

Sedimentation, Transport und Erosion an der Nordküste Kolumbiens zwischen Barranquilla und der Sierra Nevada de Santa Marta

Von AXEL FRHR. VON ERFFA

Mit 26 Abbildungen, 1 Beilage und 2 Tabellen*)

Zusammenfassung

Die Küste Nordkolumbiens zwischen Barranquilla und der Sierra Nevada de Santa Marta ist in jüngster geologischer Vergangenheit Schauplatz rascher Veränderungen. Der Rio Magdalena, der heute am Westrand dieses Gebietes in die Karibische See mündet, hat im Laufe des Jungquartärs in drei Phasen Deltas ins Meer vorgebaut. Die beiden älteren Deltas wurden von der Erosion zerstört und sind nur noch an der submarinen Morphologie zu erkennen. Das zweitälteste Delta hatte vor etwa 2400 Jahren seine größte Ausdehnung. Die damals einsetzende Zerstörung dieses Deltas ist auch heute noch nicht ganz abgeschlossen. Das jüngste Delta baut sich vor der heutigen Mündung des Rio Magdalena auf.

Die vom Nordostpassat erzeugten Wellen bewirken an der nicht ganz ausgeglichenen Küstenlinie einen ausgeprägten, nach Westen gerichteten Brandungslängsstrom. Dieser transportiert die im Westteil des Gebietes erodierten Sedimente des zweitältesten Deltas auf die Mündung des Rio Magdalena zu. Dort bauen sie zum Teil dessen jüngstes Delta mit auf, zum Teil gleiten sie durch submarine Cañons in die Tiefsee ab.

Unabhängig vom morphologischen Befund ergab die Sedimentuntersuchung der Strandsande:

1. einen nach Westen gerichteten Sedimenttransport entlang der Küstenlinie.
2. einen im Küstenverlauf sich ändernden Energiehaushalt des Meeresstrandes — im Osten Sedimentation, im Westen Erosion (Schwermineralseifen). Durch diese Erosion ist in Zukunft ein Teil der wichtigen Straße von Barranquilla nach Santa Marta gefährdet.
3. Die Herkunft der an der heutigen Oberfläche des Küstenbereiches liegenden Sedimente. Im Gebiet des ältesten Deltas stammen sie aus der Sierra Nevada de Santa Marta, in den jüngeren Deltas aus dem Einzugsbereich des Rio Magdalena.

Resumen

La costa norte de Colombia, entre Barranquilla y la Sierra Nevada de Santa Marta ha sido escenario de cambios morfológicos en un pasado geológico reciente y subreciente. El Río Magdalena desemboca actualmente en el mar caribe, por

*) Dissertation Justus Liebig-Universität Gießen (1972).

el extremo occidental de éste territorio y ha formado varios deltas. Estos deltas se han originado en tres fases comprendidas en el Cuaternario reciente. Los dos mas antiguos quedaron destruidos por la erosión y solamente son detectados en la morfología submarina. El delta siguiente en antigüedad, alcanzó su mayor amplitud hace 2.400 años aproximadamente. La etapa de destrucción de éste delta se inició por aquellos tiempos, y aun continúa en actividad. El delta más reciente se esta formando al frente de la boca actual del Río Magdalena.

La línea costera no es completamente uniforme y se encuentra sometida al flujo de resacas longitudinales y rasantes. Estas corrientes van hacia el oeste y son originadas por las olas que nacen por influencia de los vientos alisios que soplan del noreste. Las corrientes arrastran los sedimentos erosionados del delta de menor antigüedad y los depositan en la desembocadura del Río Magdalena. Parte de estos sedimentos contribuye a la farmación del delta naciente y parte de los mismos se desliza por cañones submarinos hacia el fondo del mar.

Independientemente de los resultados morfológicos, el análisis de los sedimentos en las arenas de las playas demostró:

1. un transporte de sedimentos en dirección oeste y sobre la línea costera.
2. un cambio en el balance energético a lo largo de la costa, hacia el oriente, sedimentación y hacia el oeste, erosión (placeres de minerales pesados). Esta erosión pone en peligro, en el futuro, un tramo de la carretera Barranquilla — Santa Marta.
3. el origen de los sedimentos aflorantes, actualmente en la superficie del área costera. En la región del delta más antiguo proceden estos de la Sierra Nevada de Santa Marta, mientras que los de los deltas más recientes, del área de recarga del Río Magdalena.

Summary

The coast of Northern Colombia between Barranquilla and the Sierra Nevada de Santa Marta has been subject to swift morphological alterations in the near geological past. The Magdalena River mouth into the Caribbean Sea is actually in the western end of the region and has formed deltas in three phases during the recent Quaternary. The two older ones were destroyed by erosion and can only be detected by submarine morphology. The second phase is represented by a delta, that reached its widest dimensions approximately 2.400 years ago. The then starting destruction continues until today and is not yet finished. The recent mouth foresets the youngest delta of the Magdalena River.

A westbound longshore current along the not always even shoreline is produced by north-eastern tradewinds. This current transports the eroded sediments of the second oldest delta to the mouth of the Magdalena River. Part of them helps to build its new delta, and part of them glides through submarine cañons to the deep sea.

Besides the morphological evidence, sedimentary analysis of the shore sands shows:

1. a longshore drift of sediments from east to west.
2. a change in the balance of energy: sedimentation in the east; erosion in the west (placers of heavy minerals). The very important highway from Barranquilla to Santa Marta is thus endangered by erosion in the near future.
3. the sources of the upper sediment layers in the shore area: in the oldest delta their provenance is the Sierra Nevada de Santa Marta; in the younger deltas the area of affluents of the Magdalena River.

Inhalt	
Einleitung	157
I. Küstenmorphologie	159
1. Das Untersuchungsgebiet	160
A. Rincón del Doctor bis Pueblo Viejo (km 0,0—12,4)	160
B. Boca de la Ciénaga (km 12,4—14,4)	161
C. Ciénaga bis Ciénaga Cuatro Bocas (km 9,4—55,0)	163
D. Ciénaga Cuatro Bocas bis Ciénaga El Torno (km 54—67)	165
a. Ciénaga Cuatro Bocas	165
b. Ciénaga La Atascosa	166
c. Ciénaga de Las Piedras	166
d. Ciénaga El Torno	166
E. Ciénaga El Torno bis Bocas de Ceniza (km 67—77,4)	167
2. Faktoren, die die Morphologie der Küste beeinflussen	168
A. Wind und Wellen	168
B. Flüsse	169
C. Der Mensch	169
3. Die Entwicklung des Magdalena-Deltas	171
A. Jungquartär	171
B. Historische Zeit	176
C. Veränderungen der Küste nach 1953	177
a. Die Mündungen vom Rio Toribío und Rio Córdoba	179
b. Boca de la Ciénaga	181
c. Isla de Salamanca	182
d. Ciénaga La Atascosa bis Ciénaga El Torno	182
e. Isla de Los Gómez	183
4. Ergebnisse	183
II. Sedimentanalyse	187
1. Probennahme und -behandlung	188
2. Korngrößenanalyse	191
3. Schwermineralanalyse	197
A. Transportrichtung am Strand	197
B. Relatives Alter der Strandsande	198
C. Herkunft der Strandsande	200
D. Schwermineralseifen	202
4. Leichtmineralanalyse	205
5. Feinkiesanalyse	205
6. Ergebnisse der Sedimentanalyse	206
Karten, Luftbilder und Literatur	207

Einleitung

1963 wurde in Santa Marta/Kolumbien (siehe Abb. 1) das Instituto Colombo Alemán de Investigaciones Científicas als Außenstelle des Tropeninstitutes der Justus Liebig-Universität Gießen gegründet. Als Zielsetzung galt, den Naturraum der Nordküste Kolumbiens von einem speziell dafür ausgerüsteten Forschungsinstitut aus nächster Nähe untersuchen zu können (ANKEL 1966).

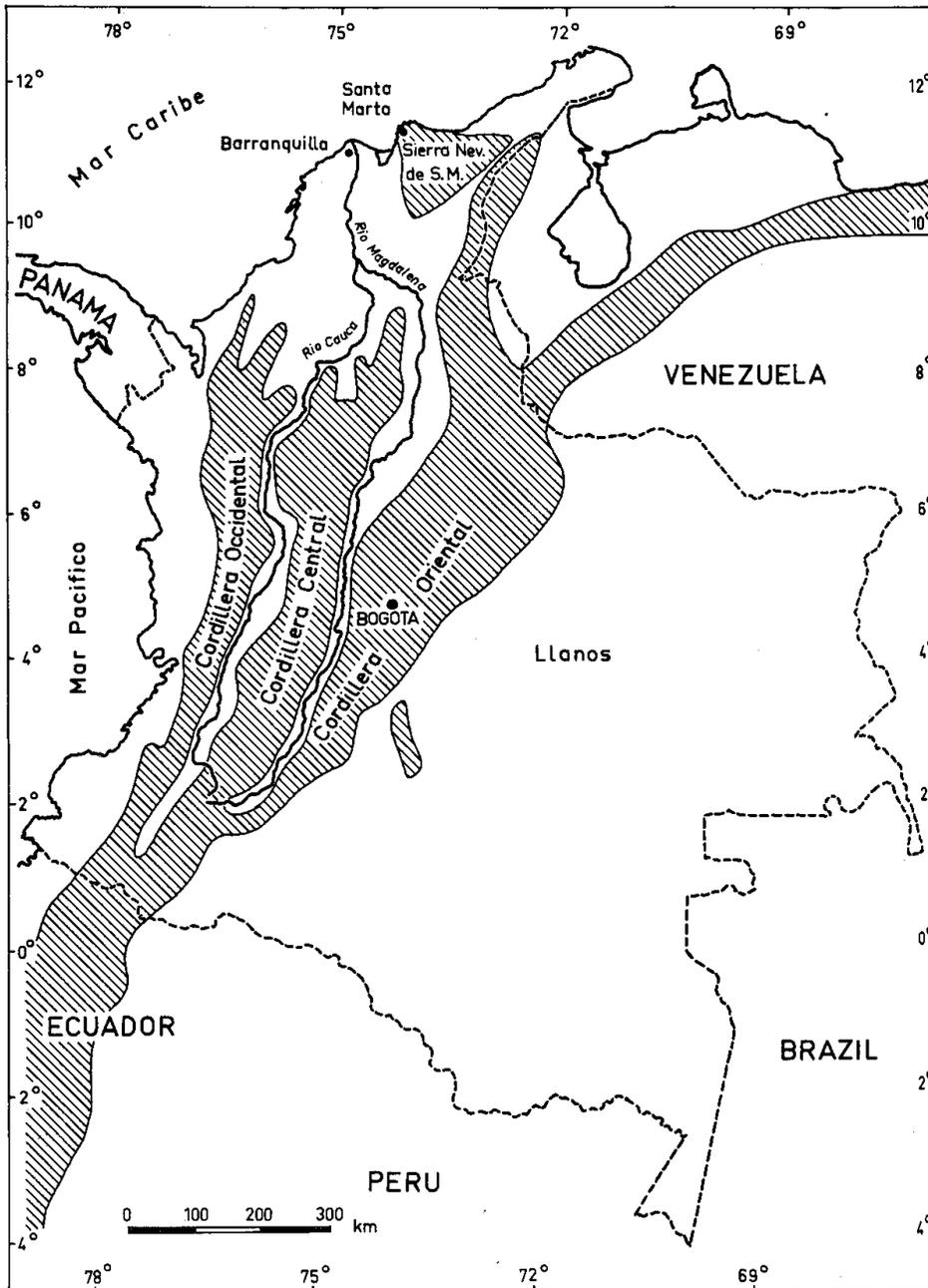


Abb. 1. Übersichtskarte von Kolumbien.

Ein auffallendes Element dieses Naturraums ist die große Lagune „Ciénaga Grande de Santa Marta“ mit der Isle de Salamanca, einer nehrungsartigen Halbinsel, die sie vom Karibischen Meer trennt. Aufgabe der vorliegenden Untersuchung ist es, das gegenwärtige Geschehen an der dem Meer zugewandten Seite der Isla de Salamanca und darüber hinaus an der gesamten Küste zwischen der Mündung des Rio Magdalena und der Sierra Nevada de Santa Marta zu erfassen. Hieraus sind Rückschlüsse auf die Entwicklung der Deltaküste des Rio Magdalena in der jüngsten geologischen Vergangenheit zu ziehen und wenn möglich Voraussagen auf zukünftige Veränderungen zu geben. Letzteres ist von Bedeutung für den Bestand der Verkehrswege in diesem Bereich (carretera panamericana and canal del Clarín).

Durch die Anwendung von zwei verschiedenen Arbeitsmethoden ergab sich die Gliederung dieser Untersuchung in die beiden Hauptabschnitte Morphologie und Sedimentanalyse.

Die Durchführung der Untersuchung folgte einer Anregung von Prof. R. WEYL und wurde von ihm entscheidend unterstützt. Ermöglicht wurde sie durch ein Stipendium des Deutschen Akademischen Austauschdienstes (DAAD). In Kolumbien erhielt ich große Hilfe durch die Leitung des Instituto Colombo-Alemán in Santa Marta (Prof. Dr. W. E. ANKEL und Dr. R. KAUFMANN) und durch die Kolumbianische Naturschutzbehörde INDERENA. Für Hilfe in vielen Fragen und Diskussionen danke ich besonders Prof. Dr. E. WALGER in Kiel und Dr. G. MERTINS in Gießen.

I. Küstenmorphologie

Der heutige Deltabereich des Rio Magdalena wird im Osten durch die Sierra Nevada de Santa Marta, im Süden und Westen durch Hochgebiete aus tertiären Sedimenten und im Norden durch das Karibische Meer begrenzt (vgl. Abb. 10). Der Rio Magdalena fließt an der westlichen Begrenzung dieses Gebietes und mündet an dessen Nordwest-Ecke etwa 15 km nordnordwestlich von Barranquilla. Östlich der Mündung bildet ein Mangrovesumpf, der durch einen Strandwall vom Meer getrennt ist, die Küste des Deltas. Dieses Strandwallsystem geht nach Osten in eine Strandwallinsel über, die Isla de Salamanca. In ihrem Ostteil bildet die Isla de Salamanca eine nehrungsähnliche Halbinsel, die eine große Lagune, die Ciénaga Grande de Santa Marta, vor dem Meer schützt. Bei der Stadt Ciénaga hat diese Lagune eine Verbindung zum Karibischen Meer. Nordöstlich von Ciénaga schließt sich bis an die Steilküste der Sierra Nevada ein Schwemmfächer von zwei kleinen Flüssen an, der zum Meer hin von einem Kliff, mehreren Strandwällen und zwei kleinen Deltas begrenzt wird. Südlich hiervon — der Sierra Nevada vorgelagert — liegt eine weite Alluvialebene, die sich vom Gebirgsfuß von etwa 100 m Meereshöhe bis in die Niederung der Ciénaga Grande erstreckt.

Die 450 km² große Ciénaga Grande erhält Zufluß von der Sierra Nevada und von Hochwasserkanälen des Rio Magdalena aus Südwesten. Sie ist umrahmt von Mangrovesümpfen, die im Westen an ein System von subrezentem Uferdämmen (natural levées) und dazugehörigen alten Flußschlingen des Rio Magdalena grenzen. Auch der heutige Rio Magdalena fließt zwischen Uferdämmen. Nordöstlich von Barranquilla befindet sich der Bereich eines ehemaligen Mündungsarmes des Rio Magdalena, der noch in jüngster Zeit aktiv war (vgl. Abb. 2).

1. Das Untersuchungsgebiet

Das engere Arbeitsgebiet umfaßt den Sandstrand der Küste zwischen der Mündung des Rio Magdalena (Bocas de Ceniza) und dem Rincón del Doctor am Rande der Sierra Nevada de Santa Marta. Bei der Betrachtung der Morphologie sind auch die nördlich und südlich anschließenden Gebiete zu berücksichtigen; im Norden handelt es sich um den submarinen Bereich (siehe Seite 71) und im Süden von Osten nach Westen um folgende Abschnitte (Abb. 2):

- A. Die Küste zwischen Rincón del Doctor und Pueblo Viejo samt dem Schwemmfächer und den Deltas der Flüsse Toribio und Córdoba.
- B. Die Öffnung der Ciénaga Grande zum Meer (Boca de la Ciénaga) zwischen Pueblo Viejo und Isla del Rosario.
- C. Die Isla de Salamanca zwischen Ciénaga und der Ciénaga Cuatro Bocas.
- D. Die kleineren Lagunen von Ciénaga Cuatro Bocas bis Ciénaga El Torno.
- E. Die Isla de Los Gómez zwischen der Ciénaga El Torno und Bocas de Ceniza.

Die im weiteren benutzten Kilometerangaben beziehen sich auf laufende Kilometer, gemessen in der Strandlinie vom Rincón del Doctor nach Westen bis zur Mündung des Rio Magdalena an der Bocas de Ceniza (siehe Abb. 2).

A. Rincón del Doctor bis Pueblo Viejo (km 0,0—12,4)

In diesem Bereich münden zwei kleine Gebirgsflüsse der Sierra Nevada ins Meer, der Rio Toribio und der Rio Córdoba. Nachdem sie das Gebirge verlassen, das hier entlang einer großen Störung, der „falla Santa Marta“ (CAMPBELL 1968 u. a.), unvermittelt aus der Ebene aufsteigt, fließen sie durch einen flachen Schwemmkegel, der am Gebirgsfuß eine Meereshöhe von etwa 20 m hat und allmählich nach Norden, Westen und Süden abfällt. Am Rincón del Doctor und im Ort Ciénaga erreicht der Schwemmkegel an der Küste das Meeresniveau, während er zwischen den Mündungen der beiden Flüsse ein Kliff von etwa 6 m

Höhe bildet. Die Flüsse mäandrieren heute nicht mehr über die Schwemmebene, sondern sind in ihre eigenen Sedimente eingeschnitten.

Das Kliff, das von nordöstlich der Mündung des Rio Toribio (km 1,3) bis knapp nördlich der Ciénaga reicht (km 6,3), ist auf der ganzen Länge nicht mehr aktiv, sondern wird von einer bis zu 100 m breiten Strandebene mit Strandwällen vor der Erosion geschützt. Nordöstlich und südwestlich des Kliffs ist das Land so niedrig, daß die Küste hier nur durch Strandwälle gebildet wird.

Vom Rincón del Doctor erstreckt sich die Küste mit zunächst drei Strandwällen und dann einem vor dem Kliff des Schwemmfächers auf 2,4 km leicht konkav nach Südwesten bis an die Mündung des Rio Toribio. Westlich der Mündung dieses Flusses liegt bei km 2,6 ein kleines Kap „Punta de Papare“, an dem die Küste auf 300 m nach Südosten abbiegt, um dann wieder bis zum Rio Córdoba (km 5,4) die alte Richtung nach Südwesten einzunehmen. Hier verläuft der Strand leicht konkav etwa 100 m vor dem Kliff, von diesem durch zwei Strandwälle getrennt. Etwa 600 m südwestlich der Mündung des Rio Córdoba befindet sich das Kap „Punta de Córdoba“, an dem die Küste auf 700 m nach Süd-südosten abbiegt. Hier nähert sie sich dem flacher werdenden Kliff derart, daß sich kein Strandwall mehr ausbilden kann. Von Ciénaga zieht sich die Küste leicht konkav bis Pueblo Viejo (km 12,4) hin und ändert dabei ihre Richtung von Südwest auf Westsüdwest.

Der Küstenabschnitt südwestlich von Ciénaga gehört morphologisch schon zur Isla de Salamanca, denn die künstlich angelegte Öffnung der Ciénaga Grande zum Meer liegt westlich von Pueblo Viejo, während sich die natürliche Boca de la Ciénaga bis zum Bau der Straße von Barranquilla nach Santa Marta zwischen Pueblo Viejo und dem Ort Ciénaga befand.

Außerhalb des Arbeitsgebietes schließt sich nördlich vom Rincón del Doctor das bis zu 20 m hohe, aktive Kliff einer angehobenen Brandungspattform an. Hier steht tiefgründig verwitterter Quarzdiorit des Batolithen von Santa Marta an (Tschanz et al. 1969).

B. Boca de la Ciénaga (km 12,4—14,4)

Etwa 400 m westsüdwestlich von Pueblo Viejo knickt die Küstenlinie nach Südwesten zur Öffnung der Ciénaga Grande hin ab. Ihre Ostflanke ist teilweise mit Fingerbuhnen befestigt, die nahe der Öffnung jedoch völlig freigespült sind. An der Westflanke ist das Ufer durch einen Damm aus Blockwerk geschützt. Überspannt wird die Boca de la Ciénaga durch eine 300 m lange Betonbrücke (siehe Abb. 3).

Wenn man die östliche Küstenlinie über die Öffnung hinaus nach Westen verlängert, zeigt sich, daß dort die Küste um etwa 250 m nach Süden versetzt ist. Dabei behält die Küstenlinie ihre alte Richtung nach Westsüdwesten wie bei Pueblo Viejo bei.

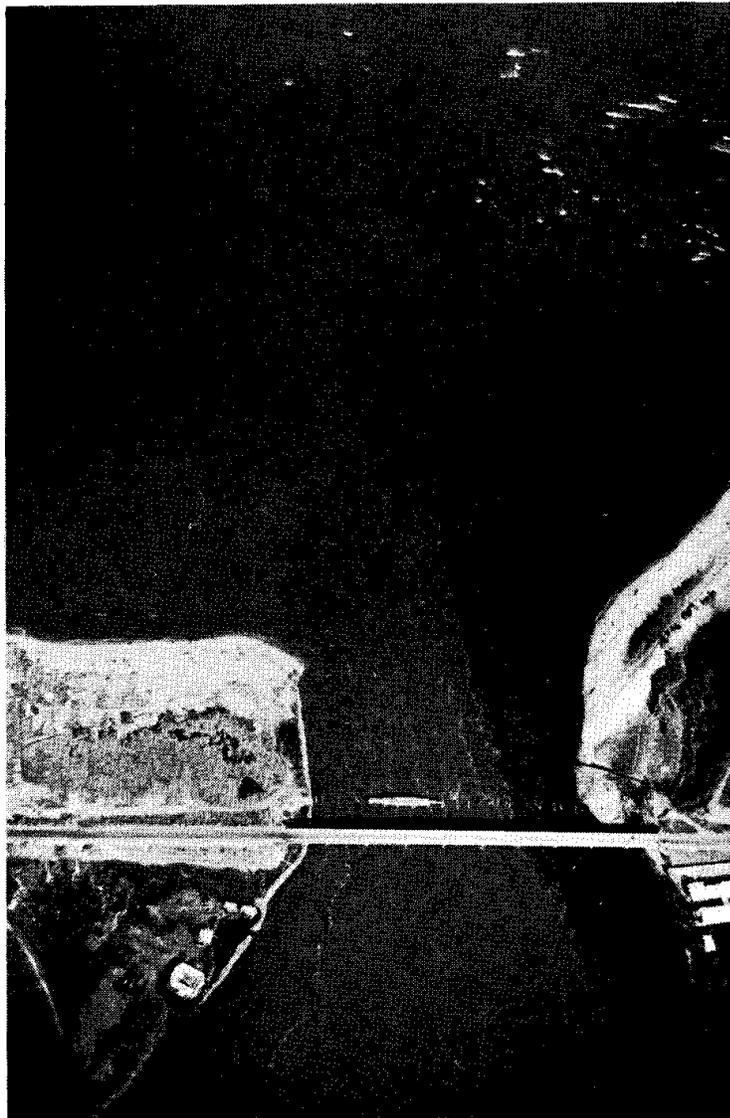


Abb. 3. Boca de la Ciénaga mit Puente de la Barra (13. 12. 1970).

Westlich der Öffnung bis zum km 14,4 sind einige Bühnen angelegt, die den Strand vor Erosion schützen sollen. Dies gelingt nicht in vollem Maße, da um die Boca de la Ciénaga sehr komplizierte und stark wechselnde Strömungsverhältnisse herrschen. Dies zeigt die Arbeit des LABORATOIRE CENTRAL D'HYDRAULIQUE DE FRANCE (1968) und die Aussage der dort ansässigen Fischer, die erklärten, daß der Strand innerhalb kürzester Zeit um 10 Meter wachsen oder verschwinden könne.

C. Ciénaga bis Ciénaga Cuatro Bocas (km 9,4—55,0)

Dieser Abschnitt ist der größte einigermaßen einheitliche Komplex im Arbeitsgebiet. Der in topographischen Karten auftauchende Name „Isla de Salamanca“ für dieses Gebiet ist heute irreführend, da es sich in deren Ostteil um eine Halbinsel handelt und im Westteil der Charakter einer Insel vollkommen verlorengegangen ist. Der Name hat bei historischer Betrachtung jedoch seine Berechtigung (siehe Seite 76).

Die Küstenlinie der Isla de Salamanca verläuft leicht konkav von Ciénaga aus zunächst nach Südwest, um dann über West auf Westnordwest zu schwenken. Dabei wird die Krümmung von Osten nach Westen immer schwächer. Der südlichste Punkt dieser Meeresküste liegt bei km 23,5 (Rincón del Jaguey).

Der Ostteil der Isla de Salamanca zwischen dem Ort Ciénaga und dem km 35 bildet den Abschluß der Ciénaga Grande de Santa Marta gegen das Karibische Meer, nur unterbrochen durch die Boca de la Ciénaga westlich von Pueblo Viejo. Die Breite dieses östlichen Teils schwankt zwischen 0,1 und 2,0 km. Zur Ciénaga Grande hin hat die Isla de Salamanca eine Reihe von Buchten, die nach WIEDEMANN (1973) ehemalige Öffnungen der Lagune zum Meer darstellen. Diese ehemaligen Öffnungen werden bei extremen Hochwässern des Rio Magdalena stellenweise durchbrochen.

Der Westteil der Isla de Salamanca wird heute im Süden durch den Canal del Clarín, im Westen durch die Ciénaga Cuatro Bocas und im Norden durch die Karibische See begrenzt. Auf der dem Meer zugewandten Seite der Isla de Salamanca finden sich Dünen und Strandwälle verschiedener Breite, die nach Süden überall in Mangrovesümpfe übergehen.

Die Isla de Salamanca ist aus verschiedenen alten Strandwällen aufgebaut. Sie entspricht damit dem System von Cheniers, wie es sich westlich der Mündung des Mississippi befindet (REINECK 1970). Westlich des Ortes Ciénaga bis zur ehemaligen Boca de la Ciénaga existiert neben dem rezenten Strandwall an der Küste etwa 400 m landein parallel dazu noch ein älterer Strandwall (vgl. Abb. 9). Bei Isla del Rosario sind im Luftbild drei Strandwälle erkennbar, die wenig westlich davon in den rezenten Strandwall übergehen. Bei Tasajera (km 17,3) und bei km 20 beginnen zwei parallele, bis zu 300 m breite Strandwallsysteme, die sich bis Barravieja (km 30) hinziehen und durch eine schmale Vertiefung voneinander getrennt sind. Im Osten werden sie unter spitzem Winkel von der Küstenlinie geschnitten. Zwischen km 20 und 26,5 liegt vor diesen Strandwällen ein schmaler Dünengürtel am Meer. Die Dünen sind teils durch Vegetation festgelegt, teils wandern sie noch nach Süden. An einigen Stellen werden sie auch vom Meer anerodiert.

Westlich von Barravieja (km 30) bis zum km 39 sind vier parallele Strandwälle erkennbar, die die Küste nach Westen hin unter spitzem Winkel schneiden. Ein weiterer alter Strandwall verläuft etwa 300 bis 400 m parallel hinter dem Strand bis zum km 44,5. Von diesem zweigt am km 38,5 ein Wall nach Süden ab, der bis zum km 52,5, knapp vor der Ciénaga Cuatro Bocas, reicht und dort etwa 1,5 km hinter der heutigen Küste liegt. Auf einem Teil dieses ältesten Strandwalles im Untersuchungsgebiet verläuft die Straße von Barranquilla nach Ciénaga.

Die Mangrove, die sonst immer südlich des sandigen Bereichs der Isla de Salamanca liegt, erreicht etwa von Cangaru (km 41) bis km 47 die Meeresküste und wird dort erodiert.

Im westlichen Teil der Isla de Salamanca befinden sich Dünen verschiedenen Alters zwischen km 40 und km 55 (Ciénaga Cuatro Bocas). Von km 40 bis km 47 sind es alte, bewachsene Dünen, die meist in der Mangrove liegen. Von km 47 bis km 50 reichen alte Dünen und deren Reste bis 1,5 km ins Land hinein. Zwischen km 51 und km 55 schließlich befinden sich aktive Dünen, die sich aus alten Dünen ernähren und nach Südsüdwesten in die Mangrove bzw. Ciénaga Cuatro Bocas hineinwandern und somit die herrschende Hauptwindrichtung anzeigen (siehe Abb. 4).

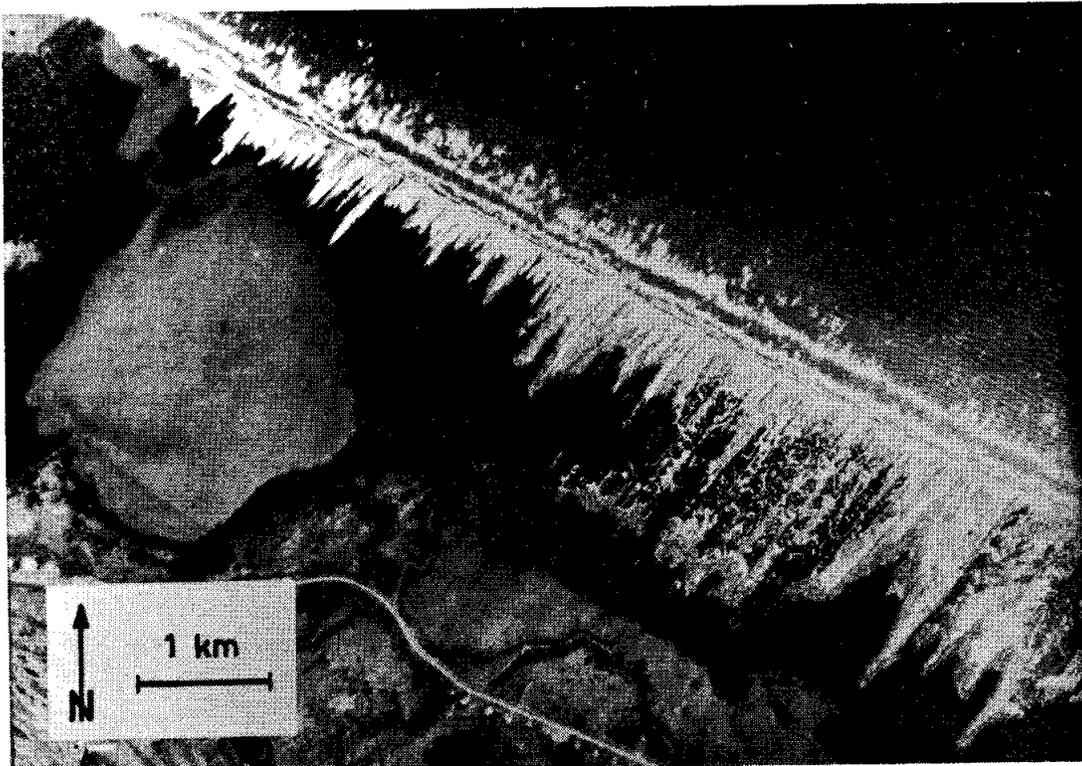


Abb. 4. Dünengebiet östlich der Ciénaga Cuatro Bocas (8. 1. 1954).

D. Ciénaga Cuatro Bocas bis Ciénaga El Torno (km 54—67)

Zwischen km 54 und km 67 behält die Küstenlinie ihre Hauptrichtung nach Westnordwesten bei. In diesem Abschnitt schützt ein flacher Strandwall den ausgedehnten Mangrovesumpf, in dem sich Lagunen (Ciénagas) und geschwungene Kanäle eines ehemaligen Flußlaufes befinden. Die vier folgenden größeren Lagunen liegen am Strandwall bzw. haben eine direkte Verbindug zum Meer:

a. Ciénaga Cuatro Bocas

Sie hat eine ovale Form von 3,0 mal 2,2 km, deren eine Schmalseite dem Meer zugewandt ist. Auf dieser Seite wird sie von einem flachen Strandwall, der nach Süden in ehemalige, durch Deflation zerstörte Dünenreste übergeht, auf den übrigen Seiten, von Mangrove umrahmt. Im Nordwesten verbindet ein S-förmig gebogener Kanal diese Lagune mit der kleinen Ciénaga Vintal, die zum Meer hin durch einen sehr flachen, an mehreren Stellen überfluteten Strandwall begrenzt wird. Das westlich anschließende Mangrovegebiet wird auf 400 m vom Meer erodiert (Abb. 5). Diese Mangrove bildet den Übergang zur



Abb. 5. Mangrove, die von der vorschreitenden Erosion östlich von km 57 erfaßt wird (11. 1969).

b. Ciénaga La Atascosa

Diese erstreckt sich auf 3,6 km längs der Küste und ist bis 1 km breit. Im Süden von Mangrove begrenzt, wird sie vom Meer durch einen bis zu 200 m breiten Strandwall getrennt. In diesem befand sich 1969 eine etwa 300 m breite Öffnung zum Meer, an deren Ostseite die Küste um 250 m nach Norden vorsprang. Die dort stehenden Reste von Mangrove waren starker Erosion ausgesetzt. 1970 war die Zerstörung vollendet und die Öffnung zum Meer durch einen Strandwall verschlossen. Außerdem war der Knick in der Küstenlinie etwas nach Osten verlagert worden. Nach Westen hat die Ciénaga La Atascosa eine etwa 100 m breite Verbindung zu einem System ehemaliger Flußschlingen, welches sich bis zum Rio Magdalena östlich Barranquilla hinzieht. Nordwestlich dieser Verbindung liegt ein Mangrovegebiet, das auf 800 m vom Meer erodiert wird. Die Küste westlich davon wird durch einen sehr flachen Strandwall gebildet, dem sich nach Süden eine flache, 400 m lange Düne anschließt. Vom Gebiet der ehemaligen Flußschlingen führt beim km 61,8 eine schmale Verbindung in die

c. Ciénaga de Las Piedras

Sie erstreckt sich auf 2 km entlang der Küste und wird 900 m breit. Im Süden ist sie von Mangrove umgeben und wird im Norden vor dem Meer durch ein bis 200 m breites Strandwallsystem geschützt, an dessen Westende sich heute einige kleine Dünen entwickeln. Durch einen Mangrovegürtel getrennt, der auf 1 km Länge vom Meer erodiert wird, folgt im Westen die

d. Ciénaga El Torno

Diese ist mit 2,8 mal 2,5 km und fast runder Form etwa genauso groß wie die Ciénaga Cuatro Bocas. Sie hat im Südosten eine Verbindung zu dem System ehemaliger Flußschlingen, im Süden zur südlich anschließenden Ciénaga de Poza Verde und im Nordwesten zu einer kleinen Nachbarlagune. Die Ciénaga El Torno ist außer im Norden vollkommen von Mangrove umgeben, welche einen etwa 1 km langen Sporn bildet, der aus Südwesten zur Mitte der Lagune gerichtet ist. Im Norden bestand 1969 eine 1,5 km breite Öffnung zum Meer, die sich bis 1970 auf 1,8 km verbreiterte. 1970 begann in der Mitte dieser Öffnung eine Sandinsel zu wachsen. Zwischen den beiden Flanken blieb an der Stelle des ehemaligen Strandwalles eine submarine Barre erhalten, an der sich die Brandung bricht. An der westlichen Begrenzung der Öffnung hat sich infolge der starken und schnellen Erosion eine ausgedehnte Schwermineralschleife gebildet (Abb. 6).



Abb. 6. Sandinsel und Schwermineralseife in der Ciénaga El Torno — Blickrichtung nach Südosten (13. 12. 1970).

E. Ciénaga El Torno bis Bocas de Ceniza (km 67—77,4)

Historisch gesehen ist die Isla de Los Gomez die Insel, welche zwischen den beiden Hauptmündungsarmen des Rio Magdalena lag, dem Rio Viejo im Osten und der Bocas de Ceniza im Westen. Heute umfaßt sie jedoch nur noch den westlichen Teil der ursprünglichen Insel und reicht von der Ciénaga El Torno bis an die Punta de Faro an der Mündung des Rio Magdalena.

Am km 67 werden auf 200 m Länge alte Dünen vom Küstenrückgang erfaßt und erodiert. Westlich davon bildet ein flacher Strandwall die Begrenzung einer Sandebene, die am km 73 bis zu 2 km breit wird. Zwischen km 68 und 70 liegt Mangrovesumpf hinter der hier ungefähr 400 m breiten Sandebene. Aus dieser wandern einige Dünen nach Südwesten in die Mangrove hinein.

Die Küstenlinie verläuft vom km 67 bis 70 nach Westnordwest, schwenkt dann bis zum km 72 nach Westen, um schließlich bis zur Punta de Faro die Richtung Westnordwest beizubehalten. Westlich von km 71 finden sich ältere Strandwälle, die an ihrem Ostende die Küstenlinie unter spitzem Winkel schneiden. Im Westen wird die Isla de Los Gomez durch den östlichen Leitdamm der Magdalenamündung begrenzt.

2. Faktoren, die die Morphologie der Küste beeinflussen

A. Wind und Wellen

Die Nordküste Kolumbiens liegt im Einflußbereich der nördlichen Passatzzone. Während der Monate Dezember bis April herrscht Trockenzeit mit starkem Nordostpassat. Dieser erreicht im 6jährigen Mittel (1958—1964) bei Barranquilla eine Geschwindigkeit von 61 km/h = 17 m/sec (das entspricht einer Windstärke 8—9 nach der 12teiligen Beaufort-Skala). In der Regenzeit, die von Mai bis November reicht, liegt die Starkwindzone des Passats in der nördlichen Karibischen See. Der Wind kann dann an der nördlichen Kolumbianischen Küste auch aus westlichen bis südlichen Richtungen wehen. Im Jahresdurchschnitt jedoch kommen über 80 % der Winde aus Nord bis Ost. Aus dieser Richtung wehen sie auch am stärksten. Episodische Stürme treten nicht auf, da sich die Nordküste Kolumbiens außerhalb der Zugbahnen der Hurrikane befindet.

Der stetig über die ganze Karibische See wehende Nordostpassat baut ein sehr stabiles Wellenregime auf, das aus Nordosten auf die Küste trifft. Da die Küste Nordkolumbiens im allgemeinen Ost—West oder Nordost—Südwest verläuft, verursachen die Wellen am Strand einen nach Westen gerichteten Brandungslängsstrom. Nach den Untersuchungen des LABORATOIRE CENTRAL D'HYDRAULIQUE DE FRANCE (1968) haben die Wellen, die aus Nordosten kommen, eine durchschnittliche Frequenz von 7 Sekunden. Das entspricht einer Wellenlänge von 80 m in tiefem Wasser. Wenn die Wassertiefe weniger als die halbe Wellenlänge beträgt, haben die Wellen Grundberührung und werden abgebremst. Dabei geben sie Energie an den Seegrund ab und können dadurch Sediment bewegen. Beim Abbremsen der Wellen werden diese zur Küstenlinie hin gebeugt. Sie erreichen die Küste aber nur dann strandparallel, wenn der flache Teil des Vorstrandes breit genug ist und der Wind ihnen keine neue Energie mehr zuführen kann.

Dies ist nur der Fall im Osten des Arbeitsgebietes zwischen Rincón del Doctor und dem Ort Ciénaga. Als Indiz für das senkrechte Auftreffen der Wellen auf den Strand treten hier auch manchmal Strandhörner auf.

Weiter im Westen ist der Schelf zum Teil sehr schmal, und der Passat trägt noch dazu bei, daß die Wellen in diesem Gebiet nicht strandparallel auf die Küste treffen. Da die Küste westlich von Ciénaga hauptsächlich Ost—West oder Ostsüdost—Westnordwest verläuft, erzeugt die schräg aus Nordosten auflaufende Brandung einen nach Westen gerichteten Brandungslängsstrom. Dieser erodiert den Strand von km 40 bis km 70.

Vor der Küste Nordkolumbiens verläuft ein Meeresstrom nach Westen, der Karibe-Strom. Nach den Nautischen Handbüchern gibt es zwischen der Isla de Aguja nördlich Santa Marta und der Mündung des

Rio Magdalena eine nach Osten gerichtete Gegenströmung. Diese Strömung wurde vom LABORATOIRE CENTRAL D'HYDRAULIQUE DE FRANCE (1968) etwa 100 m vor der Boca de la Ciénaga mit einer Geschwindigkeit von 0,1—0,2 m/sec nachgewiesen, kann also keinen Einfluß auf den küstenparallelen Sandtransport haben.

Die Gezeiten der Karibischen See sind unregelmäßig und schwach. Bei Santa Marta beträgt der normale Tidenhub 20—30 cm. Nur in der engeren Umgebung der Boca de la Ciénaga treten Gezeitenströmungen auf, die zum Sandtransport ausreichen (WIEDEMANN 1973). Das Fehlen ausgeprägter Gezeiten und das äußerst stabile Wellenregime haben zur Folge, daß der nasse Strand im Arbeitsgebiet sehr schmal (bis max. 5 m) und steil ist.

B. Flüsse

Flüsse wirken der Erosion an Küsten entgegen, indem sie Sedimente mit sich führen, die bei deren Eintritt ins Meer abgelagert werden, da hier die Transportkraft der Flüsse aufhört. An Flußmündungen sind oft die Ausgleichslinien der Flachküsten angehängt. Wie stabil diese Festpunkte sind, hängt von der Sedimentfracht der Flüsse ab und ob die Sedimente in das dynamische Gleichgewicht der Küste gelangen oder ein submarines Delta aufbauen.

Am Magdalenedelta münden drei Flüsse ins Meer; die kleinen Flüsse Toribio und Córdoba nordöstlich von Ciénaga und der Rio Magdalena nördlich von Barranquilla. Zwischen den Mündungen dieser drei Flüsse spannt sich die nicht ganz ausgeglichene, meist konkave Küstenlinie des Deltas. Obwohl die beiden kleinen Flüsse im Osten nur wenig Sediment liefern, befindet sich dort ein stabiler Ansatzpunkt der Küstenlinie, denn der küstenparallele Sedimenttransport ist hier nicht sehr stark. Der Rio Magdalena dagegen bringt eine große Menge klastischer Sedimente (nach RICO PULIDO 1969, jährlich 125 Millionen m³) und baut seine jetzige Mündung ständig vor. Dadurch bildet die Punta de Faro an der Bocas de Ceniza einen Festpunkt. Die Ausgleichslinie der Deltaküste reicht jedoch nicht bis an die Mündung des Rio Magdalena nach Westen, da ihr westlicher Ansatzpunkt heute im Bereich der Ciénaga La Atascosa liegt. Dieser Ansatzpunkt wandert auf lange Sicht durch die starke Erosion im Westteil des Untersuchungsgebietes auf den Rio Magdalena zu.

C. Der Mensch

Der Mensch greift an zwei Stellen in die natürlichen Vorgänge am Magdalenedelta ein.

Westlich von Ciénaga wurde Mitte der Fünfziger Jahre die bis dahin bestehende alte Öffnung der Ciénaga Grande de Santa Marta zum Meer durch einen Straßendamm verschlossen. Stattdessen wurde zwischen Isla

del Rosario und Pueblo Viejo eine neue Öffnung geschaffen. Durch diese Maßnahmen kam es zu erheblichen Veränderungen der Küstenlinie, die sich von Ciénaga bis fast nach Tasajera auswirkten (siehe Seite 181).

1926 wurde begonnen, die Mündung des Rio Magdalena durch zwei Leitdämme so zu regulieren, daß Schiffe bis zu 10 m Tiefgang jederzeit Barranquilla anlaufen können. Die Bauarbeiten dauerten mit Unterbrechungen bis 1963. Vor dem Bau der Leitdämme verlegte der Fluß seine Mündung ständig, so von 1908 bis 1926 um 1,4 km nach Westen. Seit Beginn der Arbeiten hat auf der Ostseite der Mündung eine starke Sedimentation eingesetzt, die den Strand seit 1939 um etwa 300 m verbreitert hat. Westlich der Bocas de Ceniza geht demgegenüber die Küste infolge Lee-Erosion sehr stark zurück, seit 1939 um etwa 1800 m (siehe Abb. 7 und vgl. Seite 183).

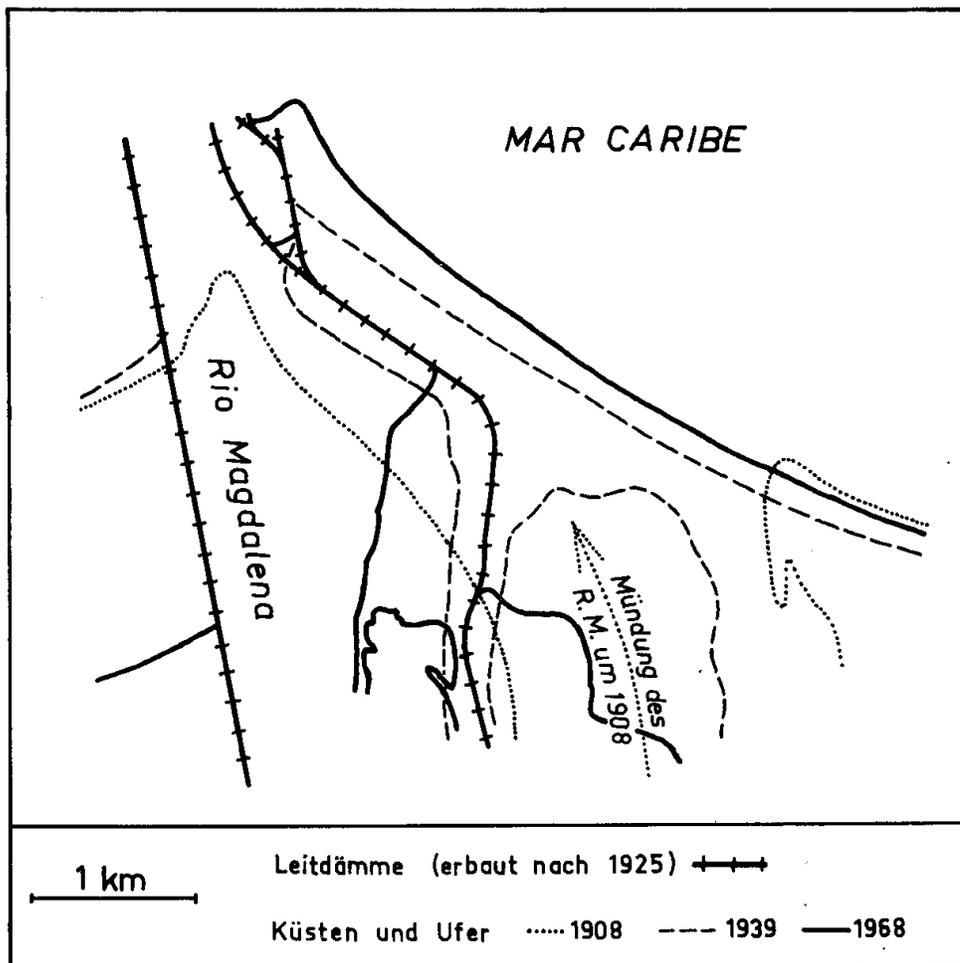


Abb. 7. Entwicklung der Mündung des Rio Magdalena (Bocas de Ceniza) von 1908 bis 1968 (nach RICO PULIDO 1969 und Luftbildern).

3. Die Entwicklung des Magdalena-Deltas

A. Jungquartär

Vor der Küste des Magdalena-Deltas liegt die 50-m-Isobathe, an welcher der Steilabfall ins Colombia-Becken beginnt, etwa 1 bis 15 km vor der Küste und bildet drei deutliche, nach Norden gerichtete Loben. Diese besitzen von Osten nach Westen folgende Radien: ca. 35 km, 7 km und 3 km. Sie seien in dieser Reihenfolge Lobus I, II und III genannt (siehe Abb. 8).

Der jüngste ist Lobus III, der vor der heutigen Mündung des Rio Magdalena, der Bocas de Ceniza liegt. In diesem Lobus ist nach Nordwesten ein ausgeprägter submariner Cañon eingesenkt, durch den in unregelmäßigen Abständen Trübestrome in die Tiefe abgleiten (HEEZEN 1956, RICO PULIDO 1969). Diese treten auf, sobald die unverfestigten klastischen Sedimente, die der Rio Magdalena bringt, auf dem steilen Relief des submarinen Deltas das statische Gleichgewicht verlieren. Zuletzt geschah dies 1935, 1945 und 1963.

Weiter im Osten schließt sich der Lobus II an, der das submarine Delta einer Mündung des Rio Magdalena darstellt, die bis in die 20er Jahre unseres Jahrhunderts aktiv war. An der Konfiguration der Mangrovekanäle hinter der Küste kann man den ehemaligen Lauf dieses Mündungsarmes „Rio Viejo“ rekonstruieren. In der Seekarte von 1936 ist seine Mündung, Boca del Viejo, noch zwischen der Ciénaga de Las Piedras und der Ciénaga La Atascosa eingezeichnet. Dieser Mündungsarm des Rio Magdalena diente neben der Hauptmündung, Bocas de Ceniza, von 1801 bis 1849 der Schifffahrt als Einfahrt zum Hafen von Barranquilla (RICO PULIDO 1969). Der Rio Viejo muß lange Zeit die Hauptmündung des Rio Magdalena gewesen sein, der von ihm aufgebaute Lobus II schiebt sich mit der 50-m-Isobathe fast 10 km vor die heutige Küstenlinie vor. Letztere ist dem herrschenden Wind- und Wellenregime entsprechend nicht ausgeglichen und deshalb starker Erosion ausgesetzt, welche Beträge von mehr als 10 m im Jahr erreicht. Wenn man im Vergleich zum heute aktiven Delta III annimmt, daß die 50-m-Linie normalerweise etwa 3 km vor der Mündung gelegen hätte, kann man rekonstruieren, daß das vom Rio Viejo aufgebaute Delta II noch etwa 7 km vor die heutige Küste reichte (siehe Abb. 9).

Setzt man einen gleichmäßigen jährlichen Erosionsbetrag voraus, dann muß der Rio Viejo bis vor etwa 700 Jahren die Hauptmündung des Rio Magdalena gewesen sein. Da er aber während der Zerstörung des Deltas II auch noch Sedimente geführt haben dürfte, ist anzunehmen, daß dieser Prozeß länger gedauert hat. WIEDEMANN (1973) hat anhand von C¹⁴-Datierungen festgestellt, daß die Transgression des Meeres in dem Bereich der Ciénaga Grande de Santa Marta vor etwa 2400 Jahren begann. Der dies verursachende relative Meeresspiegelanstieg kann der

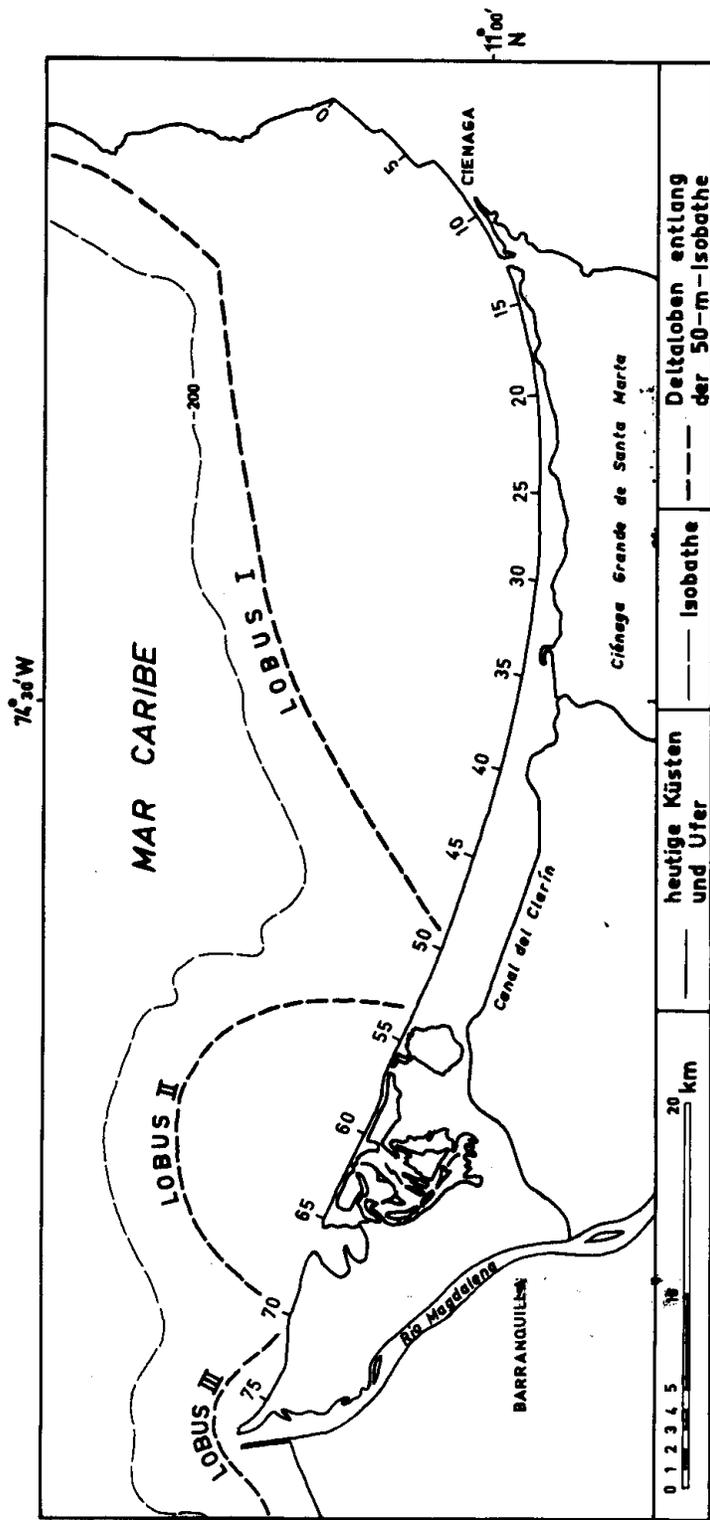


Abb. 8. Submarine Deltaloben des Rio Magdalena, bezogen auf die 50-m-Isobathe.

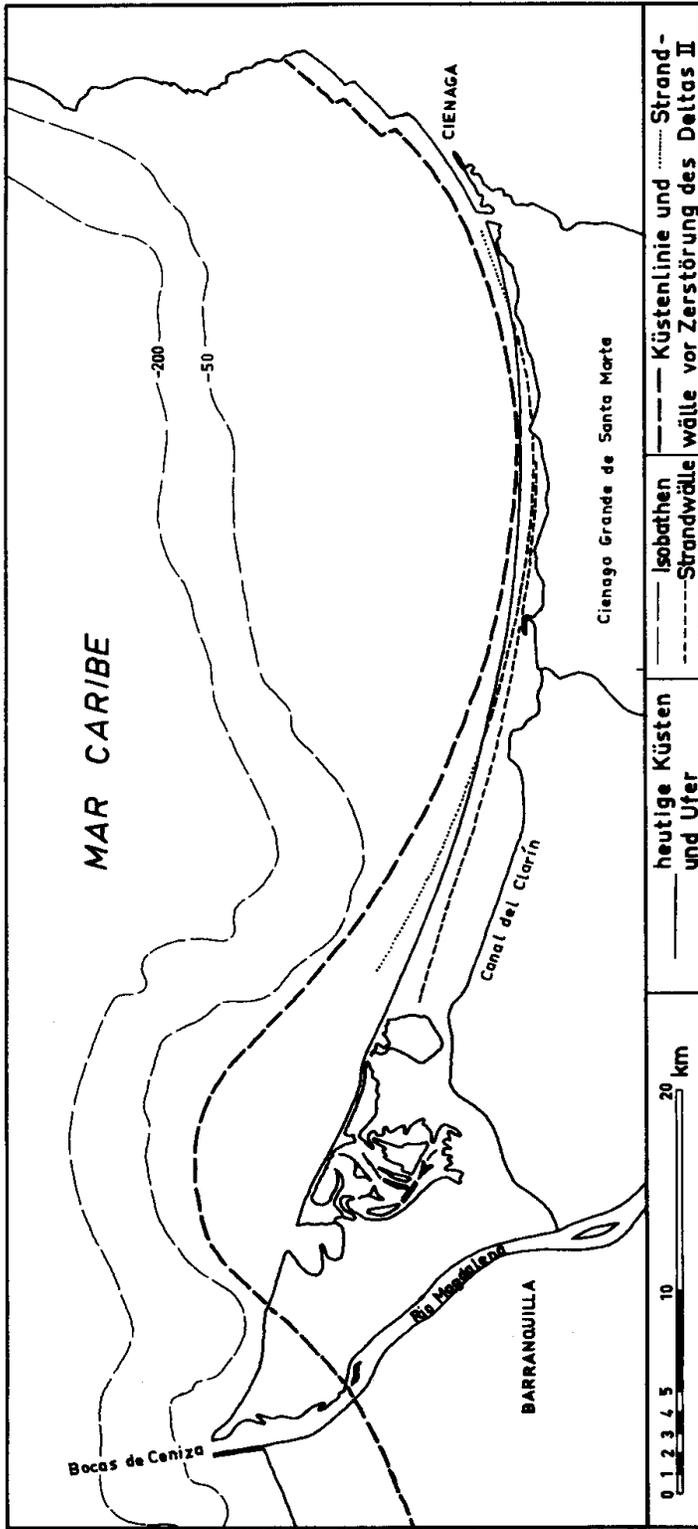


Abb. 9. Rekonstruktion der Küstenlinie zur Zeit der größten Ausdehnung des Deltas II.

Grund für den Beginn der Erosion und die Zerstörung des Deltas II, sowie auch der Westverlagerung der Hauptmündung des Rio Magdalena zur Bocas de Ceniza sein.

Die restlichen 40 km bis zur Sierra Nevada de Santa Marta nimmt der Lobus I ein, der den größten Radius von etwa 35 km hat. Es ist wahrscheinlich, daß es sich dabei um ein ehemaliges Delta I des Rio Magdalena handelt. Seine Bildung und anschließende Zerstörung bis zu einer Linie, die dem alten Strandwall entspricht, der sich von km 38,5 bis 51,5 hinzieht, müssen lange zurückliegen. Dieser Strandwall ist älter als die Strandwälle, die zwischen km 17 und 40 liegen und zu einem Stadium des Deltas II gehören. Es ist denkbar, daß der älteste Strandwall den Zeitpunkt markiert, zu dem der Vorbau des Deltas II die Zerstörung des Deltas I zum Stillstand brachte.

Schließt man sich den Überlegungen von LINK (1927) an, so kommt man zu folgender Betrachtung: Während des Quartärs hat es im Mündungsgebiet des Rio Magdalena mehrere Meeresspiegelschwankungen gegeben, die sowohl glaziale als auch tektonische Ursachen haben können.

Während eines längeren Meerestiefstandes bildeten sich westlich und nordwestlich von Calamar zwei ausgeprägte Mündungstäler des Rio Magdalena (siehe Abb. 10). Entlang alter Strukturlinien führten sie durch die heutige Senke des Canal del Dique und durch den Engpaß von Luruaco zum Karibischen Meer. Das Mündungstal von Luruaco war wahrscheinlich von größerer Bedeutung, da sich vor dessen Mündungsgebiet ein großer submariner Deltalobus von etwa 30 km Radius befindet. Eine anschließende Hebung im Bereich der Talenge von Luruaco zwang den Rio Magdalena in die noch heute benutzte Richtung von Calamar nach Norden. Er dürfte etwa in der Mitte der Niederung zwischen der Sierra Nevada und dem Hochgebiet von Barranquilla geflossen sein und das Delta I aufgebaut haben.

Dieser Phase relativen Meerestiefstandes folgte nach LINK eine Transgression, die bis etwa 25 m über den heutigen Meeresspiegel reichte. Damit wurde die Mündung des Rio Magdalena weit ins Inland zurückverlegt, so daß seine Sedimente, die durch ihren Gehalt an dem Schwermineral Hypersthen gekennzeichnet sind (vgl. Seite 202), nicht mehr den Bereich des Deltas I erreichen konnten. Es ist anzunehmen, daß während dieser Zeit eine Schicht von Hypersthen-freien Sedimenten auf der Plattform des Deltas I abgelagert worden ist. Den an der Oberfläche dieses Gebietes zu findenden Ablagerungen fehlt nämlich dieses Schwermineral fast völlig. Diese Sedimente dürften aus der unmittelbar benachbarten Sierra Nevada stammen.

Abb. 10. Geologische Übersichtskarte des Mündungsgebietes des Rio Magdalena.

Schließlich zog sich das Meer auf ein dem heutigen ähnliches Niveau zurück. Dieser Rückzug war im Ostteil des Gebietes nicht mehr so stark wie im Westen, so daß der Rio Magdalena nicht mehr sein altes Delta I benutzen konnte, sondern westlich davon das Delta II aufbaute.

B. Historische Zeit

Um den Verlauf der Küste und die Lage der Flußmündungen in früherer Zeit festzustellen, werden alte Landkarten verglichen und Reisebeschreibungen analysiert. Brauchbare Landkarten der Magdalenamündung gibt es seit 1811, als Francisco José de Caldas eine Karte des Rio Magdalena anfertigte. Aus derselben Zeit stammt eine Karte von Alexander v. Humboldt, die auf der Seekarte „Litoral de las Costas de Tierra Firme“ des Deposito Hidrográfico de España in Madrid basiert. Diese Karte wurde 1793 bis 1802 aufgenommen und 1817 veröffentlicht. SIEVERS (1887) beschreibt eine Bootsreise von Barranquilla nach Ciénaga durch die Kanäle des Magdalenadeltas. Von 1898 gibt es eine kleinmaßstäbliche Karte von Agustin Codazzi. 1935 führte das Vermessungsschiff NOKOMIS des U. S. NAVAL OCEANOGRAPHIC OFFICE Lotungen vor der Küste durch, die 1936 in der Seekarte H. O. 5688 im Maßstab 1:80 000 veröffentlicht wurden. Die 1965 gedruckten topographischen Karten 1:50 000 wurden auf Basis der Luftaufnahmen von 1953 angefertigt.

In den Karten des vorigen Jahrhunderts hat der Rio Magdalena stets zwei Mündungen, die Bocas de Ceniza und die Boca del Rio Viejo (Mündung des Alten Flusses). Zwischen beiden Mündungen lag die Isla de Los Gómez.

Die Bocas de Ceniza wird seit 1787 ständig als Einfahrt zum Hafen von Barranquilla benutzt. Die Richtung, aus der die Schiffe in sie einlaufen konnten, änderte sich im Lauf der Zeit ständig. Diese Hauptmündung des Flusses pendelte nämlich zwischen der Punta Sabanilla westlich Barranquilla und dem ehemaligen Leuchtturm auf der Isla de Los Gómez. Von 1787 bis 1926 bewegte sie sich einmal hin und zurück über diesen ganzen Sektor. Erst ab 1926 wurde das Wandern der Bocas de Ceniza durch den Bau von Leitdämmen zum Stillstand gebracht.

Die ehemalige östliche Mündung des Rio Magdalena, die Boca del Rio Viejo, lag zwischen der Ciénaga de Las Piedras und der Ciénaga La Atascosa und wurde nach RICO PULIDO (1969) von 1801 bis 1849 auch als Einfahrt zum Hafen Barranquilla benutzt. Der Rio Viejo ist der Rest einer ehemaligen Hauptmündung des Rio Magdalena, die das Delta II aufgebaut hat (siehe Seite 71). 1886 war dieser Flußarm noch als Verbindung zum Caño del Clarín in Gebrauch (SIEVERS 1887). Um 1920 war der Rio Viejo nach BRANDENBURG (1923) noch 500 bis 800 m breit, aber nicht mehr schiffbar. Die Seekarte von 1936 verzeichnet zwar

noch die Boca del Rio Viejo, jedoch bestand zu dieser Zeit keine dauernde Verbindung mehr zum Rio Magdalena.

Die Lagunen El Torno bis Cuatro Bocas sind im vorigen Jahrhundert noch erheblich größer gewesen, da die Küstenlinie damals zum Teil mehr als einen Kilometer weiter seewärts lag. Der Rio Viejo hatte eine breite Verbindung zur Ciénaga La Atascosa, die auf alten Karten Ciénaga del Cobado heißt. Von dieser führte ein Kanal zur Ciénaga Cuatro Bocas (siehe Abb. 11).

An dieser Lagune begann der Caño del Clarín, ein natürlicher Wasserweg, der sich hinter der Isla de Salamanca bis zur Ciénaga Grande de Santa Marta hinzog. Der Caño del Clarín bildete damals die einzige Verkehrsverbindung zwischen dem Rio Magdalena (und damit dem Inneren Kolumbiens) und den Orten Ciénaga und Santa Marta. 1886 reiste SIEVERS mit dem Boot von Barranquilla nach Ciénaga und beschrieb die Fahrt durch diesen Kanal. Der Wasserweg drohte ständig von der Isla de Salamanca her zu versanden und von der Mangrove im Süden her zuzuwachsen. Vor allem unmittelbar östlich der Ciénaga Cuatro Bocas wuchsen die damals noch aktiven Strichdünen schnell in den küstenparallelen Kanal (vgl. Abb. 4). Ursache dieses Prozesses war die starke Küstenerosion, die die Isla de Salamanca in ihrem Westteil nach Süden wandern ließ.

Durch das Versanden des Caño del Clarín verlor die Isla de Salamanca schließlich auch ihren Charakter als Insel. Anfang dieses Jahrhunderts wurde es immer schwieriger, diesen natürlichen Kanal freizuhalten, so daß man gezwungen war, weiter im Inland künstlich einen sicheren Kanal für Flußschiffe anzulegen, den Canal del Clarín. Auf diesem Wasserweg werden heute Ciénaga und Santa Marta vor allem mit Öl und Benzin versorgt.

Über Veränderungen der Küste im Ostteil des Untersuchungsgebietes ist aus alten Karten nichts zu entnehmen.

C. Veränderungen der Küste nach 1953

In der Trockenzeit 1953/54 wurden Photoflüge im Küstengebiet Nordkolumbiens durchgeführt und auch vom Arbeitsgebiet Luftaufnahmen im Maßstab 1:60 000 hergestellt. Auf dieser Basis beruhen die topographischen Karten 1:50 000, die 1965 veröffentlicht wurden und Korrekturen nach dem damals neuesten Stand aufweisen. Im Februar 1967 wurden Luftaufnahmen im Maßstab 1:20 000 vom Westrand der Sierra Nevada und der Bananenzone gemacht. Dabei wurde auch die Küste zwischen Ciénaga und Santa Marta erfaßt. Vom Januar 1968 stammen Luftaufnahmen eines Fluges über die Küste zwischen Bocas de Ceniza und Cangaru (1:20 000). Im Frühjahr desselben Jahres untersuchte das LABORATOIRE CENTRAL D'HYDRAULIQUE DE

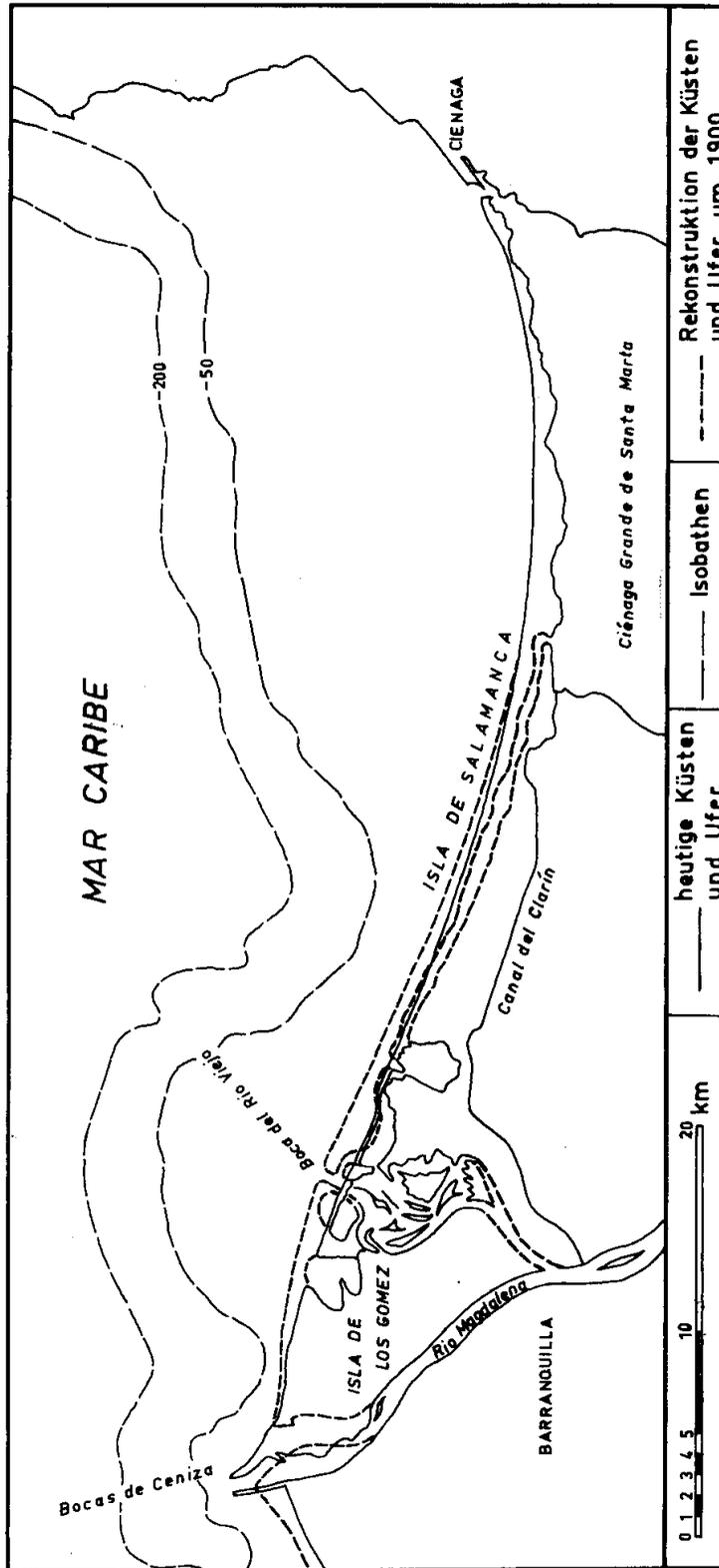


Abb. 11. Rekonstruktion der Küsten und Ufer um 1900.

FRANCE die hydraulischen Verhältnisse in der Umgebung der Boca de la Ciénaga und nahm dabei die Veränderungen der Küstenlinie genau auf. Die eigenen Geländebeobachtungen fanden zwischen Mai 1969 und Dezember 1970 statt und wurden durch einen Flug abgeschlossen, bei dem Schrägaufnahmen von allen interessanten Punkten gemacht wurden.

Aus dem Vergleich der o. a. verschiedenen Luftaufnahmen und Geländeaufnahmen ergibt sich folgendes Bild der Küstenentwicklung seit 1953:

a. Die Mündungen von Rio Toribio und Rio Córdoba

Die Küste verläuft hier generell Nordost—Südwest und ist jeweils westlich des Rio Toribio (um 300 m) und des Rio Córdoba (um 700 m) zurückversetzt (siehe Abb. 12). Bei diesen Küstenformen handelt es sich

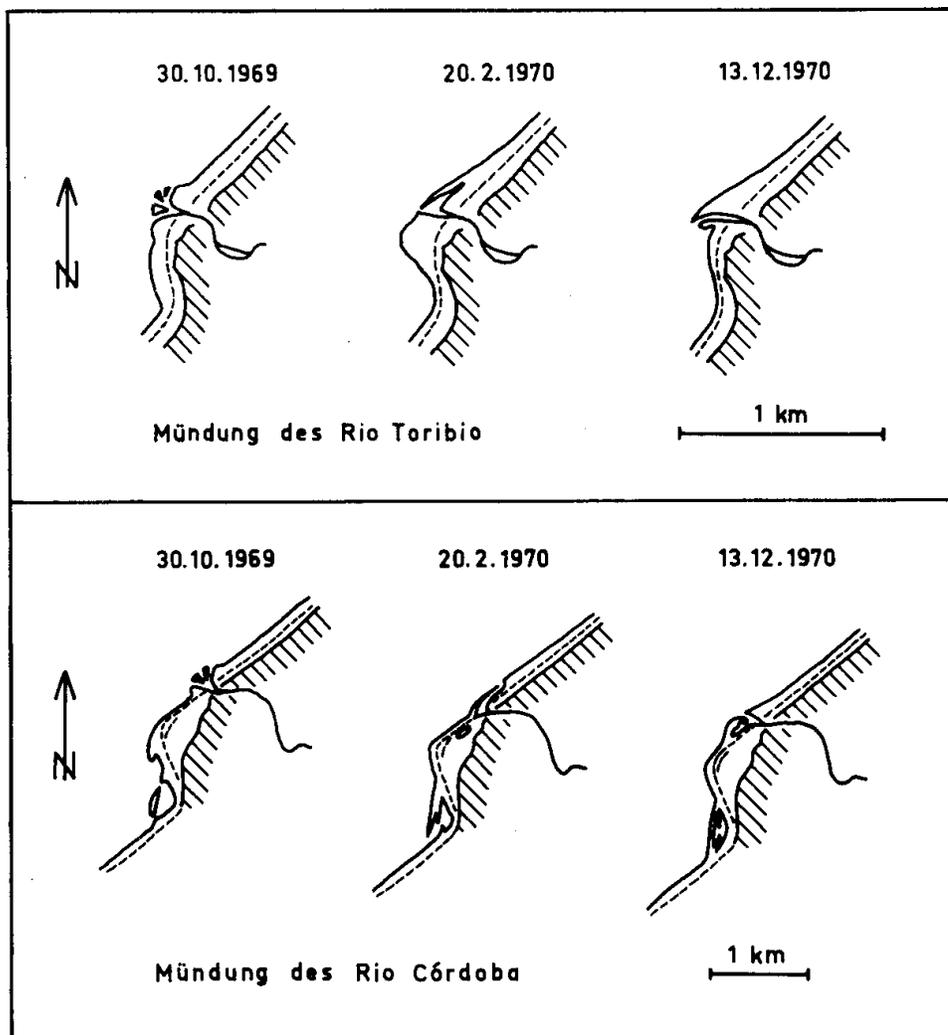


Abb. 12. Änderungen der Deltas von Rio Toribio und Rio Córdoba (nach eigenen Geländeaufnahmen und Luftaufnahmen).

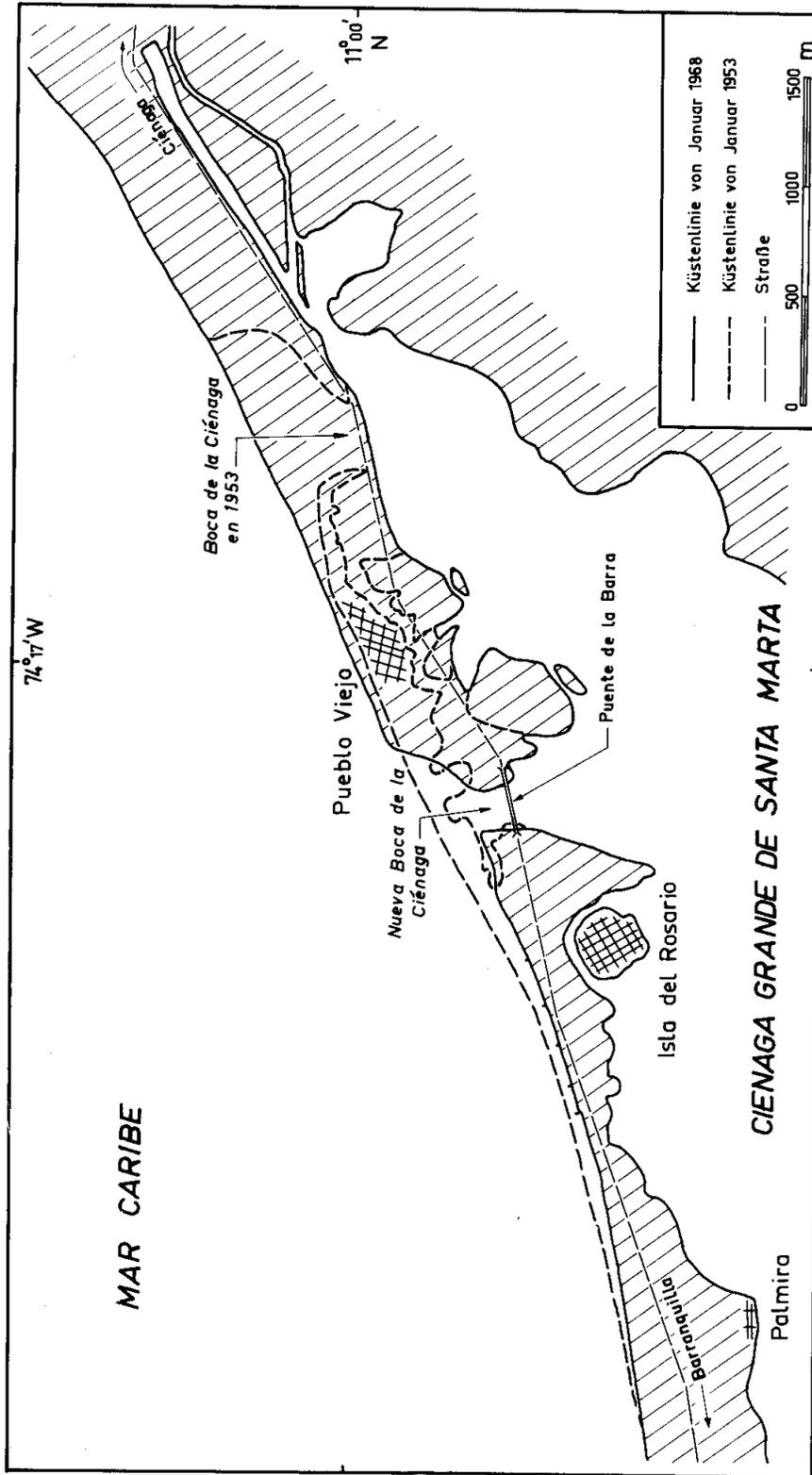


Abb. 13. Die Küstenlinie zwischen Palmira und Ciénaga vor (1953) und nach (1968) Öffnung der neuen Boca de la Ciénaga (nach LABORATOIRE CENTRAL D'HYDRAULIQUE DE FRANCE 1968).

um Flußdeltas, die durch einen nach Westen gerichteten Küstenlängsstrom deformiert wurden. Diese einseitigen Deltas zeigen seit 1953 keine erkennbaren Veränderungen, so daß sie sich wahrscheinlich im Gleichgewicht befinden. Vor dieser stabilen Küstenlinie bauen die beiden Flüsse in jeder Regenzeit, wenn sie viel Sediment führen, jeweils ein kleines Delta auf. Diese werden während der Trockenzeit durch die Dünung des starken Nordostpassats immer wieder zerstört. Dabei werden beide Flüsse hinter einer Mündungsbarre entlang der Küste abgelenkt, bevor es ihnen gelingt, sie bis zum Meer hin zu durchbrechen.

b. Boca de la Ciénaga

Über die Lage und Form der Öffnung der Ciénaga Grande de Santa Marta zum Meer läßt sich erst ab 1953 Genaueres sagen (siehe Abb. 13). Damals befand sich die Öffnung etwa 1 km östlich von Pueblo Viejo, war 300 m breit und öffnete sich zum Meer hin bis auf 800 m. Mitte der fünfziger Jahre wurde die Straße von Ciénaga nach Barranquilla gebaut und diese alte Boca de la Ciénaga durch den Damm der Straße geschlossen. Letzterer folgte der Verlängerung eines alten Strandwalles, der sich etwa 400 m hinter der Küste von Ciénaga nach Westsüdwesten hinzieht.

Die durch die Schließung der alten Öffnung notwendig gewordene neue Boca de la Ciénaga wurde zwischen Pueblo Viejo und Isla del Rosario an einer schmalen Stelle der Isla de Salamanca angelegt. An dieser Stelle war nach H. U. WIEDEMANN (1973) auch früher schon einmal eine Öffnung der großen Lagune zum Meer, wie die Tiefenlinien in der Ciénaga Grande südlich der Puente de la Barra zeigen.

1960 wurde die bis dahin bestehende Holzbrücke über die neue Öffnung durch eine 300 m lange Betonkonstruktion ersetzt. Seither wurde die Küstenlinie und deren Veränderungen in der näheren Umgebung der Puente de la Barra genauer beobachtet. 1968 untersuchte das LABORATOIRE CENTRAL D'HYDRAULIQUE DE FRANCE über einen Zeitraum von mehreren Monaten die hydraulischen Verhältnisse, um Vorschläge zur Küstensicherung unterbreiten zu können.

Es wurde festgestellt, daß sich die submarine Morphologie unterhalb der 5-m-Isobathe seit 1935 kaum verändert hat. Der Küstenlängsstrom hatte die Lücke der alten Boca de la Ciénaga seit dem Bau der Straße völlig zusedimentiert, und der Strand von Pueblo Viejo war etwas breiter geworden. Dagegen war der Strand westlich der neuen Öffnung bis etwa vor Palmira (km 16) zurückverlegt worden — an der Boca de la Ciénaga um 160 m. Es gelang nicht, den Küstenrückgang auf diesem gefährdeten Stück Strand durch den Bau von Fingerbuhnen aufzuhalten. Allein von Juni 1969 bis Ende 1970 ging die Küste hier um weitere 5 m zurück, so daß einige Buhnen endgültig freigespült wurden (siehe Abb. 14).

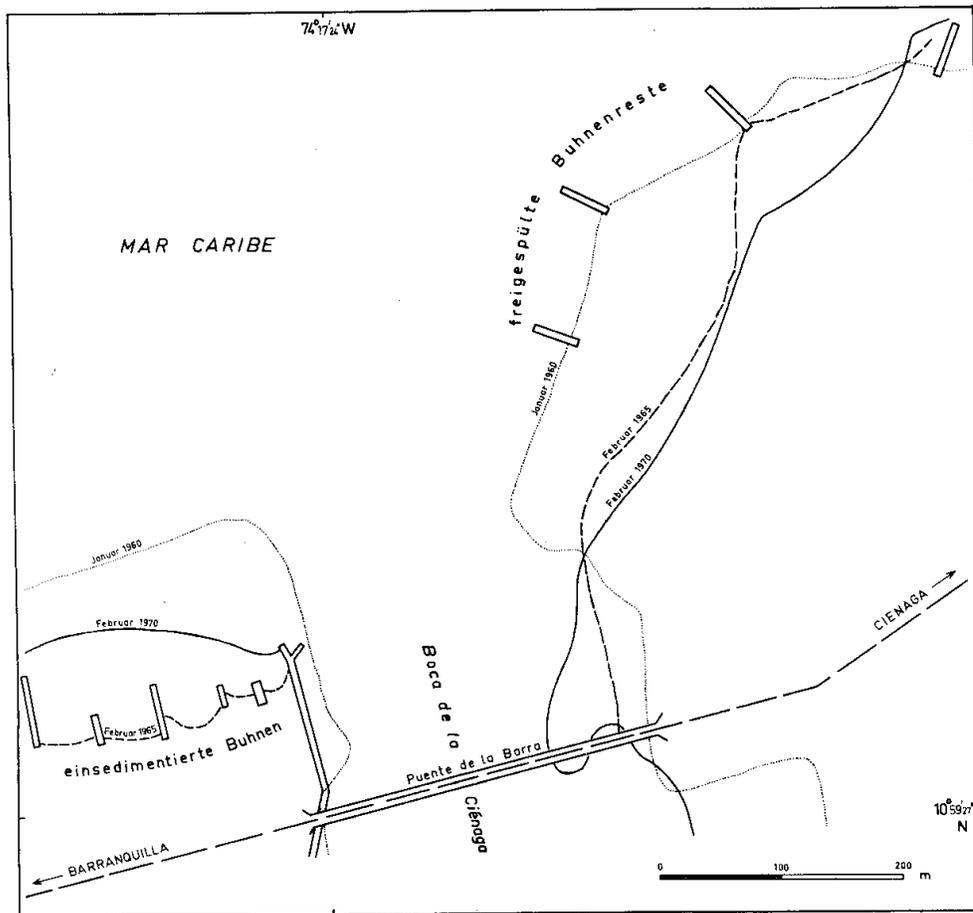


Abb. 14. Veränderungen der Küstenlinie an der neuen Boca de la Ciénaga von 1960 bis 1970 (nach LABORATOIRE CENTRAL D'HYDRAULIQUE DE FRANCE 1968 und eigener Geländeaufnahme).

c. Isla de Salamanca

Ein Vergleich der Luftbilder von 1953 mit dem Zustand von 1970 läßt im Ostteil der Isla de Salamanca zwischen Palmira (km 16) und Cangaru (km 40) keine wesentlichen Veränderungen erkennen. Westlich von Cangaru ist Küstenerosion feststellbar, die nach Westen hin zunimmt. Vor der Ciénaga Cuatro Bocas ging die Küste in den 15 Jahren von 1953 bis 1968 um 200 m zurück. Sollte die Erosion in diesem Maße anhalten, dann wird die Straße Ciénaga—Barranquilla bei km 49 (Straßenkilometer 17,9) um das Jahr 2000 direkt am Meer liegen.

d. Ciénaga La Atascosa bis Ciénaga El Torno

Die Küste vor den Lagunen des ehemaligen Deltas II weist die höchsten Erosionsbeträge auf (siehe Abb. 15, 16, 17). Vor der Ciénaga

La Atascosa ging die Küste von 1953 bis 1968 um 460 m zurück. Dieser enorm hohe Betrag kommt durch das Ostwärtswandern eines Knicks in der Küstenlinie zustande. Westlich des Knicks ist die Küste um 250 m nach Süden versetzt. Besagte Strandform entstand an der ehemaligen Mündung des Rio Viejo, die sich 1935 bei km 61 zwischen den Lagunen La Atascosa und de Las Piedras befand. Diese Verbindung des Lagunensystems zum Meer wanderte in der Folgezeit nach Osten, wobei deren westliches Ufer infolge der Lee-Erosion stärker zurückverlagert wurde als das östliche. 1953 war die Öffnung am Westrand der Ciénaga La Atascosa angelangt bei km 59,5. Bis 1968 bewegte sie sich um weitere 2 km nach Osten. Diese Bewegung wurde überlagert vom Rückgang der gesamten Küste in diesem Abschnitt. Ende 1970 war der Knick bis zum km 57 an den Ostrand der Ciénaga La Atascosa gewandert und die Öffnung zum Meer, Mitte 1969 noch 300 m breit, hatte sich durch einen Strandwall geschlossen.

Östlich wie westlich der Ciénaga La Atascosa ist der Erosionsbetrag von 1953 bis 1968 200 bis 270 m.

1953 war die Ciénaga El Torno durch einen 1,8 km langen und 200 m breiten Strandwall vom Meer getrennt. Dieser wurde 1967 durchbrochen, und die so entstandene Lücke erweiterte sich bis 1968 auf 1,0 km und bis 1969 auf 1,5 km. In der Öffnung der auf diese Weise entstandenen Bucht wuchs ab 1970 eine Sandinsel.

e. Isla de Los Gómez

Die Küste der Isla de Los Gomez besteht aus zwei unterschiedlichen Bereichen. Östlich des km 70 wurde die Küste zwischen 1953 und 1968 stark erodiert. Die Erosion betrug an der ehemaligen Saline „El Torno“ am km 68 etwa 230 m und nahm bis zum km 70 auf 0 m ab. Westlich dieses Punktes bis zum Ostufer der Bocas de Ceniza herrschte Sedimentation, die den Strand um bis zu 100 m verbreiterte. Von diesem Strand nimmt der Passatwind Sand auf, der flächenhaft nach Südwesten in die Ciénaga de Punta Faro geweht wird. Von 1953 bis 1968 sandete so eine 900 m breite und 2 km lange Fläche dieser Lagune zu. Am Nordende des östlichen Leitdammes der Magdalenamündung baute sich in diesem Zeitraum die Punta de Faro um etwa 300 m ins Meer hinaus vor.

4. Ergebnisse

Die Betrachtung der submarinen Morphologie vor der heutigen Küste des Magdalenadeltas, der Vergleich alter Land- und Seekarten und schließlich die Analyse von verschiedenen alten Luftbildern ergibt ein Bild der Entwicklung der Küste zwischen Barranquilla und der Sierra Nevada de Santa Marta vom jüngeren Quartär bis heute und gestattet sogar einen vorsichtigen Blick in die nähere Zukunft.

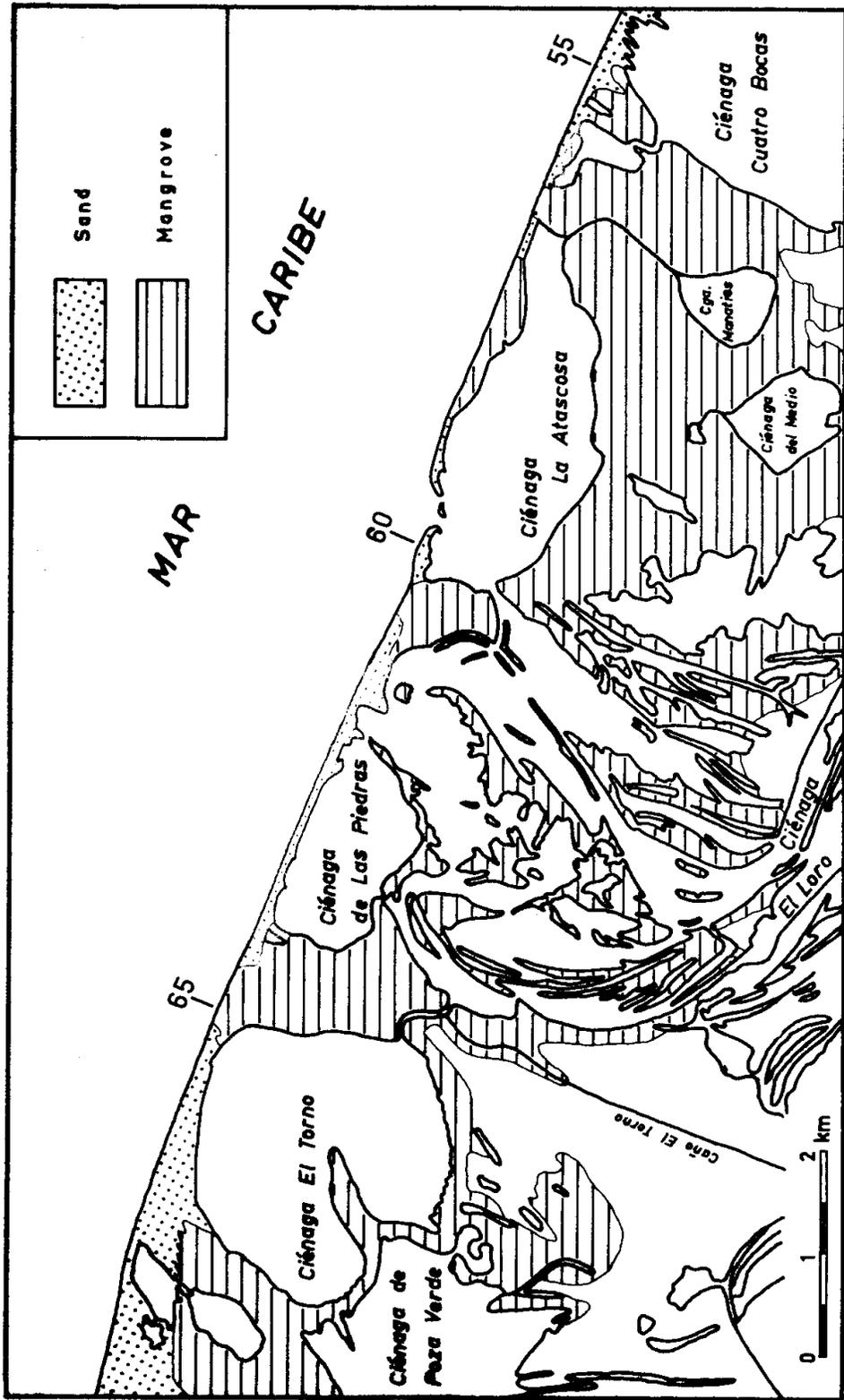


Abb. 15. Die Küste im Westteil des Untersuchungsgebietes nach Luftbildern von 1953/54.

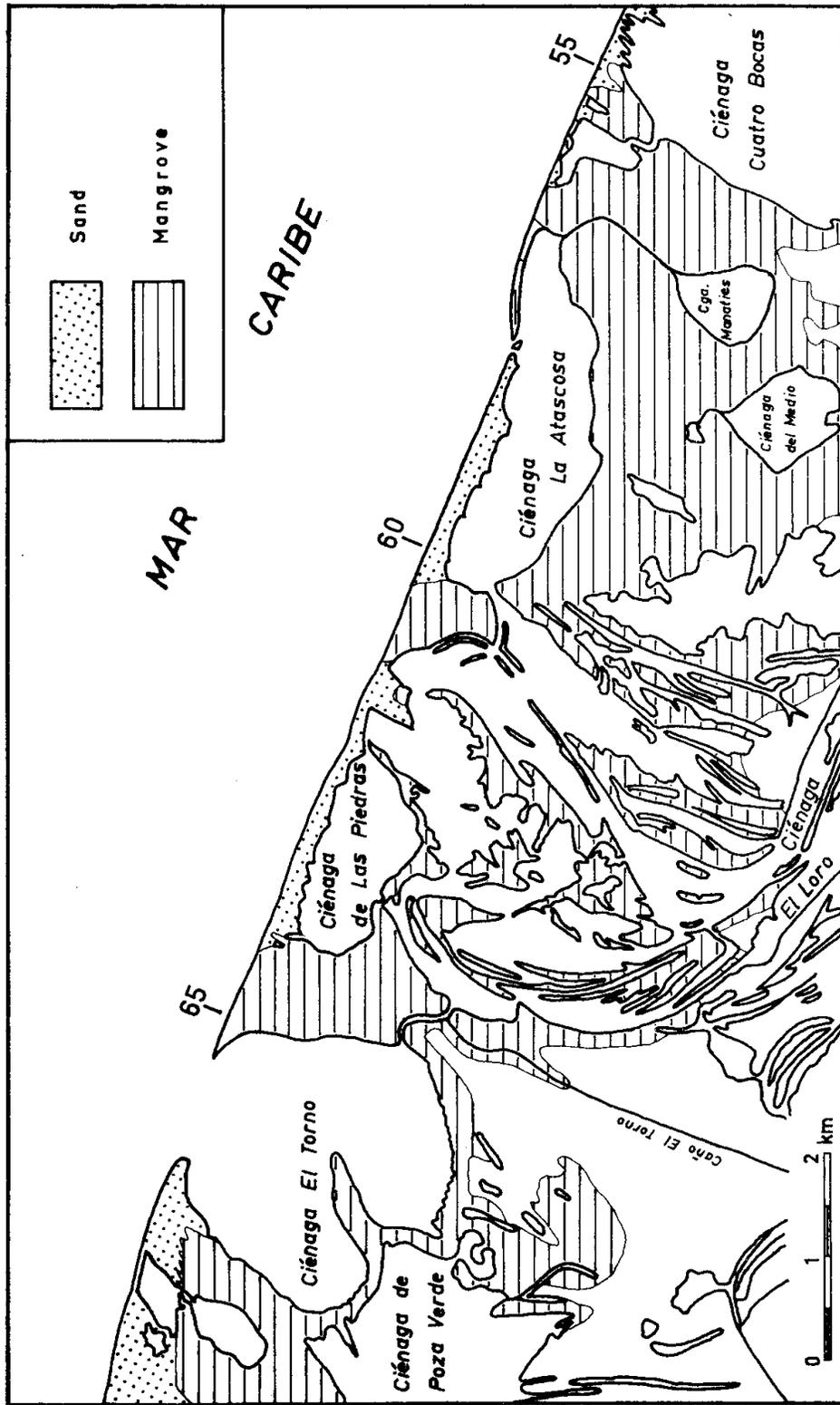


Abb. 16. Die Küste im Westteil des Untersuchungsgebietes nach Luftbildern vom Januar 1968.

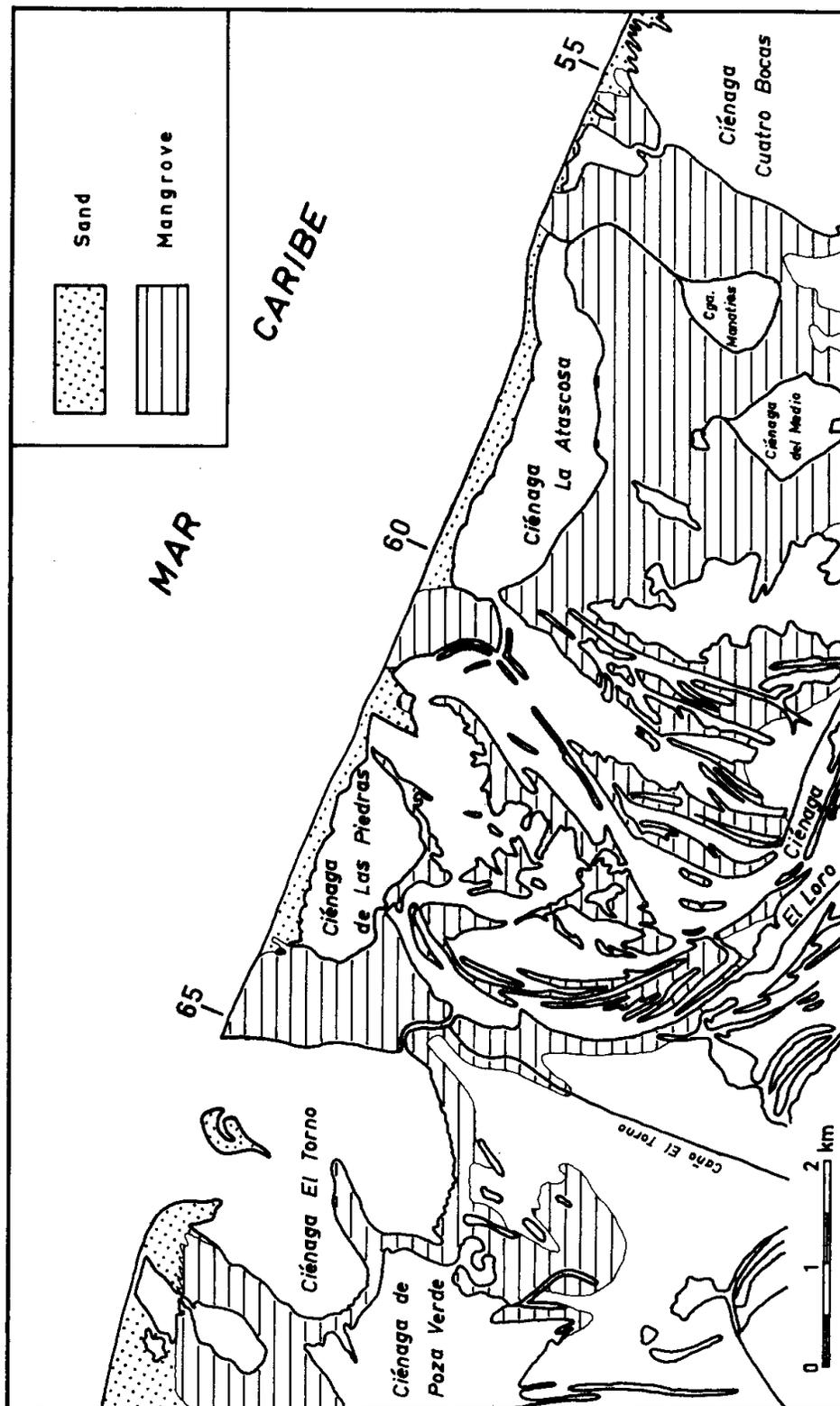


Abb. 17. Die Küste im Westteil des Untersuchungsgebietes nach eigenen Luftbildern vom Dezember 1970.

Nach dem Aufbau des großen Deltas I durch den Rio Magdalena verlegte ein Meeresspiegelanstieg dessen Mündung weit ins Land zurück. Hierdurch wurde Sedimentation von Material aus der Sierra Nevada auf der Deltaplattform möglich. Bei dem darauf folgenden Rückzug des Meeres auf ein dem heutigen ähnliches Niveau verlegte der Rio Magdalena seine Mündung weiter nach Westen und baute dort das Delta II auf. Während sich das Delta II vorbaute, ging die Küste im Bereich des Deltas I zurück, und dabei entstanden die ältesten Strandwälle der Isla de Salamanca. Die jüngeren Strandwälle dagegen wurden vorwiegend zur Zeit der größten Ausdehnung des Deltas II gebildet. Ein relativer Meeresspiegelanstieg leitete vor etwa 2400 Jahren die Zerstörung dieses Delta ein. In deren Folge verlegte der Rio Magdalena seinen Lauf weiter nach Westen in den Bereich seiner heutigen Mündung.

Die Zerstörung des Deltas II ist auch heute noch nicht abgeschlossen. Hierdurch wurde die Isla de Salamanca in ihrem Westteil soweit nach Süden verlagert, daß ein hinter ihr gelegener natürlicher Kanal vor etwa 50 Jahren versandete. Vor ungefähr 30 Jahren schloß sich auch die Mündung des Rio Viejo. Dieser hatte als östlicher Mündungsarm des Rio Magdalena noch die ehemalige Richtung dieses Flusses in das Delta II beibehalten.

Heute herrscht westlich von etwa km 40 sehr starke Erosion, die die Küste jährlich um mehr als 10 m zurückverlegt. Eine stabile Ausgleichslinie der Küste ist im Westteil des Untersuchungsgebietes noch nicht erreicht. Deshalb ist anzunehmen, daß die starke Erosion noch längere Zeit anhält. In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, daß die wichtige Straße von Ciénaga nach Barranquilla in etwa 30 Jahren beim Straßenkilometer 17,9 direkt von der Küstenerosion bedroht sein wird.

Die Beobachtung der herrschenden Wind- und Wellenverhältnisse in Beziehung zur Küstenmorphologie führt zu dem Schluß, daß ein nach Westen gerichteter Brandungslängsstrom vorhanden ist.

II. Sedimentanalyse

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurde der Versuch unternommen, mit Hilfe der aus den Strandsanden zu ermittelnden sedimentologischen Daten die Transportrichtung entlang der fast 80 km langen Flachküste zwischen Ciénaga und Barranquilla festzustellen. Dies sollte möglicherweise als Modell zur Bestimmung der Transportrichtung in ähnlichen Sedimentkörpern der geologischen Vergangenheit dienen. Es wurde auf die Anwendung von Sandtransportversuchen nach der Anfärbemethode verzichtet, da diese stets nur Augenblicksbilder der jeweiligen Situation ergeben können. WALGER (1966) war es gelungen, bei Untersuchungen an Strandsanden der westlichen Ostsee und durch eingehende Überlegungen zur Theorie des Sedimenttransports, Parameter

zu ermitteln, die eine Aussage zur Transportrichtung ohne Berücksichtigung der Küstenmorphologie unter bestimmten Voraussetzungen gestatten. Er hatte transportabhängige Abnutzungsvorgänge an Schwermineralen unter rechnerischem Ausschluß der Transportsonderung untersucht. Diese Methode erbrachte aus folgenden Gründen im Arbeitsgebiet keinen Erfolg:

1. der durchschnittliche Schwermineralgehalt der Strandsande liegt bei 50 %, was zu nicht abwägbaren Schwierigkeiten führt;
2. die Verfügbarkeitsverteilung der Minerale in den Ausgangssedimenten konnte nicht eindeutig bestimmt werden, da nicht auszuschließen ist, daß auch Material vom Flachscheff in den Strandbereich gelangt.

Die Anwendung anderer Methoden der Sedimentanalyse brachte dagegen Ergebnisse zur Herkunft der Sedimente, deren relativem Alter und zum Energiehaushalt des Strandbereichs.

1. P r o b e n n a h m e u n d - b e h a n d l u n g

Es bestand die Aufgabe, an einem Küstenstreifen von annähernd 80 km Länge eine ausreichende Anzahl von Sedimentproben zu entnehmen, die einander vergleichbar sind. Erschwerend wirkte sich dabei die Inhomogenität der Strandsedimente und die schlechte Zugänglichkeit des Geländes im Westteil aus.

Zur Beantwortung der sedimentologischen Fragestellung mußte versucht werden, Proben aus möglichst gleichen hydraulischen Verhältnissen zu erhalten. Deswegen wurden in Anlehnung an WALGER (1966), der den Transportmechanismus am Strand klären wollte, Oberflächenproben aus dem obersten Schwallbereich der auflaufenden Wellen genommen. Die Probenmenge betrug jeweils 300 g. Neben den Sandproben wurde nach Möglichkeit noch eine Kiesprobe aus dem Teil des Strandes entnommen, an dem sich die Wellen zum letzten Mal brechen.

Das Ideal einer möglichst gleichzeitigen Probennahme über das gesamte Arbeitsgebiet konnte nicht erreicht werden. Wegen der Schwierigkeiten des Geländes und lokaler Widrigkeiten konnten nur 4 Proben pro Tag genommen werden. Deshalb zog sich die Probennahme über mehrere Wochen hin, fand jedoch nur während der Regenzeit statt. Auf diese Weise blieben die äußeren Bedingungen wie Windrichtung und Windstärke, damit auch Brandung und Brandungslängsstrom konstant. Beim späteren Vergleich der Daten aus verschiedenen alten Proben ergab sich, daß der Zeitpunkt der Probennahme keine große Rolle spielt.

Zwischen Rincón del Doctor im Osten und Bocas des Ceniza im Westen wurden an 33 Stellen Sedimentproben am Strand genommen. Die Probennahmepunkte lagen also im Durchschnitt 2,3 km auseinander (Tab. 1).

km	Lokalität	PROBEN	
		E	N
0	Rincón del Doctor	0,0	43,217
	Punta de Toribio	3,0	9,10
	Punta de Córdoba	6,0	113
	CIENAGA	8,2	115,216
10		10,0	111,112
	PUEBLO VIEJO	12,4	31
	Boca de la Ciénaga	13,2	29
	PALMIRA	15,2	109,207
	TASAJERA	17,6	27
20		20,0	104,105
	Rincón del Jaguey	22,4	101,197
		25,0	25,213
		27,6	87,88,198
30	Rincón de Barravieja	30,0	80
		33,0	23,199
		35,4	91,92,210
		38,6	77
40	Cangaru	41,0	21,22,211
		44,4	94,95
		47,4	97,215
		49,0	19
50		51,4	74,75
	Ciénaga Cuatro Bocas	54,6	59,60
		57,0	64,206
	Ciénaga La Atascosa	58,8	15
60	"Boca del Rio Viejo" →	61,6	67,68
	Ciénaga de Las Piedras	63,8	70,205
	Ciénaga El Torno	67,0	71
70		69,6	220
		72,6	221
	Ciénaga de Punta Faro	75,0	222
	Punta de Faro	76,8	223
	Bocas de Ceniza	77,4	224

Tab. 1. Verzeichnis der untersuchten Proben, deren Entnahmepunkte am Strand und der im Text erwähnten Lokalitäten.

Einteilung nach DIN 4022	Feinsand	Mittelsand	Grobsand	Feinkies
<i>in [mm]</i>	0,063 0,08 0,10 0,125 0,16 0,2 0,25 0,315 0,4 0,5 0,63 0,8 1,0 1,25 1,6 2,0 2,5 3,15 4,0 5,0 6,3			
<i>Durchmesser in [°]</i>	1,5 1,4 1,3 1,2 1,1 1,0 0,9 0,8 0,7 0,6 0,5 0,4 0,3 0,2 0,1 0,0 -0,1 -0,2 -0,3 -0,4 -0,5			

Tab. 2. Klasseneinteilung der Korngrößen nach ζ° und mm.

Die Sand- und Kiesproben wurden durch wiederholtes Waschen mit Süßwasser entsalzen und danach getrocknet. Mit Hilfe eines Proben-teilers nach OTTO (1937) wurden sie auf annähernd 100 g geteilt. Anschließend wurden die Sedimente mit einem kompletten Siebsatz nach DIN 4188 in Korngrößenklassen von 0,1 ζ° Breite (WALGER 1964) gesiebt. Die ζ -Grade sind nach folgender Gleichung definiert:

$$\zeta = -\lg \frac{X}{X_0} \quad \text{mit } X_0 = 2,0 \text{ mm} \quad (\text{vgl. Tab. 2})$$

Der 10 Minuten dauernde Siebvorgang auf einer Siebmaschine vom Typ Retsch Retac 3D wurde nach 5 Minuten durch eine Handsiebung von 1 Minute unterbrochen. Nach Wägung der Einzelklassen auf der Feinwaage wurden diese in einer Scheidetrichterbatterie mit Tetrabromäthan (Dichte 2,96) in Schwermineral- und Leichtmineralfraktion getrennt. Die beiden Fraktionen wurden in Filterpapier aufgefangen, mit Methanol ausgewaschen und getrocknet. Nach genauer Wägung auf der Feinwaage wurden die Fraktionen getrennt in Plastiktütchen für den Transport nach Deutschland eingeschweißt.

Zur Mineralanalyse wurden Körnerpräparate angefertigt. Als Einbettungsmittel diente Aroclor (WALGER 1959).

Von 30 ausgewählten Strandsandproben wurden mit Hilfe der Sedimentationswaage des Geologischen Instituts in Kiel (300 cm Fallweg, 0,03 g Probengewicht je cm^2 Rohrquerschnitt) Korngrößenanalysen hergestellt.

2. Korngrößenanalyse

Bei den untersuchten Strandsanden wurden folgende Werte ermittelt:

1. Medianwert Md_ζ ($Md_\zeta = \zeta_{50}$, wobei ζ_k der ζ -Wert am Schnittpunkt der k -0/-Linie mit der Summenkurve ist);

2. Sortierungsgrad $QD_\zeta = \frac{1}{2} (\zeta_{25} - \zeta_{75})$

(KRUMBEIN & PETTIJOHN 1938)

3. der relative Sortierungsgrad $QH = \frac{QD_\zeta}{QD_{\zeta_E}}$, wobei QD_{ζ_E} der Sortierungsgrad der Einzelkornlage mit demselben Medianwert ist (WALGER 1961; SEIBOLD, DILL & WALGER 1961; WALGER 1966).

Die hier in Anspruch genommene Abhängigkeit des Sortierungsgrades QD_{ζ_E} einer Einzelkornlage vom Medianwert ist empirisch ermittelt und gilt nur für Leichtmineralsande. Die untersuchten Strandsande bestanden jedoch nicht nur aus Leichtmineralen, sondern hatten sehr unterschiedliche Schwermineralanteile (4,0 bis 99,5 Gewichts-% der Gesamtprobe), im Durchschnitt über 50 %.

Diese Verhältnisse machten es notwendig, die Korngrößenanalyse mit Hilfe der Sedimentationswaage zu erstellen. Die hierbei ermittelten Kornverteilungskurven zeigen „Klassen“ gleichen Sedimentationsverhaltens beim freien Fall der Körner in einer Wassersäule. Da diese Kurven auf das Vergleichsmineral Quarz bezogen werden, kann man die so erhaltenen Sortierungsgrade QD_{ζ} mit den Erfahrungswerten $QD_{\zeta E}$ der Einzelkornlagen von Leichtmineralsanden vergleichen.

Wenn man statt der Sedimentationswaage die Siebanalyse zur Ermittlung der Kornverteilungskurven heranzieht, erhält man lediglich „Gruppen“ gleicher Korngröße ohne Berücksichtigung der Dichte der einzelnen Körner. Die hierbei entstehenden Unterschiede in den Summenkurven sind in Abbildung 18 zu erkennen:

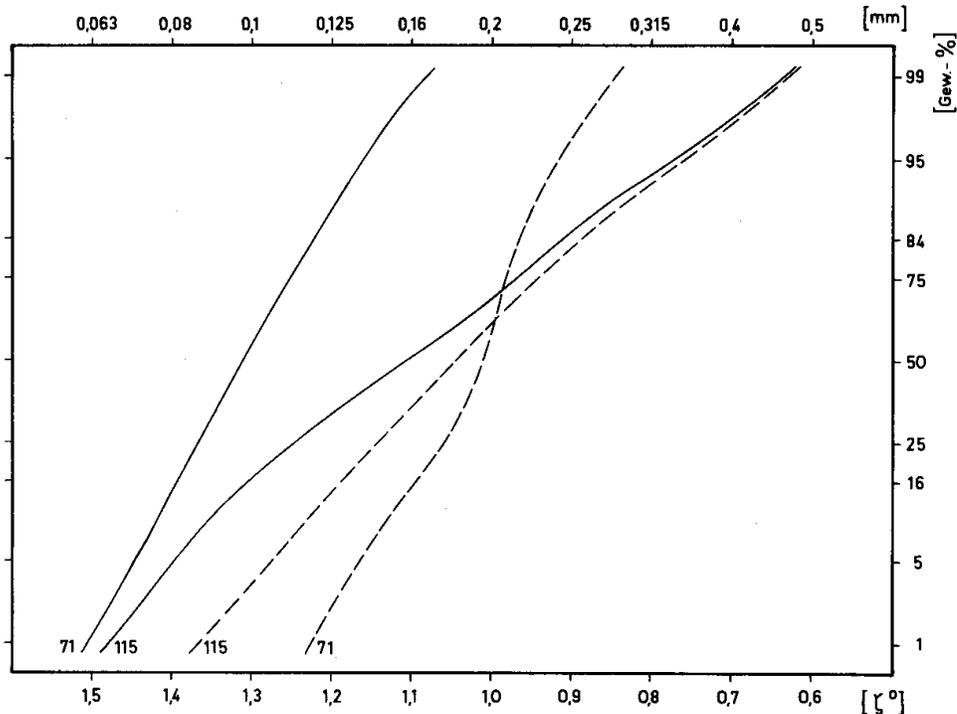


Abb. 18. Kornverteilungskurven der Sandproben 71 und 115, gewonnen durch Siebanalyse (—) und Sedimentationswaage (---).

Als Beispiele wurden die Proben 71 ($km\ 67,0/SM_t = 99,5\%$) und 115 ($km\ 8,2/SM_t = 17,0\%$) gewählt. Der Abstand der zu einer Probe gehörenden Siebanalysen- bzw. Sedimentationswaagen-Kurven entlang der Prozentlinie ist ein direktes Maß für den Gehalt an Nicht-Leichtmineralen. Beide Kurven einer Probe sind nur dann identisch, wenn diese einheitlich aus Quarzsand besteht. Demnach gibt die Sedimentationswaagen-Kurve wieder, welche Kornverteilung ein Mineralgemisch

hätte, wenn alle Nicht-Quarzkörner durch gegenüber dem freien Fall in in einer Wassersäule äquivalente Quarzkörner ersetzt wären.

Probe 71 besteht ausschließlich aus Feinsand, ist gut sortiert, und beide Kurven laufen in großem Abstand ($2,5\text{--}3,0 \xi^\circ$) fast parallel, was darauf hindeutet, daß dies Sediment fast völlig aus Schwermineralen besteht. Probe 115 ist ein Fein-Mittel-Sand, weniger gut sortiert, und der Verlauf beider Kurven zeigt, daß der Schwermineralanteil fast ausschließlich im Feinsandbereich liegt. Hier haben die Kurven einen Abstand von $1,0\text{--}1,5 \xi^\circ$, der im Mittelsandbereich auf $0,5 \xi^\circ$ absinkt.

Nach den Überlegungen von WALGER (1961) ist die Funktion des Sortierungsgrades vom Medianwert für Einzelkornlagen unabhängig vom Ablagerungsmilieu. Auf Grund der bis heute bekannten empirischen Daten bildet sie in Abbildung 19 die Kurve $QD_{\xi E}$ ($QH = 1,0$). Ein Sediment, dessen Projektionspunkt auf dieser Kurve liegt, hat einen homogenen Lagenbau.

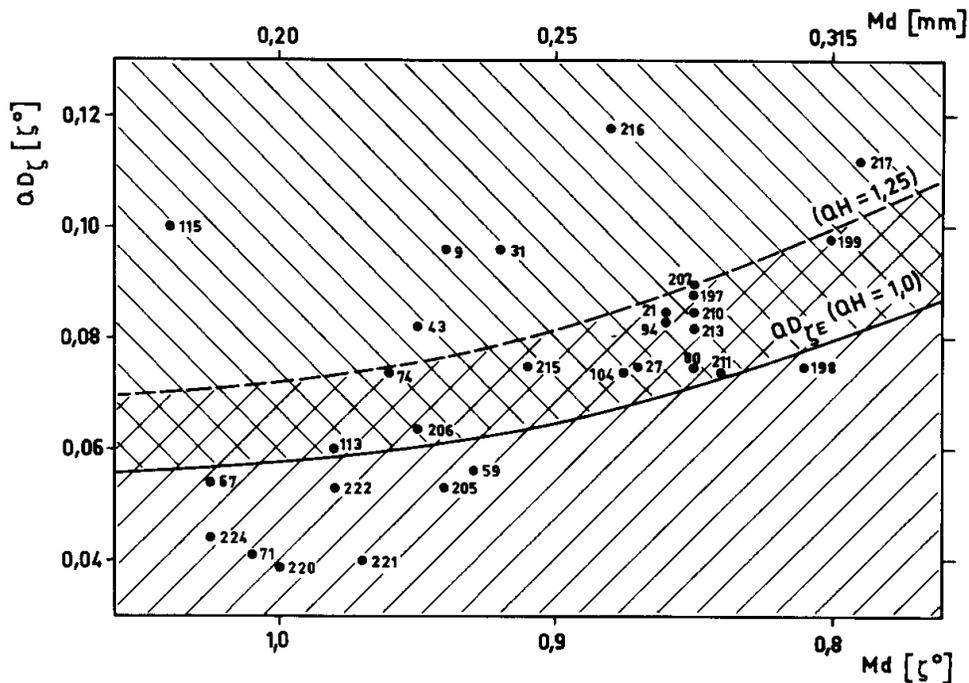


Abb. 19. Quartilsortierung QD in Abhängigkeit vom Medianwert der Sande.

Für Sedimente, die mit der Strömung, aus der sie ausfallen, gerade im Gleichgewicht sind, kann QH nur größer als 1 sein. Wenn ein Sediment mit der herrschenden Strömung im Gleichgewicht ist, kommt es zur Restsedimentbildung, d. h. der Korngrößenbereich dieses Sediments wird nach der Ablagerung weiter eingengt. Restsedimente treten also dort

auf, wo Erosion herrscht. In diesem Fall muß QH kleiner sein als 1. Da man bei der Probennahme immer eine mindestens 1 cm dicke Schicht erfaßt, die mehrere Einzelkornlagen enthält, kann die Grenze zwischen den Sedimenten, die mit der Strömung im Gleichgewicht stehen, und den Restsedimenten nicht scharf gezogen werden. Nach WALGER (1966) werden drei Bereiche unterschieden (siehe Abb. 19):

- a) Unter der Kurve $QD_{\zeta E}$ liegen die Projektionspunkte der Restsedimente, die auf Erosionsbedingungen hinweisen. Die Proben, die westlich von km 54 (Ciénaga Cuatro Bocas) genommen worden waren, gehören in diesen Bereich. Sie bilden eine Punkthäufung, deren Schwerpunkt bei $Md_{\zeta} = 0,98$ und $QD_{\zeta} = 0,05$ liegt. Die Probe 198 (km 27,6) liegt ebenfalls unterhalb der Kurve, aber nicht im Bereich der Restsedimente aus dem Westteil der Küste. Am Entnahmepunkt dieser Probe herrschte zur Zeit der Probennahme leichte Erosion.
- b) Zwischen den Kurven $QD_{\zeta E}$ ($QH = 1,0$) und $QH = 1,25$ befindet sich der Übergangsbereich. Dieser spiegelt Bedingungen wider, in denen Erosion und Sedimentation vergleichbare Stärke haben. Die zwischen diesen Kurven liegenden Punkte gehören mit Ausnahme von Nummer 113 (km 6,0) alle zu Proben aus dem Strandabschnitt zwischen km 15 und km 52. Diese Punkte häufen sich ebenfalls, und zwar um den Schwerpunkt $Md_{\zeta} = 0,86$ und $QD_{\zeta} = 0,08$. Die oben besprochene Probe 198 liegt nahe dieser Punkthäufung und auch in demselben Küstenteil. Es kann angenommen werden, daß sie zu diesen Proben zu rechnen ist.
- c) Oberhalb der Kurve $QH = 1,25$ schließlich folgt der Bereich, der auf inhomogenen Lagenbau und damit auf weitgehendes Fehlen von Erosion hinweist. Die in diesem Bereich liegenden Punkte stammen alle von Strandsanden, die östlich von km 15 entnommen wurden. Eine Ausnahme bildet die Probe 113. Sie wurde westlich der Mündung des Rio Córdoba an einer Stelle genommen, an der leichte Erosion herrschte. Das erklärt, weshalb sich der Projektionspunkt dieser Probe im Übergangsbereich befindet.

Eine weitere Betrachtung der Verteilung der Projektionspunkte der an diesem Strand gefundenen Sedimente im Verhältnis zu der empirisch gewonnenen Kurve $QD_{\zeta E}$ führt zu dem Schluß, daß diese Kurve in der linken Hälfte von Abbildung 19 um etwa $0,01 \zeta^{\circ}$ niedriger verlaufen müßte, wodurch dann lediglich die extremen Restsedimente unter diese Grenze zu liegen kämen.

Abb. 20 zeigt den Verlauf des relativen Sortierungsgrades QH (unten) und des Medianwertes Md (oben) entlang der Strandlinie.

Die QH-Werte der untersuchten Sande sind westlich von km 54 kleiner als 1,0. Sie deuten auf Restsedimentbildung und damit auf herrschende Erosion hin. Von km 52 bis km 15 haben die Strandsande QH-

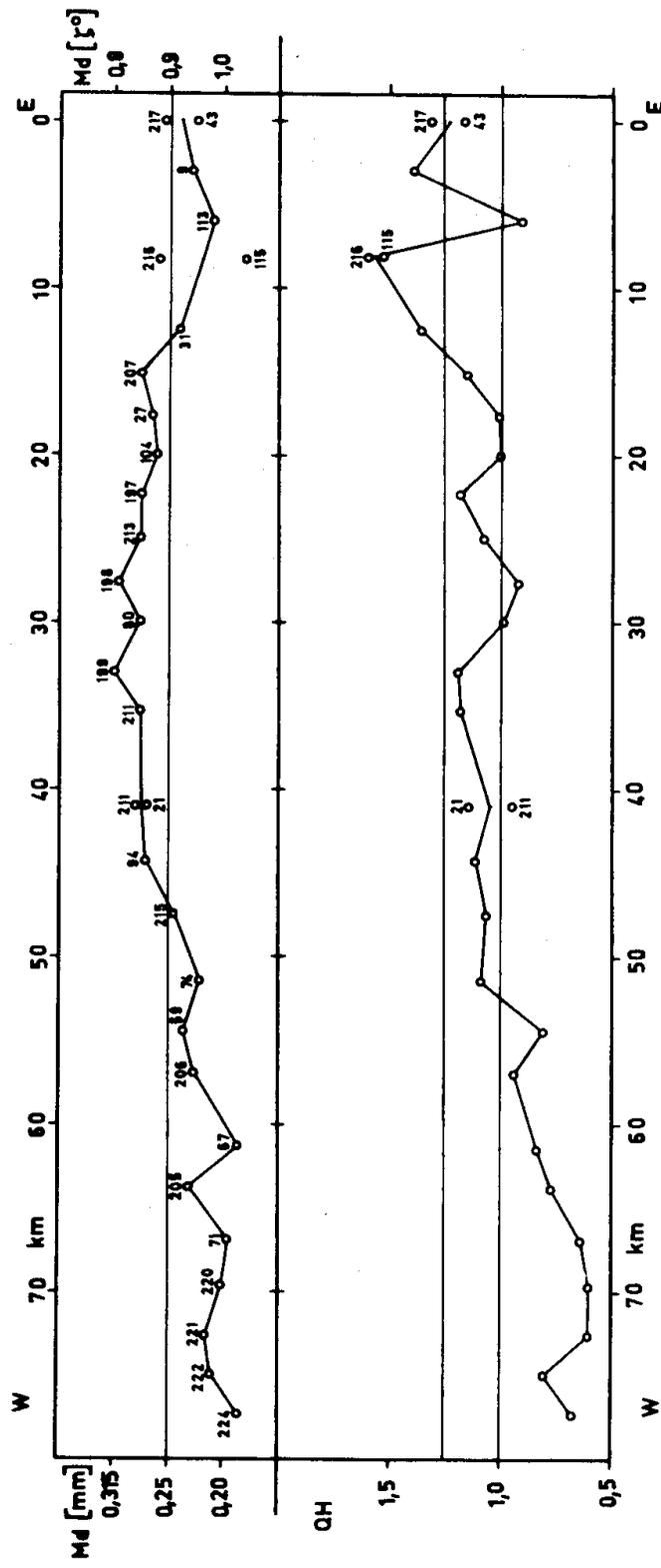


Abb. 20. Verlauf des relativen Sortierungsgrades QH (unten) und des Medianwertes (oben) entlang der Strandlinie.

Werte, die zwischen 1,0 und 1,25 liegen, also im Übergangsbereich. Dieser weist auf ein relatives Gleichgewicht von Erosion und Sedimentation hin. Östlich von km 15 treten mit Ausnahme von Probe 113 (s. o.) nur QH-Werte über 1,25 auf. Hier wird also nicht erodiert.

Die Medianwerte Md_{ζ} schwanken zwischen $1,04 \zeta^{\circ}$ und $0,79 \zeta^{\circ}$ (bzw. 0,18 mm und 0,32 mm). Die feinsten Sande mit Md_{ζ} 0,9 finden sich westlich von km 47 und zum Teil östlich von km 13. Im östlichen Teil kommen außerdem gröbere Sande vor, was auf die Inhomogenität der Sedimente in diesem Gebiet hinweist (s. o.). Zwischen km 47 und km 13 liegen die Mediane aller untersuchten Sande unter $0,9 \zeta^{\circ}$ (bzw. über 0,25 mm).

Die unregelmäßige Verteilung der Medianwerte östlich von km 13 kann nur so gedeutet werden, daß sich hier eine Sedimentquelle befindet. Diese ist in den beiden sedimentführenden Flüssen Toribio und Córdoba zu suchen.

Im Verlauf eines Sedimentstromes wird der Medianwert der Sedimente in der Regel in Transportrichtung immer feiner. Bedingt durch den im ganzen Gebiet nach Westen gerichteten Brandungslängsstrom müßte also die Korngröße der Strandsedimente bis zur Mündung des Rio Magdalena immer feiner werden. Die Strandsande werden jedoch von km 13 bis km 33 immer gröber und erst von km 33 nach Westen wieder feiner. Hieraus kann aber nicht geschlossen werden, daß von km 33 aus eine Transportrichtung nach Westen und eine nach Osten besteht (vgl. Seite 68). Die Sedimente zwischen km 13 und 47 sind vielmehr aus einem anderen Grund so grob. Diese Erscheinung kann nur dadurch erklärt werden, daß die Strandsande in diesem Bereich vorwiegend aus aufgearbeiteten alten Strandwällen stammen. Letztere bauen genau in diesem Abschnitt die Isla de Salamanca auf. Von den „alten Strandwällen“ wurden deshalb keine Proben genommen, weil sie erst nach der Rückkehr nach Deutschland auf Luftbildern als solche erkannt werden konnten.

Daß die Sande von km 33 nach Westen immer feiner werden, wird durch die in dieser Richtung zunehmende Erosion und die Transportsonderung erklärlich. Dies ist also ein weiterer Beweis für einen nach Westen gerichteten Sedimentstrom.

Die Korngrößenanalyse gestattet Aussagen über die Sedimentationsbedingungen und damit die Energieverteilung am Strande zu treffen. Ferner erlaubt sie Schlüsse auf die Lage von Sedimentquellen und mit Einschränkung auch auf die Transportrichtung am Strand.

Die Wellenenergie, die am untersuchten Strand freigesetzt wird, nimmt von Osten nach Westen stark zu, was sich in einem Wechsel von Sedimentation zu Erosion widerspiegelt. Im Ostteil des Gebietes befindet sich eine nicht sehr starke Sedimentquelle. Die heutigen Sedimente des Rio Magdalena werden von der Mündung aus sowohl nach Westen

als auch direkt in die Tiefsee verfrachtet, gelangen jedoch nicht nach Osten an die Küste des Untersuchungsgebietes.

3. Schwermineralanalyse

Zur Schwermineralanalyse werden 33 Sandproben vom Strand des Untersuchungsgebietes und zur Ergänzung 10 Proben (8 aus Flüssen, 1 Strandsand und 1 vulkanische Asche) untersucht. Die Schwermineralpräparate der Klassen mit den Klassenmitten 0,85; 0,95; 1,05; 1,15; 1,25 und 1,35 ζ° wurden unter dem Polarisationsmikroskop ausgezählt. Insgesamt wurden dabei folgende Schwerminerale bestimmt:

Hornblende, Epidot, Hypersthen, Granat, Zirkon, Titanit, Diopsid, Apatit, Disthen, Rutil, Augit, Sillimanit, Olivin, Staurolith, Anatas, Enstatit und opake Minerale.

Bis auf Hornblende, Epidot, Hypersthen und Granat waren die übrigen Minerale in den Proben entweder nur in Spuren vorhanden oder mit einem gleichmäßigen, geringen Korn-%-Satz vertreten. Sie wurden deshalb mit den nicht bestimmbareren Schwermineralen als „Rest“ aufgeführt.

Beim Zählen wurde das Sehnzählverfahren nach HENNIG (1958) so angewendet, daß je Präparat mindestens 300 Körner der nichtopaken Schwerminerale erfaßt wurden. Bei der Berechnung der Mineralverhältnisse wurden Korn-Prozente aus der Gesamtheit der nichtopaken Schwerminerale jedes Präparates und damit jeder Klasse ermittelt. Dadurch ergeben sich bei den opaken Mineralen auch Prozent-Zahlen, die über 100 % liegen können.

A. Transportrichtung am Strand

Zur Bestimmung der Transportrichtung mit Hilfe der Schwermineralanalyse muß man transportabhängige Abnutzungsvorgänge an Mineralkörnern nachweisen, die unabhängig von der Transportsonderung sind (WALGER 1966). Folgende Voraussetzungen sind dazu notwendig:

1. Die mechanische Beanspruchung muß während des Transports möglichst intensiv sein. — Dies ist durch die äußerst starke Brandung vor allem westlich von Ciénaga gegeben.
2. Es müssen in ausreichenden Mengen Minerale auftreten, die gegen mechanische Beanspruchung empfindlich sind. — Auch dies ist der Fall, da die häufigsten Schwerminerale im Gebiet Epidot und Hornblende sind. Besonders Hornblende ist wegen ihrer guten Spaltbarkeit für den Nachweis von Abnutzungsvorgängen geeignet.

Im Verlauf der Untersuchungen ergab sich nun, daß Faktoren existieren, die es unmöglich machen, den Einfluß der Transportsonderung

rechnerisch auszuschließen. Daher können hier Abnutzungsvorgänge nicht als Transportrichtungs-Kriterien herangezogen werden. Die Gründe hierfür sind:

1. Gegenüber den Untersuchungen von WALGER (1966), dessen Strandsande höchstens 3 % Schwerminerale enthielten, befinden sich in den hier untersuchten Strandsanden im Durchschnitt mehr als 50 % Schwerminerale, was zu nicht abwägbaren Schwierigkeiten führt.
2. Die Verfügbarkeitsverteilung der Minerale konnte nicht in allen Sedimentquellen festgestellt werden. Es ist nämlich nicht auszuschließen, daß Material vom Flachscheff in den Strandbereich gelangt. Zudem dient der gesamte westliche Teil der untersuchten Küste als Sedimentquelle, da hier starke Erosion herrscht.

B. Relatives Alter der Strandsande

Wie vorstehend dargelegt, können die Abnutzungsvorgänge an Mineralen bei den hier untersuchten Strandsanden nicht zur Ermittlung von Transportrichtungs-Kriterien verwendet werden.

Das Verhältnis Hornblende/Epidot bietet sich jedoch zu weiteren Untersuchungen an. Beide Minerale sind in ausreichenden Mengen vorhanden und unterliegen wegen der sehr ähnlichen Dichte den gleichen Transportsonderungsvorgängen. Durch das Verhältnis Hornblende/Epidot kann etwas über das relative Alter der Strandsande ausgesagt werden. Ein frisches Sediment wird ein höheres Verhältnis Hornblende/Epidot haben als ein Sand, der durch Transport oder Brandung über längere Zeit beansprucht wurde, da die Hornblende gegenüber mechanischer und chemischer Beanspruchung empfindlicher ist als Epidot (WEYL 1950).

Einer Anregung WALGERS (1966) folgend, wurde das Verhältnis Hornblende zu Epidot in der Klasse 1,1 — 1,3 ζ° (0,16 — 0,10 mm) berechnet. Die Schwerminerale waren jeweils in Klassen von 0,1 ζ° Breite ausgezählt worden. In diesem Fall mußten also die Klassen mit den Klassenmitten 1,15 und 1,25 ζ° nachträglich wieder zusammengefügt werden. Dabei konnte aber nicht einfach das arithmetische Mittel zwischen den Prozent-Zahlen der Minerale in den einzelnen Klassen genommen werden. Die verschiedenen Klassen-Präparate repräsentieren nämlich jeweils verschiedene Prozentmengen von Schwermineralen. Die Berechnung der durchschnittlichen Prozent-Zahl $\overline{\% m}$ eines Minerals m aus n benachbarten Klassen k wurde nach folgender Gleichung durchgeführt:

$$\overline{\% m} = \frac{\sum \% m_k \cdot \% SM_k}{\sum \% SM_k}$$

Dabei ist $\% SM_k$ der Anteil der Schwerminerale in der Klasse k an der Gesamt-Schwermineralmenge einer Sandprobe. $\% m_k$ ist der Anteil des Minerals m an der Klasse k.

Es ergab sich, daß mit Ausnahme der Proben 43 (Rincón del Doctor, km 0,0) und 224 (Punta de Faro, km 77,4) das Verhältnis Hornblende/Epidot in den Strandsanden zwischen 1,65 und 4,35 liegt, bei einem Durchschnitt von 2,47 (siehe Abb. 21). Es ist keine eindeutige Tendenz zu erkennen. Auffällig ist dagegen die relativ geringe Schwankungsbreite der Verhältniswerte.

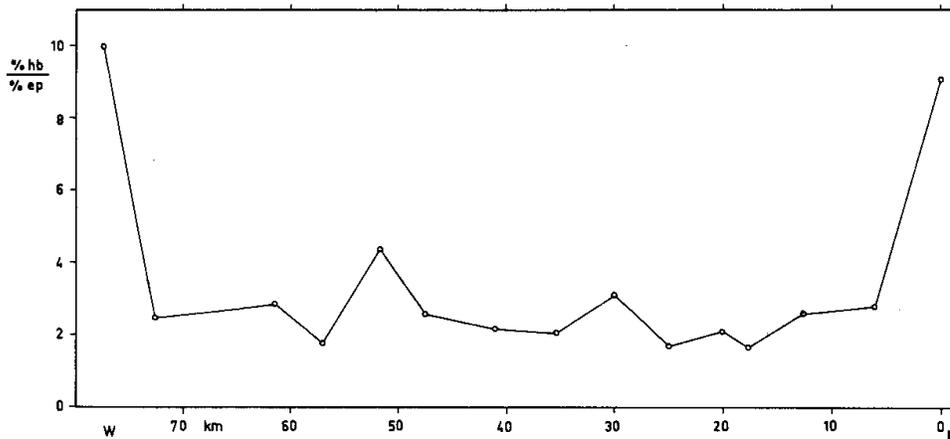


Abb. 21. Verhältnis von Hornblende zu Epidot in der Klasse 1,1—1,3 ζ° (0,16—0,10 mm) in Beziehung zur Lage der Probennahmepunkte am Strand.

Die Werte der Proben 43 und 224 liegen bei 9,05 bzw. 10,0. Probe 43 lag direkt am aktiven Kliff des Quarzdiorits von Santa Marta, enthält also frisches Material. Probe 224 lag unmittelbar an der Mündung des Rio Magdalena, schon im Sedimentationsbereich des Flusses. Auch hier liegt demnach frisches Material vor.

Zum Vergleich wurden noch die Proben 45, 47, 84 und 201 hinzugezogen. Sie stammen von Sedimenten außerhalb des Arbeitsgebietes. Die Proben 45 und 47 wurden am Fuße der Sierra Nevada den Flüssen Toribio und Córdoba entnommen. 201 stammt von einer Sandbank des Rio Magdalena und 84 vom Strand von Puerto Colombia westlich Barranquilla. Diese vier Proben besitzen alle höhere Hornblende/Epidot-Quotienten als der Durchschnittswert der Proben aus dem Arbeitsbereich. Das Sediment in den Flüssen ist also frischer als das am Strand. Probe 84 stammt von einem Strand, der heute vom Rio Magdalena ständig frisches Sediment erhält.

Es zeigt sich, daß die Strandsande der Küste des Magdalenadeltas relativ älter sind als an der äußersten westlichen und östlichen Begren-

zung dieses Gebietes. Auch sind sie erkennbar älter als die Sedimente der Flüsse, die in dieses Gebiet münden. Der extrem hohe Quotient an der Mündung des Rio Magdalena (Probe 224) kann nicht allein durch den Einfluß der Sedimente dieses Flusses erklärt werden.

C. Herkunft der Strandsande

Es gibt zwei mögliche Haupt-Sedimentquellen, den Rio Magdalena und die Sierra Nevada de Santa Marta. Daraus ergab sich die Frage, aus welcher der beiden Sedimentquellen der Strandsand des Untersuchungsgebietes stammt bzw. wie weit deren jeweiliger Einfluß reicht. Zur Lösung dieser Frage wurde die Schwermineralanalyse herangezogen. Von der Untersuchung der Transportrichtung her standen die Auszählergebnisse der Klasse $1,1 - 1,2 \zeta^{\circ}$ ($0,16 - 0,125 \text{ mm}$) von 33 Strandsandproben zur Verfügung (Abb. 23). Aus möglichen Herkunftsgewässern wurden noch folgende Proben der Schwermineralanalyse unterzogen:

(45) Rio Toribio, (47) Rio Córdoba, (84) Strandsand von Puerto Colombia westlich Barranquilla, (117) Rest einer vulkanischen Asche aus der Nähe von Bogotá, (121) Rio Fundación, (122) Rio Aracataca, (123) Rio Tucurinca, (124) Rio Sevilla, (125) Rio Frio und (201) Rio Magdalena (Abb. 22).

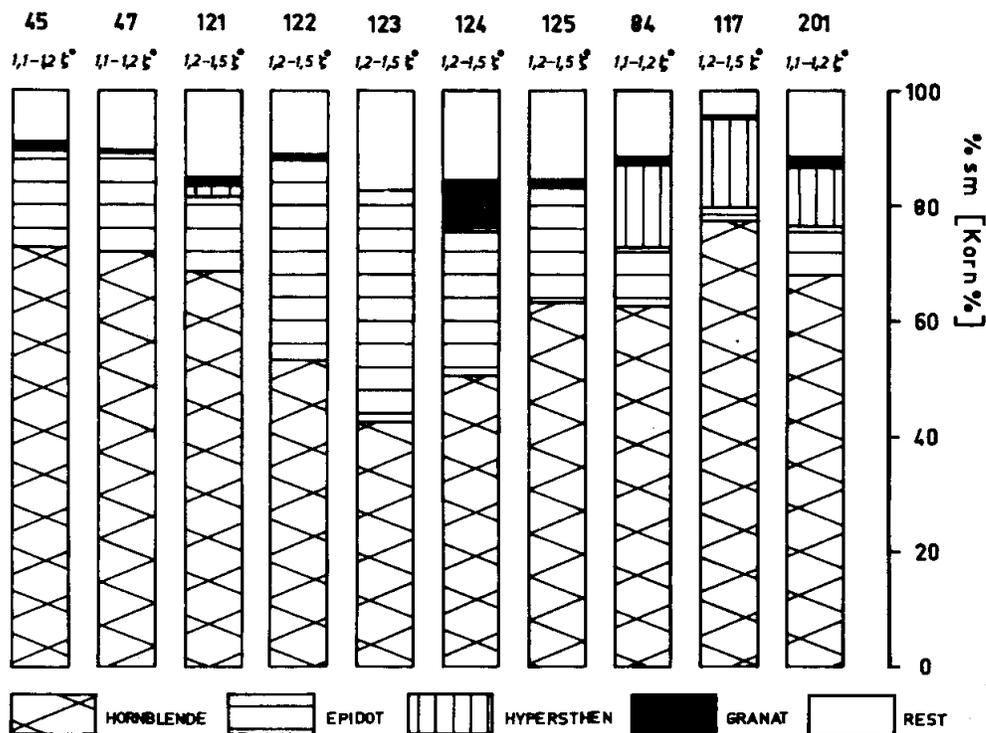


Abb. 22. Schwermineralspektren einiger Sedimentproben aus Herkunftsgewässern (Klassen $1,1 - 1,2^{\circ}$ bzw. $1,2 - 1,5^{\circ}$).

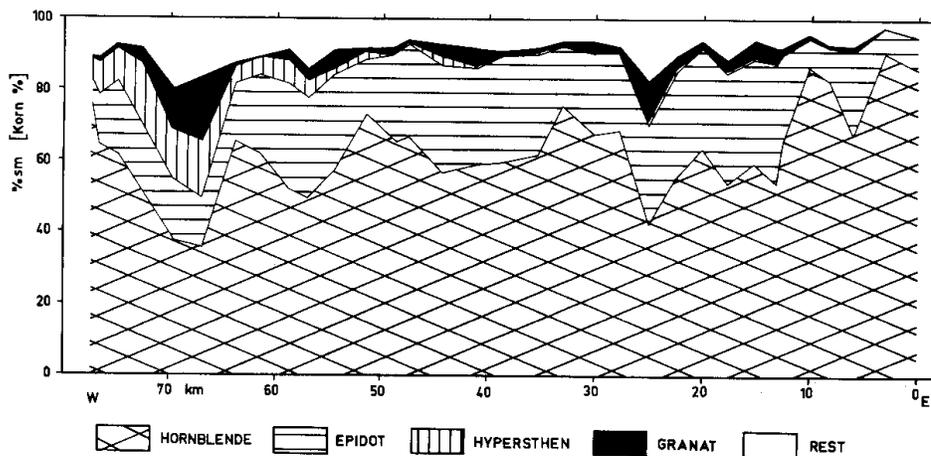


Abb. 23. Schwermineralspektren der Strandsande in der Klasse 1,1—1,2 ζ° im Verhältnis zur Lage der Probennahmepunkte am Strand.

Hornblende und Epidot bilden immer den größten Anteil der Schwerminerale in allen Proben. Das Verhältnis dieser beiden Minerale zueinander ist in den Flüssen der Sierra Nevada (vgl. Abb. 10) wie auch im Rio Magdalena fast gleich (s. o.), kann also nicht als Herkunftskriterium dienen.

Der Hypersthen fehlt in den Flüssen der Sierra Nevada nahezu völlig. Lediglich im Rio Fundación und im Rio Sevilla ist er mit 1,6 bzw. 0,3 % vertreten. Dieser Hypersthen kann aber keinen Einfluß auf den heutigen Strandbereich haben, da beide Flüsse erst nach Durchqueren einer weiten Alluvialebene in die Ciénaga Grande de Santa Marta münden. Auf diesem Weg verlieren sie bereits alle sandigen Sedimente.

Demgegenüber führt der Rio Magdalena 10,0 % Hypersthen. Es ist anzunehmen, daß dieses Mineral aus den sauren bis intermediären Vulkaniten der Cordillera Central stammt. Probe 117 wurde zwar in der Cordillera Oriental bei Bogotá genommen, jedoch aus Überresten eines Tuffs, der aus der Cordillera Central kam. In dieser Probe waren 15,1 % Hypersthen. Ähnliche Tuffe werden mindestens seit dem Pliozän von Vulkanen der Cordillera Central geliefert, die ganz im Einzugsgebiet des Rio Magdalena liegt. BUTLER (1942) beschreibt solche Tuffe aus der Umgebung von Honda am Mittellauf des Rio Magdalena. Sie stehen dort als mächtige Schichten der Honda- bzw. Gualf-Formation an und werden vom Rio Magdalena durchschnitten. Mit dem Hypersthen ist demnach ein Leitmineral für Sedimente des Rio Magdalena gefunden.

Setzt man die Prozent-Zahlen dieses Minerals ins Verhältnis zur Lage der Probenpunkte am Strand (Abb. 24), so zeigt sich, daß östlich von km 50 mit Ausnahme von Probe 94 (km 44,4) der Hypersthen-Anteil immer weniger als 1 % beträgt. Westlich von km 50 steigt sein An-

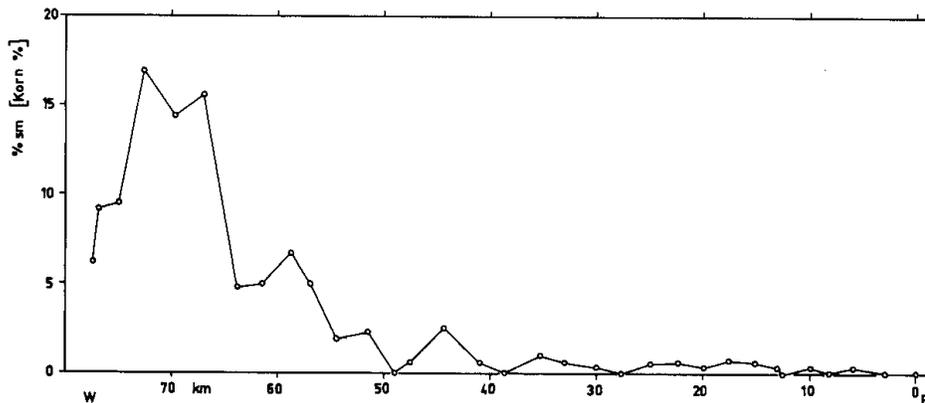


Abb. 24. Prozentsatz (Korn-%) des Hypersthens an der Gesamtheit der nicht-opaken Schwerminerale im Verhältnis zur Lage der Probennahmepunkte am Strand (Klasse 1,1—1,2 ξ°).

teil bis auf 16,9 % (221, km 72,6), um dann bis zur Mündung des Rio Magdalena wieder auf 6,2 % (224) abzufallen. Die Strandsandproben mit relativ hohem Hypersthen-Gehalt liegen also fast alle im Bereich des ehemaligen Deltas II. Dies ist ein weiterer Beweis dafür, daß das Delta II vom Rio Magdalena aufgebaut wurde (vgl. Abb. 2 und 8).

Das geringe Vorkommen von Hypersthen östlich von km 50 ist auf den Einfluß der Sierra Nevada zurückzuführen, deren Sedimente praktisch keinen Hypersthen führen. Dieser Küstenabschnitt liegt aber hinter dem Lobus I, der ein vom Rio Magdalena aufgebautes Delta repräsentiert. Um diesen Widerspruch aufzulösen, kann man nur annehmen, daß nach Ablagerung der Sedimente des Rio Magdalena noch Material aus der Sierra Nevada auf der Plattform des Deltas I sedimentiert wurde (vgl. Seite 74).

Nach diesen Überlegungen gibt die Verteilung des Hypersthens am Strand auch einen Hinweis auf die Transportrichtung an dieser Küste. Wenn dies Mineral aus den Sedimenten des Deltas II stammt, aber weiter im Osten nicht angetroffen wird und dort auch nicht in den Ausgangsgesteinen vorliegt, kann kein Küstenlängstransport nach Osten stattfinden.

D. Schwermineralseifen

Betrachtet man die Verteilung des Granats in der Klasse 1,1—1,2 ξ° längs der Strandlinie (Abb. 25), dann fällt auf, daß er im Durchschnitt mit bis zu 5 % vorhanden ist und zwei ausgeprägte Maxima bei Probe 25 (km 25,0) und Probe 71 (km 67,0) aufweist. Hier erreicht der Granat-Anteil 11,3 bzw. 17,9 %. In denselben Proben zeigen auch die opaken Schwerminerale Maxima von 173 % und 409 %. Ebenso steigt der Prozentsatz aller Schwerminerale in der Gesamtprobe auf 84,6 % (25) und

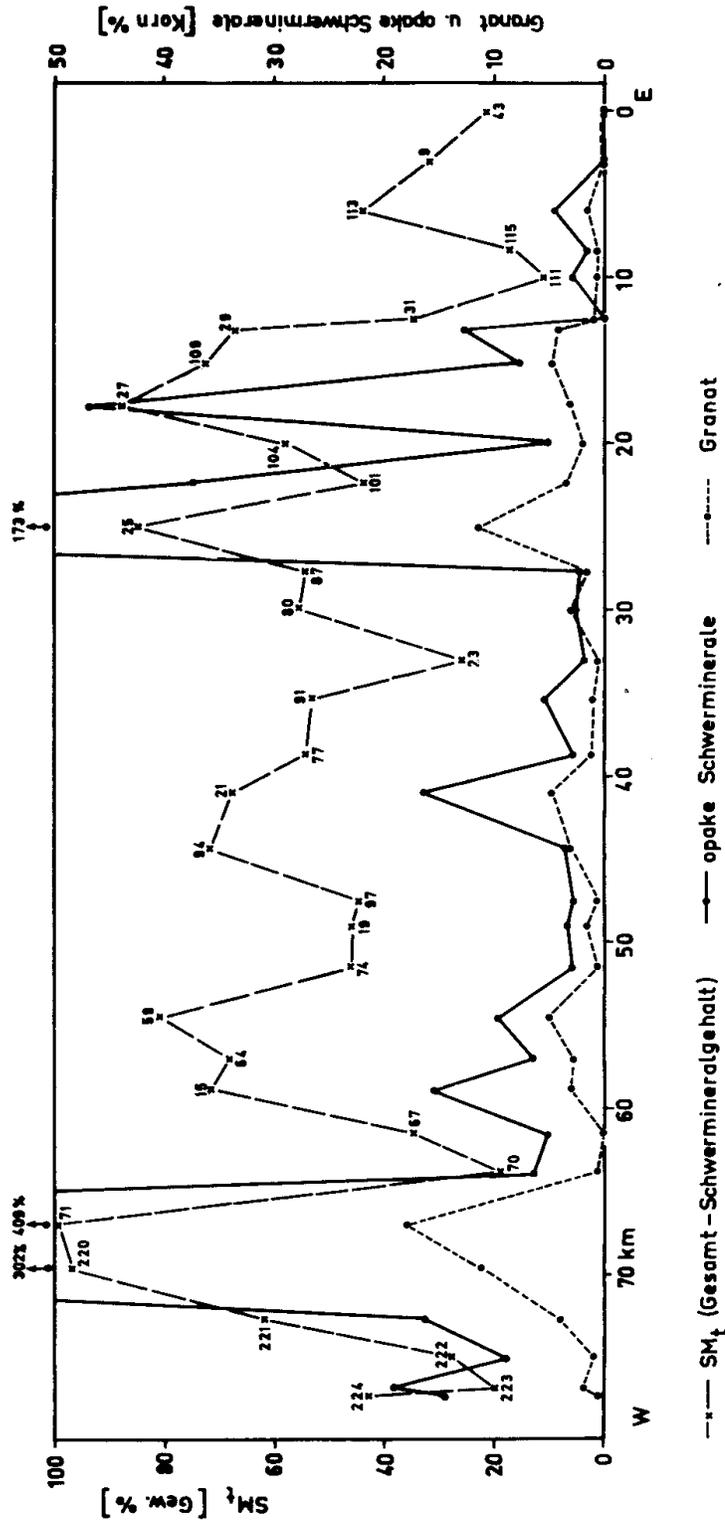


Abb. 25. Prozentsatz (Korn-%) des Granat und der opaken Schwerminerale, bezogen auf die Gesamtheit der nichtopaken Schwerminerale in der Klasse 1,1—1,2 ζ_0 , sowie der Gesamtschwermineralegehalt SM_t (Gew.-%) im Verhältnis zur Lage der Probennahmepunkte am Strand.

99,5 % (71). In beiden Fällen handelt es sich also um Schwermineralseifen. In Abbildung 24 zeigen sich außerdem noch mehrere, weniger stark angereicherte Seifen, deren Granat- und Opak-Maxima nicht so deutlich ausgeprägt sind:

27 (km 17,6), 21 (km 41,0), 59 (km 54,6), 15 (58,8), und 220 (km 69,6).

Bei 15, 21, 25, 27 und 59 handelt es sich um Proben aus temporären Schwermineralseifen. Die Proben 71 und 220 dagegen stammen von einer exponierten Stelle westlich der Ciénaga El Torno. Hier befindet sich eine beständige Strandseife. Südlich der Westflanke der neuen Öffnung dieser Lagune hat sich außerdem noch auf einem Strandhaken eine mehrere Hektar große Schwermineralseife von 50 cm Mächtigkeit gebildet (Abb. 6).

Schwermineralseifen entstehen durch Sortierung des Gesamtmineralbestandes eines Sandes nach schweren und leichten Bestandteilen. Dies ist eine Art der Restsedimentbildung, die in Gebieten mit starker Erosion stattfindet. Über den Mechanismus der Seifenbildung hat CORDES (1966) eingehende Untersuchungen an Seifenvorkommen in Skagen/Dänemark durchgeführt. Danach kommt es immer dann zur Bildung von Seifen, wenn größere Mengen von Sedimenten mit mittlerem bis geringem Schwermineralgehalt starker Erosion ausgesetzt werden.

Bereits beim Absatz des durch die Brandung aufgewirbelten Sedimentmaterials kommt es zu einer Vorsortierung, wobei die kleineren Schwerminerale bevorzugt in die tieferen Lagen einer Lamelle verlagert werden. Die eigentliche Trennung der Minerale erfolgt dann in dem dünnen Wasserfilm des ablaufenden Sogs einer Welle, der bevorzugt die oben liegenden größeren und leichteren Körner abtransportiert.

Die Schwersten (in diesem Falle die opaken Minerale, meist Magnetit) widerstehen dem Abtransport am ehesten. Je ähnlicher die Dichte der Schwerminerale derjenigen des Quarzes ist ($\rho = 2,65$), desto leichter werden sie auch mit diesem fortgeführt. Das erklärt, weshalb Hornblende ($\rho = 3,0-3,3$) und Epidot ($\rho = 3,25$) zusammen in Probe 71 weniger als 50 % ausmachen. Ihr Anteil in den übrigen Proben beträgt im Durchschnitt knapp 90 % (vgl. Abb. 23). Demgegenüber ist Granat mit seiner deutlich höheren Dichte ($\rho = 4,0$) bei allen Seiten im Strandbereich mehr oder weniger angereichert.

Am deutlichsten ist diese Anreicherung aber bei den opaken Schwermineralen ($\rho \approx 5$).

Die relativ stabile Schwermineralseife an der Ciénaga El Torno bei km 66,8 dürfte auf die Erosion des ehemaligen Strandwalls vor der Lagune zurückzuführen sein. Hier hat sich eine Lagerstätte von schätzungsweise einigen 100 000 Tonnen Magnetit gebildet. Die Seifen bei km 67-70 bilden sich durch die Zerstörung der alten Dünen, die hier

bis ans Meer reichen und etwa 60 % Schwerminerale enthalten. Die Seifen, die im Ostteil des Arbeitsgebietes gefunden werden, sind temporäre Bildungen, wie wiederholte Geländebegehungen zeigten. Diese Schwermineralseifen bildeten sich kurzfristig und relativ leicht, da der durchschnittliche Schwermineralegehalt der anstehenden Sedimente bereits sehr hoch ist.

4. Leichtmineralanalyse

Bei der Schwerentrennung mit Tetrabromäthan fielen auch die Leichtmineralfraktionen der einzelnen Klassen an. An diesen wurden Voruntersuchungen auf Leitminerale unternommen.

Die Anfärbung der Feldspäte nach der Methode von BAILEY & STEVENS (1960), beschrieben in G.MÜLLER (1964), wurde an Körnerpräparaten vorgenommen. Dazu wurden die Leichtmineral Körner auf Objektträgern in Aroclor (WALGER 1959) eingebettet, angeschliffen, angeätzt und eingefärbt.

Die Voruntersuchungen erbrachten jedoch keine signifikanten Unterschiede der Gehalte an Plagioklas und Kalifeldspat im Küstenverlauf, so daß diese Methode nicht weiter verfolgt wurde.

5. Feinkiesanalyse

Das größte Sediment am Strand kommt an der Stelle vor, an der die ankommende Welle zum letzten Mal bricht, bevor sie als Schwall den nassen Strand hinaufläuft. An dieser Stelle wird die größte Energie am Strand freigesetzt. Daher kommt es dort zu einer Restsedimentbildung, deren Ergebnis Kies und Feinkies sind.

An den Entnahmepunkten der Strandsandproben wurde immer versucht, auch eine Kiesprobe zu nehmen. Gefunden wurde Kies jedoch nur zwischen km 3,0 und km 61,6. Östlich von km 3,0 liegt nur noch der Probenpunkt am Rincón del Doctor (km 0,0). Hier kommt wohl deswegen kein Kies vor, weil die Wellen an dieser Stelle die geringste Energie des ganzen Arbeitsgebietes besitzen. Weshalb westlich von km 61,6 kein Kies mehr zu finden war, ist nicht klar ersichtlich, kann aber damit zusammenhängen, daß an dieser Stelle die ehemalige Boca del Rio Viejo lag.

Aus den Kiesproben wurde die Klasse 0,3—0,0 ζ° (4,0—2,0 mm) ausgesiebt und nach Komponenten ausgezählt (je Probe mindestens 300 Körner). Ihre Zusammensetzung ist in Abbildung 26 mit der Lage der Probenpunkte am Strand ins Verhältnis gesetzt. Unterschieden wurden: kristalline Gesteine, Metamorphite (mit den Sedimenten zusammengefaßt) und Molluskenschalenreste.

Das Verhältnis der anorganischen Komponenten zueinander zeigt im Küstenverlauf keine nennenswerten Änderungen. Dies läßt auf eine ge-

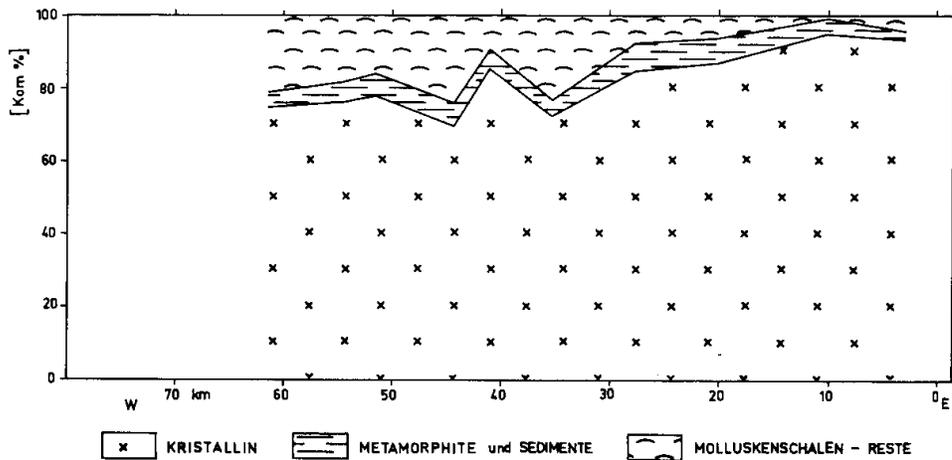


Abb. 26. Komponenten des Strandkieses in Beziehung zur Lage der Probenahmeplätze an der Küste (Klasse $-0,3-0,0 \zeta^{\circ}$ bzw. $4,0-2,0$ mm).

ringe Abnutzung innerhalb der untersuchten Kornklasse und damit auf einen schnellen Transport längs des Strandes schließen. Nach ZENKOVICH (1967, Seite 49, Abb. 10) ist die Zone, in der sich die Wellen am Strand zum letzten Mal brechen, auch der Bereich des stärksten Küstenlängstransports.

Auffallend ist die Zunahme des Anteils an Molluskschalenresten von Osten nach Westen. Die Schalenreste stammen vorwiegend von der Strandmuschel *Donax denticulatus*, die nach mündlicher Mitteilung von Prof. Götting/Gießen am Strand der Isla de Salamanca massenhaft lebt. Die toten Muscheln werden überall ausgespült und deren Schalen gelangen in den Strandkies. Die Zunahme des Anteils an Schalenresten wird als Anreicherung durch einen von Osten nach Westen verlaufenden Sedimenttransport bedingt.

6. Ergebnisse der Sedimentanalyse

Im Verlauf der Untersuchungen stellte sich heraus, daß die Frage der Transportrichtung an diesem Strand mit Hilfe des von WALGER (1966) angegebenen Weges nicht zu lösen ist. Die Ermittlung weiterer sedimentologischer Daten ergab dagegen aufschlußreiche Ergebnisse.

Wie die Korngrößenanalyse mit der Sedimentationswaage zeigte, nimmt die auf den Strand auf seine Sedimente wirkende Energie von Osten nach Westen stark zu. Östlich von km 15 herrscht kaum Erosion. Abgesehen davon befindet sich dort eine Sedimentquelle. Westlich von km 52 dagegen ist die Erosion sehr kräftig, und es kommt zur Restsedimentbildung mit ausgedehnten Schwermineraleisen. Aus dem Verlauf des Medianwertes längs der Küstenlinie wird auf eine Transportrichtung nach Westen geschlossen.

Bei der Schwermineralanalyse stellte sich heraus, daß der Hypersthen ein Leitmineral für die Sedimente darstellt, die aus dem Rio Magdalena stammen. Die Sedimente am Strand des Untersuchungsgebietes stammen direkt oder indirekt aus dem Rio Magdalena bzw. aus den Flüssen der Sierra Nevada de Santa Marta. Von km 50 ab nach Westen werden Sedimente erodiert, die der Rio Magdalena im Delta II abgesetzt hatte. Das vom Rio Magdalena ebenfalls gebildete Delta I ist nachträglich von Sedimenten aus der Sierra Nevada überlagert worden. Östlich von km 50 wird nämlich kaum noch Hypersthen gefunden. Hieraus ist auch zu schließen, daß kein Sedimenttransport nach Osten stattfindet.

Das Verhältnis von Hornblende zu Epidot gibt Hinweise auf das relativ höhere Alter der Sedimente am Strand im Gegensatz zu den heutigen Ablagerungen aus der Sierra Nevada und des Rio Magdalena.

Die Zunahme der Muschelschalenreste im Strandkies von Osten nach Westen bedeutet einen weiteren Hinweis auf eine allgemeine Transportrichtung nach Westen. Die Sedimentanalyse erlaubt also hier direkte und indirekte Schlüsse auf einen Küstenlängstransport von Osten nach Westen.

Karten, Luftbilder und Schrifttum

Land- und Seekarten

“Atlas de una parte de America Meridional ...”, Hoja 12, Francisco José de Caldas, Bogotá 1811; in Atlas de Colombia, Bogotá 1969.

“Litoral de las costa de Tierra Firme”, Deposito Hidrográfico, Madrid 1793—1802; in Atlas de Mapas Antiguos de Colombia, siglos XVI a XIX, Bogotá 1971. Amerikanisches Reisewerk, Teil III, A. v. HUMBOLDT; in H. de Terra: A. v. HUMBOLDT und seine Zeit, Wiesbaden 1956.

Atlas de Colombia, Carta no. 1, “Agustin Codazzi”, Bogotá 1898; in Atlas de Colombia, Bogotá 1969.

Puerto Colombia to Santa Marta, H. O. 5688, 1:80 000, U. S. Naval Oceanographic Office, Washington 1936.

Mapa de Colombia, 1:50 000, Hojas 1992 I, 1992 IV, 1993 II, 1993 III, 2092 I, 2092 IV, 2093 II, 2093 III, Instituto Geográfico “Agustin Codazzi”, Bogotá 1965.

Geologische Karten

Mapa geológico de reconocimiento de la Sierra Nevada de Santa Marta, Instituto Nacional de investigaciones geológico-mineras. — U. S. Geological Survey, Bogotá 1969.

Mapa geológico de Colombia, Servicio Geológico Nacional, Bogotá 1962.

Luftbilder

- Instituto Geográfico "Agustin Codazzi", Departamento Aérofotográfico
16. 12. 1953 1 : 60 000 M 7 / 401, 402, 403, 468, 469, 471, 472
28. 12. 1953 1 : 60 000 M 13 / 1014, 1015; M 14 / 1150, 1151, 1152; M 16 / 1310, 1311, 1389, 1390, 1391
8. 1. 1954 1 : 60 000 M 21 / 1816, 1826, 1827, 1828
2. 1967 1 : 20 000 C 1195 / 814—818
9. 1. 1968 1 : 21 000 R 611 / 221—240

Schrifttum

- Atlas de mapas antiguas de Colombia, siglos XVI a XIX. — Litografía ARCO, Bogotá, 169 S., 1971.
- ACEVEDO LATORRE, E.: Atlas de Colombia. — Instituto Geográfico "Agustin Codazzi", 216 S., Bogotá 1969.
- ANKEL, W. E.: Das Instituto Colombo-Alemán in Santa Marta/Kolumbien. — Natur und Museum, 96, 37—43, 1966.
- BAILEY, E. H. & STEVENS, R. E.: Selective staining of K-Feldspar and Plagioclase on rock slabs and thin sections. — Amer. Mineralogist, 45, 1020—1025, 1960.
- BRANDENBURG, L.: Der Rio Magdalena, eine Flußmonographie. — Diss. phil., Leipzig, 1923.
- BUTLER, JR., J. W.: Geology of Honda District, Colombia. — Bull. Am. Ass. Petr. Geol., Vol. 26, no. 5, 793—837, 1942.
- CAMPBELL, C. J.: The Santa Marta Wrench Fault of Colombia, and its regional setting. — Fourth Caribbean Geological conference, Trinidad 1965, 1968.
- CORDES, E.: Aufbau und Bildungsbedingungen der Schwermineraleisen bei Skagen (Dänemark). — Meyniana, 16, 1—35, 1966.
- HEEZEN, B. C.: Corrientes de turbidez del Rio Magdalena. — Soc. Geográfico Colombia Bol., ves. 51, 52, 135—143, Bogotá 1956.
- HENNIG, A.: Kritische Betrachtungen zur Volumen- und Oberflächenmessung in der Mikroskopie. — Zeiss-Werkzeitschrift, 6, 78—86, 1958.
- KRUMBEIN, W. C. & PETTIJOHN, F. J.: Manual of Sedimentary Petrography. — New York 1938.
- LABORATOIRE CENTRAL D'HYDRAULIQUE DE FRANCE, MISSIONS EN COLOMBIE: Defensa de Playas en Ciénaga-mision en el terreno, informe general. — Ministerio de Obras Publicas, Rama Tecnica, Colombia, 27 p., 15 Abb., unveröffentl., 1968.
- LINK, T. A.: Post-Tertiary Strand-line oscillations in the Caribbean coastal area of Colombia, South America. — Journal of Geology, vol. 35, 58—72, 1927.
- MÜLLER, G.: Methoden der Sedimentuntersuchung, Teil I. — E. Schweizerbart, Stuttgart, 303 S., 1964.
- OTTO, G. H.: The use of statistical methods in effecting improvements on a Jones sample splitter. — J. Sed. Petrol., Vol. 7, 110—132, 1937.
- REINECK, H.-E.: Marine Sandkörper, rezent und fossil. — Geol. Rundschau, 60, 302—321, 1970.
- RICO PULIDO, E.: Las obras de Bocas de Ceniza. — Informe general von COLPUERTOS, empresa de puertos de Colombia/Bogotá, 100 S., 1969.
- SEIBOLD, E.; DILL, R. F. & WALGER, E.: Tauchbeobachtungen und petrographische Untersuchungen zur Sedimentumlagerung in der Kieler Außenförde. — Meyniana, 11, 82—96, 1961.

- SIEVERS, W.: Reise in der Sierra Nevada de Santa Marta. — Gressner & Schramm, Leipzig, 290 S., 1887.
- TERRA, DE H.: Alexander v. Humboldt und seine Zeit. — F. A. Brockhaus, Wiesbaden, 279 S., 1956.
- TSCHANZ, C. M.: JIMENO, V., A.; CRUZ, B., J., et al.: Mapa geologico de reconocimiento de la Sierra Nevada de Santa Marta — Colombia. — INGEOMINAS, Bogotá (Geol. Karte) 1969.
- WALGER, E.: Ein Kunstharz mit hoher Brechzahl als Einbettungsmittel für Schwerminerale und andere petrographische Zwecke. — Erdöl und Kohle, Jahrg. 12, 957—958, 1959.
- Die Korngrößenverteilung von Einzellagen sandiger Sedimente und ihre genetische Bedeutung. — Geol. Rundschau, Bd. 51, 494—507, 1961.
- Zur Darstellung von Korngrößenverteilungen. — Geol. Rundschau, Bd. 54, 976—1002, 1964.
- Untersuchungen zum Vorgang der Transportsonderung von Mineralen am Beispiel von Strandsanden der westlichen Ostsee. — Meyniana, 16, 55—106, 1966.
- WEYL, R.: Schwermineral-Verwitterung und ihr Einfluß auf die Mineralführung klastischer Sedimente. — Erdöl und Kohle, 3, 209—211, 1950.
- WIEDEMANN, H. U.: Reconnaissance of the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia: Physical Parameters and Geological History. — Mitt. Inst. Colombo-Alemán Invest. Cient., 7, 85—119, Santa Marta 1973.
- ZENKOVITCH, V. P.: Process of Coastal Development. — Interscience, New York, 738 S., 1967.

Anschrift des Autors:

Dr. A. Frhr. v. ERFFA, 63 Giessen, Grünberger Straße 58a.