

14. Internationaler Kongreß
der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie
Hamburg 1980
Kommission VII

H.-P. Bähr und E. Dennert-Möller
Universität Hannover, Bundesrepublik Deutschland
Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen

Multispektrale Klassifizierung von Wattgebieten aus Landsat-Aufnahmen

1. Fernerkundung im Bereich der deutschen Nordseeküste

Fernerkundung kann immer dort wirtschaftlich angewandt werden, wo es um die Erfassung

1. großer Gebiete
- oder 2. schwer zugänglicher Gebiete
- oder 3. die (mehrfache) Wiederholung der Aufnahmen geht.

Für die Kartierung der Nordseewatten treffen die drei genannten Gesichtspunkte gleichzeitig zu:

1. Flächen wie das nordfriesische Watt sind so ausgedehnt, daß eine Kartierung vom Boden aus immer nur stückweise erfolgen kann. Dies hat dazu geführt, daß heute Aufnahmen verschiedenster Autoren vorliegen, oft genug mit widersprüchlichen Ergebnissen, weil Aufnahmezeitpunkt und Aufnahmeschlüssel nicht übereinstimmen.
2. Die amphibische Wattlandschaft ist naturgemäß schwer zugänglich. Der Wechsel von Ebbe und Flut schränkt den Zeitraum für die Geländearbeiten erheblich ein, abgesehen von der Tatsache, daß die Wintermonate dafür ohnehin ausfallen. Geländearbeiten im Watt sind noch teurer als auf dem festen Land, weil die eigentliche Arbeitszeit auf wenige Stunden am Tag beschränkt ist und Schiffseinsätze unvermeidbar sind.
3. Kaum eine Landschaft unterliegt so starken Veränderungen wie das Watt. Die Veränderungen, also der Sedimenttransport, bilden einen Indikator für die Strömungsverhältnisse. Diese wiederum sind maßgebend für den Schiffsverkehr wie auch für Untersuchungen im Zusammenhang mit dem Küstenschutz. Die großräumige Erfassung von V e r ä n d e r u n g e n der Wattflächen ist daher von hervorragender Bedeutung. Sie gelingt nur mit homogenem Datenmaterial, quasi mit zeitlich verschiedenen "Momentaufnahmen". Geländeaufnahmen lassen eine homogene, großräumige Erfassung des Watts nicht zu.

Mit den Aufnahmen des Erderkundungssatelliten LANDSAT steht ein geeignetes, relativ kostengünstiges Hilfsmittel für die Wattkartierung zur Verfügung: Nordfriesland wird z. B. innerhalb von 9,7 Sekunden aufgenommen. Die Bildelementgröße am Boden von 79 m x 79 m scheint für die spezifische Situation in Wattgebieten auszureichen. Dem stehen als Nachteile die geringe Anzahl

spektral unabhängiger Kanäle und die starren Wiederholungsraten von LANDSAT gegenüber. Letzteres ergab in der Zeit von 1975 - 1979 nur 3 Szenen, die das gesamte nordfriesische Watt wolkenfrei und bei Niedrigwasser zeigen.

Wattkartierungsverfahren, die sich allein auf konventionelle Luftbildinterpretation stützen, entsprechen heute nicht mehr dem Stand der internationalen Forschung und Entwicklung. Rechnerunterstützte multispektrale Klassifizierungsverfahren liefern demgegenüber statistisch überwachte Ergebnisse, welche weniger personenabhängig und weitgehend reproduzierbar sind. Dieser Gesichtspunkt ist von großer Bedeutung, wenn möglichst objektiv gewonnene Information als Grundlage für weitere Untersuchungen benötigt wird.

2. Digitale geometrische Entzerrung

Aufgabe der geometrischen Behandlung von Satellitenaufnahmen im Zusammenhang mit der Wattkartierung ist die Herstellung von Bildern, welche vorhandenen Karten möglichst fehlerfrei überlagert werden können.

Die geometrische Entzerrung von Satellitenbildern ist darüber hinaus unerlässlich, wenn Veränderungen im Watt aus Aufnahmen festzustellen sind, die zu verschiedenen Zeiten geflogen wurden.

Für die Entzerrung benötigt man zunächst ein geeignetes mathematisches Modell, welches die Karten- (Soll-)Koordinaten als Funktion der Bildkoordinaten ausdrückt:

$$X, Y = f(x', y') \quad (1)$$

Da Abtasteraufnahmen andere geometrische Verhältnisse als konventionelle zentralperspektivische Bilder aufweisen, müssen auch andere geometrische Modelle zur Beschreibung der Geometrie verwendet werden. Das allgemeinste Modell, die Kollinearitätsgleichung

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \underline{D}_{u, i, \Omega} \left(\underline{D}_{\phi, \omega, \kappa} \underline{B}_{\theta} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -d_{\theta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ r \end{pmatrix} \right) \quad (2)$$

liefern nach BÄHR 1979 geozentrische Koordinaten X, Y, Z als Funktion von Drehmatrizen der Bahnelemente ($\underline{D}_{u, i, \Omega}$), der Orientierungselemente ($\underline{D}_{\phi, \omega, \kappa}$) und des Abtastwinkels (\underline{B}_{θ}), sowie des Radiusvektors von Satelliten O zum Geozentrum M (r) und des Abstandes des Satelliten vom Aufnahme- punkt P (d_{θ}).

Die Bildkoordinate y' geht direkt in θ ein, x' geht als "Zeitparameter" in alle Parameter der Gleichung (2) ein.

S p e z i e l l f ü r L A N D S A T hat man nachweisen können (BÄHR 1979), daß die Kollinearitätsgleichungen zu Polynomen 2. Grades vereinfacht werden können:

$$\begin{aligned} x &= a_0 + a_1 x' + a_2 y' + a_3 x'^2 + a_4 y'^2 + a_5 x' y' \\ y &= b_0 + b_1 x' + b_2 y' + b_3 x'^2 + b_4 y'^2 + b_5 x' y' \end{aligned} \quad (3)$$

Hierdurch entsteht kein Genauigkeitsverlust. Die Polynomparameter werden durch eine Ausgleichung nach kleinsten Quadraten durch Einführung von Paßpunkten ermittelt. Die Paßpunktkoordinaten werden dazu im Bildsystem x', y' durch Messung in einem Präzisionsstereokomparator, im Kartensystem X, Y durch Messung in einer amtlichen topographischen Karte des Maßstabs 1 : 50 000 bestimmt.

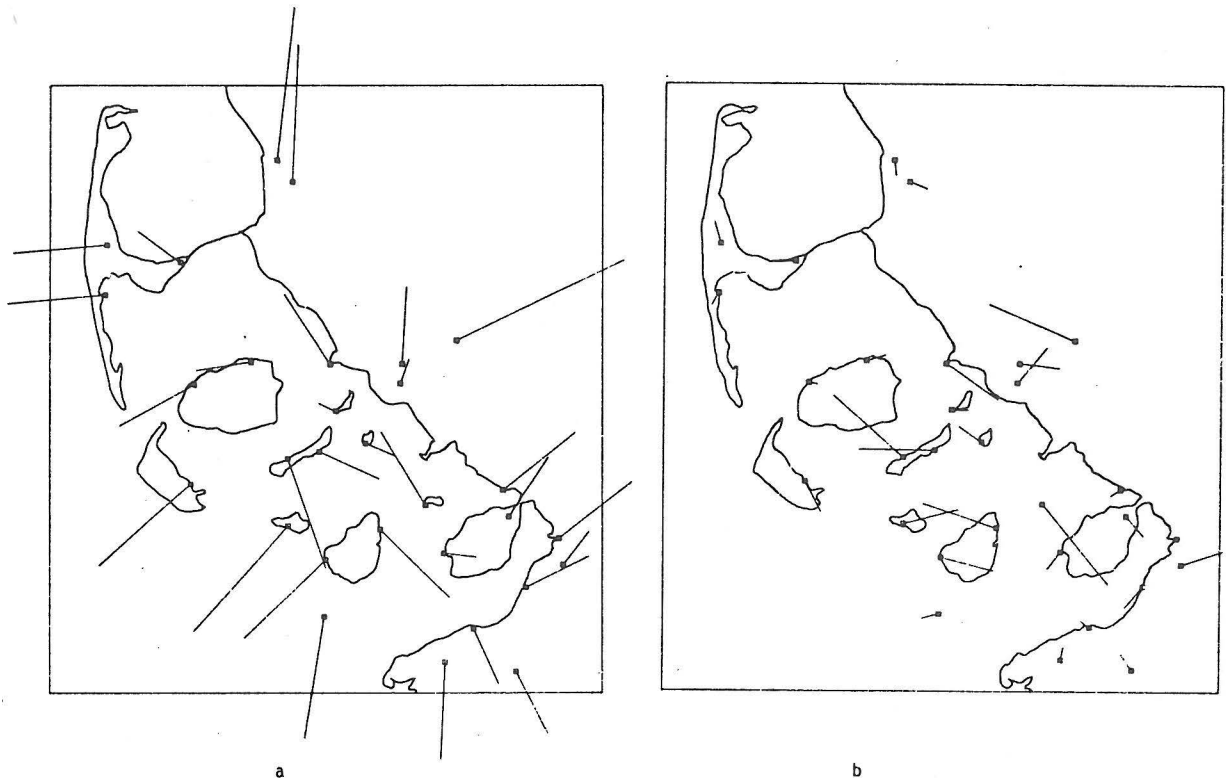


Abb. 1: Geometrische Verzerrungen an Paßpunkten
a) nach Grobentzerrung
b) nach Entzerrung mit Polynomen 2. Ordnung
Maßstab: —|—| entspricht 10 km am Boden 100 m als Vektor

Die eigentliche geometrische Entzerrung schließt sich an die Bestimmung des mathematischen Modells an. Sie erfolgt auf einer CDC CYBER 76 unter Verwendung des modularen digitalen Bildverarbeitungspaketes "MOBI", das am Institut für Photogrammetrie entwickelt wurde (s. BAHR 1977). Die Verarbeitung muß in zwei Schritten durchgeführt werden, da im grob verzerrten Originalbild die Paßpunkte nicht sicher genug bestimmt werden können. Zuerst werden die a priori bekannten Parameter, der Affinitätsfaktor und der Erdrotationseffekt angebracht. Diese "Grobentzerrung" liefert schon eine gute Genauigkeit, nämlich etwa 100 m für eine ganze Szene. Die "Feinentzerrung" erfolgt im zweiten Schritt. Auf die digitale Herstellung eines "runden" Maßstabs wird verzichtet, da die Bildgröße bei der Ausgabe am OPTRONICS maximal nur 23 cm x 23 cm betragen kann und eine Vergrößerung praktisch ohnehin notwendig ist. Der exakte Maßstabsfaktor ergibt sich bei der Ausgleichung von (3).

Für die Kartierung der nordfriesischen Wattgebiete wurde eine LANDSAT-Aufnahme vom 11.8.1975 ausgewählt.

Abb. 1 a zeigt Paßpunktanordnung und Restfehler an den Paßpunkten nach der Grobentzerrung. Als mittlere Fehler in Flug- und Abtastrichtung (x, y) erhält man

$$m_x = \pm 89,7 \text{ m}$$

$$\text{und } m_y = \pm 78,8 \text{ m}$$

Das in der Größenordnung von 1 Bildelement liegende Ergebnis ist darauf zurückzuführen, daß es sich nur um einen kleinen Bildausschnitt handelt (16 % der Gesamtscene).

Die anschließende digitale Entzerrung nach Polynomen (3) führt auf das in Abb. 2 gezeigte Resultat. Die Restfehler dieses Bildes sind gegenüber dem grob entzerrten Bild noch einmal erheblich reduziert worden, wie aus Abb. 1 b hervorgeht. Man erhält

$$m_x = \pm 25,7 \text{ m}$$

$$m_y = \pm 51,3 \text{ m}$$

Faßt man beide Fehlerkomponenten zusammen, so führt das auf $\pm 46,4 \text{ m}$, ein Ergebnis in der Größenordnung von 50 m, das man, wie die Erfahrung zeigt, bei LANDSAT-Aufnahmen im allgemeinen erwarten kann.



Abb. 2:

Nordfriesisches
Wattgebiet

Ausschnitt LANDSAT-
Szene vom 11.8.1975,
Kanal 7, Gittermaschen-
weite 10 km

3. Digitale multispektrale Klassifizierung

Das bekannteste Verfahren zur überwachten Klassifizierung ist die "Maximum Likelihood Methode" (NIEMANN 1974, TOU/GONZALES 1974). Es ist in den letzten Jahren auf den verschiedensten Gebieten der Erderkundung erfolgreich zur Anwendung gebracht worden und hat sich auch für die Klassifizierung der norddeutschen Wattgebiete im Bereich der Jade bewährt (s. DENNERT-MÖLLER). Der Entscheidungsalgorithmus dieses Verfahrens

$$x \in \omega_i \Leftrightarrow p_i(x) > p_j(x) \quad \forall j \neq i, \quad j = 1, \dots, m$$

wobei

$$p_i(x) = p(\omega_i) \left(\frac{1}{2\pi}\right)^{\frac{n}{2}} \cdot (\det(C_i))^{-\frac{1}{2}} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} (x - \underline{m}_i)^T \cdot C_i^{-1} (x - \underline{m}_i) \right\} \quad (4)$$

zeigt, welche Bedeutung den Parametern Kovarianzmatrix C_i und Mittelwertvektor \underline{m}_i zukommt. Da sie aus Trainingsfeldern geschätzt werden, wird damit deutlich, daß die richtige Auswahl der Trainingsfelder für die Ergebnisse der Klassifizierung eine zentrale Rolle spielt. Wählt man zur Kennzeichnung einer Klasse ein Trainingsfeld aus, das mehr als nur Elemente dieser Klasse enthält, so ergibt die Schätzung verfälschte Parameter, die sich direkt auf die Abgrenzung gegen die anderen Klassen auswirkt.

Da die verschiedenen Wattoberflächen keine klar definierten Grenzen aufweisen, sondern fließend ineinander übergehen, ist die exakte Definition von Trainingsfeldern hier besonders schwierig. Sie wird außerdem dadurch erschwert, daß oft kaum ausreichend große wirklich homogene Flächen ausgewählt werden können, die als Trainingsfelder zur "Eichung" des Verfahrens geeignet sind. Aus diesen Gründen ist im Bereich der überwachten Klassifizierung von Wattgebieten bei der Auswahl von Trainingsfeldern die Unterstützung durch einen geländekundigen Fachmann unabdingbar.

Die Rechenzeit des Verfahrens wächst etwa quadratisch mit der Anzahl der verwendeten Kanäle. Da außerdem die Kanäle 4 und 5 sowie 6 und 7 stark korreliert sind, ist es sinnvoll, die Klassifizierung mit nur zwei Kanälen durchzuführen. Eine Hauptkomponentenanalyse verschiedener Wattflächen in der geometrisch entzerrten Bildszene ergibt, daß dort die Hauptrichtungen der Information etwa in Richtung der Kanäle 5 und 6 liegen. Diese beiden Kanäle werden daher für die weiteren zur Klassifizierung notwendigen Arbeiten verwendet.

Im vorliegenden Fall sollen die folgenden Klassen unterschieden werden:

1. Sandwatten
2. Trockene Außensände
3. Schlickwatten
4. Vorland
5. Land
6. Wasser
7. Restflächen

Die Klasse "Restflächen" umfaßt die als unklassifizierbar zurückgewiesenen Bildpunkte. Das sind diejenigen Punkte, für die der maximale Wert der in (4) angegebenen Entscheidungsfunktion unterhalb eines vorgegebenen Schwellenwertes liegt.

Die Klassen "trockene Außenwände" und "Wasser" sind in der Unterscheidung untereinander wie auch von den übrigen Klassen unproblematisch: Die auswählbaren Trainingsgebiete sind im Bild leicht zu erkennen und enthalten auch genügend viele Punkte zur Parameterschätzung. Ihre mittleren Grauwerte unterscheiden sich in beiden Spektralbereichen erheblich von denen der anderen Klassen.

Da auf dem Festland nicht weiter differenziert werden soll, kann das Trainingsgebiet für die Klasse "Land" an beliebiger Stelle dort festgelegt werden. Die Grauwertbereiche der Wattflächen überschneiden sich im allgemeinen nur wenig mit den Grauwertbereichen der Landflächen, daher bietet ihre gegenseitige Abgrenzung keine Schwierigkeiten. Lediglich die Klasse "Vorland" ist - wie auch das Klassifizierungsergebnis zeigt - nicht so leicht von "Land" zu trennen, weil Feuchtgebiete auf dem Festland und Vorland sich kaum unterscheiden. Die Auswahl geeigneter Trainingsgebiete für die Klassen "Sandwatt" und "Schlickwatt" ist einerseits schwierig, weil nur wenige Gebiete auch groß und homogen genug sind, andererseits dadurch, daß es Mischformen gibt und die Grenzen zwischen den verschiedenen Schlickwatt- und Sandwattarten nicht klar definiert sind. Es sind daher oft mehrere Trainingsgebiete zur Kennzeichnung einer Klasse notwendig. Es ist im allgemeinen nicht sinnvoll, diese verschiedenen Trainingsgebiete zu einem Trainingsgebiet zusammensetzen und daraus die für die Klassifizierung benötigten Parameter zu berechnen. Denn betrachtet man die Verteilungsfunktionen, die sich aus zwei Trainingsgebieten einer Klasse ergeben würden, so sind diese entweder in etwa gleich - dann reicht auch eins der beiden Trainingsgebiete aus, oder sie sind verschieden. In dem Fall würde die Verwendung des zusammengesetzten Trainingsgebietes zur Parameterschätzung bedeuten, daß man eine zweigipflige Verteilungsfunktion durch eine eingipflige zu approximieren versucht.

Verwendet man mehrere Trainingsgebiete für eine Klasse ω_i , so sollte man also diese Klasse als Vereinigungsmenge von durch die verschiedenen Trainingsgebiete beschriebenen "Unterklassen" ω_{ik} auffassen

$$\omega_i = \bigcup_k \omega_{ik}$$

und (4) modifizieren zu

$$\underline{x} \in \omega_i \Leftrightarrow p_i(\underline{x}) > p_j(\underline{x}) \quad i \neq j \quad (5)$$

wobei

$$p_i(\underline{x}) = \max_k p_{ik}(\underline{x})$$

mit

$$p_i(\underline{x}), p_j(\underline{x}) \text{ wie in (4) und } p_{ik} \text{ analog.}$$

Die Lage der im Beispiel verwendeten Trainingsgebiete ist in Abb. 3 angegeben. Die Zahlen 1 bis 6 kennzeichnen die Lage der zur Klassifizierung ausgewählten Trainingsgebiete, während $\bar{1}$ bis $\bar{6}$ für die anschließend zur Kontrolle des Klassifizierungsergebnisses verwendeten Gebiete stehen.

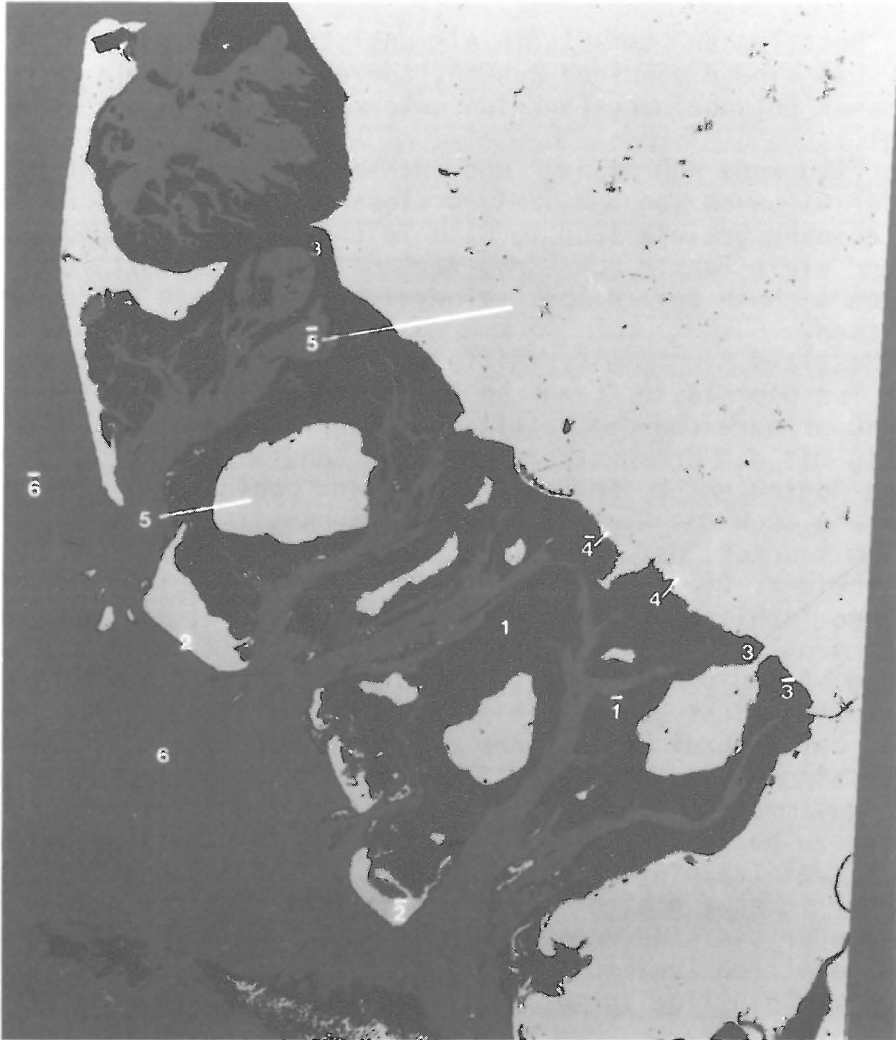


Abb. 3: Trainingsgebiete und Kontrollflächen für Klassifizierung des Nordfriesischen Watts

Für die Klasse "Schlickwatt" erwies es sich als sinnvoll, zwei Trainingsgebiete zu verwenden, da deren mittlere Grauwerte sich stark unterschieden; zur Kennzeichnung der übrigen Klassen reichte jeweils ein Trainingsgebiet aus.

Die Klassifizierung ergab für die flächenmäßigen Anteile der sieben Klassen im Bild folgende Verteilung

Klasse	Fläche in km ²
Sandwatten	828
trockene Außensände	51
Schlickwatten	1353
Land mit Vorland	4774
Wasser	1697
Restflächen	1765

Das Klassifizierungsergebnis zeigen die Abbildungen 4 - 6



Abb. 4:

Klassifizierungs-
ergebnis

Von hell nach dunkel:

Trockene Außensände,
Sandwatten,
Schlickwatten,
Vorland, Land, Wasser
und unklassifizierte
Flächen

Die Darstellung des Klassifizierungsergebnisses sollte grundsätzlich in Form thematischer Karten erfolgen. Dies kann entweder für alle Klassen gemeinsam in einer einzigen Karte oder in mehreren Karten für jeweils einzelne Klassen getrennt geschehen. Die separate Präsentation hat den Vorteil, daß die Verteilung der einzelnen Klassen auch großräumig sehr übersichtlich wirkt; sie hat den Nachteil, daß die Anschauung der relativen Lage der Klassen zueinander verloren geht. Wegen der starken Streuung der einzelnen Klassen im Watt sollte die gemeinsame Darstellung jedoch unbedingt in Farbe erfolgen.



Abb. 5
Klassifizierungs-
ergebnis
Sandwatten

4. Qualität des Klassifizierungsergebnisses

Die Frage nach der Qualität des Ergebnisses einer Klassifizierung ist für die Praxis außerordentlich wichtig. Sie muß beantwortet werden, um gewährleisten zu können, daß eine auf der Basis des Klassifizierungsergebnisses erstellte thematische Karte bestimmten Genauigkeitsansprüchen genügt. Sie stellt sich außerdem, wenn es um den Vergleich der Leistungsfähigkeit verschiedener Klassifizierungsverfahren geht. Nicht zuletzt taucht sie immer dann auf, wenn Klassifizierungsergebnisse miteinander verglichen werden sollen, die aufgrund unterschiedlicher Auswahl von Trainingsgebieten oder unter Verwendung verschiedener Spektralbereiche entstanden sind; einmal, um festzustellen, welches Ergebnis das bessere ist, zum anderen, um eventuell abzuschätzen, ob durch weitere Variation Verbesserungen zu erwarten sind. Um über die Qualität eines Klassifizierungsergebnisses Aussagen zu treffen, müßte man es durch eine Ortsbegehung Bildpunkt für Bildpunkt überprüfen. Solche Ortsbegehungen sind gerade in Wattgebieten - sofern sie überhaupt möglich sind - mit erheblichem zeitlichen und finanziellen Aufwand verbunden. Sie sind daher höchstens in ausgewählten Teilbereichen durchführbar.

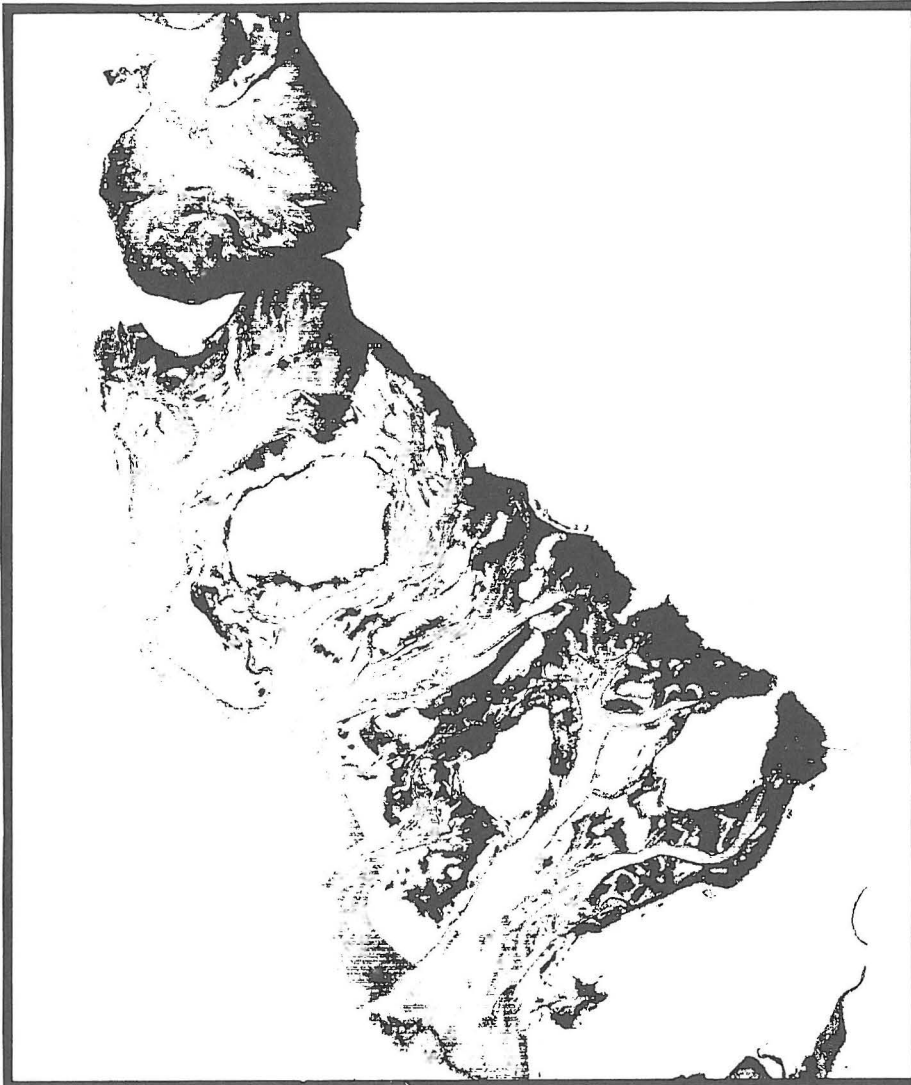


Abb. 6:
Klassifizierungs-
ergebnis
Schlickwatten

Ist geeignetes Kartenmaterial für die klassifizierte Szene vorhanden, so läßt sich die Qualität der Klassifizierung daran messen. Bei HABERÄCKER 1979 findet sich der Vorschlag, eine Verkleinerung des zu klassifizierenden Bildes zunächst Punkt für Punkt manuell visuell zu interpretieren. Diese Interpretation soll als Grundlage für die Untersuchung der Qualität des digital erstellten Klassifizierungsergebnisses dienen. Eine solche manuelle "Punkt-für-Punkt-Interpretation" ist in Wattgebieten aufgrund ihrer Heterogenität kaum mit der erforderlichen Sicherheit durchzuführen. Da in Wattgebieten außerdem im allgemeinen keine flächendeckenden Karten für eine LANDSAT-Szene zur Verfügung stehen, muß man sich für die Erfassung der Genauigkeit des Klassifizierungsergebnisses auf Schätzwerte beschränken, die aus ausgewählten Kontrollflächen ermittelt werden können. Wählt man die Kontrollflächen so aus, daß sie jeweils nur Punkte einer Klasse enthalten - es treten hier dieselben Probleme auf wie bei der Auswahl geeigneter Trainingsgebiete - so bieten sich als Genauigkeitsmaß zum Beispiel die relativen Häufigkeiten q_{ij} der richtig erkannten Bildpunkte der Klasse ω_j an. Bezeichnet man mit N_j den Stichprobenumfang und mit K_{ij} die Anzahl der als zur Klasse ω_j gehörig erkannten Punkte, so ist für $i = j$

$$q_{ii} = \frac{K_{ij}}{N_i}$$

der relative Anteil der richtig erkannten Bildpunkte und

$$\sum_{j \neq i} q_{ij} = \frac{1}{N_i} \sum_{j \neq i} K_{ij}$$

der relative Anteil der falsch eingeordneten Bildpunkte in der Stichprobe. q_{ii} ist aufzufassen als Schätzwert für die "Trefferwahrscheinlichkeit" des Klassifizierungsverfahrens bezogen auf die Klasse ω_i .

Die beiden nachfolgenden Tabellen enthalten die q_{ij} für die Klassen 1 - 6 in Prozent. Die Trefferwahrscheinlichkeiten q_{ij} stehen in den Hauptdiagonalen. Als Kontrollflächen wurden die Trainingsgebiete (siehe 1 bis 6 in Abb. 3) und zusätzliche Testgebiete (siehe 1 bis 6 in Abb. 3) verwendet. Die Auswahl dieser Kontrollflächen geschah in Kombination der oben dargestellten Möglichkeiten, also durch visuelle Interpretation unter Einbeziehung von Kartenmaterial sowie durch Unterstützung durch einen geländekundigen Fachmann und sollte noch über Ortsbegehungen ergänzt bzw. abgesichert werden.

Klassifiziert als	Sand	Trockener Sand	Schlickwatt	Vorland	Land	Wasser	unklassifiziert
Trainingsgebiet							
Sand	90.3	-	9.5	0.22	-	-	-
Trockener Sand	-	100.0	-	-	-	-	-
Schlickwatt	2.5	-	97.3	0.2	-	-	-
Vorland	-	-	8.1	89.6	2.3	-	-
Land	-	-	-	10.6	89.4	-	0.04
Wasser	-	-	-	-	-	100.0	-

Tabelle 1: Klassifizierungsqualität gemessen in Trainingsgebieten

Es fragt sich, ob diese Werte geeignet sind, die Qualität des gesamten Klassifizierungsergebnisses quantitativ zu erfassen. Man darf nämlich nicht übersehen, daß nicht nur die Trainingsgebiete, sondern auch die zusätzlichen Testgebiete nicht willkürlich gewählte Stichproben sind, sondern visuell besonders gut erkennbare Flächen, die jeweils nur Punkte einer Klasse enthalten sollen. Außerdem ist die Zuverlässigkeit der Schätzwerte für die Treffer- und Fehlerwahrscheinlichkeiten sicher abhängig vom Umfang der Stichprobe, also von der Größe der ausgewählten Kontrollflächen. Es ist also sinnvoll, zusätzlich Konfidenzintervalle für diese Werte anzugeben. Ansätze dazu finden sich z. B. bei NIEMANN 1974.

Klassifiziert als	Sand	Trockener Sand	Schlickwatt	Vorland	Land	Wasser	unklassifiziert
Sand	93.8	-	2.7	3.1	-	-	0.4
Trockener Sand	-	100.0	-	-	-	-	-
Schlickwatt	-	-	99.4	0.6	-	-	-
Vorland	-	-	4.8	92.9	1.2	-	1.0
Land	-	-	-	13,9	85.9	-	0.2
Wasser	-	-	-	-	-	100.0	-

Tabelle 2: Klassifizierungsqualität gemessen in Testgebieten

Literatur:

- BÄHR, H.-P.: Analyse der Geometrie auf Photodetektoren abgetasteter Aufnahmen von Erderkundungssatelliten. Schriftenreihe des Niedersächsischen Landesverwaltungsamtes - Landesvermessung - , Hannover 1976
- BÄHR, H.-P.: Digital Image Processing Experience at Hannover Institute for Photogrammetry. IGP Symposium Komm. III, Arbeitsgruppe 4, Graz 1977
- BÄHR, H.-P.: Geometric Analysis and Rectification of LANDSAT MSS Imagery: Comparison of Different Methods. IGP Komm. III, Moskau 1978
- BÄHR, H.-P.: Wechselwirkung von Photogrammetrie und Fernerkundung durch Anwendung digitaler Bildverarbeitung. Habilitationsschrift Hannover 1979
- DENNERT-MÖLLER, E.: Multispectral Classification of Tidal Land. Mitteilungen der geodätischen Institute der Technischen Universität Graz, Folge 29, 1977
- HABERACKER, P.: Untersuchungen zur Beurteilung der Güte von Klassifizierungsergebnissen in Bildverarbeitung und Mustererkennung. E.Triendl Herausgeber; Springer Berlin Heidelberg 1978
- NIEMANN, H.: Methoden der Mustererkennung. Frankfurt/M. 1974
- TOU, J.T. und GONZALES, R.C.: Pattern Recognition Principles. London 1974