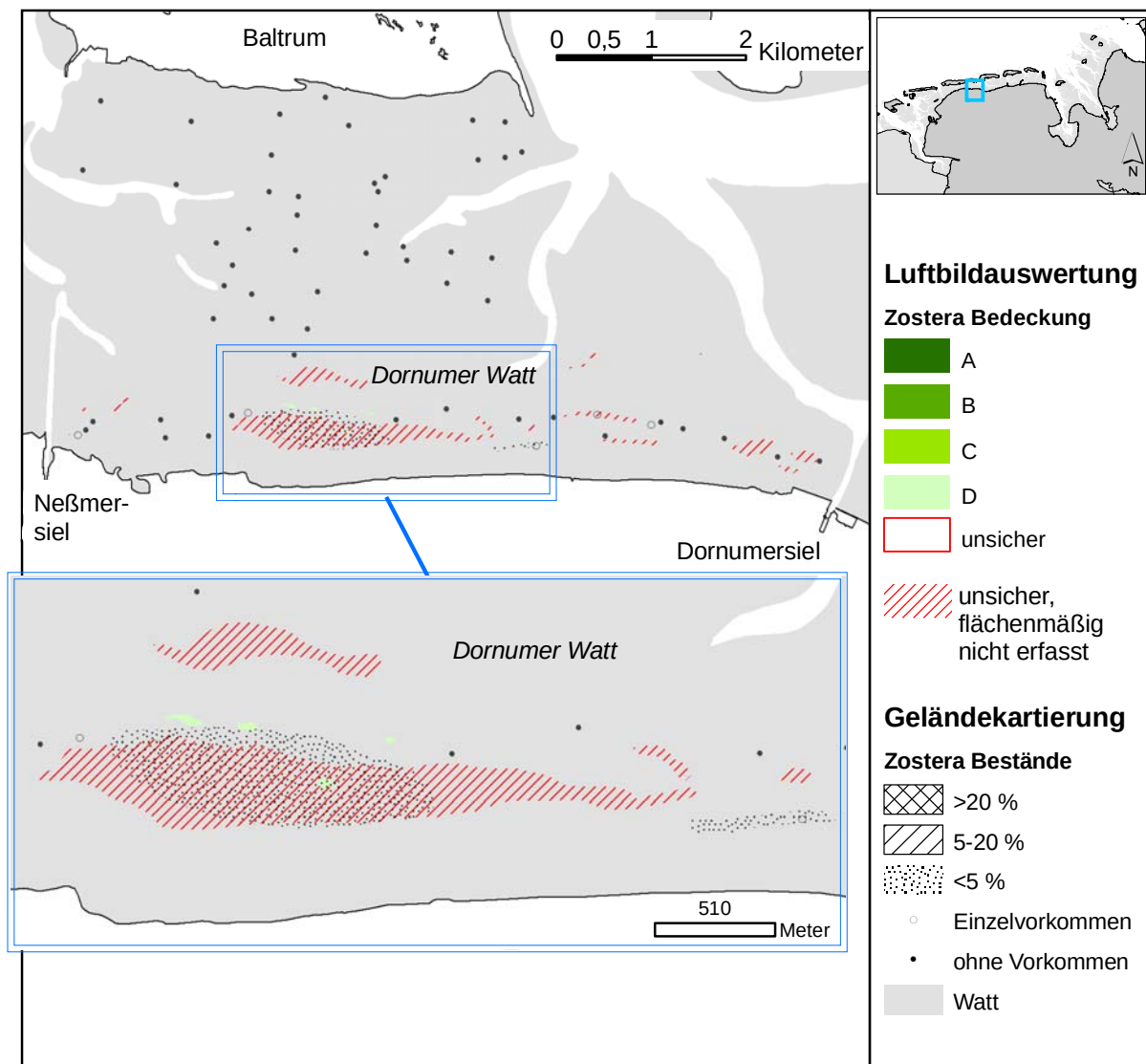


Abb. 3.5: Seegrasvorkommen Dornumer Watt – 2008

3.1.6 Neßmersiel bis Dornumersiel (Dornumer Watt)

Auf den Luftbildern aus dem Bereich Dornumer Watt wurden 4 kleine Seegrasbestände der Kategorie D mit einer Gesamtfläche von 0,09 km² identifiziert (Abb. 3.5). Diese Seegrasflecken, und auch die größte der seegrasverdächtigen Strukturen, liegen in Bereich eines lockeren Seegrasbestands, der vor Ort eingemessen wurde. Ein weiter östlich gelegener lockerer Bestand wurde auf den Luftbildern nicht erkannt.

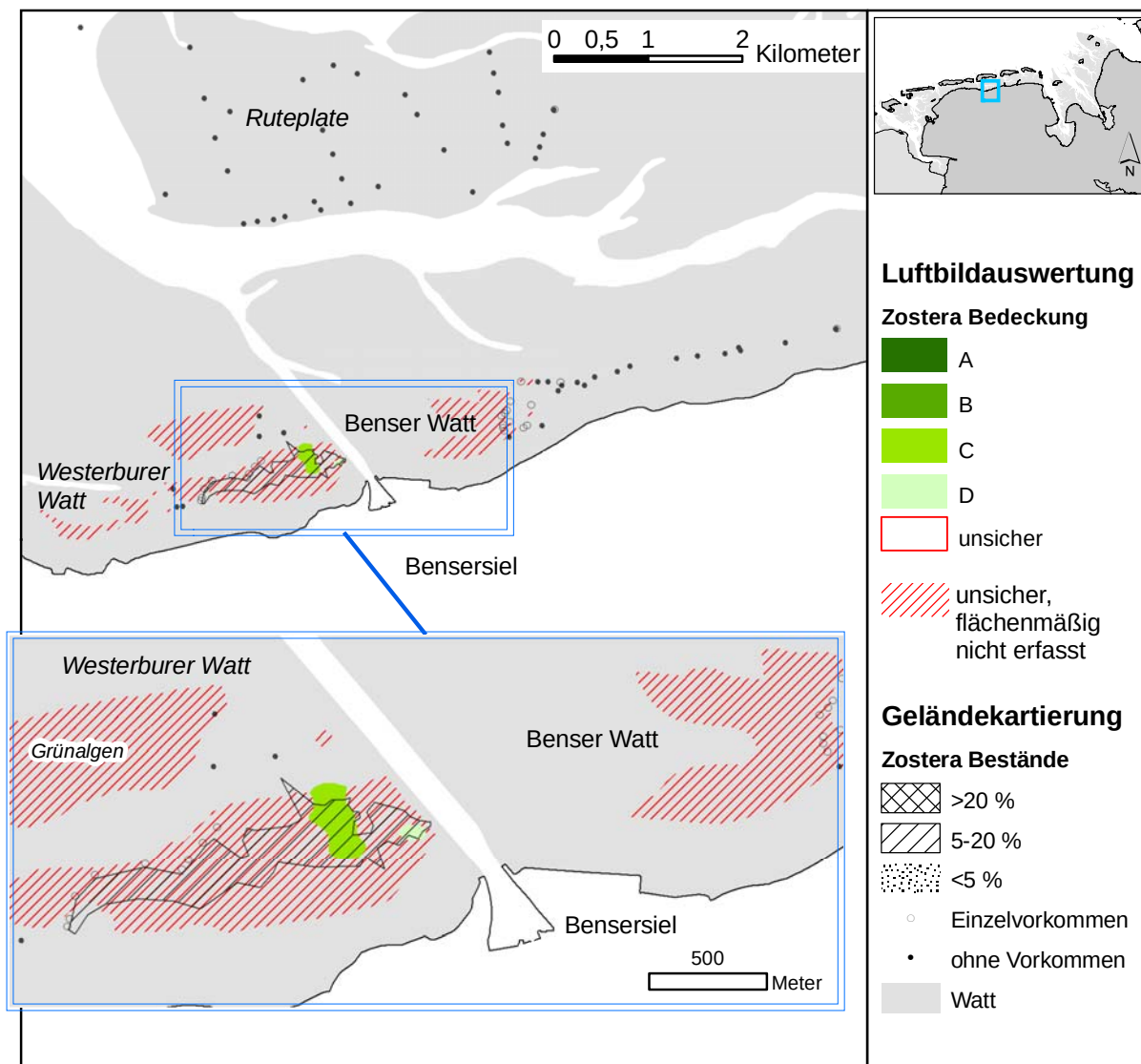


Abb. 3.6: Seegrasvorkommen Westerburer Watt, Benser Watt – 2008

3.1.7 Dornumersiel, Bensorsiel bis Neuharlingersiel

Im Küstenabschnitt zwischen Dornumersiel und Neuharlingersiel konzentriert sich das Seegrasvorkommen auf das Westerburer Watt westlich und das Benser Watt östlich von Bensorsiel (Abb. 3.6). Auf den Luftbildern vom Westerburer Watt wurden zwei Bestände der Kategorien C und D mit einer Gesamtgröße von 0,054 km² identifiziert, beide in der vor Ort kartierten Seegraswiese gelegen. Außerdem wurden einige seegrasverdächtige Strukturen aufgenommen, von denen eine – ein Bereich um die identifizierten Bestände herum – die aus der In-situ-Untersuchung bekannte Seegraswiese großzügig überdeckt. Eine weitere verdächtige Struktur nördlich der Seegraswiese war bereits in einem Luftbild von 2007 (Ritzmann & Herlyn 2007) aufgefallen und stellte sich im Gelände als Ansammlung mit Grünalgen bewachsener Bulten dar (Adolph 2010).

3.1.8 Neuharlingersiel bis Harlesiel

Auf den Luftbildern des Küstenabschnitts zwischen Neuharlingersiel und Harlesiel wurden keine Seegrasbestände identifiziert und keine auffälligen Strukturen gefunden. Auch bei der Geländekartierung wurden hier nur wenige Einzelvorkommen nachgewiesen.

3.1.9 Harlesiel bis Schillig

Auf den Luftbildern vom Harlesieler und Wanger Watt zwischen Harlesiel und Schillig konnte kein Seegras identifiziert werden. Die Bestände, die bei der Geländekartierung eingemessen wurden, waren auf den Luftbildern nicht zu erkennen. Auch waren in diesem Küstenabschnitt keine auffälligen Strukturen festzustellen (Abb. 3.7).

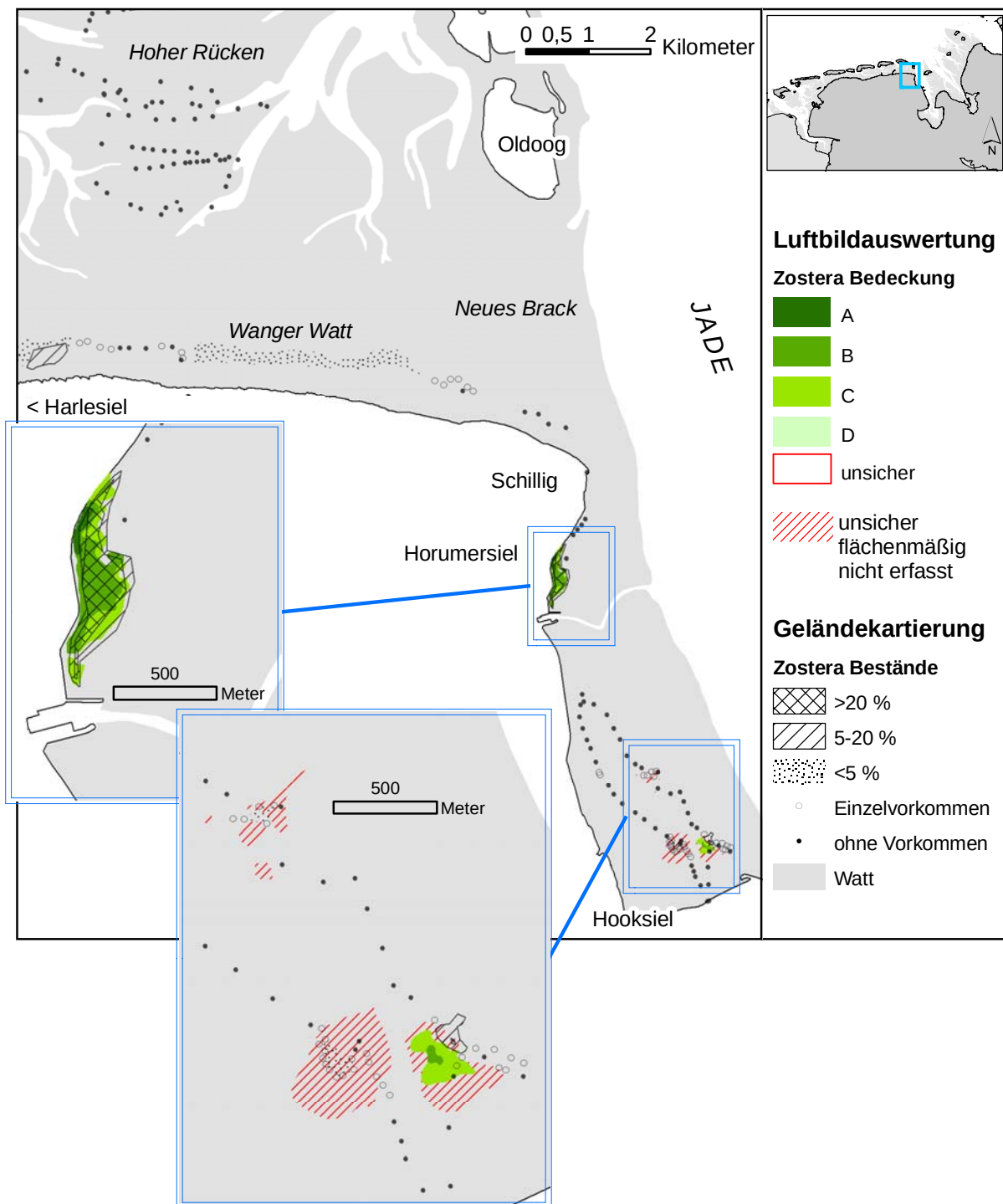


Abb. 3.7: Seegrasvorkommen Wanger Watt, Horumersiel und Hooksiel – 2008

3.1.10 Schillig, Horumersiel bis Hooksiel

In der Wattenbucht zwischen Schillig und Hooksiel wurden auf den Luftbildern zwei aus der Geländearbeit bekannte Seegrasbestände identifiziert (Abb. 3.7). Die Seegraswiese bei Horumersiel mit den Dichtekategorien A, B und C und einer Ausdehnung von 0,136 km² konnte sehr gut abgegrenzt werden. Die Lageübereinstimmung mit der Geländekartierung ist sehr gut. Der Bestand auf dem Watt bei Hooksiel, der etwas verschoben zu der vor Ort eingemessenen

Wiese erscheint, zeigt keine so eindeutige Form. Der Kernbereich mit den Dichtekategorien B und C und einer Ausdehnung von 0,041 km² geht an seinen Rändern in eine unklare Struktur über, die als seegrasverdächtig eingeschätzt wurde. Im Umkreis von bis zu 2 km wurden weitere seegrasverdächtige Strukturen erkannt. Diese kennzeichnen die Bereiche, in denen bei der Geländekartierung gehäuft Einzelbestände verzeichnet wurden.

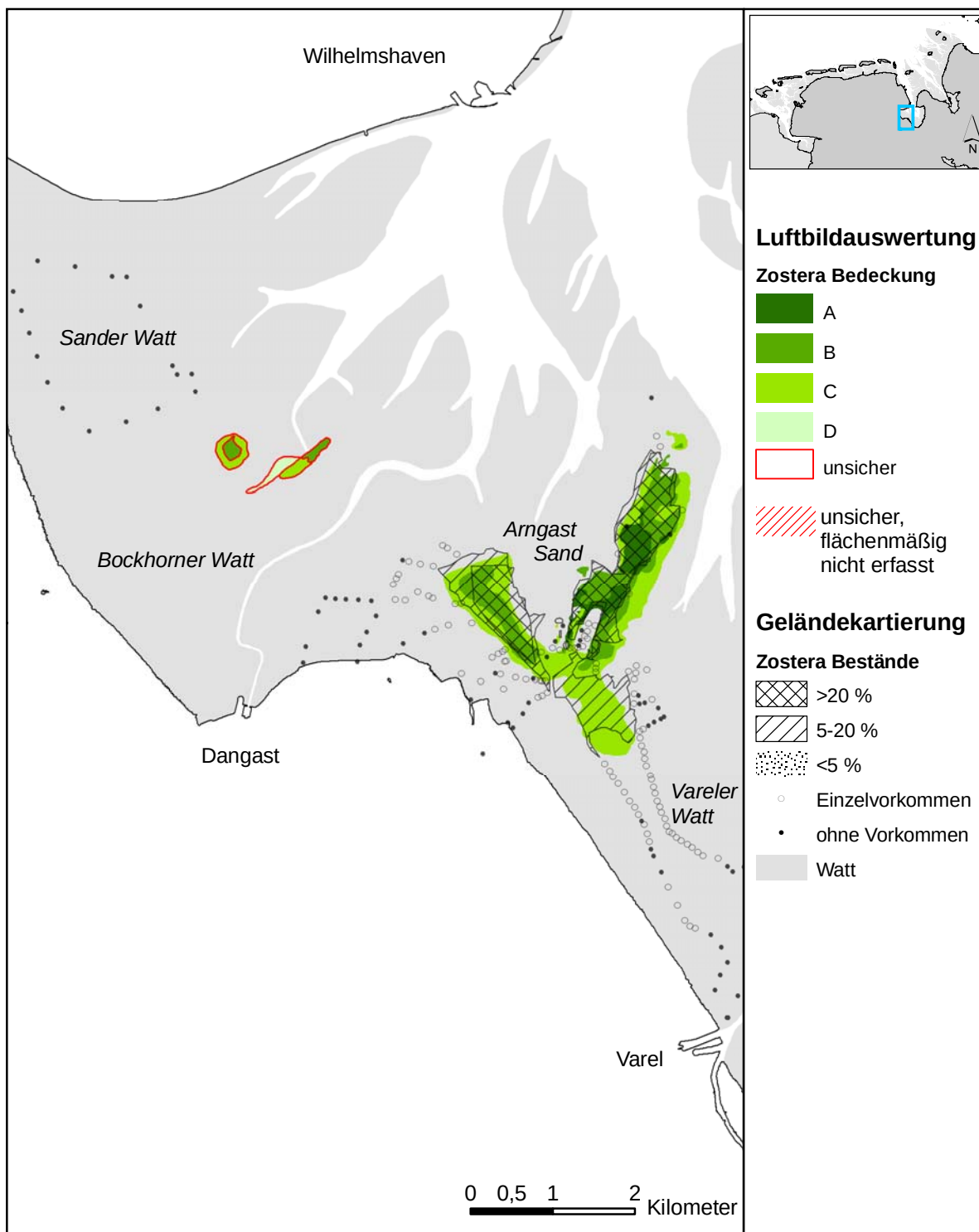


Abb. 3.8: Seegrasvorkommen Jadebusen West – Arngast Sand – 2008

3.1.11 Jadebusen

Der Jadebusen beherbergt mit insgesamt 12,24 km² (Abb. 3.8 u. Abb. 3.9) die ausgedehntesten Seegrasbestände an der niedersächsischen Küste. Dies sind in erster Linie die Seegraswiesen auf dem Seefelder Watt im Osten der Bucht (Abb. 3.9) sowie auf dem Arngast Sand im Westen (Abb. 3.8). Sie umfassen alle vier Dichtekategorien und sind auf den Luftbildern recht gut abzugrenzen, wobei die nördlichen

und südlichen Randbereiche der Wiese im Seefelder Watt etwas unklar auslaufen. Die Lageübereinstimmung mit der Geländekartierung ist insgesamt gut. Auf den Luftbildern vom südlich gelegenen Schweiburger Watt wurden außer einer Wiese, die aus der Geländekartierung bekannt ist, zwei weitere kleine Flächen als Seegras identifiziert. Dieser Befund ist allerdings wegen mangelnder Geländedaten noch unsicher. Das gleiche gilt für zwei Strukturen im Sander/Bockhorner Watt im Westen.

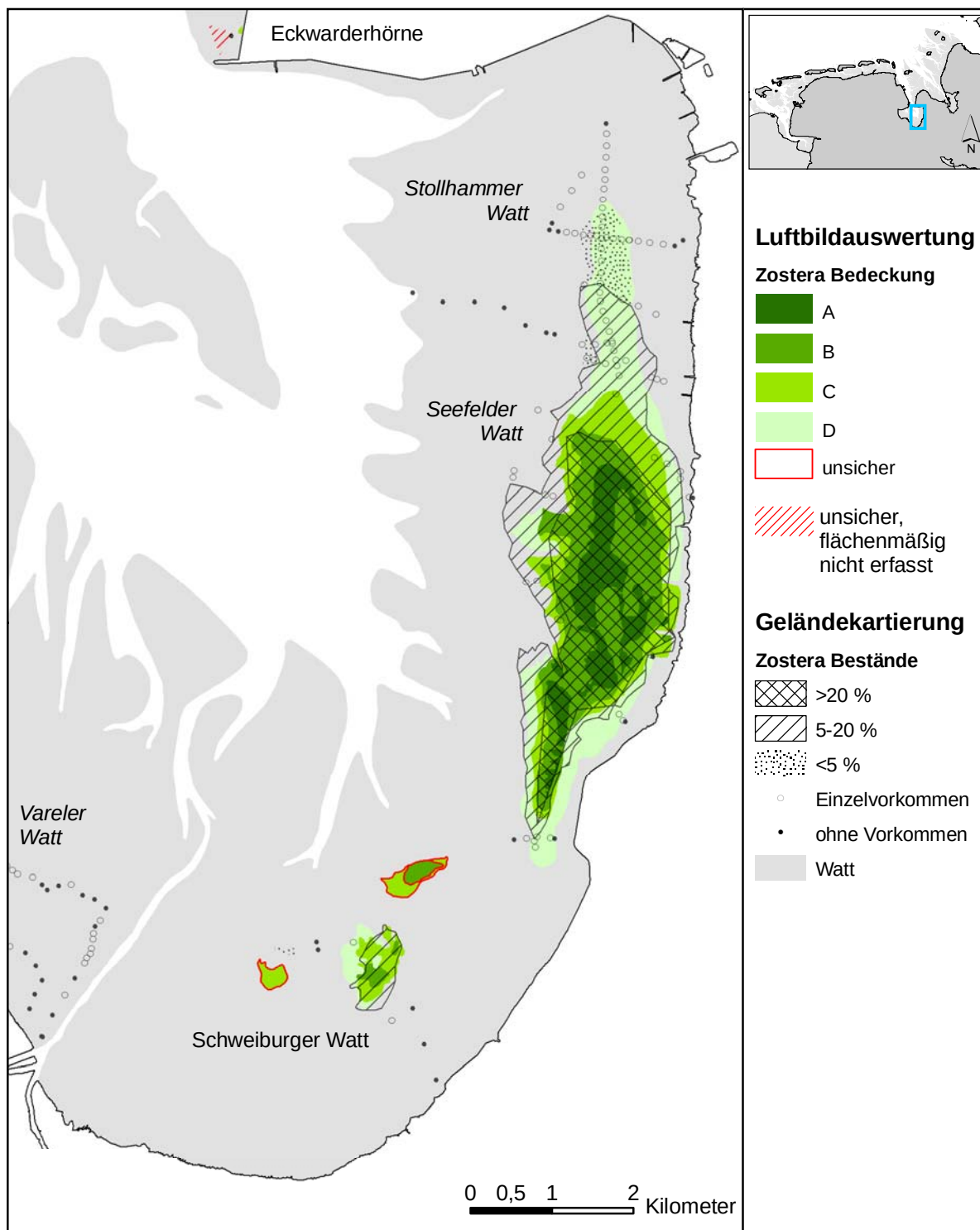


Abb. 3.9: Seegrasvorkommen Jadebusen Süd und Ost – Schweiburger Watt, Seefelder Watt – 2008

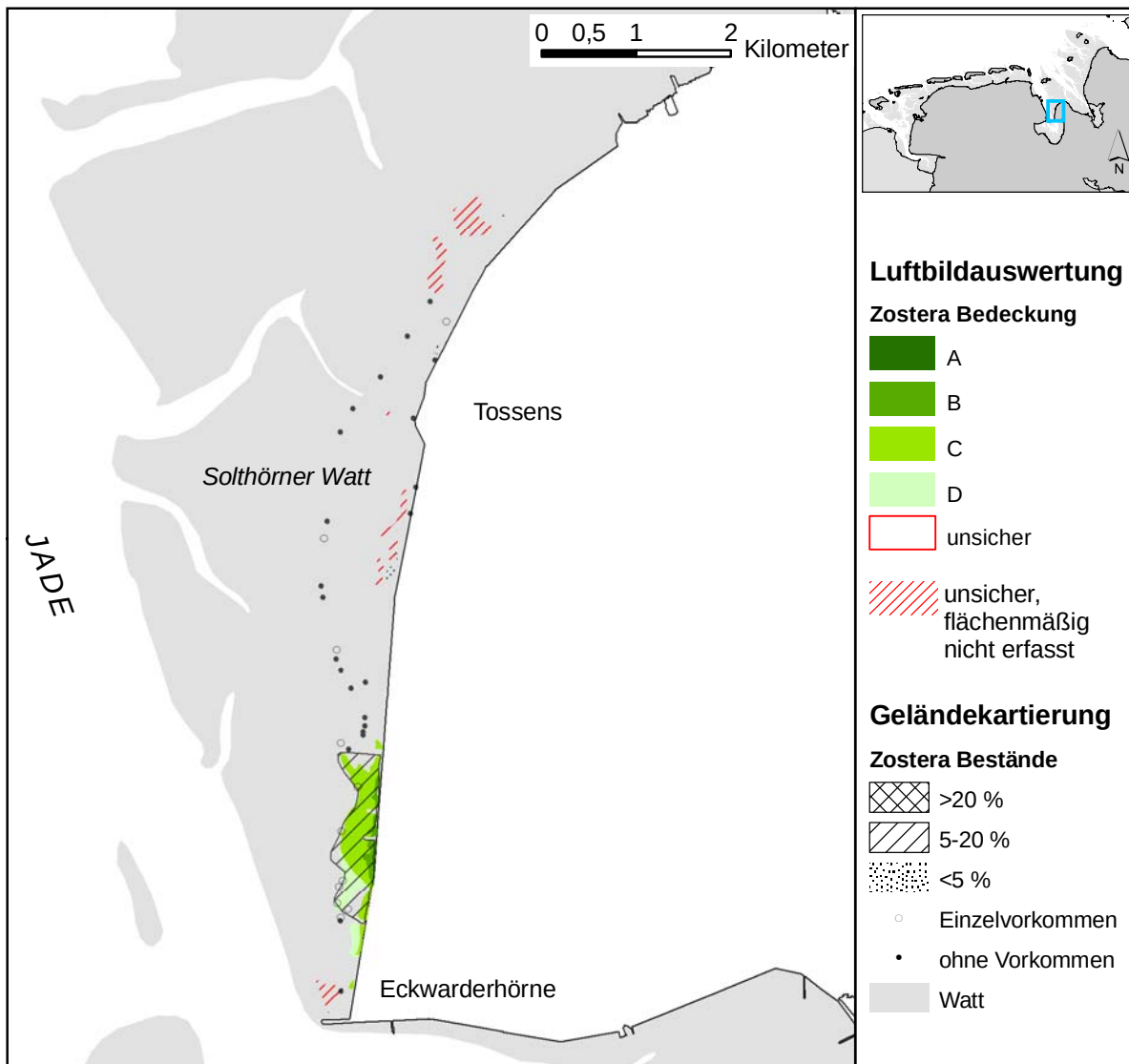


Abb. 3.10: Seegrasvorkommen Butjadingen West – Solthörner Watt – 2008

3.1.12 Westküste Butjadingen

Auf den Luftbildern vom Solthörner Watt an der Westküste von Butjadingen wurde in der Nähe von Eckwarderhörne ein Seegrasbestand von 0,523 km² identifiziert (Abb. 3.10). Er besteht aus einer größeren zusammenhängenden Wiese und einigen kleinen Flächen. Seine Dichte wurde den Kategorien B, C und D zugeordnet. Die Lage des Bestandes stimmt mit der vor Ort eingemessenen Wiese recht gut überein, wobei seine Ausdehnung Richtung Süden etwas abweicht. Nördlich der Wiese in zwei und fünf Kilometer Entfernung wurden einige seegrasverdächtige Strukturen gefunden, die aber nicht flächenmäßig erfasst wurden. Eine dieser Strukturen liegt bei einem lockeren Seegrasvorkommen, über die anderen sind keine Vor-Ort-Informationen bekannt.

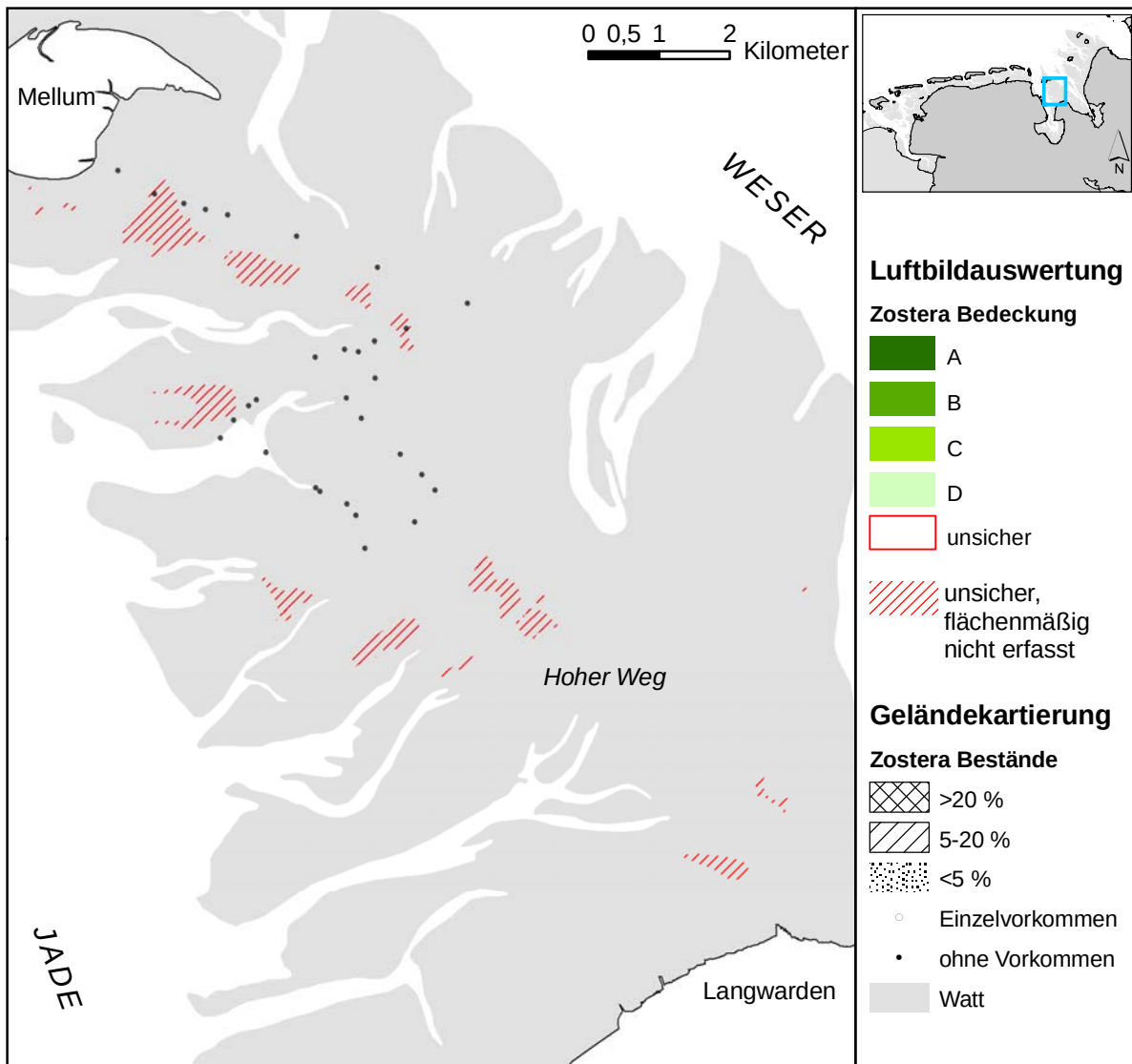


Abb. 3.11: Seegrasvorkommen Hoher Weg – 2008

3.1.13 Hoher Weg

Auf den Luftbildern der Hohe-Weg-Watten zwischen Mellum und der Küste Butjadingens wurden einige seegrasverdächtige Strukturen aufgenommen, jedoch keine Seegrasbestände sicher identifiziert (Abb. 3.11). Auch aus den aktuellen Geländeuntersuchungen sind hier keine Seegrasbestände bekannt.

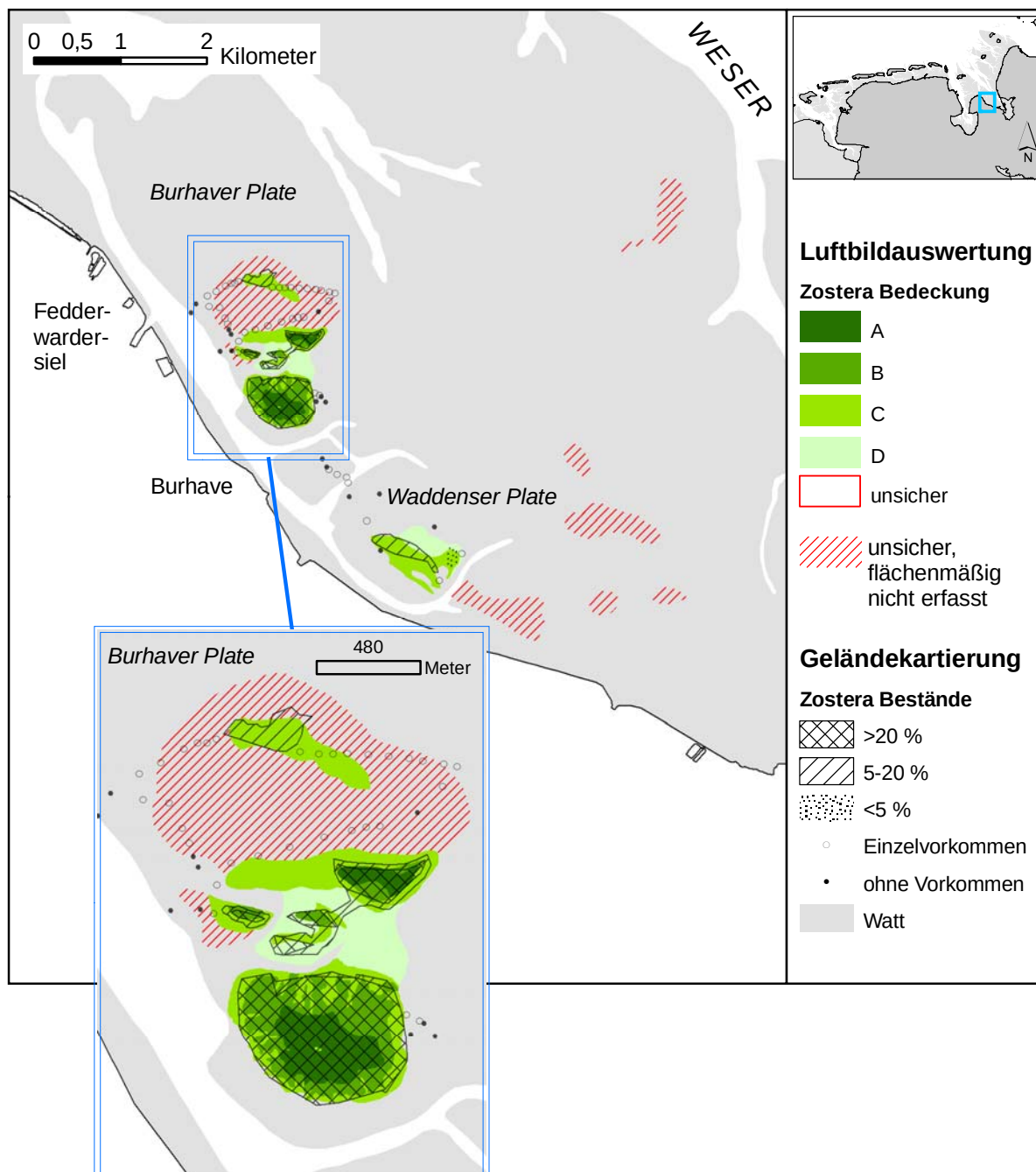


Abb. 3.12: Seegrasvorkommen Butjadingen Ost / Wesermündung – Burhaver und Waddenser Plate – 2008

3.1.14 Ostküste Butjadingen – Wesermündung

Auf den Luftbildern von den Weserwatten an der Ostküste von Butjadingen (Burhaver Plate und Waddenser Plate) wurden Seegrasbestände der Kategorien A bis D von insgesamt 1,312 km² identifiziert (Abb. 3.12). Hinzu kommen einige seegrasverdächti-

ge Strukturen, von denen eine den Bereich der vor Ort kartierten Einzelbestände bezeichnet. Bei den dichteren Kernbereichen der Seegraswiese auf der Burhaver Plate ist die Lageübereinstimmung mit der Geländekartierung sehr gut. In den äußeren Bereichen und bei dem Bestand auf der Waddenser Plate gibt es hingegen größere Abweichungen.

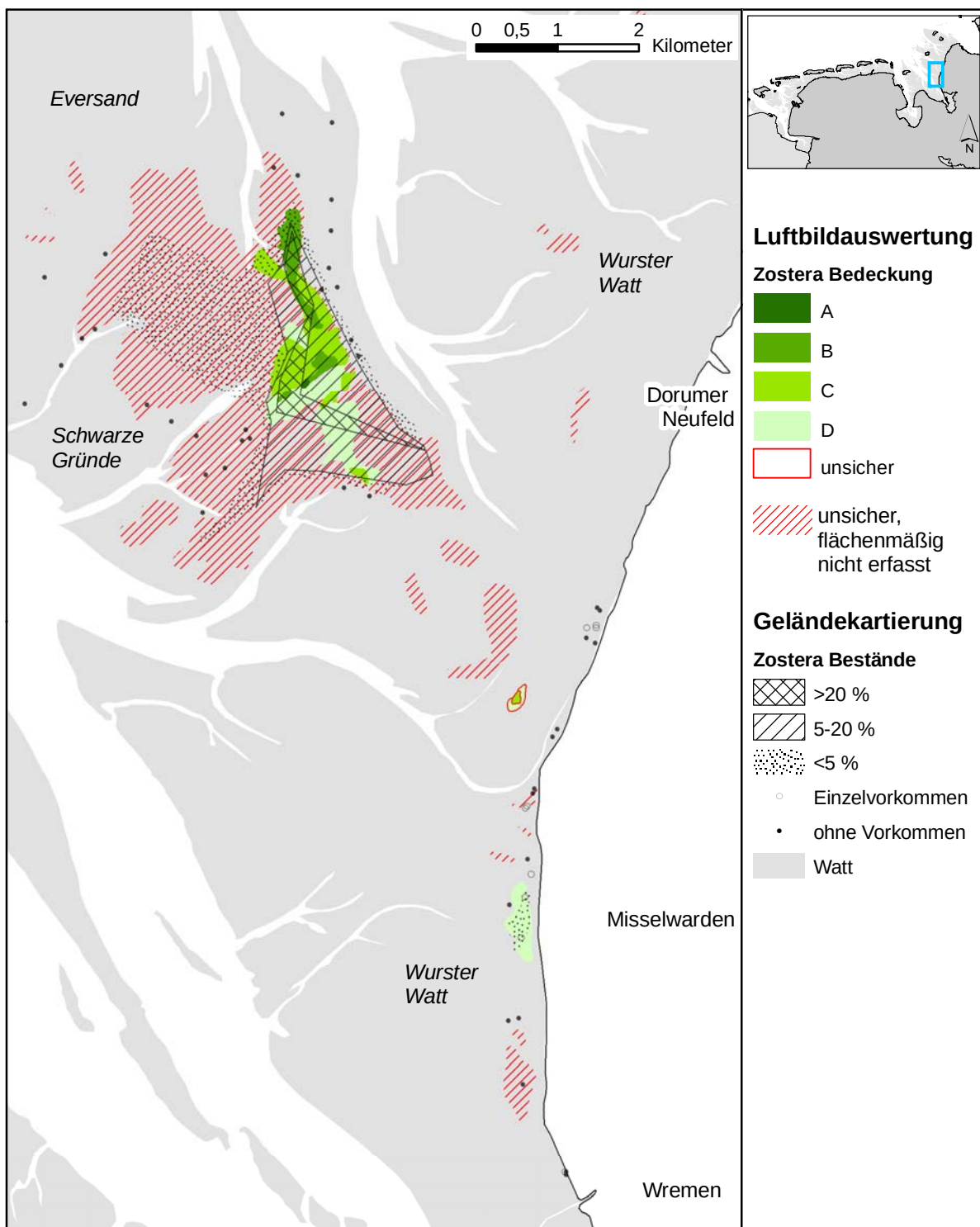


Abb. 3.13: Seegrasvorkommen Wurster Watt und Eversand (Schwarze Gründe) – 2008

3.1.15 Wurster Küste und Eversand

Auf den Luftbildern vom Wurster Watt wurden zwischen Wremen und Dorumer Neufeld zwei Seegrasbestände der Kategorien C und D von insgesamt 0,247 km² identifiziert (Abb. 3.13). Die im südlichen Abschnitt in der Höhe von Misselwarden gelegene Seegrasfläche zeigt eine gute Lageübereinstimmung mit einem lockeren Bestand, der vor Ort eingemes-

sen wurde. Für den anderen Bestand, 2 km nördlich hiervon gelegen, gibt es keine Geländeinformationen. Dieser Seegrasnachweis wurde deshalb als „unsicher“ eingestuft.

Der Seegrasbestand auf dem Eversand (Schwarze Gründe), der durch die Vor-Ort-Untersuchungen bekannt ist, konnte auf den Luftbildern gut erkannt werden, wenngleich die Abgrenzung schwierig war. So

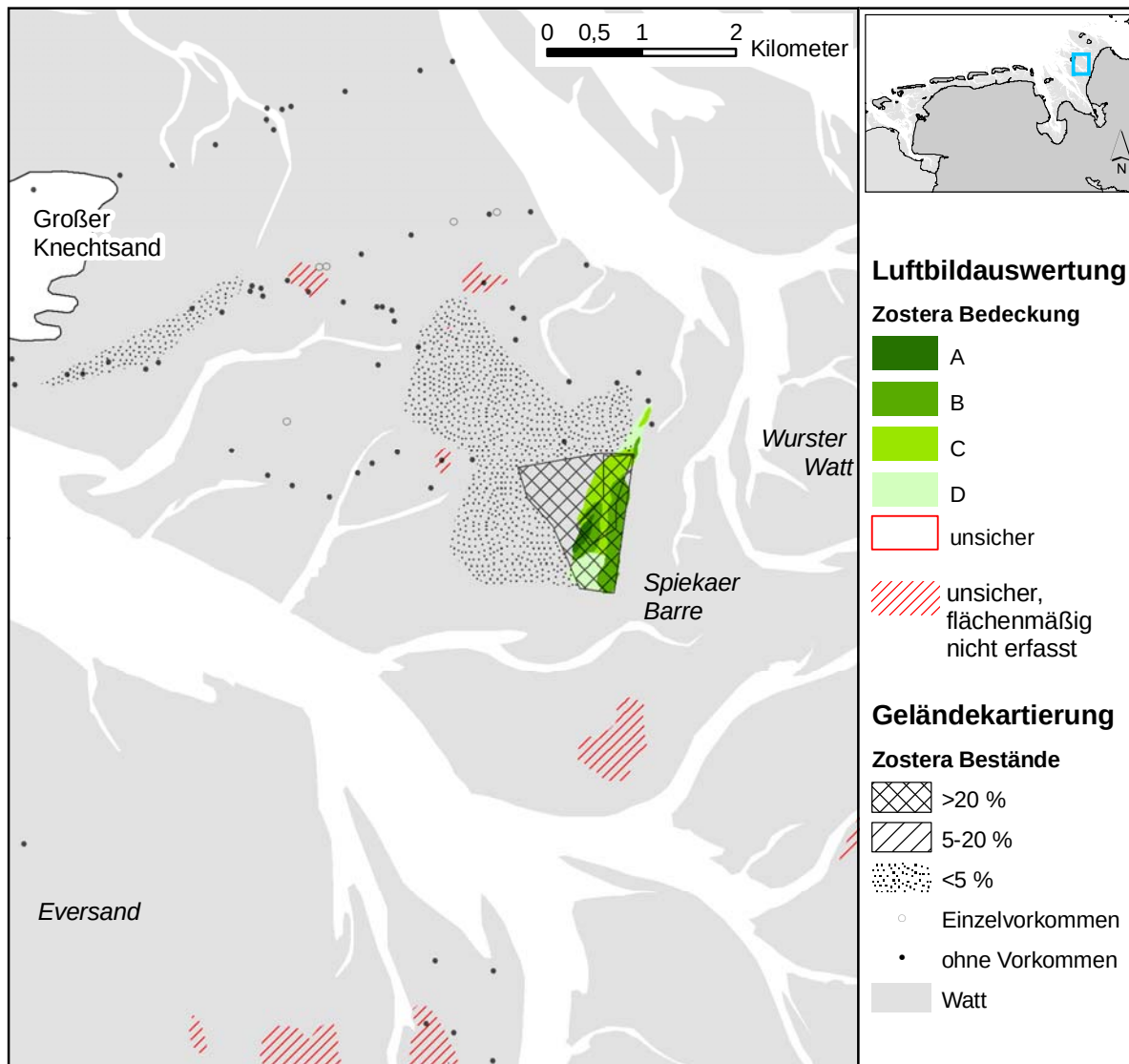


Abb. 3.14: Seegrasvorkommen Knechtsand Watten, Spiekaer Barre – 2008

wurde zwar ein ausgedehntes Gebiet als seegrasverdächtig eingeschätzt, flächenmäßig erfasst wurde jedoch nur der Kernbereich von 1,699 km². Hier waren alle vier Dichtekategorien vertreten (Abb. 3.13).

3.1.16 Knechtsand

Auf den Luftbildern der Knechtsandwatten wurde eine Seegraswiese von 0,716 km² Fläche identifiziert (Abb. 3.14). Sie umfasst alle vier Dichtekategorien. Die östliche und südliche Begrenzung der Wiese stimmt mit der Vor-Ort-Kartierung überein. Nach Westen und Norden ist die Lageübereinstimmung weniger gut. Vor allem die Ausdehnung der Wiese in westlicher Richtung ist auf dem Luftbild nicht erkennbar. Auch die unmittelbar östlich des Großen Knechtsands gelegene Fläche mit gehäuften Einzelnachweisen ist auf den Luftbildern unauffällig.

Von zahlreichen seegrasverdächtigen Strukturen im Gebiet können einige durch die Vor-Ort-Untersuchungen als Grünalgenbestände klassifiziert werden. Diese werden in den Karten nicht dargestellt.

3.1.17 Neuwerk

Auf den Luftbildern vom Neuwerker Watt und dem Sahlenburger Watt wurden keine Seegrasstrukturen erkannt. Auch bei der Geländekartierung sind hier nur wenige Einzelvorkommen nachgewiesen worden. Einige seegrasverdächtige Strukturen westlich vor Neuwerk wurden durch Informationen aus Vor-Ort-Untersuchungen als Grünalgen bewertet und nicht in die Karte übernommen. (Abb. 2.5, S. 7 oben links).

3.2 Gesamtfläche und räumliche Verteilung der auf Luftbildern identifizierten Seegrasbestände

Die Flächengrößen der auf den Luftbildern des Jahres 2008 identifizierten Seegrasbestände sind in Tab. 3.1 - getrennt nach Dichteklassen und Standorten, sowie jeweils aufsummiert - aufgelistet. Die Gesamtfläche aus allen Dichteklassen beträgt 17,38 km². Darin enthalten sind einige als „unsichere Nachweise“ klassifizierte Flächen von insgesamt 0,58 km². Diese Flächen in den Gebieten Norder Watt - Ost, Sander Watt, hier ist es der gesamte identifizierte Bestand (Abb. 3.8), Schweiburger Watt und Wurster Watt waren auf Grund von Farbe und Struktur im Luftbild als „seegrasverdächtig“ eingeschätzt worden, konnten aber wegen fehlender Feldinformationen nur als unsicherer Seegrasnachweis gelten. Im Gesamtgebiet wurde darüber hinaus eine ganze Reihe weitere

Strukturen als „auffällig“ notiert, aber nicht flächenmäßig erfasst, da hier die Unsicherheit der Bildinterpretation zu groß war. Ihre Lage wurde dennoch im GIS festgehalten.

Die größte zusammenhängende Seegrasfläche ist mit 8,1 km² die Wiese im Seefelder Watt im Jadebusen. Weitere große Bestände sind auf dem Arngast Sand (3,1 km²; ebenfalls im Jadebusen) und auf dem Eversand (1,7 km²) im Bereich der Außenweser zu finden. Die kleinste aus den Luftbildern kartierte Einzelfläche hat eine Größe von 500 m².

Den größeren Anteil von 61% der Gesamtfläche haben die locker bis dünn besiedelten Bestände der Klassen C (6,2 km² / 35 %) und D (4,6 km² / 26 %). Dichte und sehr dichte Bestände machen zusammen 39 % der Gesamtfläche aus (B: 4,8 km² / 28 %; A: 1,9 km² / 11 %).

Tab. 3.1: Flächengrößen der Seegrasbestände 2008 nach Luftbildinterpretation

Standorte (von West nach Ost)	Seegras - Fläche (km ²)				
	Summe	Dichteklasse**			
		A	B	C	D
Randzel	0,135	0,000	0,000	0,135	0,000
Norder Watt - Ost	0,004*	0,000	0,002	0,002*	0,000
Ostermarscher Watt	0,208	0,036	0,071	0,097	0,004
Hilgenrieder Watt	0,059	0,000	0,013	0,046	0,000
Dornumer Watt	0,009	0,000	0,000	0,000	0,009
Westerburer Watt (Bensersiel)	0,054	0,000	0,000	0,048	0,006
Horumersiel	0,136	0,008	0,075	0,053	0,000
Hooksiel	0,041	0,000	0,004	0,037	0,000
Sander Watt	0,277*	0,000	0,075*	0,135*	0,067*
Arngast Sand	3,070	0,348	1,030	1,692	0,000
Schweiburger Watt	0,755*	0,000	0,154*	0,412	0,189*
Seefelder Watt	8,135	1,325	2,506	1,553	2,751
Butjadingen West (Eckwarderhörne)	0,523	0,000	0,058	0,354	0,111
Burhaver Plate	0,900	0,148	0,202	0,383	0,167
Waddenser Plate	0,412	0,000	0,000	0,271	0,141
Wurster Watt	0,247*	0,000	0,000	0,012*	0,235*
Eversand (Schwarze Gründe)	1,699	0,009	0,328	0,699	0,663
Knechtsand (Spikaer Barre)	0,716	0,037	0,298	0,221	0,160
Summe	17,38*	1,91	4,82*	6,15*	4,50*
darin „unsichere“ Nachweise	0,58	0,00	0,15	0,15	0,28
Sichere Nachweise	16,80	1,91	4,66	6,00	4,22

** Dichteklassen A-D siehe Tab. 2.2, S. 5 * enthält „unsichere“ Nachweise

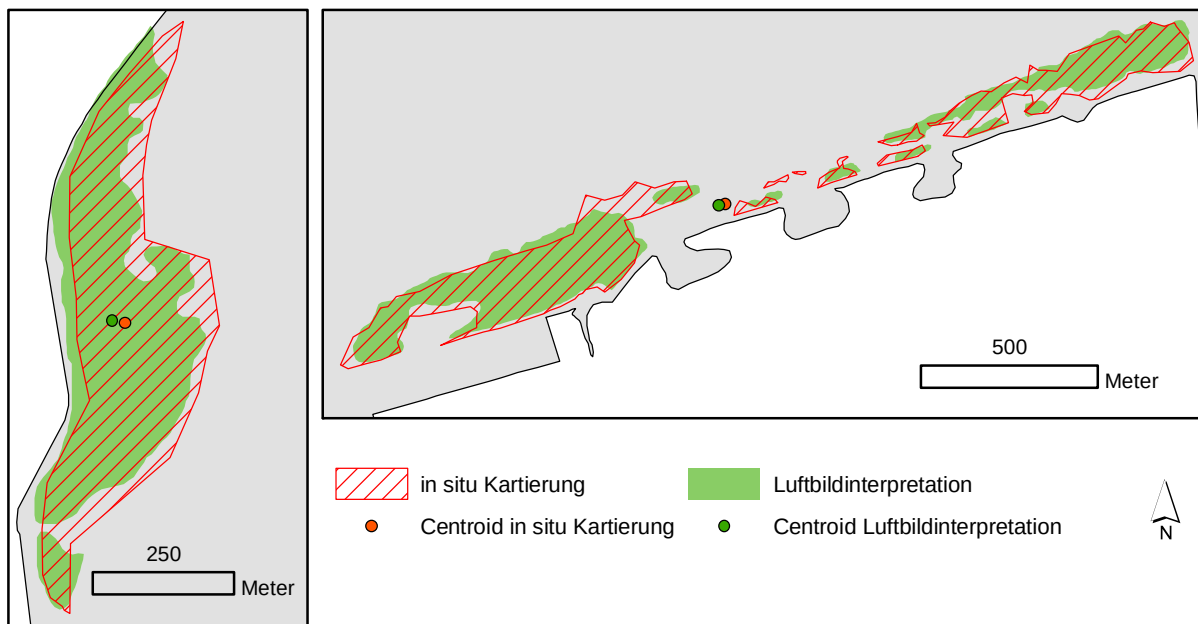


Abb. 3.15: Position und Form einer eingemessenen Seegraswiese werden im GIS durch den Centroid (Schwerpunkt) des entsprechenden Polygons repräsentiert. Die Distanz des Centroids einer in situ kartierten Seegraswiese zum Centroid der gleichen Seegraswiese, die aus dem Luftbild erfasst wurde, kann als Maß der Abweichung der beiden Kartierungsmethoden angesehen werden. Beispiele: Horumersiel (links) und Ostermarscher Watt (rechts)

3.3 Übereinstimmung mit Ergebnissen der Geländearbeit

Die Übereinstimmung der Ergebnisse der Luftbildanalyse mit den Ergebnissen der Geländearbeit (Adolph 2010) wurde im Hinblick auf verschiedene Aspekte überprüft.

Flächengröße: Die Übereinstimmung bzw. Abweichung der Flächengröße wird jeweils in % der im Gelände eingemessenen Fläche ausgedrückt.

Position: Position und Form einer eingemessenen Seegraswiese werden im GIS durch den Centroid (Schwerpunkt) des entsprechenden Polygons repräsentiert. Die Distanz (m) zwischen dem Centroid einer vor Ort eingemessenen Wiese und dem Centroid der gleichen Wiese aus der Luftbildinterpretation kann daher als Maß für die Güte der Positions-Übereinstimmung der beiden Kartierungsmethoden herangezogen werden (Abb. 3.15; vgl. auch Dolch et al. 2009).

Bewuchsdichte: Durch Verschneiden mit den Vor-Ort-Informationen werden den Dichtekategorien der Luftbildanalyse numerische Dichtewerte zugeordnet. Unter Einbeziehung der Flächengrößen kann damit die „Mittlere Gesamtdichte“ der einzelnen Wiesen berechnet werden und mit den Ergebnissen der Bodenkartierung verglichen werden.

3.3.1 Fläche und Position bei Beständen mit >5 % Gesamtabdeckung

Die durch Luftbildauswertung ermittelte Gesamtfläche von 17,4 km² Seegras steht einem Wert von 18,8 km² aus der Geländekartierung 2008 gegenüber (Adolph 2010). Die Abweichung der Luftbildanalyse gegenüber der Geländekartierung in Bezug auf die ermittelte Gesamtfläche beträgt damit ca. (-)7,4 %. Wenn die unsicheren Nachweise aus der Luftbildkartierung nicht berücksichtigt werden, erhöht sich die Abweichung auf (-)10,6 %. (Tab. 3.2).

Betrachtet man die einzelnen Seegrasbestände genauer, so ergibt sich ein weit differenzierteres Bild (Tab. 3.2). Abgesehen vom Nichtauffinden oder dem Erstrnachweis einiger Flächen auf den Luftbildern (Abweichung = ± 100 %) reichen die Abweichungen der Luftbildauswertung gegenüber der Geländekartierung je nach Gebiet von (-)91 % bis (+)281 %. Gute Übereinstimmung mit maximal 18% Abweichung der Flächengrößen konnte bei den Beständen Ostermarscher Watt, Horumersiel, Arngast Sand, Seefelder Watt und Butjadingen West erzielt werden. Die Seegrasflächen an den Standorten Itzendorfplate, Neßmer Watt und Wanger Watt, die bei der Kartierung im Gelände eingemessen worden waren, konnten auf den Luftbildern nicht identifiziert werden. Die Bestände der Standorte Randzel, Norder Watt - Ost, Benersiel, Eversand und Knechtsand wurden auf den Luftbildern deutlich kleiner eingeschätzt als bei der Geländekartierung. Größer als bei der Aufnahme im Gelände wurden nach der Luftbildinterpretation die Bestände Hooksiel, Schweiburger Watt, Burhaver

Plate und Waddenser Plate eingemessen. An den Standorten Hilgenrieder Watt, Dornumer Watt, Sander Watt und Wurster Watt wurden bei der Luftbildauswertung Seegrasflächen registriert, die bei der Geländearbeit nicht oder nicht in Gesamtbedeckungen >5 %, berücksichtigt worden waren¹.

Die Positionsabweichung der mit Luftbildanalyse aufgenommenen Seegrasbestände der Dichte-Kate-

¹ Der Bestand Hilgenrieder Watt wurde durch eine Begehung im Frühsommer 2010 abgesichert (Bio Consult 2010)

gorien A bis D zu den entsprechenden Beständen >5 % Gesamtbedeckung aus der Bodenkartierung beträgt im Mittel 234 m. Besonders groß ist die Positionsabweichung auf dem Randzel (1073 m), es folgen Eversand (462 m), Bensersiel (393 m), Knechtsand (235 m) und Waddenser Plate (211 m). An allen anderen Standorten ist die Distanz zwischen den Ergebnissen der beiden Kartiermethoden geringer als 150 m. An drei Standorten (Ostermarscher Watt, Horumersiel und Seefelder Watt) liegt sie unter 100 m.

Tab. 3.2: Vergleich von Flächengrößen und Positionen der Seegrasbestände aus der In-situ-Kartierung 2008 (Adolph 2010) und der Luftbildanalyse – Gesamtbedeckung im Gelände >5 % vs. Dichtekategorien A+B+C+D der Luftbild-Analyse

Standort (fett = Standorte mit jährlichem Monitoring)	Seegras - Fläche (km²)		Vergleich		
	in situ 2008	Luftbilder	Fläche		Position
	(Adolph 2010)	(diese Arbeit)			
	5-%-Linie	Dichtekategorien A+B+C+D	Übereinstimmung ¹	Abweichung ²	Distanz (m)
Hund/Paapsand	0,000	0,000	-	-	-
Randzel	1,528	0,135	9 %	-91 %	1095
Itzendorfplate	0,001	0,000	0 %	-100 %	-
Norder Watt - Ost	0,017	0,003*	15 %	-85 %	100
Ostermarscher Watt	0,231	0,208	90 %	-10 %	17
Hilgenrieder Watt	-	0,059	-	-	-
Neßmer Watt	0,033	0,000	0 %	-100 %	-
Dornumer Watt	0,000	0,009	-	-	-
Bensersiel	0,269	0,054	20 %	-80 %	393
Wanger Watt	0,157	0,000	0 %	-100 %	-
Horumersiel	0,145	0,136	94 %	-6 %	23
Hooksiel	0,015	0,041	273 %	173 %	138
Arngast Sand	2,603	3,070	118 %	18 %	138
Schweiburger Watt	0,374	0,493*	132 %	32 %	127
Seefelder Watt	7,920	8,135	103 %	3 %	88
Butjadingen West	0,583	0,523	90 %	-10 %	107
Burhaver Plate	0,553	0,900	163 %	63 %	142
Waddenser Plate	0,108	0,412	381 %	281 %	211
Wurster Watt	0,000	0,204*	-	-	-
Eversand	3,121	1,699	54 %	-46 %	462
Knechtsand	1,121	0,716	64 %	-36 %	235
GESAMT	18,78	16,80*	89,4 %	-10,6 %	
Mittelwert					234

*nur sichere Nachweise

¹) Übereinstimmung = Fläche Luftbild / Fläche in situ

²) Abweichung = $\frac{(\text{Fläche Luftbild} - \text{Fläche in situ})}{(\text{Fläche in situ})} \times 100$

Tab. 3.3: Vergleich von Flächengrößen und Positionen der Seegrasbestände aus der In-situ-Kartierung 2008 (Adolph 2010) und der Luftbildanalyse – Gesamtbedeckung im Gelände >20% vs. Dichtekategorien A+B der Luftbild-Analyse

Standort (fett = Standorte mit jährlichem Monitoring)	Seegras - Fläche (km ²)		Vergleich		
	in situ 2008 (Adolph 2009)	Luftbilder (diese Arbeit)	Fläche		Position
	20%-Linie	Dichtekategorien A+B	Übereinstimmung ¹	Abweichung ¹	Distanz (m)
Hund/Paapsand	0	0	-	-	-
Randzel	0,043	0	0 %	-100 %	-
Itzendorfplate	0	0	-	-	-
Norder Watt - Ost	0,001	0,002*	200 %	100 %	13
Ostermarscher Watt	0,2	0,107	54 %	-47 %	85
Hilgenrieder Watt	0	0	-	-	-
Neßmer Watt	0	0	-	-	-
Dornumer Watt	0	0	-	-	-
Bensersiel	0	0	-	-	-
Wanger Watt	0	0	-	-	-
Horumersiel	0,082	0,083	101 %	1 %	28
Hooksiel	0,0004	0,004	1000 %	900 %	115
Arngast Sand	1,459	1,378	94 %	-6 %	156
Schweiburger Watt	0	0,075*	-	-	-
Seefelder Watt	4,069	3,831	94 %	-6 %	94
Butjadingen West	0	0,058	-	-	-
Burhaver Plate	0,437	0,35	80 %	-20 %	16
Waddenser Plate	0	0	-	-	-
Wurster Watt	0	0	-	-	-
Eversand	0,618	0,337	55 %	-45 %	985
Knechtsand	0,231	0,335	145 %	45 %	330
GESAMT*	7,14	6,56	91,9 %	-8,1 %	
Mittelwert					202

*nur sichere Nachweise

¹⁾ Berechnung siehe Tab. 3.2

3.3.2 Fläche und Position bei Beständen mit >20 % Gesamtbedeckung

Betrachtet man nur die dichten Seegrasbestände (Bodenkartierung >20 % Gesamtbedeckung; Luftbild Dichtekategorien A + B), beträgt die Flächendifferenz (-)8,1 % und die mittlere Distanz der Positionen 202 m (Tab. 3.3). Bis auf eine Seegrasfläche von 0,043 km² auf dem Randzel wurden alle aus dem Gelände bekannten, dichten Bestände auf den Luftbildern wiedergefunden. In zwei Gebieten (Butjadingen West und Schweiburger Watt) wurden auf dem Luftbild dichte Bereiche ausgemacht, deren Gesamtbedeckung vor Ort geringer als 20 % eingeschätzt worden war.

3.3.3 Bewuchsdichte

An den Aufnahmepunkten bei der In-situ-Kartierung waren zwei verschiedene Dichtewerte ermittelt worden: „Bedeckung“ und „Besatz“. Die „Bedeckung“ bezeichnet den prozentualen Anteil der mit Seegras bewachsenen Bulten an der Gesamtfläche einer Wiese, der „Besatz“ den Anteil der von Seegrasblättern bedeckten Fläche innerhalb der Bulten. Aus der Verrechnung dieser beiden Werte ergibt sich der numerische Wert der „Gesamtbedeckung“ - als Anteil der Wattfläche, die in der Trockenliegezeit von Seegras bedeckt ist - („Bedeckung“ x „Besatz“/100 = „Gesamtbedeckung“; Adolph 2010).

Bei der Luftbildinterpretation wurde die Bewuchsdichte der Seegraswiesen in Dichteklassen erfasst (A, B, C und D; Tab. 2.2, S. 5). Die Klassenwerte sind im Gegensatz zu den In-situ-Werten nicht für Berechnungen geeignet.

Tab. 3.4: Kalibrierung der Dichteklasse aus der Luftbildkartierung mit den Vor-Ort-Aufnahmen

Dichteklasse Luftbild	Anzahl (n) Aufnahmepunkte vor Ort	Mittlere Gesamtbedeckung vor Ort
A	140	53 %
B	279	36 %
C	414	16 %
D	189	8 %
„Verdachtsfläche“	291	6 %
Kein Seegras	2.445	4 %

Tab. 3.5: Mittlere Dichte der Seegrasbestände in einzelnen Wattgebieten. Vergleich der Ergebnisse der Luftbildanalyse mit Berechnungen aus der Geländekartierung (Adolph 2010)

Gebiet	Mittlere Dichte der Seegrasbestände %)		Abweichung ¹⁾ der Luftbild-Methode von der Vor-Ort-Kartierung
	nach Luftbild (diese Arbeit) ²⁾	in situ (Adolph 2010)	
Randzel	16	5	220 %
Norder Watt - Ost	29	10	193 %
Ostermarscher Watt	29	42	(-) 31 %
Bensersiel	15	5	202 %
Horumersiel	29	34	(-) 14 %
Hooksiel	18	16	12 %
Arngast Sand	27	23	17 %
Schweiburger Watt	19	6	215 %
Seefelder Watt	25	38	(-) 33 %
Butjadingen West	17	6	175 %
Burhaver Plate	25	43	(-) 42 %
Waddenser Plate	13	6	121 %
Eversand	17	27	(-) 37 %
Knechtsand	24	28	(-) 11 %

$$^1) \text{ Abweichung} = \frac{(\text{Dichte Luftbild \%} - \text{Dichte in situ \%})}{(\text{Dichte in situ \%})} \times 100$$

²⁾ in dieser Arbeit kalibriert (s.o.)

Um aus den Luftbildanalysen die mittlere Dichte der einzelnen Seegrasbestände berechnen zu können, wurde deshalb zunächst jeder Dichtekategorie (Klassen-Wert) eine mittlere „Gesamtbedeckung“ (numerischer Wert) zugeordnet²⁾. Zu diesem Zweck wurden die Flächendaten der Luftbildanalyse im GIS mit den Punktdaten räumlich verschnitten und 3.758 Wertepaare aus Dichteklasse und „Gesamtbedeckung“ gebildet. Anschließend wurde für jede Dichteklasse eine mittlere Gesamtbedeckung errechnet (Tab. 3.4).

²⁾ Die Dichteklassen sind wegen der Integration von Flächentextur (vgl. „Bedeckung“) und Farbtiefe (vgl. „Besatz“) qualitativ am ehesten mit dem errechneten Wert „Gesamtbedeckung“ der Vor-Ort-Kartierung vergleichbar.

Mit Hilfe dieser Kalibrierung wurde nun für jeden mittels Luftbildanalyse identifizierten Seegrasbestand, entsprechend der Flächenanteile der verschiedenen Dichtekategorien an der jeweiligen Gesamtfläche, die mittlere Dichte errechnet. In Tab. 3.5 sind die resultierenden Werte den räumlich entsprechenden Werten aus der Vor-Ort-Kartierung gegenübergestellt. Eine mäßige Übereinstimmung der Ergebnisse beider Methoden, Abweichungen unter 20 %, hat sich für die Gebiete Horumersiel, Hooksiel, Arngast Sand und Knechtsand ergeben. In den anderen Wattgebieten sind die Unterschiede zwischen beiden Methoden mit z. T. über 200 % Abweichung recht groß (Bensersiel, Schweiburger Watt und Randzel). Dabei wurde die Dichte der Seegrasbestände in den Luftbildern in einigen Gebieten niedriger, an anderen Stellen aber auch höher als im Gelände eingeschätzt.

4 Einsatz alternativer Methoden

4.1 Visuelle Interpretation von Luftbildern am Bildschirm

Um Luftbilder direkt am Bildschirm auswerten zu können, müssen sie in digitaler Form vorliegen. Hierzu werden entweder analog hergestellte Luftbilder eingescannt oder direkt digital hergestellte Aufnahmen genutzt. In beiden Fällen kann heute eine Bodenauflösung von mindestens ca. 30-40 cm erreicht werden. Um einen Qualitätsverlust zu vermeiden, sollte das Scannen von analog hergestellten Luftaufnahmen dabei mit den Dias bzw. Farbnegativen erfolgen, nicht mit den Kontaktabzügen. Hierbei ist - unter Hinzuziehung der Aufnahmedaten für die externe Orientierung - eine Entzerrung und Georeferenzierung der Bilddateien möglich, so dass sie direkt lage-richtig im Geoinformationssystem angezeigt werden können. Die Lagegenauigkeit beträgt dabei ca. 4 m. Bei digitalen Aufnahmen kann die Georeferenzierung direkt automatisiert durchgeführt werden. Auch können während eines Fluges mehrere Spektralbereiche gleichzeitig erfasst werden, z.B. Farbe (RGB) und Color-Infrarot (CIR), was gerade für die Vegetationskartierung interessant ist (Abb. 4.1).

Die Luftbildinterpretation am Bildschirm hat den Vorteil, dass eine Digitalisierung der erkannten Strukturen mit Maus („heads up/screen digitizing“), oder mit Digitalisierstift auf einem interaktiven Display, direkt vom Foto erfolgen kann. Die Übertragungsfehler, die durch das Hochzeichnen auf Folie und erneutes Abdigitalisieren am Bildschirm entstehen, werden so vermieden. Die Digitalisier-Linien (z.B. Grenzen der

Seegraswiesen) haben keine Ausdehnung in der Breite. Im Gegensatz dazu entspricht die Breite der auf Folie gezeichneten Linien, legt man eine Strichstärke von 0,75 mm zugrunde³, bei einem Bildmaßstab 1:20.000 ca. 15 m! Insgesamt ist die Arbeit mit digitalen Luftbildern weniger umständlich als die analoge Auswertung. Jedes Bild kann am Bildschirm leicht wieder aufgerufen werden, z.B. um eine bereits vorgenommene Interpretation zu überprüfen und ggf. zu verändern. Die Überlagerung der Bilddaten mit Ergebnissen anderer Kartierungen (Ground Truth, Muschelbänke, Makroalgen etc.) ist ebenfalls leicht möglich. Mit einer entsprechenden Rechner- und Bildschirm-Ausrüstung kann auch mit digitalen Bildern eine stereoskopische Auswertung erfolgen. Für die Erfassung von Seegraswiesen aus Luftbildern ist der räumliche (3D) Eindruck, der bei der stereoskopischen Betrachtung entsteht, allerdings in der Regel nicht ausschlaggebend.

Ein Nachteil der Arbeit mit digitalen Luftbildern ist der hohe Speicherbedarf der Rechner. Die Bilddateien mit bei einer Bodenauflösung von ca. 0,4 m erreichen eine Größe von bis zu 750 MB. Bei der technischen Ausrüstung eines Arbeitsplatzes zur Auswertung digitaler Luftbilder muss deshalb in erster Linie auf eine ausreichende Speicher- und Rechenkapazität geachtet werden. Gut auflösende Bildschirme und Digitalisierungsinstrumente sind ebenfalls nötig.

³ Bei Einsatz eines 0,4 mm Stiftes variiert die gezeichnete Strichstärke je nach Andruckstärke und Schreibwinkel zwischen 0,5 und 1 mm.



Abb. 4.1: Digitale Luftbilder der Seegraswiese im Ostermarscher Watt, 2009; Darstellung im Maßstab 1:10.000; Spektralbereich links: RGB, rechts: CIR

4.2 Erfassung von Seegras durch Klassifizierung der Farbwerte von digitalen Luftbildern

Die Auswertung digitaler Luftbilder ermöglicht prinzipiell eine mehr oder weniger automatische Auswertung durch Klassifizierung der Farbwerte des Bildes. Hierdurch ist es möglich, die Informationen direkt aus dem Raster-Luftbild thematisch getrennt zu extrahieren. In der vorliegenden Arbeit wurde diese Methode nur angerissen, um ihre eventuelle Eignung für das Seegrasmonitoring abzuschätzen. Als Grundlage wurde digitales Bildmaterial aus der einer Befliegung 2009 („Riffbogenbefliegung“, NLWKN) benutzt, das für den entsprechenden Abschnitt sowohl als RGB als auch als CIR vorliegt.

Überwachte Klassifizierung

Für die Auswertung von Multiband-Bild-Dateien, wie sie digitale Farbbilder (z.B. RGB) darstellen, ist die überwachte Klassifizierung mit der Maximum-Likelihood-Methode eine erprobte Vorgehensweise (Stelzer et al. 2007). Hierzu werden innerhalb des zu klassifizierenden Bildes zunächst „Trainingsgebiete“ erstellt, die die spektrale Charakteristik der zu verwendenden Klassen (z.B. „Watt“, „Seegras“, „Muschel“) festlegen. Bei der nachfolgenden Klassifizierung des Bildes wird jedes Pixel der Klasse zugeordnet, zu der es aufgrund seiner Charakteristik am wahrscheinlichsten gehört (Abb. 4.2 links). Die resul-

tierende Klassifikation kann quantitativ ausgewertet werden (z.B. Summe „Seegras-Pixel“). Mit vorangestellter Maskierung können Gebiete, die nicht im Fokus der Auswertung liegen (z.B. „freies Wasser“ und „Land“ von vornherein aus der Betrachtung ausgeschlossen werden. Ein Abgleich mit Ground-Truth-Daten verbessert die Qualität des Ergebnisses.

NDVI (normalisierter differenzierter Vegetationsindex)

Aus CIR-Luftbildern lässt sich der Vegetationsindex „NDVI“ (normalized difference vegetation index) berechnen, der zur Kartierung von mit Vegetation bewachsenen Flächen verwendet werden kann:

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$$

mit NIR = nahes Infrarot; R = rot

Abb. 4.2 (rechts) zeigt eine Beispiel-Klassifikation auf Basis des NDVI. Dicht bewachsene Seegraswiesen lassen sich offensichtlich mit dieser Methode gut abgrenzen, wobei eine Kalibrierung mit Ground-Truth-Daten vorausgesetzt werden muss, da der NDVI grundsätzlich nicht zwischen Vegetationstypen (z.B. Algen, Seegras, Vorland etc.) unterscheidet.

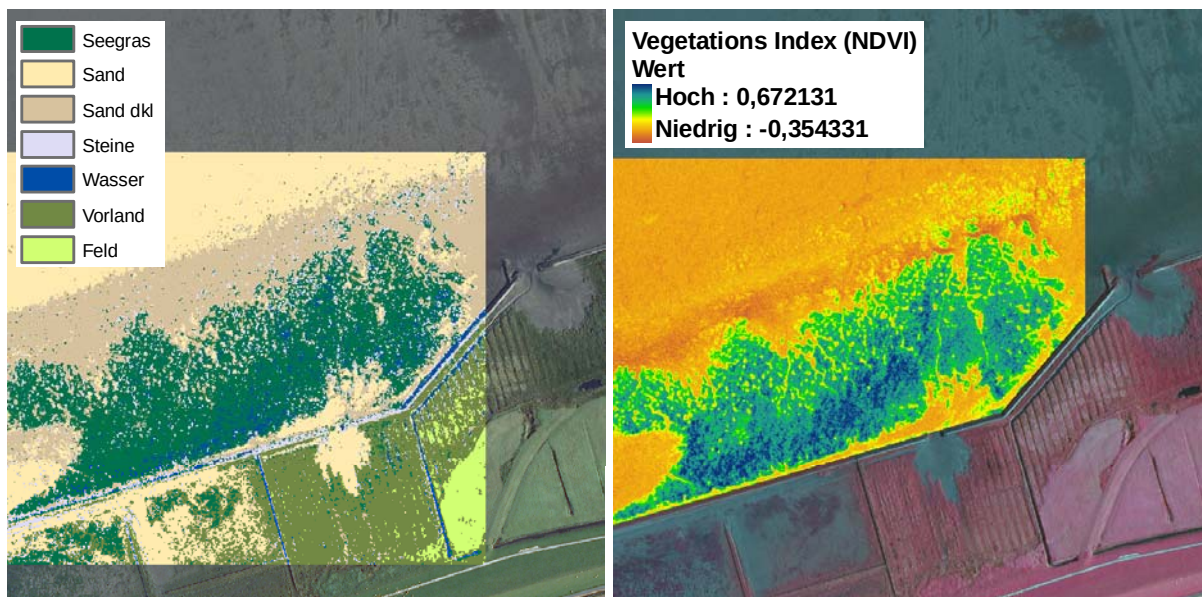


Abb. 4.2: Beispiele für Klassifikationen aus digitalen Luftbildern
Seegraswiese im Ostermarscher Watt, 2009, Darstellung im Maßstab 1:10.000

links: RGB mit überwachter Klassifizierung (Maximum-Likelihood-Methode)

rechts: aus den Spektralbändern des CIR berechneter Vegetationsindex (NDVI),
(Bereich der Klassifizierung durch Maskierung begrenzt)

5 Diskussion

Die Luftbildinterpretation wird weltweit als bevorzugte Standardmethode für Seegraskartierungen eingesetzt (McKenzie et al. 2003, Dekker et al. 2006, Hossain 2005). Dabei werden in erster Linie die Flächenausdehnung, aber auch die Bewuchsdichte und, unter bestimmten Voraussetzungen, sogar die Verteilung unterschiedlicher Arten erfasst (Hossain 2005).

Als Vorzüge der Luftbildinterpretation werden genannt:

- + synchrone Betrachtung eines größeren Gebietes möglich
- + nachträgliche Datenerhebung aus historischem Bildmaterial möglich
- + Hohe räumliche Auflösung möglich
- + Auflösung kann an die Erfordernisse des Projekts angepasst werden
- + Flexible Beschaffung des Materials - die Fotos können exklusiv für ein Projekt zum optimalen Zeitpunkt (Jahreszeit, Tageszeit, Wetter) hergestellt werden
- + geringe Anforderungen an die technische Ausrüstung (Hard- und Software) bei der Auswertung analoger Bilder
- + Möglichkeit stereoskopischer Auswertung

Als Nachteile gelten:

- Interpretation u. U. fehlerbehaftet
- Evtl. kostenintensiv (je nach Größe des Gebietes und räumlicher Auflösung)
- Analog hergestellte Bilder müssen erst gescannt werden, um am Computer ausgewertet zu werden
- Hoher Speicherbedarf bei hoch aufgelösten digitalen Luftbildern
- Bilder müssen i. d. R. entzerrt und rektifiziert werden

Für die Gewinnung von Luftbildmaterial zum Zwecke der quantitativen Auswertung im Hinblick auf Seegrasvorkommen im Wattenmeer sollten einige grundsätzliche Voraussetzungen eingehalten werden (bzw. bestimmte Kenndaten bekannt sein):

- Saison – möglichst August/September (Vegetationsmaximum)
- Tidephase – innerhalb ± 1 Std. um Niedrigwasser
- Wetterbedingungen – Sonne, aber möglichst geringe Reflektion; Sonnenstand $< 45^\circ$

- Senkrechtaufnahmen mit Passpunkten (Landmarken) zum Entzerren (alternativ sollten Koordinaten und Aufnahmewinkel - externe Orientierung - bekannt sein⁴)

Sind Seegraswiesen auf Luftbildern erkennbar?

Eine wichtige Voraussetzung für das sichere Erkennen von Seegras auf Luftbildern ist die Qualifikation der/s Bearbeiter/s. Fehlerhafte Interpretationen von Luftbildstrukturen können niemals vollständig ausgeschlossen werden, aber es gibt einige Möglichkeiten, um den persönlichen Interpretationsfehler zu bestimmen und zu verringern (McKenzie et al. 2003):

- mehrere Bearbeiter interpretieren dieselben Bilder und vergleichen das Ergebnis
- ein Bearbeiter interpretiert ein Bild mehrmals im zeitlichen Abstand
- die Arbeit sollte vorzugsweise immer vom selben Bearbeiter durchgeführt werden
- besonders falls wechselnde Bearbeiter eingesetzt werden, sollte ein möglichst konkret beschriebener Interpretations- und Klassifizierungsschlüssel erarbeitet werden
- die Bearbeiter sollen über ein hohes Maß an Übung und Felderfahrung verfügen

Auch beim Wechsel der Methoden, z.B. von stereoskopischer Auswertung analoger Luftbilder zur Auswertung von Digitalbildern am Bildschirm, gehört die Quantifizierung der Interpretationsunterschiede zur Qualitätssicherung.

Die gegenwärtig angewandte Methode der Feldkartierung von Seegraswiesen in Niedersachsen unterscheidet im Ergebnis Bestände mit 5-20 % Gesamtbedeckung von Beständen > 20 % Gesamtbedeckung⁵. Laut der Definitionen des trilateralen Monitorings TMAP gelten Bestände mit einer Gesamtbedeckung < 5 % als „spärlich besiedelt“ (Kategorie 1), bei 5-20 % wird von einer „Seegras Streusiedlung“ oder einem „lockerem Bestand“ (Kategorie 2) gesprochen. „Seegraswiesen“ (Kategorie 3) haben definitionsgemäß eine Gesamtbedeckung über 20 %. Bei fleckhaften Verteilungen soll der Abstand zwischen einzelnen Bulten innerhalb einer Seegraswiese 25 m nicht übersteigen (CWSS 2006; Van der Graaf et al. 2009).

Wie die vorliegende Arbeit zeigt, sind Seegraswiesen auf dem Eulitoral des Wattenmeeres auf Echtfarben-

⁴ Moderne Bordcomputer-Systeme leisten die Georeferenzierung incl. Entzerrung vollautomatisch (Kremer 2002).

⁵ Zur Unterscheidung von „Bedeckung“, „Besatz“ und „Gesamtbedeckung“, die an den Aufnahmepunkten im Gelände etwas genauer geschätzt werden, siehe Kapitel 3.3.3. S. 26.

Luftbildern im Maßstab 1: 20.000 dann gut zu erkennen, wenn die Gesamtbedeckung der Bestände 15 % übersteigt. Das bedeutet, dass - nach der Klassifizierung der Feldkartierung - nur Seegraswiesen der TMAP-Kategorie 3 recht sicher zu unterscheiden sind, während Bestände der Kategorien 2 und 1 auf Luftbildern nicht sicher identifiziert werden können.

Die Identifikation der Seegrasbestände auf Luftbildern stützt sich vornehmlich auf die Interpretation von Textur und Farbwerten, weniger auf das Relief. Die Informationen aus den Luftbildern reichen allein allerdings nicht aus, um zweifelsfrei nachzuweisen, dass es sich bei einer als Seegras interpretierten Struktur im Luftbild tatsächlich um solches handelt. Insbesondere Makroalgen, aber auch Diatomeen, Muschelbänke und Sedimentrelief können ähnliche Muster und Farbwerte abbilden und müssen daher sicher ausgeschlossen werden. Dies sollte in erster Linie durch Untersuchungen vor Ort geschehen (Ground Truth), welche den einzig zweifelsfreien Nachweis von Seegras einschließlich einer Artangabe ermöglichen. Ist die Position einer Seegraswiese einmal durch Ground Truth bekannt, so müssen die Befunde aus dem Luftbild allerdings nicht mehr jährlich überprüft werden. Da die Seegraswiesen in der Regel über längere Zeiträume ortstreu sind, kann auch die wiederholte lageidentische Identifizierung „seegrasverdächtiger Strukturen“ in Luftbildern als hinreichender Nachweis gelten, sofern in größeren Zeitabständen weiterhin ein Ground-Truthing erfolgt. Der Abgleich mit den Ergebnissen aus z.B. Miesmuschel- und Makroalgen-Kartierungen kann in diesem Fall zusätzliche Sicherheit geben.

Erfassung der Flächengröße

Die visuelle Auswertung von Luftbildern ermöglicht eine gute, hoch aufgelöste Flächenermittlung von Seegraswiesen mit >20 % Gesamtbedeckung. Wiesen mit 5-20 % Gesamtbedeckung werden nicht immer sicher erkannt. Der 5 % Grenzwert, der bei der Feldkartierung den Übergang zwischen „spärlich besiedelt“ und „lockerem Bestand“ kennzeichnet, kann auf den Luftbildern nicht sicher nachvollzogen werden, wodurch Unterschiede bei der Flächenerfassung der beiden Methoden entstehen. Die Genauigkeit der Abgrenzung aus der Luftbildinterpretation hängt außer von der Besiedlungsdichte stark vom Substrat (Kontrast, Relief) ab.

Die kleinste auf einem Luftbild erfasste Fläche (in dieser Arbeit) hat eine Ausdehnung von knapp 500 m². Bestände, die auf den Luftbildern aus 2008 - trotz ausreichender Größe - nicht erkannt wurden, wiesen im Gelände eine „Bedeckung“ von maximal 20 % und eine „Gesamtbedeckung“ von maximal 8 % auf.

Bei der Luftbildinterpretation kann die gesamte Fläche des Bestandes gleichmäßig überblickt werden. Dies ist bei der Bodenkartierung nicht immer der Fall.

Lückenhafte Innenstrukturen einer größeren Wiese können bei der Bodenkartierung übersehen werden, was ebenfalls zu Flächenunterschieden zwischen Bodenkartierung und Luftbilddauswertung führt.

Der Unterschied zwischen den beiden Erfassungsmethoden in Bezug auf die Ermittlung der Flächengröße ist zum Teil auch ein Resultat der unterschiedlichen räumlichen Auflösung der digitalisierten Flächen. Diese kann durch den Abstand der Stützpunkte der Polygone im GIS ausgedrückt werden. Bei der vorliegenden Luftbilddauswertung beträgt er 10 m (vgl. Abb. 2.6 S. 8). Bei der Bodenkartierung 2008 beträgt der mittlere Abstand von Stützpunkten ganze 100 m. Die maximale Segmentlänge liegt hier sogar bei 1.800 m, und nur 27 % der Polygonsegmente sind kürzer als 30 m. Es ist zumindest fraglich, ob hiermit die tatsächlichen Möglichkeiten der Bodenkartierung adäquat ausgeschöpft werden. Eine Mindestauflösung von 25 m, vgl. Definitionen des CWSS (s. S. 30), wäre wünschenswert.⁶

Erfassung der Besiedlungsdichte

Die Besiedlungsdichte von Seegraswiesen kann auf Luftbildern visuell anhand von Textur und Farbtiefe klassifiziert werden. Es gelingt gut, Bestände mit >20 % Gesamtbedeckung von denen mit geringerer Gesamtbedeckung abzugrenzen. Feinere Unterteilungen der Dichte sind vermutlich möglich, bedürfen jedoch noch einer Kalibrierung mit gezielten Ground-Truth-Erhebungen. Größere Schwierigkeiten bereitet die 5 % Dichte-Abgrenzung, die die Definition eines „lockeren Bestands“ bedingt (CWSS 2006). Hier sind es häufig die Sekundäreffekte der Seegrasbesiedlung (z.B. Bultenbildung), die auf dem Bild identifiziert werden. Locker besiedelte Randzonen dichter Wiesen sind in der Regel leichter auszumachen als gleichförmig dünn besiedelte Einzelbestände. Eine Fehlinterpretation der Bildinhalte (z.B. Bereiche mit unbewachsenen Bulten) ist leicht möglich und muss durch Ground-Truth-Stichproben möglichst verhindert werden. Ein weiteres Problem stellt das häufige Überwachsen von Seegras durch Grünalgen dar. Eine Trennung der Anteile von Seegras und Algen bei einer Mischbesiedlung ist mit visueller Luftbilddauswertung nicht möglich, wodurch die Bewuchsdichten beider Taxa (Seegräser oder Algen) dort regelmäßig überschätzt werden. Auch die Artzusammensetzung der Seegrasbestände ist nur in situ zu bestimmen.

Bei den Vor-Ort-Kartierungen 2008 wurde die mittlere Gesamtbedeckung der einzelnen Seegraswiesen aus der Begutachtung von je 10 Transekt- oder Probenahmepunkten hochgerechnet oder fußte auf einer allgemeinen „Gesamteinschätzung im Gelände“. Dabei ist es wichtig, dass die Punkterhebungen in

⁶ Zur unterschiedlichen Auflösung der Ergebnisse von Luftbildinterpretation und In-situ-Kartierung vgl. auch Abb. 3.15, S. 24

Bezug auf die Gesamtfläche repräsentativ sind, was, vor Allem bei ausgedehnten Beständen, nicht immer zu gewährleisten ist. Hier kann die Luftbildinterpretation flächenhafte Informationen liefern.

Lagerichtige Kartierung

Die lagerichtige Kartierung von Seegrasbeständen aus Luftbildern hängt von der Qualität der Georeferenzierung der Luftbilder, bzw. der eingesetzten Folien, ab (vgl. Kap. 2.2.3, S. 4). Bei der stereoskopischen Auswertung von nicht entzerrten, analogen Luftbildern am Aviopreten, wie sie in der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurde, ist der Fehler hierbei unregelmäßig und teilweise recht hoch. Die Georeferenzierung der Informationen aus analogen Luftbildern ist mit großem Zeitaufwand verbunden, wobei das Ergebnis nicht immer zufriedenstellt. Je weniger Landmarken als Passpunkte auf den Bildern vorhanden sind, umso schwieriger ist die korrekte Ausrichtung der Fotos bzw. Folien, und umso größer ist der Positionierungsfehler. Schwierig ist es auch, größere Strukturen, deren Ausdehnung über mehrere Fotos reicht, lagerichtig auf Folien und schließlich in das Geoinformationssystem zu übertragen. Für das Zusammenspiel von Luftbildanalyse und Ground Truth ist die korrekte Positionierung allerdings essentiell. Der Einsatz von vorab entzerrten und georeferenzierten Luftbildern ist hier deutlich überlegen. Digital aufgenommene, rektifizierte Luftbilder weisen heute standardmäßig eine Lagegenauigkeit von mindestens ca. 1 - 5 m auf. Dies liegt in der Größenordnung, die auch bei Feldkartierungen mittels GPS erreicht werden kann (McKenzie et al. 2003).

Ermittlung der Biomasse

Die klassische Methode der Entnahme und Bearbeitung von Pflanzenmaterial zur Biomassebestimmung von Seegras hat den Nachteil, dass sie destruktiv ist, also in empfindlichen, geschützten Gebieten wie Seegraswiesen möglichst vermieden werden sollte. Außerdem ist sie relativ arbeitsaufwändig. Eine Alternative hierzu könnte die visuelle Auswertung von im Feld angefertigten Fotografien – im Vergleich mit einer kalibrierten Fotosammlung – gemäß der von Kutser et al. (2007) vorgestellten Methode sein.

Eine Biomassebestimmung rein anhand visueller Luftbildinterpretation wurde in der vorliegenden Arbeit nicht erprobt und erscheint auch kaum realisierbar. In der satellitengestützten Fernerkundung von Seegrasbeständen gibt es erste Ansätze, die Biomasse durch eine spektrale Auswertung von der Aufnahmen zu ermitteln (Kutser et al. 2009) – eine Anwendung, die noch weitere Entwicklungsarbeit benötigt.

Bereits in den 80er Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts waren Methoden entwickelt worden, neben

Verbreitung und Dichte auch die Biomasse von Makrophytobenthos durch technisch gestützte Luftbildauswertung zu ermitteln (Meulstee et al. 1986). Hierbei wurde die Farbdichte von Falschfarben-Luftbild-Dias mit einem Transmissions-Densitometer gemessen und die Werte mit vor Ort ermittelten Biomassewerten von *Fucus vesiculosus*, *Enteromorpha/Ulva*, *Zostera noltii* und Mischvegetation kalibriert. Durch die Entwicklung digitaler Aufnahmetechniken wurde diese Methode mittlerweile überholt.

Automatische Klassifizierung von Bilddaten

Digitale Luftbilder können mit Hilfe geeigneter Klassifizierungsmethoden, z.B. Maximum Likelihood Methode oder NDVI Berechnung, automatisiert ausgewertet werden. Dass diese Verfahren prinzipiell auch zur Kartierung von eulitoralem Seegras im niedersächsischen Wattenmeer genutzt werden können, konnte an Beispielmaterial gezeigt werden. Die Grenzen dieser Methoden in Bezug auf die Identifizierung lockerer Seegrasbestände oder die Abgrenzung von Algenbewuchs sind noch zu ermitteln.

Die thematische Klassifizierung digitaler Bilddaten aus der Fernerkundung spielt in der Küstenökologie weltweit eine immer größere Rolle (Klemas 2011). Zurzeit werden gerade für kleinskalige Kartierungen meist kombinierte Ansätze aus Klassifizierung von Fernerkundungsdaten und Vor-Ort-Untersuchungen eingesetzt (z.B. Young et al. 2010, Kutser et al. 2009, Roelfsema et al. 2009).

Der SAVI (soil adjusted vegetation index), ein an lockeren Bewuchs angepasster Index auf Basis des NDVI, wird von der US Naturschutzbehörde EPA im Verbund mit Felduntersuchungen und visueller Luftbildinterpretation (RGB + CIR) erfolgreich zur Kartierung von eulitoralem Seegras eingesetzt (Young et al. 2010). Die dort erzielte Übereinstimmung mit Ergebnissen aus der Feldkartierung ist mit 76 – 98 % zufriedenstellend.

Als Grundlage für die thematische Klassifizierung sind besonders auch Bilddaten von Hyperspektralscannern (HyMap) geeignet, die sich durch eine hohe spektrale Auflösung auszeichnen. Versuche mit HyMap Bilddaten aus dem Wattenmeerbereich haben gezeigt, dass eine gezielte Auswertung sogar die spektrale Trennung von Makroalgen und Seegras erlaubt (Stelzer et al. 2007). Gegen einen routinemäßigen Einsatz von Hyperspektralscannern für große Flächen sprechen jedoch noch die im Vergleich mit digitalen Luftbildern (RGB, CIR) hohen Kosten, sowie die geringere räumliche Auflösung.

6 Zusammenfassung / Empfehlungen

Mit Hilfe visueller Auswertung von Luftbildern wurde der Gesamtbestand des eulitoral Seegrases an der niedersächsischen Küste für 2008 auf knapp 17 km² bemessen. Die Schwerpunkte der Verteilung wurden im Jadebusen und auf dem Eversand in der äußeren Wesermündung ermittelt. Dichte Seegraswiesen kleineren Ausmaßes waren im Ostermarscher Watt, bei Horumersiel an der Jade, an der West- und Ostküste Butjadingens sowie auf den Knechtsandwatten vorhanden. Knapp 40 % der Bestände wurden als „dicht“ oder „sehr dicht“ klassifiziert. Bis auf sechs kleinere seegrasverdächtige Strukturen auf den Luftbildern waren die identifizierten Seegrasstandorte bereits aus Vor-Ort-Kartierungen bekannt. Die Übereinstimmung der beiden Kartiermethoden (in situ vs. Luftbild) im Hinblick auf Ausdehnung, Dichte und Position dieser Bestände ist nicht durchgängig zufriedenstellend.

Die visuelle Luftbildinterpretation am Stereoskop liefert für hinreichend große Seegraswiesen (>0,001 km²) mit >20 % Gesamtbedeckung im niedersächsischen Wattenmeer gute Ergebnisse. Bei kleineren Flächen oder einer Gesamtbedeckung unter 20 % nimmt die Auffindungsrate und -qualität ab, Seegrasbestände mit einer Gesamtbedeckung <8 % werden oft nicht erkannt.

Die Qualität der analogen Luftbilder ist heute sehr hoch. Oft lassen sich Seegrasbestände auf den Bildern bereits mit bloßem Auge erkennen. Bei Betrachtung eines Bildpaares mit dem Stereoskop erhält man ein scharfes, dreidimensional erscheinendes Bild. Dennoch erscheint die Methode der Auswertung analog hergestellter Bilder am Stereoskop mit anschließender Übertragung in das digitale GIS als nicht optimal. Sie ist umständlich in der Handhabung, die Positionierung der nicht entzerrten Bilder bzw. Inter-

pretationsergebnisse ist fehleranfällig, zeitaufwändig und das Abzeichnen mit Folienstiften begrenzt die räumliche Auflösung der Auswertung. Relativ aufwendig gestaltet es sich auch, die Bildinhalte mit digital vorliegenden, thematischen Karten zu vergleichen (z.B. Feldkartierung, Muschelbänke, Algentepiche). Der Vorteil der dreidimensionalen Bildwirkung bei der Stereoskopie wiegt diese Nachteile im Falle von Seegras nicht auf, da das Relief der Bestände nur schwach ausgeprägt ist. Für die Seegraskartierung sollten daher bevorzugt digitale, möglichst entzerrte und rektifizierte, Luftbilder eingesetzt werden. Die sichere thematische Auswertung wird sich weiterhin auf gezielte punktuelle Felderhebungen stützen müssen, die den einzigen zweifelsfreien Nachweis für Seegrasvorkommen und Artenzusammensetzung erbringen können.

Für die flächendeckende Bestandsaufnahme von Seegras der Dichtekategorie >20 % (TMAP Kategorie 3) im niedersächsischen Wattenmeer mit den Parametern „Ausdehnung“ und „Gesamtbedeckung“ könnte eine Methoden-Kombination aus visueller Luftbildinterpretation, gestützt durch überwachte Klassifizierung der Bildpixel und Absicherung der Ergebnisse mit Feldkartierungen ausgearbeitet werden (vgl. Young et al. 2010). Für die Kartierung lichter Seegrasbestände (TMAP Kategorie 2 und 1) und für die Ermittlung von Biomasse und evtl. weiterer Kenngrößen (z.B. Arten) - Parameter, die z. Z. teilweise für die Bewertung nach WRRL benötigt werden (NLWKN 2010) - eignet sich die Luftbildauswertung nur eingeschränkt, z.B. zur Vorhab-Identifizierung von (Verdachts-)Probenflächen bei der Planung von In-situ-Untersuchungen.

7 Quellen

- Adolph, W. (2010): Praxistest Monitoring Küste 2008 Seegraskartierung. Gesamtbestandserfassung der eulitoral Seegrasbestände im Niedersächsischen Wattenmeer und Bewertung nach Wasserrahmenrichtlinie. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft Küsten- und Naturschutz (Ed.). Küstengewässer und Ästuar 2/2010. 58 S.
- ARGE BLMP (2011): BLMP Online. <http://www.blmp-online.de/Seiten/Monitoringhandbuch.htm>. (26/07/2011).
- BioConsult (2010): Unveröffentlichte GIS-Daten aus einer Seegraskartierung im Frühsommer 2010 – mit freundlicher Genehmigung der transpower offshore GmbH, Bayreuth.
- CWSS (1998): Erklärung von Stade -Trilateraler Wattenmeerplan. Ministererklärung der Achten Trilateralen Regierungskonferenz zum Schutz des Wattenmeeres. Stade, 22. Oktober 1997. Common Wadden Sea Secretariat (Ed.). 112 S.
- CWSS (2006): Monitoring of Seagrass in the Wadden Sea. HARBASINS report of the TMAP ad hoc working group Seagrass. 28.8.2006. 19 S.
- Davison, D.M. & Hughes D.J. (1998): *Zostera* biotopes (volume 1): An overview of dynamics and sensitivity characteristics for conservation management of marine SACs,. (UK Marine SACs Project). Scottish Association for Marine Science (Ed.). 95 S.
- De Jonge, V.N. & De Jong, D. (1992): Role of tide, light and fisheries in the decline of *Zostera marina* L. in the Dutch Wadden Sea. Neth. Inst. Sea Res. Publ. Ser. 20: 161–176.
- Dekker, A., Brando, V., Anstee, J., Fyfe, S., Malthus, T., Karpouzli, E. (2006): Remote Sensing of Seagrass Ecosystems: Use of Spaceborne and Airborne Sensors. In: A.W.D. Larkum, R.J. Orth & C.M. Duarte (Eds.), *Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*: Springer, 347–359.
- Dijkema, K.S., Tienen, G. van, Beek, J.G. van: Habitats of the Netherlands, German and Danish Wadden Sea 1: 100,000. 24 Karten. Research Institute for Nature Management Texel/Veth Foundation Leiden (Ed.): 6 S.
- Dolch, T., Buschbaum, C., Reise, K. (2009): Seegras Monitoring im Schleswig-Holsteinischen Wattenmeer 2008. Forschungsbericht zur Bodenkartierung ausgewählter Seegrasbestände im Auftrag des Landesamts für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein Flintbek. Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (Ed.). 95 S.
- EU (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. 2000/60/EG.
- EU (2008): Richtlinie 2008/56/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Juni 2008 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Meeresumwelt (Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie). EG-MSRL..
- Hartog, C. den & Poldermann, P.J.G. (1975): Changes in the seagrass populations of the Dutch Wadden Sea. Aquat. Bot. 1: 141–147.
- Herlyn, M. (2005): Quantitative assessment of intertidal blue mussel (*Mytilus edulis* L.) stocks: combined methods of remote sensing, field investigation and sampling. Journal of Sea Research 53: 243–253.
- Hossain, M.K. (2005): An examination of seagrass monitoring protocols as applied to two New South Wales estuarine settings. Masterarbeit Australian Catholic University Fitzroy, Victoria (Australien). 70 S.
- Kastler, T. & Michaelis, H. (1997): Der Rückgang der Seegrasbestände im niedersächsischen Wattenmeer. Ber. Forschungsstelle Küste 41: 119–139.
- Klemas, V. (2011): Remote Sensing Techniques for Studying Coastal Ecosystems: An Overview. J. Coast. Res. 27(1): 2–17.
- Kremer, J. (2002): CCNS / AEROcontrol - an Integrated GPS/IMU System for Direct Georeferencing of Airborne Image Data. 10 S.
- Kutser, T., Vahtmäe, E., Roelfsema, C.M., Metsamaa, L. (2007): Photo-library method for mapping seagrass biomass. Est. Coast. Shelf Sci. 75(4): 559–563.
- Kutser, T., Vahtmäe, E., Roelfsema, C., Metsamaa, L. (2009): Mapping Seagrass Biomass with Photo-Library Method. In: S. Jones & K. Reinke (Eds.), *Innovations in Remote Sensing and Photogrammetry. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*: Springer Berlin Heidelberg, 407–415.
- McKenzie, L.J., Finkbeiner, M.A., Kirkman, H. (2003): Methods for mapping seagrass distribution. In: F.T. Short, R.G. Coles & C.A. Short (Eds.), *Global seagrass research methods*: Elsevier, Amsterdam, 101–121.

- Meulstee, C., Nienhuis, P.H., van Stokkom, H.T.C. (1986): Biomass assessment of estuarine macrophytobenthos using aerial photography. *Mar. Biol.* 91: 331–335.
- Michaelis, H. (1987): Ökologische Untersuchung der Watten des Jadebusens in Verbindung mit einer Luftbild-Analyse. *Jber. Forschungsstelle Küste* 1986(38): 13 - 97 + Anlagen.
- Millat, G. (1996): Entwicklung eines methodisch-inhaltlichen Konzeptes zum Einsatz von Fernerkundungsdaten für ein Umweltmonitoring im niedersächsischen Wattenmeer. Dissertation, Hochschule Vechta, Schriftenreihe der Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer, Wilhelmshaven, Band 1, 125 S.
- NLPV-WHV (2011): Muschelwildbänke von Borkum bis Cuxhaven (GIS-Daten). Nationalparkverwaltung Niedersächsisches Wattenmeer (Ed.). <http://www.nationalpark-wattenmeer.de> (28/03/2011)
- NLWKN (2010): Umsetzung der EG-WRRL – Bewertung des ökologischen Zustands der niedersächsischen Übergangs- und Küstengewässer (Stand: Bewirtschaftungsplan 2009). *Küstengewässer und Ästuare* 1/2010. 59 S.
- Obert, B. (1982): Bodenfauna der Watten und Strände um Borkum - Emsmündung. *Jber. Forschungsstelle Insel und Küstenschutz* 1981(33): 139–162.
- Riecken, U., Ries, U., Ssymank, A., Merck, T., Nordheim, H. von (1995): Rote Liste der Biotoptypen des deutschen Wattenmeer- und Nordseebereichs. *Schr.R. f. Landschaftspfl. u. Natursch.* 44: 15–38.
- Ritzmann, A. (2007): Einsatz von Gelände- und Fernerkundungsmethoden für das Seegrasmonitoring im Niedersächsischen Wattenmeer. Ein Praxistest im Rahmen der EG-WRRL. Diplomarbeit. Westfälische Wilhelms-Universität Münster (Ed.). 109 S.
- Ritzmann, A. & Herlyn, M. (2007): Praxistest Monitoring Küste 2007. Untersuchung eulitoraler Seegrasvorkommen des Niedersächsischen Wattenmeeres. *Untersuchungsbericht* 12/2007, 35 S.
- Roelfsema, C.M., Phinn, S., Udy, N., Maxwell, P. (2009): An Integrated Field and Remote Sensing Approach for Mapping Seagrass Cover, Moreton Bay, Australia. *Spatial Science* 54(1): 45–62.
- Stelzer, K., Brockmann, C., Geißler, J. (2007): Operationalisierung von Fernerkundungsmethoden für das Wattenmeermonitoring (ofew). *Abschlussbericht*. 128 S.
- Van der Graaf, S., Jonker, I., Herlyn, M., Kohlus, J., Fogh Vinther, H., Reise, K., De Jong, D. (2009): Seagrass. Thematic Report No. 12. In: H. Marenco & J. de Vlas (Eds.), *Quality Status Report 2009. Wadden Sea Ecosystem*. 25, Common Wadden Sea Secretariat, Trilateral Monitoring and Assessment Group, Wilhelmshaven. 20 S.
- Young, D., Clinton, P., Specht, D. (2010): Mapping intertidal eelgrass (*Zostera marina* L.) in three coastal estuaries of the Pacific Northwest USA using false colour near-infrared aerial photography. *Int. J. Remote Sens.* 31(7): 1699–1715.

