BERLINER GEOGRAPHISCHE ABHANDLUNGEN

Herausgegeben von Jürgen Hövermann, Georg Jensch, Hartmut Valentin, Wilhelm Wöhlke

Schriftleitung: Horst Hagedorn

Heft 4

Hans-Joachim Pachur

Untersuchungen zur morphoskopischen Sandanalyse

1966

Im Selbstverlag des II. Geographischen Institutes der Freien Universität Berlin

BERLINER GEOGRAPHISCHE ABHANDLUNGEN

Herausgegeben von Jürgen Hövermann, Georg Jensch, Hartmut Valentin, Wilhelm Wöhlke

Schriftleitung: Horst Hagedorn

Heft 4

Hans-Joachim Pachur

Untersuchungen zur morphoskopischen Sandanalyse

1966

Im Selbstverlag des II. Geographischen Institutes der Freien Universität Berlin

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort 4

I. Die Grundlagen der morphoskopischen Sandanalyse

1. Die technischen Voraussetzungen zur Durchführung der Sandanalysen 5

2. Betrachtungen über die Veränderung der Quarzkornoberfläche und -gestalt innerhalb des Sediments 6

3. Experimentelle Überprüfung der Grundlagen der morphoskopischen Sandanalyse 8

a) „Marine" Bearbeitung 9

b) „Äolische" Bearbeitung 10

c) Fehlerbetrachtung 15

d) Folgerungen aus den Experimentaluntersuchungen 16

II. Die Anwendung der morphoskopischen Sandanalyse

1. Äolische Sedimente 17

2. Kombinierte Wind- und Wasserwirkung 19

3. Marine und fluviatile Sedimente 20

4. Beispiele für Regionaluntersuchungen

a) Glaziäre Akkumulationen (Lüneburger Heide) 21

b) Alluvionen eines Trockenflußbettes (Tibesti-Gebirge) 25

c) Sedimente der Serir el Gattusa und der Serir Tibesti 28

Zusammenfassung und Schluß 32

Literatur- und Kartenverzeichnis 33

VORWORT

Die Untersuchungen wurden im Geomorphologischen Laboratorium der Freien Universität Berlin und der Außenstelle des Laboratoriums in Bardai/Tibesti/Republique du Tchad vorgenommen.

Herrn Professor Dr. Jürgen Hövermann danke ich für Anregungen und Hinweise und für die Möglichkeit, im Laboratorium und an der Forschungsstation arbeiten zu dürfen.

Den Mitarbeitern des II. Geographischen Instituts der Freien Universität Berlin bin ich für die erwiesene Unterstützung zu Dank verpflichtet.

DIE GRUNDLAGEN DER MORPHOSKOPISCHEN SANDANALYSE

Die Grundkonzeption der von Cailleux (1948 und folgende Arbeiten) entwickelten morphoskopischen Sandanalyse beruht, im Gegensatz zu den in der Morphometrie der Mineralkörner geübten Methoden, darauf, daß die Gestaltung der Kornoberfläche im Zusammenhang mit der Kornform gesehen wird.

Cailleux unterscheidet, zurückgehend auf Sorby (1880) und Reades (1892), die zuerst die glänzende Oberfläche von Quarzkörnern auf marine Einwirkungen zurückführten, drei Grundtypen von Quarzkörnern:

a) non-usés (unbearbeitet); b) émoussés-luisant (abgerundet-glänzend) und c) ronds-mats (rund-matt).

a) Die unbearbeiteten Körner haben einen unregelmäßigen Grundriß, sie weisen scharfe Kanten, Grate und selten ebene Flächen auf (Abb. 1 und 2).

Es handelt sich bei diesem Typ im wesentlichen um Körner, die unmittelbar aus dem Gesteinsverband herausgelöst und nach kurzer Wegstrecke sedimentiert wurden oder um vormals runde Körner, die zerschlagen worden sind, ohne daß abgerundete Kornteile noch zu erkennen sind. Ich fand diesen Typ in Granitgrus, in Sandern von Alpengletschern und am Brikdalsbree; er ist Bestandteil der Stauchmoränen in der Umrahmung des Uelzener Beckens (Lüneburger Heide) und maßgebend beteiligt an der Zusammensetzung der Alluvionen im Oberlauf des Bardagué im Tibesti und anderer Wadis dieses Wüstengebirges, in den Trockentälern des Toummo, Djebel el Soda und im Hongraben.

Übereinstimmend mit Cailleux (1948) wurde erkannt, daß dieser Korntyp charakteristisch für Sedimente aus Gebirgsflüssen und für Verwitterungsprodukte kristalliner Gesteine ist. Nach Cailleux (1961) sind an Küsten mit starker Brandung die non-usés Körner dominierender Bestandteil der Akkumulationen.

b) Die Oberfläche des émoussés-luisant Korntyps ist glänzend poliert (Abb. 3 und 4).

Für fluviatile, limnische (Große Seen N.-Amerikas, Schneider und Cailleux 1959) und marine (Küsten-)Sedimente ist dieser Korntyp charakteristisch.

In den Dünensanden der humiden Zone und in den glazialen Akkumulationen (Lüneburger Heide, Schleswig-Holstein, Mark Brandenburg) sind stets abgerundete glänzende Körner vorhanden. In den Barchanen der Sahara fehlen sie völlig, in den Dünen des Sahel (Oum Chalouba, Tschad) und in den nördlichen Randbereichen der Sahara (Hongraben, Libyen) sind sie vertreten.

c) Die Oberfläche des runden-mattierten Quarzkornes erscheint durch flächenhaft deckende Schlagtrichter (Abb. 9) mattiert.

In Barchansanden sind diese Körner zu mehr als 75 % vertreten, sie fehlen in keinem äolischen Sediment. Von Cailleux (1948) wurden sie als Indikator für den Nachweis dominierender Windwirkung im Periglazial Europas benutzt. Aus ihrem Vorhandensein im triassischen Buntsandstein, im Sandstein bzw. terrestischen Ablagerungen des Kambrosilur und Präkambriums schließt Cailleux (1952) auf aride Klimaverhältnisse in diesen Erdzeitaltern.

Die ronds-mats Quarzkörner sind vorherrschender Bestandteil aller von mir untersuchten Proben aus der Sahara, mit Ausnahme der Gebirgsregionen.

Neben diesen drei Grundtypen führt Cailleux den der ronds-mats-sales ein. Er versteht darunter Quarzkörner, die auf der Oberfläche Reste des im Sandstein vorkommenden Bindemittels tragen.

Mit Hilfe dieses Korntyps ist es möglich, die Sandkörner, die unmittelbar am Entnahmeort der Probe, z. B. aus in der Nähe verwitternden Sandstein stammen, von denen zu trennen, die einen längeren Transportweg zurückgelegt haben (vgl. die Transportweguntersuchungen Cailleuxs (1961) an Rheinalluvionen).

1. Die technische Durchführung der Sandanalysen.

Die Untersuchung der Mineralkörner ist nur mit Hilfe eines Binokulars möglich; sie kann nicht unmittelbar im Feld, wie es bei der Schottermorphometrie möglich ist, vorgenommen werden.

Beim Mikroskopieren (Binokular) wurde nach einem Vorschlag Cailleuxs mit Auflicht (Einfallwinkel 45°) gearbeitet. Nur bei Auflicht sind die Oberflächenstrukturen des Kornes genügend scharf erkennbar.

Die Vergrößerung richtet sich nach der Korngröße, weil die gesamte Kornoberfläche überschaubar sein muß. Für die Korngrößen von 1,0 mm bis 0,063 mm Durchmesser ist eine 12,5 bis 112,5 fache Vergrößerung ausreichend. Für Detailbeobachtungen ist ein Mikroskop (Polarisationsmikroskop) unentbehrlich.

Am Korn haftende Ton-Kalk- und Oxydkrusten wurden durch Waschen und gegebenenfalls Kochen in Salzsäure entfernt. Organische Krusten wurden mit Wasserstoffsuperoxyd beseitigt.

Um eine ausreichende Kontrastwirkung zu erzielen, wurde der Objekttisch mit einer geschwärzten und mattierten Metallplatte ausgestattet. Zur Betrachtung unter dem Binokular wurden die Körner einer Größe in Reihen angeordnet.

Bewährt hat sich die Ausstattung des Binokulars mit einer Kreuzverschiebung, die einen Durchmusterungsbereich von 50 mal 50 mm umfaßt; dadurch ist bei der Analyse ein „Abfahren" der Kornreihen möglich.

Zur genauen Untersuchung der Kornoberfläche muß die Vergrößerung häufig geändert werden, darum ist ein Schnellwechselobjektiv zu empfehlen. Damit der Anteil aller Korngrößen in der zu analysierenden Sandprobe gewährleistet ist, wurde sie zu einem Kegel aufgeschüttet und dieser dann je nach gewünschter Materialmenge halbiert und geviertelt.

Mit Hilfe eines Prüfsiebsatzes (DIN 4188) nebst Siebmaschine wurden die Proben in die Fraktionen 2,0, 1,0, 0,5, 0,25, 0,125, 0,063 und 0,05 aufgeteilt; die Zahlen geben die Maschenweiten in mm an.

Für 100 g Siebgut ist erfahrungsgemäß eine Mindestsiebzeit von 15 Minuten notwendig. Mehr als 100 g sind, besonders wenn es sich um feinkörniges Material handelt, in einer Siebung nicht zu fraktionieren.

2. Betrachtungen über die Veränderung der Quarzkornoberfläche und -gestalt innerhalb des Sediments.

Bei Vorgängen, die der Sedimentation folgen, werden die Quarzkörner durch Eisen-Manganhydroxydkrusten im Laterit, durch im wesentlichen Eisenhydroxyd im Ortsteinhorizont von Dünen und im Grundwasserbereich der Barchane (Capot-Rey und Gremion 1964) verbacken. Kalk- und Tonauflagerungen in Staubböden der Serir und die kalkigen oder kieselsäurehaltigen Bindemittel im Sandstein verdecken die Oberflächenskulptierung der Körner.

In welchem Umfang bei der Ausbildung der Kruste die Quarzkornoberfläche in Gestalt chemischer Reaktionen beteiligt wird, ist weitgehend unerforscht.

Auf Grund der hohen Reaktionsträgheit des Siliziumdioxyd ist aber wohl eine bedeutende Resistenz der Quarzkornoberfläche gegenüber chemischen Vorgängen im Sediment anzunehmen, darin liegt neben der ubiquitären Verbreitung der Quarzkörner die besondere Gunst des Untersuchungsobjekts.

Für kieselsäurehaltige Bindemittel ist jedoch eine direkte Einwirkung durch Aufkristallisation von Facetten aus SiO_2 in der Größe zwischen 20 und 50 mikron von Cailleux (1961) beschrieben worden. Auskristallisation von Kieselsäure spielt vermutlich nach Cailleux und Tricart (1961) eine Rolle bei in Französisch-Guayana gefundenen 0,05 mm großen kugligen und glänzenden Quarzkörnern.

Im Oberlauf des Bardagué (Tibesti) fand ich Quarzkörner bis zu 0,063 mm Durchmesser, die sehr gut abgerundet, glänzend und transparent sind (Abb. 5).

Diese sehr kleinen abgerundet und glänzenden Quarzkörner sind deshalb erwähnenswert, weil sie die untere Korngrößengrenze, bei der erfahrungsgemäß die Bearbeitung endet, in Frage zu stellen scheinen. Weil ihre Zahl jedoch gering ist, handelt es sich wohl um exzeptionelle Exemplare. Ob ihre Kornform von chemischen oder mechanischen Prozessen abhängt, ist ungeklärt.

Gegen eine mechanische, das hieße durch fluviatilen Transport verursachte Bearbeitung spricht — wie die Beobachtungen aus mehreren hundert Proben und die experimentellen Untersuchungen lehren —, daß die Kornbearbeitung in fluviatilem und äolischem Milieu im Korngrößenbereich der 0,125 mm Fraktion (so auch im Prinzip Cailleux 1961) endet.

Chemische Vorgänge spielen wahrscheinlich eine Rolle bei Quarzkörnern aus Lateritkrusten (Becken von Zouar, Tibesti), die am gleichen Korn scharfkantig verschneidende Flächen und abgerundete glänzende Kornteile aufweisen (Abb. 6).

Zur Deutung dieses Phänomens gibt es, da die regelhafte Anordnung der Kristallkanten das Zerbrechen eines ursprünglich anders geformten Korns ausschließt, zwei Möglichkeiten:

1. Aufkristallisation von Kieselsäure.

Die Rundung des Mittelteils des Korns könnte während eines längeren fluviatilen Transports entstanden sein. Nach der Sedimentation gingen dann Lateritisierungsprozesse vor sich, in deren Verlauf mobile in Solform vorliegende Kieselsäure (Harrassowitz 1936, Scheffer-Schachtschabel 1963) an einzelnen Körnern auskristallisierte. Auf einem als Kristallisationskern dienenden runden und glänzenden Korn führt die Auskristallisation der Kieselsäure zu den sich scharfkantig verschneidenden trigonalen Flächen.

2. Lösungsvorgänge am Quarzkorn.

Der infragestehende Kristall ist durch Lösung aus einem Quarzkorn unbekannter Form entstanden.

Diese Deutung kann sich auf experimentelle Untersuchungen von Meyer und Penfield (1889) stützen, welche eine Quarzkugel (24 mm ϕ) mit Flußsäure behandelten. Die maximale Auflösung des Quarzes erfolgte in Richtung der dreizähligen Achse, wobei sich schließlich an den beiden Enden der Vertikalachse eine dreiseitige Pyramide ausbildete.

Setzt man die Vorstellung eines Lösungsvorganges als richtig voraus, ergäbe sich also für die morphoskopische Auswertung von Quarzkörnern aus Lateritkrusten die Konsequenz, daß glänzende Kornteile keine fluviatile Bearbeitung anzeigen.

Die Beeinflussung der Quarzkornoberfläche ist in bezug auf die Vorgänge in Bodenhorizonten wenig untersucht (vgl. Tricart und Cailleux 1963, Alimen 1944).

Vergleiche von Sandproben aus Bodenprofilen mit starker Ortsteinbildung ergaben, daß die Quarzkörner auffallend tiefe Kavitationen aufwiesen (Abb 7 und 8).

Die Erscheinung beschränkt sich auf die Korngrößen zwischen 1,0 mm und 0,25 mm. Die kleineren Körner haben den charakteristischen Habitus des non-usés Korntyps.

Im C-Horizont wiesen die Quarzkörner keine derartigen Kavitationserscheinungen auf. Nach den Aufschlußverhältnissen erscheint es ausgeschlossen, daß der Ortsteinhorizont an eine besondere Sedimentschicht, die sich von dem Hangenden und Liegenden unterscheidet, gebunden ist; ein homogenes Ausgangsmaterial (Dünensand) ist der Bodenbildung unterworfen worden. Im Morphogramm steigt unter solchen Bedingungen der Anteil des non-usés bzw. des rond-mat Korntyps, weil vor allem bei letzterem schwer zu unterscheiden ist, ob die Oberfläche durch den Wind oder durch andere Einwirkungen mattiert wurde.

Eine Mattierung der Quarzkornoberfläche kann im Laboratoriumsversuch mit Flußsäure oder stark konzentrierten Laugen leicht durchgeführt werden. Die so erzeugte Mattierung und Änderung der Transparenz äußert sich in einer sehr feinen und gleichmäßigen Skulptierung der Quarzkornoberfläche. Dagegen überzieht die äolisch mattierte Kornoberfläche dicht nebeneinanderliegende Krater. Weniger leicht ist die Unterscheidung bei Quarzkörnern zu treffen, deren Oberfläche unter natürlichen Verhältnissen skulptiert worden ist. Die Quarzkörner wurden aus Handstücken von vergrusendem Granit (nördliches Vorland des Tibesti und aus Granit bei Mourizide) isoliert, die Wände der Klüfte und Risse im Granitdetritus sind von Eisenoxyd überzogen, die Feldspäte sind angewittert. Dies sind Hinweise auf eine chemische Verwitterung des Gesteins.

Die scharfkantigen Quarzkörner tragen bevorzugt auf den Flächen, die zu den Klüften und Rissen orien-

tiert sind, eine deutliche Mattierung (Abb. 11) in stärker verwittertem Granit erscheint schließlich das ganze Korn einheitlich mattiert.

Diese Mattierung ist von der äolisch entstandenen Skulptierung durch die einheitliche Größe der Vertiefungen zu unterscheiden, jedoch nur in den Anfangszuständen äolischer Bearbeitung, denn bei Barchansanden ist die äolisch erzeugte Oberflächentracht schon so einheitlich (Abb. 9), daß eine Unterscheidung von der „chemischen Mattierung" (Abb. 10) kaum noch möglich ist.

Sehr problematisch wird die Unterscheidung der ungeformten, durch den Wind mattierten, von den ungeformten, dank chemischen Einflüssen im Gesteinsverband mattierten, Quarzkörnern. Eine Unterscheidungsmöglichkeit liegt im Vergleich der Grate, sie sind bei den in situ mattierten Körner scharfkantig und in sich wellenschliffartig gegliedert (Abb. 11). Die äolisch bearbeiteten Körner weisen abgerundete Grate auf, es gibt keine scharfen Übergänge zu den Flächen des Korns. Da aber die äolische Bearbeitung auch an den Graten des Korns ansetzt, täuscht das nur kurze Zeit äolisch bearbeitete, vorher chemisch mattierte Korn, eine langandauernde äolische Bearbeitung vor; eine wichtige Fehlermöglichkeit bei der Auswertung ungeformter mattierter Quarzkörner.

Die Untersuchung von Quarzkörnern aus Granitgrus (Fundort: Bayerischer Wald, Bundesstraße 85, km 28) ergab das Fehlen einer Mattierung.

Es muß weiteren Forschungen vorbehalten bleiben, inwieweit sich die Quarzkörner vergrusenden Granits, abhängig von den klimatischen Gegebenheiten, unter denen der Granitgrus entstanden ist, verändern.

Einen weiteren Beleg für die nicht-mechanische Skulptierung der Quarzkornoberfläche (Abb. 12) bilden Quarzkörner aus Bardagué-Alluvionen, deren Oberfläche von tief und steilwandig eingesenkten unregelmäßig geformten Gruben untergliedert ist.

Auf welche chemischen Prozesse im einzelnen diese Vertiefungen zurückgehen, ist problematisch. Sie sind nicht tri- oder hexagonal geformt, im Gegensatz zu den Ätzgruben des Tiefquarzes, die in Abhängigkeit vom Kristallgitter tri- oder hexagonal ausgebildet sind (Meyer, O. u. Penfield, S. L. 1889, Kleber W. 1936, Kleber W. und Himmel, H. 1958, Heimann, R. 1963). Im vorliegenden Falle handelt es sich auf Grund der röntgenographischen Untersuchung um einen Tiefquarz. Die Ausbildung von charakteristischen Ätzgruben bei chemischer Einwirkung auf die Quarzkornoberfläche bietet eine Möglichkeit, die chemische Einwirkung von der mechanischen zu unterscheiden. Bei weniger deutlich ausgeprägten Erscheinungen kann der Nachweis aber nur noch elektronenmikroskopisch (Küenen und Perdock 1962) geführt werden.

Im oben beschriebenen Fall ist die Verwechslung mit einer durch den Wind mattierten Kornoberfläche ausgeschlossen, weil die mechanisch erzeugten Vertiefungen entweder trichterförmige Schlagstellen oder muschelschalenförmigen Bruch (Cailleux 1948) ergeben, im Gegensatz zu den Gebilden, die mit steilen Wänden miniaturklammähnlich in die Oberfläche eingesenkt sind und ihre Entstehung Lösungsprozessen verdanken. Eine weitere Möglichkeit der Unterscheidung mechanischer von chemischer Oberflächenbearbeitung ergibt sich aus der Tatsache, daß bei Ätzungen charakteristisch ausgeprägte Ätzmuster entstehen (vgl. den von W. L. Bond 1938 veröffentlichten Katalog von 37 Ätzmustern).

Der Einfluß von Druck und Temperatur auf die Qarzkörner

Die Druckkräfte sind bei den hier betrachteten Fällen nicht so groß, daß sie plastische Verformung verursachen könnten.

Ob Eismassen Quarzkörner durch Zerbrechen aufarbeiten, ist nicht eindeutig geklärt.

In eiszeitlichen Akkumulationsgebieten, wie z. B. der Lüneburger Heide, ist es bisher unmöglich zu unterscheiden, ob ursprünglich runde Sandkörner durch das Eis zermahlen oder durch den Frost zerbrochen wurden oder ob von vornherein ungerundetes Material vorlag.

Ich konnte in keiner pleistozänen Ablagerung oder in den Trogtälern der Alpen Belege für ein Zermahlen von Sandkörnern durch das Gletschereis finden. Stets waren andere Deutungsmöglichkeiten nicht auszuschließen.

Im Gebiet der Großen Seen haben Schneider und Cailleux (1959) Sandstein kambrischen und ordovizischen Alters, der von Inlandeis bedeckt war, untersucht.

Die Autoren stellen fest: „Hier wie anderswo hat der Gletscher auf den Quarzkörnern keine Spur der Abnutzung hinterlassen".*)

Den Einfluß des Frostes auf Quarzkörner belegen die folgenden Beobachtungen (vgl. Walter 1951): Angefeuchtete Quarzkörner der mittleren Korngröße von 0,5 mm bis 0,125 mm wurden auf —27° C (Kältemischung von Eis und $CaCl_2 \cdot 6\,H_2O$) abgekühlt und auf +12° C erwärmt. Nach 30 maligem Temperaturwechsel wiesen 6 von 10 eingebrachten Körnern Absplisse auf. Im Rückstand fanden sich Splitter von ca. 0,05 mm Durchmesser.

Walter (1951) unterwarf angefeuchteten Sand Temperaturen von —7° C bis —5° und taute ihn anschließend bei +20° C wieder auf. Nach 12 stündiger Frosteinwirkung zeigten sich bevorzugt an hellbraun bis dunkelbraunen Sandkörnern feine Sprünge und rotbraune Ausschwitzungserscheinungen. Der experimentelle Nachweis einer Frosteinwirkung auf Quarzkörner von ca. 0,5 mm Durchmesser ist also erbracht.

Es wird weiter erwähnt, daß diese Phänomene an Quarzkörnern aus Windmulden der Dünen und Flugsandfeldern bei Frankfurt/Main beobachtet wurden.

Walter fand am Grunde der Windmulden mehr Feinmaterial als an ihrem Rande und folgert daraus eine Frostzersplitterung der Quarzkörner in situ.

Hier stellt sich allerdings die Frage, ob nicht auf die Muldensohle transportiertes Feinmaterial an diesem Ort eine gesteigerte Frostzersplitterung vortäuscht. Es wird nämlich ausdrücklich die Schneebedeckung im Muldenboden erwähnt, aber gerade diese verhindert

*) Im Gegensatz hierzu vertritt Krinsley und Takahashiv (1962) — durch Experimente belegt — die Auffassung, daß im Elektronenmikroskop eine „glacial surfaces" erkennbar ist.

das Auftreten stärkerer Temperaturdifferenzen. Am Rande der Mulde müßte die größte Temperaturdifferenz auftreten. Die Ansammlung von Feinmaterial auf der Muldensohle wäre demnach ein indirekter Beweis für die Frostzersplitterung der Quarzkörner.

Korngrößenanalysen Dückers (1937) zeigten in Frostmusterböden ein „in der Kornverteilungskurve auftretendes Maximum innerhalb der Größen 0,1 bis 0,02 bzw. 0,01". Ich möchte diese Fraktion als untere Korngröße, die durch Frostsprengung, wie auch Dücker annimmt, geschaffen wurde, interpretieren. Dabei spielt vielleicht nicht allein Frostsprengung durch das Wasser — das Wasser verliert auf Grund der Gefrierpunktserniedrigung in den Kapillaren die Fähigkeit auszukristallisieren (Beskow 1930) — eine Rolle, sondern Temperaturgegensätze werden im Kristall durch seine geringe Größe ausgeglichen, so daß es nicht zu thermisch bedingter unterschiedlicher Ausdehnung, die das Zerbrechen einleitet, kommt.*)

Durch das auskristallisierende Wasser werden gröbere Sedimentbestandteile gegeneinander bewegt, das Feinmaterial zwischen diesem unterliegt also mechanischer Druckwirkung, es bleibt zu prüfen, in welchem Maße derartig bearbeitete Quarzkörner am Aufbau z. B. von Solifluktionsschuttdecken und Frostmusterböden beteiligt sind und ob vormals gerundete Körner zum Typ der non-usés umgewandelt werden.

Experimentelle Untersuchungen, etwa in einer Klimakammer, könnten sicherlich zur Klärung dieser Fragen wesentliches beitragen.

Die Untersuchungen Walters (1951) hinsichtlich des Verhaltens der Quarzkörner bei höheren Temperaturen (+ 80° C) konnten bestätigt werden. Mehrmaliges Erhitzen von runden glänzenden Quarzkörnern führte zu Mattierung, abnehmender Transparenz und Heraussprengung einzelner kleinerer Quarzteilchen, hauptsächlich an vorgebildeten Sprüngen und in der Umgebung von Einschlüssen. Der Mattierungseffekt wird hierbei nicht durch die Aufrauhung der Kornoberfläche erreicht, sondern durch eine Trübung des gesamten Kristalls. Dies äußert sich in der abnehmenden Transparenz. Die Fe-Mn-hydroxyd Ein- und Auflagerungen — bei Einlagerungen kommt es zu Myrmekelit ähnlichen Kristallbildungen — hatten nach dem Erhitzen eine hellere Färbung angenommen, die wahrscheinlich durch Abgabe von Kristallwasser zu erklären ist (Farbwechsel von 5YR; 2/2 dark reddish brown nach 10R; 4/6 red der Munsel soil red color skala).

Relativ starke Temperaturwechsel, Erhitzen auf +75° C und Abkühlen durch Wasserzugabe von +20° C, erzeugten eine Mattierung der Quarzkörner. Walter führt aus, daß dieses Ergebnis die Methode Cailleuxs und ihre Auswertung durch Poser (1948) hinsichtlich der Windformung von Quarzkörnern in Frage stellt.

Hohe Bodentemperaturen von 68° C konnte ich selbst messen**) (siehe auch Meckelein 1955, Monod 1958, Bagnold 1938 und weitere zahlreiche Angaben der französischen Sahara-Literatur), aber sehr viel seltener ist eine Benetzung mit Wasser, die eine plötzliche Abkühlung verursacht.

Wenn es wirklich einmal regnete, so war schon Stunden vorher eine deutliche Abnahme der Lufttemperatur zu registrieren.

Es bedarf also selbst unter ariden Klimabedingungen außergewöhnlicher Temperaturverhältnisse, um sie mit den experimentellen Bedingungen Walters vergleichen zu können. Das gilt natürlich erst recht für die humide Klimaregion.

Einen weiteren Einwand liefert das Experiment zur äolische Formung (siehe S. 10), das eindeutig nachweist, daß eine mechanische Mattierung zu einer Oberflächenskulptierung führt, wie sie Quarzkörner aus Barchanen und Dünen aufweisen.

Walter meint, daß der Wind nur unregelmäßig über die Kornoberfläche verlaufende Kratzer erzeugt, die Beobachtung aber lehrt, daß während des Windtransports beim Aufprallen der Quarzkörner zahlreiche Perkussionstrichter entstehen, die die Mattierung der Oberfläche verursachen.

Zu Beginn der äolischen Bearbeitung treten auch Kratzern ähnelnde Spuren auf, die sich meist als Sprünge im Kristall fortsetzen und die bei stärkerer Schlagwirkung sicherlich den charakteristischen muschelschalenförmigen Bruch ergeben hätten. Jedoch wird erst die Aufrauhung der Oberfläche durch dicht nebeneinanderliegende Perkussionstrichter als windbearbeitete Oberfläche gewertet (vgl. Abb. 9).

3. Experimentelle Überprüfung der Grundlagen der morphoskopischen Sandanalyse

Wie die Beispiele zeigen, ist eine Beeinflussung der Quarzkornoberfläche am ruhenden Korn nicht auszuschließen.

Die Oberflächenskulptierung der Quarzkörner wird daher von einigen Forschern (Küenen, Perdock) vorwiegend durch chemische Korrasion erklärt, andere (Walter) betonen physikalische Vorgänge.

Auf Grund eines sehr umfangreichen Probenmaterials sind nach Cailleux und Tricart Mattierungen und Polierung das Ergebnis mechanischer Einwirkungen.

Für die Auswertung von im Gelände gesammelten Proben ist die Frage, ob die Oberflächentracht des Quarzkornes entsprechend dieser oder jener der drei skizzierten Auffassungen entstanden ist, von großer Bedeutung.

Deshalb schien es geraten, unter genauer überschaubaren Bedingungen die Faktoren für eine Kornbearbeitung zu studieren.

Das zweckmäßigste hierzu ist das Laboratoriumsexperiment, ein Weg, der auch von Küenen und Perdock (1953) zum Beweis der Prädominanz chemischer Korra-

*) Einen interessanten Hinweis auf eine untere Temperaturresistenz in Abhängigkeit von der Korngröße ergibt sich aus der Tatsache, daß bei Alkali-Fluoridschmelzen die Kornfraktion von 0,01 mm ⌀ thermisch unbeansprucht bleibt. (Dankenswerte mündliche Mitteilung Herrn R. Heimanns, Dipl.-Mineraloge, Mineral. Inst. der Freien Universität Berlin.)

Nach Poltev (1966) liegt in der 0,25 mm Fraktion eine bedeutende Grenze der Frostresistenz.

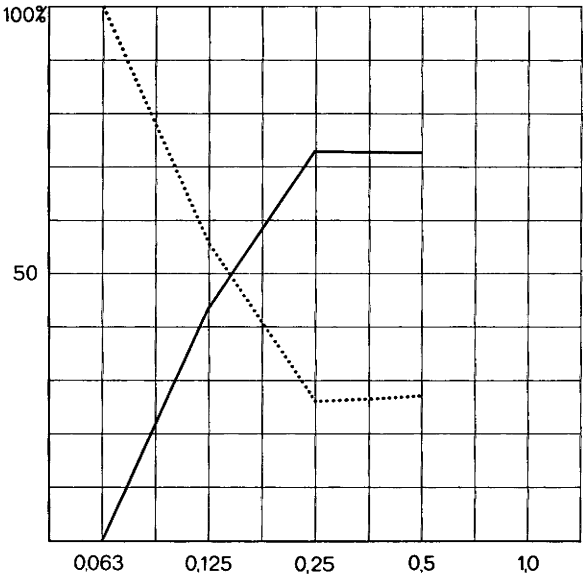
**) Winter 1964/65 an der Forschungsstation (Bardai, Tibesti) des Geomorphologischen Laboratoriums der Freien Universität Berlin.

sion über die mechanische und von Walter (1951) für die physikalische beschritten wurde.

a) „Marine" Bearbeitung

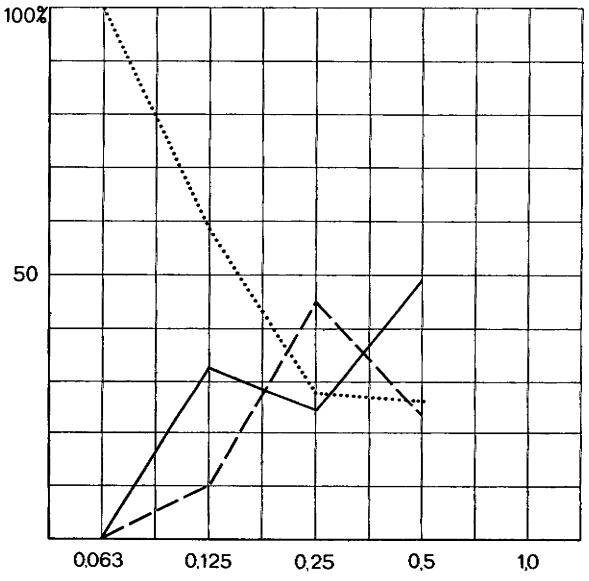
Um zu klaren und überschaubaren Versuchsbedingungen zu gelangen, war es notwendig, ein möglichst homogenes Ausgangsmaterial hinsichtlich der Form und Oberflächenbeschaffenheit zu verwenden.

Es kamen in Frage: in situ verwitterte kristalline Gesteine und Sandproben, die ein möglichst eindeutiges Morphogramm ergaben; Barchansande boten sich als extrem geformte äolische Ablagerung an.

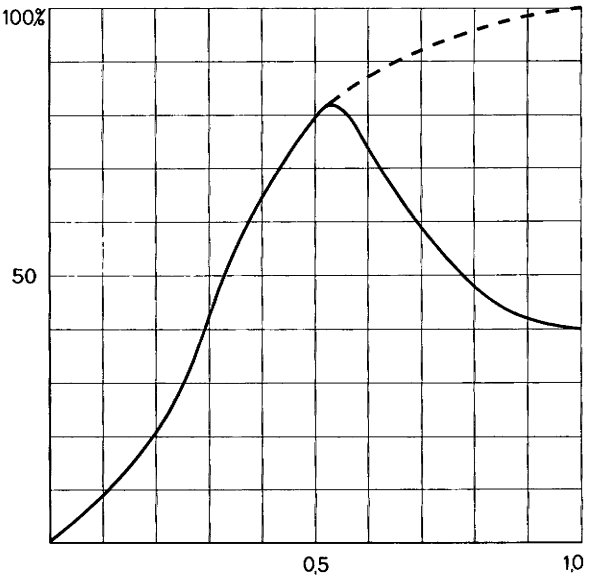


Morphogramm 1
(Erläuterungen im Text. Vgl. Tab. I, Seite 11. Legende s. Anhang.)

In einer Siebmaschine, die horizontale und vertikale Schwingungen ausführt, wurde ein Sieb mit einer Maschenweite von 0,052 mm DIN 4188 wasserdicht mit einer Auffangschale für Siebgut verbunden. Auf das Siebnetz wurde die Probe gegeben. Um eine möglichst



Morphogramm 2



Nach Cailleux (1961, Seite 66)

große Zahl von Sandkörnern aus allen Größenfraktionen zu erhalten, wurden 250 g Siebgut verwendet.

Die Probe wurde mit Wasser bedeckt. Der Bewegungsvorgang war durch ein Fenster gut sichtbar.

Die Schwingungszahl wurde derart eingestellt, daß sich das Siebgut ständig vermengte.

Eine intensive Berührung der Sandkörner untereinander war gegeben.

Durch die vertikalen Schwingungen wird eine alleinige Reibung der Körner an der Gaze vermieden.

Wichtig ist es, die intensive Bewegung der Körner gegeneinander — weitgehend getreu den natürlichen Verhältnissen in der Brandungszone und während des fluviatilen Transports — zu ermöglichen.

Stets waren die Körner also einer turbulenten Bewegung unterworfen. Die Einstellung eines Gleichgewichtes zwischen Strömung und Sediment, die eine Beendigung der Kornbewegung zur Folge gehabt hätte, wurde so vermieden.

Die Bearbeitung erfolgte über die Versuchszeit bei wechselnder Schwingungszahl und konstanter Temperatur.

Unter den oben geschilderten Versuchsbedingungen wurde ein in situ verwitterter Granitgrus (Entnahmeort Bayerischer Wald, Bundesstraße 85 nördlich km 28) der Bearbeitung unterworfen.

Während der ersten 200 Stunden wurden die locker ineinander verzahnten Mineralien Quarz, Feldspat, Biotit und Glimmer in einzelne Körner mit völlig unregelmäßigem Grundriß zerlegt. Bis zum Abbruch des Versuches nach 490 Stunden stieg der Anteil der Korngrößenfraktion 0,063 mm von 6,8 % auf 15,2 %.

Die mikroskopische Untersuchung der Körner aus den verschiedenen Fraktionen ergab auch an sehr scharfen Graten keine sichtbare Abrundung.

Ein zweiter Versuch mit Verwitterungsmaterial von der Hauptrumpffläche des Harzes (aus dem unmittelbaren Einzugsbereich der Radau) verlief hinsichtlich der Kornformung ebenfalls negativ.

Den gleichen Versuchsbedingungen wie der Granitgrus wurde Barchansand (Entnahmestelle ein Barchan 5 km südlich Largeau, Tschad) unterworfen (Morph. 1).

Nach 5 Stunden Bearbeitung waren Gesteinssplitter und Gesteinsmehl aus den Vertiefungen ausgewaschen; eine Oberflächenbearbeitung ist nicht sicher zu erkennen. Nach 550 Stunden, in Spuren nach 225 Stunden sichtbar, ist das Morphogramm der Probe völlig verändert (siehe Seite 9, dort auch Erläuterung, und Abb. 14—16).

Die Morphogramme 1 (vor der „marinen" Bearbeitung) und 2 (nach 550 stündiger Bearbeitung) geben den Bearbeitungsverlauf im Kurvenbild wieder (Seite 9).

Deutlich wird erkennbar, daß der Anteil der unbearbeiteten Körner (punktierter Kurvenzug) durch die Kornbearbeitung nicht tangiert wird. Es ändert sich nur das Verhältnis der runden-glänzenden (gerissener Kurvenzug) zu den runden-matten (durchgezogener Kurvenzug) Körnern.

Bis zu 250 Stunden Bearbeitung erfolgt also keine Kornformung. Lediglich die Kornoberfläche wird verändert. Sie spiegelt somit den Milieuwechsel wieder. Der Anteil der runden-glänzenden Körner weist ein deutliches Maximum in der 0,25 mm Fraktion auf. Diese Erscheinung ist wichtig für die Interpretation der Morphogramme. Der experimentelle Befund steht nämlich im Widerspruch zur Cailleuxschen Auffassung, nach der bei konstanten Bedingungen im Sinne des gestrichelten Kurvenanteils in nebenstehender Abbildung eine asymptotische Näherung an 100 % verlangt wird.

Cailleux (1961, Seite 65) erklärt den aufsteigenden Ast zum Maximum als der fossilen Formung zugehörig, den abfallenden durch Hinzukommen von Fremdmaterial (Seite 9).

Das Experiment zeigt aber, daß trotz konstanter Bedingungen und homogenen Ausgangsmaterials, in Abhängigkeit von der Korngröße, deutliche Bearbeitungsunterschiede entstehen.

Die Fortführung des Experiments auf 1300^h und schließlich 1817^h zeigt ein grundsätzlich unverändertes Bild hinsichtlich der Kornformung (Tabelle I, Seite 11).

Während innerhalb der gerundeten Körner ein Wechsel von runden-matten zu runden-glänzenden erfolgt, bleibt der Anteil der non-usés konstant.

Ein Hinweis auf die Formungsruhe, soweit man von der Möglichkeit eines Lösungsvorganges absieht, ist das Fehlen von Quarzsplittern im Rückstand des Siebgutes; die Gewichtsverhältnisse bleiben konstant.

Die Entstehung eines deutlich ausgeprägten Maximums ist abhängig von der Menge der ursprünglich im Sediment vorhandenen gerundeten Körner.

Wenn der Anteil der runden-matten Körner verbraucht ist, endet die Zunahme der runden-glänzenden; aus dem Reservoir der ungeformten Körner können keine hinzukommen, weil offenbar die Änderung der Korngestalt einen sehr viel größeren Zeitraum beansprucht.

Eine Bearbeitung auch der non-usés (ungeformten) ist an dem zunehmenden Glanz der Körner erkennbar, deren mattierte Flächen in glänzende überführt werden.

Das Experiment kann die Frage nach den Gesetzmäßigkeiten der Änderung der Korngestalt*) nicht beantworten. Es zeigt aber, und dies war die Aufgabe des Ansatzes, daß die Kornformung — Änderung der geometrischen Gestalt des Kornes — und die Kornbearbeitung — Skulptierung der Kornoberfläche — nicht in gleicher Zeitdimension ablaufen.

b) Äolische Bearbeitung

Zwei Prüfsiebe (20 cm ⌀) mit den Maschenweiten 0,05 mm wurden übereinandergesetzt und mit einer Gummimanschette fest verbunden.

Die Probe befand sich zwischen den schräg aufgestellten Sieben; ein Gebläsestrahl wurde so auf den Fußpunkt des Sandhäufchens gerichtet, daß die Sandkörner nach beiden Seiten emporgeschleudert wurden. Rechts und links der Gebläsestrahlansatzstelle bildeten sich zwei Sandhänge aus. Über diese „Halde" rollten und sprangen die Körner zurück, bis sie wieder vom Luftstrahl erfaßt und erneut emporgeschleudert wurden.

Wichtig ist, daß die Bewegung der Körner über die Halde springend (Saltation) ist, d. h. eine intensive Berührung mit einem körnigen Untergrund; entsprechend der Bewegung des Flugsandes über die Oberfläche von Dünen und Barchanen.

Ein Fehler entsteht durch die Berührung der Körner mit der Siebgaze. Da diese aber elastisch ist und das Korn in einem elastischen Stoß zurückschleudert, kann er nicht bedeutend sein.

Die Stärke des Gebläsestrahls wurde so gewählt, daß lediglich die Energie für den Transport auf die oberen Hangbereiche geliefert wurde.

Der Bearbeitung wurden Granitgrus aus dem Bayerischen Wald (Bundesstraße 85 nördl. km 28) und Sandrablagerungen (unmittelbar vom Eisrand des Schwarzensteinkees, Zillertaler Alpen) unterworfen.

Im Gegensatz zur „marinen" Formung waren nach 48 stündiger Bearbeitung an vielen Körnern die Spuren äolischer Bearbeitung sichtbar; scharfkantige Grate waren wenig, aber erkennbar abgerundet. In den Eindellungen lag Gesteinsmehl. Sein Vorhandensein beweist die starke Beanspruchung der Kornoberfläche. Auf besonders exponierten Flächen wurden erste Schlagspuren in Form von halbmondförmigen Sprüngen sichtbar.

Die Korngrößenverteilung veränderte sich: Bei der Probe aus der Sandrablagerung stieg der Gewichtsanteil der 0,125 mm und 0,063 mm Fraktion von 1,2 % auf das Zwanzigfache, beim Granitgrus betrug der Zuwachs in diesen Fraktionen das Zehnfache und zwar bei beiden Fraktionen nach 150 Stunden äolischer Bearbeitung.

Der Anfall des Feinmaterials beim Granitgrus in den ersten Stunden des Experiments ist natürlich nicht in vollem Maße der Kornformung zuzuschreiben. Viele der non-usés Körner zerfallen erst in die verschiedenen Mineralbestandteile, deren Zusammenhang schon vorher gelockert war.

*) Zu diesem Problem gibt es zahlreiche Untersuchungen. Vergl. die ausführlichen Literaturangaben bei G. Müller (1963) und E. Köster (1964).

Berichtigung für Tabelle I, Seite 11

Bearbeitungsstadien in Stunden:		0h				250h				550h				950h				1300h				1817h			
Korntypenanteile in %:																									
Frakt. (mm)	Gew. %	RM	RG	Un	Gew. %	RM	RG	Un	Gew. %	RM	RG	Un	Gew. %	RM	RG	Un	Gew. %	RM	RG	Un	Gew. %	RM	RG	Un	glänzend Un in % von Un
Arithm. M.		73,03		26,96		61,64 ±1,44	11,60 ±2,59	26,60 ±1,73		49,40 ±0,61	24,30 ±0,26	25,96 ±0,35		27,70 ±0,90	46,50 ±1,05	25,80 ±1,10		10,80 ±1,26	63,00 ±1,49	26,20 ±1,05		8,68 ±1,21	65,50 ±1,34	25,73 ±0,01	16,14 ±0,83
0,5 Durchschnittlicher Fehler	4,97				konst.	1,43	2,30	1,51	konst.	1,60	1,80	0,86	konst.	0,80	0,95	1,00	konst.	1,10	1,32	0,94	konst.	1,08	1,02	0,30	0,74
Mittlere Abw.						3,22	5,18	3,97		2,77	1,24	1,57		1,88	2,13	2,16		2,46	2,97	2,12		2,43	2,68	0,07	1,65
Mittlerer Fehler des Mittels						3,60	5,80	3,65		3,39	1,41	1,92		2,07	2,38	2,39		2,75	3,32	2,36		2,71	3,00	0,08	1,87
		73,30		26,36		48,35 ±1,81	24,21 ±1,37	27,40 ±0,99		25,30 ± 0,90	45,70 ±0,40	28,66 ±0,89		14,58 ±1,27	56,23 ±1,26	29,13 ±0,02		12,00 ±1,34	59,10 ±1,27	28,88 ±0,02		7,32 ±1,91	65,12 ±1,00	26,96 ±0,10	11,33 ±1,23
0,25	76,30				konst.	1,60	12,22	0,89	konst.	2,33	1,03	1,33	konst.	1,17	1,14	0,18	konst.	1,23	1,10	0,20	konst.	1,78	0,90	0,35	1,10
						3,62	2,75	1,99		4,00	1,84	4,30		2,59	2,55	0,04		2,75	2,55	0,46		3,81	2,00	0,79	2,47
						4,05	3,07	2,23		4,95	2,23	4,86		2,90	2,85	0,05		3,08	2,85	0,51		4,24	2,24	0,80	2,76
		44,46		55,43		40,92 ±2,22	2,90 ±1,18	56,17 ±0,79		33,09 ±0,77	8,06 ±0,40	58,83 ±0,44		27,16 ±1,74	16,02 ±1,12	56,77 ±0,20		16,82 ±1,55	26,23 ±1,34	56,55 ±0,09		12,26 ± 1,37	30,01 ±1,46	57,19 ±0,06	
0,125	17,50				konst.	1,90	1,68	0,71	konst.	1,79	1,06	1,06	konst.	1,60	1,00	0,60	konst.	1,60	1,00	0,60	konst.	1,20	1,44	0,51	
						4,45	2,39	1,59		3,46	1,84	1,84		3,57	2,24	1,34		3,15	2,69	1,74		2,70	3,22	1,14	
						4,97	2,66	1,77		4,14	2,23	2,43		4,00	2,50	1,50		3,53	3,00	1,95		3,02	3,61	1,26	

RM = rund mattiert
RG = abgerundet glänzend
Un = ungeformt (non-uses)

Tabelle I

Die im vorliegenden Experiment ermittelte Zunahme der Fraktion 0,063 beweist noch nicht zunehmende Kornrundung, denn die Erfassung der Abtragungsprodukte beinhaltet nicht Kenntnis der Formengenese.

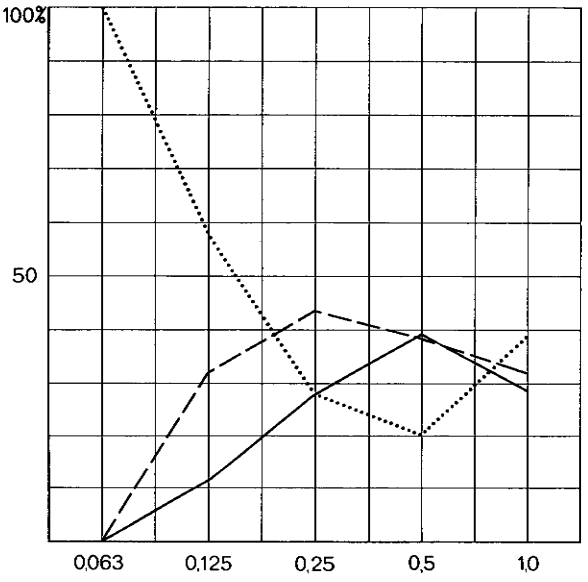
Um die Umwandlung mariner in äolisch bearbeitete Körner zu studieren, wurde eine Probe mit besonders gut polierten und glänzenden Körnern dem Experiment unterworfen.

Es handelt sich um eine glazifluviatile Ablagerung aus dem eiszeitlichen Akkumulationsgebiet der Lüneburger Heide (Naturschutzgebiet Saugrund, Topograph. Karte 1:25000, 3128 Suderburg) mit rezenter fluviatiler Bearbeitung (aus der Gerinnebahn) (vgl. Abb. 18—21).

Diese Probe wurde trotz des relativ hohen Anteils an mattierten Quarzkörnern gewählt, weil die Oberflächenpolitur (Abb. 3 und 4) außerordentlich gut ist, so daß auch die beginnende Mattierung leicht festgestellt werden kann.

Im Folgenden werden die Analysenergebnisse in Morphogrammen (Poser und Hövermann 1952) dargestellt. Auf der Ordinate sind in % der Korntypenanteil und gegebenenfalls als senkrechte Linien die Korngrößenanteile dargestellt. Auf der Abszisse sind die Fraktionen aufgetragen (vgl. Legende im Anhang).

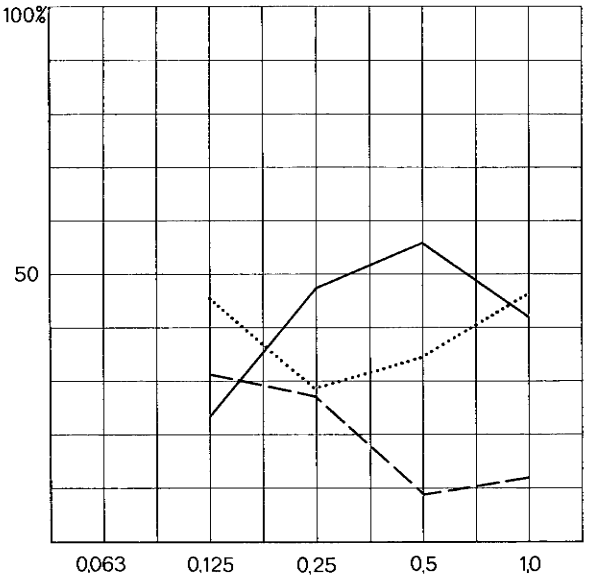
Die punktierte Kurve gibt den Prozentsatz der ungerundeten (non-usés), die gerissene den der abgerundet glänzenden (émoussés-luisants, fluviatile Bearbeitung) und die durchgezogene den der rund mattierten (ronds-mats, äolische Bearbeitung) Körner an. Das Morphogramm (a) gibt, gemittelt aus sechs Analysen, den Bearbeitungszustand bei Beginn des Experiments wieder.



a

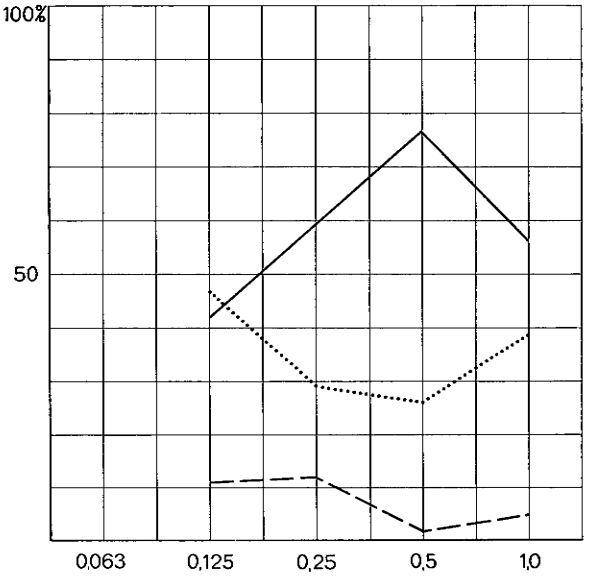
In jedem weiteren Bearbeitungsstadium sind in jeder Fraktion sechs Zählungen mit jeweils nicht weniger als 200 Körner durchgeführt worden. Das ergibt für jedes Formungsstadium ca. 4000 Sandkörner.

Die Korngrößenfraktionen unter 0,125 mm sind nicht mehr auswertbar, weil der Prozentsatz der unbearbeiteten Körner stets bei 98% liegt, was für jedes Milieu gilt.



b

Das Morphogramm b gibt den Bearbeitungszustand nach 34 Stunden äolischer Einwirkung wieder. Nach 79 Stunden (c) ist der Charakter einer fluviatilen Ablagerung fast völlig verwischt. Die mattierten Quarzkörner beherrschen das Bild.



c

Die Tabelle II (Seite 14) gibt folgenden Einblick in den Ablauf der Bearbeitung:

Von 0 (vor der Bearbeitung) bis I (erstes Bearbeitungsstadium nach 34 Stunden) liegt die Zunahme der äolisch bearbeiteten Körner in der 1,0 Fraktion bei 13%, von I nach II (zweites Bearbeitungsstadium nach 79 Stunden) in der gleichen Größenordnung mit 14%.

Dasselbe gilt für die 0,5 Fraktion, die mit einem leichten Anstieg von I nach II (0 nach I 20,38 %, von I nach II 13,66 %) reagiert.

Die 0,25 Fraktion spricht mit 19,80 % von 0 nach I rasch auf die äolische Bearbeitung an und ergibt mit 11,80 % in der zweiten Phase den geringsten Bearbeitungsbetrag.

Die 0,125 Fraktion reagiert am trägsten mit 13,00 % von 0 nach I und mit 18,00 % von I nach II.

Dies gibt auch die Errechnung des Verhältnisses der runden-matten zu den unbearbeiteten Körnern von der Bearbeitungsstufe 0 nach I und I nach II wieder:

1,0	Fraktion	3 :1
0,5	Fraktion	1,2:1
0,25	Fraktion	7 :1
0,125	Fraktion	1 :1

Der Prozentsatz der unbearbeiteten Körner (1,0 Fraktion) steigt in der ersten Phase an, um dann fast auf den Ausgangswert zurückzusinken. Wahrscheinlich fallen beim Auszählen jene Körner unter die unbearbeiteten, die schon vorher etwa zu einem Drittel unbearbeitet waren und durch die äolische Bearbeitung vollends zu non-usés werden. Der Unterschied ist jedoch gering. Er liegt nicht weit von der Fehlergrenze entfernt.

Es zeigt sich weiterhin, daß die Fraktionen 1,0, 0,5 und 0,25 zugunsten der 0,125 Fraktion und kleinerer gewichtsanteilmäßig abnehmen. Synchron damit läuft der Anstieg zu höheren Prozentsätzen bei den unbearbeiteten Körnern.

Trotz des Zuschusses von unbearbeiteten Körnern in den kleinen Fraktionen wächst in allen Größenbereichen der Anteil der mattierten Körner. Dieser Vorgang kann als Hinweis auf die unabhängig von der Korngrößenverteilung der Probe verlaufende Bearbeitung gelten.

Die „äolische" Bearbeitung bietet also ein etwas komplizierteres Bild als die „marine", weil die Formung der unbearbeiteten Körner früher einsetzt, was die Schwankungen der Korngrößenanteile beweisen (Tabelle II).

Deutlich aber wird erkennbar, daß die Umwandlung der glänzenden Körner zu mattierten bedeutend schneller erfolgt als die Formung der unbearbeiteten.

Spuren der „äolischen" Bearbeitung lassen sich auf letzteren durch die Mattierung der vorher glänzenden Flächenteile ablesen.

Die Befunde stehen im Widerspruch zu den von Küenen am Institut für Experimentalgeologie der Universität Groningen gewonnenen Untersuchungsergebnissen (vgl. auch Krinsley und Takahashi 1962).

Dort wurde in einem Windkanal mit Gummiwänden und Betonboden (Küenen 1961) Sand über eine Strecke von mehreren 100 km transportiert. Trotzdem konnte keine Mattierung der Quarzkörner registriert werden. Hieraus wurde gefolgert, daß die Cailleuxsche Methode der Diagnostizierung von äolischen Sedimenten mit Hilfe der Oberflächenmattierung nicht zu halten sei. (Nach einer Gastvorlesung am Geologischen Institut der Freien Universität Berlin über „Experimentalgeologie" im Wintersemester 1963/64, sowie Küenen und Perdok 1961.)

Möglicherweise kam es zu diesem Befund, weil die Versuchsanordnung nicht den Gegebenheiten der natürlichen Sandbewegung angepaßt wurde, bei der die Sandkörner über eine körnige materialhomogene Oberfläche springen und rutschen. Vielleicht führen auch die Härteunterschiede Quarz : Beton, Quarz : Gummi zu einem Polierungseffekt.

Zweifellos kommt den Experimenten, die ein positives Ergebnis zeigen, ein höherer Beweiswert zu, der aussagt, daß Mattierung der Quarzkornoberfläche durch mechanische Einwirkung möglich ist (Abb. 18—21).

Wie auf Seite 7 ausgeführt, ist es notwendig, auch „chemical frosting" in Betracht zu ziehen. Es ist jedoch nur eine Möglichkeit, die zudem solche Annahmen notwendig macht, wie besondere Temperaturverhältnisse, hohe Agentienkonzentration und Verharren des Quarzkornes über längere Zeit am Ort unter diesen speziellen Verhältnissen.

In den Mittelpunkt seiner Replik auf die Walterschen Untersuchungen stellt Cailleux (1952) den Aspekt der Kornrundung, gemäß seiner Prämisse für die morphoskopischen Sandanalyse, daß die Kornform und die Kornoberfläche gemeinsam berücksichtigt werden müssen.

Wie jedoch die experimentelle äolische Bearbeitung und der Korntyp des ungerundet mattierten Kornes beweisen, ist die Kornoberflächenbearbeitung und die Kornformung nicht unmittelbar voneinander abhängig; die Argumentation Cailleuxs überzeugt daher nicht vollkommen.

Nur der Nachweis einer durch mechanische Einwirkung erzeugten Mattierung der Oberfläche eines wie auch immer geformten Quarzkornes entkräftet Walters (1951) Einwand, die Cailleuxsche Methode und ihre Auswertung durch Poser beruhe auf einem Fehlansatz.

Da die Oberfläche der Quarzkörner in verhältnismäßig kurzer Zeit verändert werden kann, ist der Einwand zu diskutieren, die Methode sei bei geomorphologischen Untersuchungen nicht anwendbar, weil schon kurzzeitige und damit nicht unbedingt typische Bearbeitungsbedingungen eine Oberflächenskulptierung hinterlassen.

Hierzu ist zu bemerken:

1. Beim Experiment erfolgt eine äußerst intensive, den gesamten Akkumulationskörper erfassende Einwirkung. Die Zeit, die im Experiment benötigt wird, ist nicht einfach auf die Natur übertragbar, es sei denn, es kann eine über die Zeiteinheit andauernde Bewegung des Quarzkornes angenommen werden.

Die über längere Zeit andauernde Bewegung des Kornes ist nur in sehr seltenen Fällen anzunehmen. Selbst in Barchanen, die sehr labile Akkumulationskörper darstellen, ist die Bewegung der Quarzkörner durch längere Ruhepausen unterbrochen, weil das Sandkorn, sobald es die Luvseite des Barchans passiert hat, im Lee zur Ablagerung gelangt und einsedimentiert wird. Für die relative Bewegungsruhe des Sandes selbst in Barchanen spricht Ausfällung von Oxydkrusten auf der Kornoberfläche (Capot-Rey und Gremion 1964). Ob dies auch für die Barchane im Wüstenbereich mit Windrelief (Hövermann 1961) gilt, ist zweifelhaft.

Bearbeitungsstadien:		vor der Bearbeitung (0)			nach 34 h (I)				nach 79 h (II)			
Korntypenanteile in %:												
Fraktion (mm)		Gew. %	RM	RG	Un	Gew. %	RM	RG	Un	Gew. %	RM	RG	Un
1,0	Arithm. M.	3,90	29,00±0,61	31,73±0,331	39,20±0,378	3,80	42,00±3,76	11,05	46,00±0,80	1,40	56,42±0,20	5,42±0,04	38,12±0,16
	Durchschnittlicher Fehler		2,04	3,32	1,26		1,17	0	2,50		5,10	0,34	5,75
	Mittlere Abw.		3,54	1,92	2,20		1,50	0	3,53		1,12	0,216	1,02
	Mittlerer Fehler des Mittels		4,33	2,35	2,68		2,35	0	5,00		1,25	0,25	1,03
0,5		16,1	39,26±2,13	38,54±0,95	20,11±1,99	10,75	59,64±0,56	14,54±0,729	25,75±0,368	10,50	73,30±2,50	1,95±0,62	25,60±2,19
			6,04	2,68	5,64		3,51	4,56	1,15		6,93	1,40	5,95
			13,56	5,98	12,60		2,48	3,27	1,62		13,8	2,81	11,90
			15,1	6,70	14,10		3,51	4,56	2,30		16,0	3,90	13,70
0,25		54,1	27,7 ±1,79	43,70±2,06	28,40±0,387	53,20	47,45±0,88	26,50±0,416	25,95±0,16	51,70	59,30±2,30	11,50±0,69	29,15±2,19
			4,81	5,05	1,05		2,55	2,60	0,50		5,52	1,40	5,85
			9,70	11,12	2,10		3,89	1,84	0,22		11,10	2,80	11,80
			11,20	12,80	2,42		5,50	2,60	1,00		12,70	3,81	13,70
0,125		26,0	10,83±0,465	31,90±0,633	57,30±2,19	31,40	24,20±0,71	31,00±0,256	44,80±3,10	31,80	42,20±1,54	11,14±0,87	46,50±0,667
			3,71	1,83	6,46		4,45	0,80	9,70		4,50	1,93	1,96
			2,08	3,23	11,20		3,16	0,57	13,70		4,20	3,96	3,41
			2,91	3,96	13,70		4,45	1,60	19,40		9,62	5,44	4,17
0,063 u. ∆		0,00				0,8				4,25			

Tabelle II

2. Die Mattierung oder Polierung der Kornoberfläche gestattet wegen ihrer empfindlichen Reaktion auf Milieuveränderungen geomorphologisch auswertbare Schlüsse, weil nicht ein einzelnes Korn, sondern ein statistisches Mittel aus mindestens 100 Körnern aus allen Größenfraktionen ausgewertet wird.

Die Wahl des Entnahmeortes der Probe erhält dadurch natürlich eine gesteigerte Bedeutung.

Bei der Probeentnahme aus einem Barchan genügt nicht allein die Probe vom Grat, weil dort Fraktionen kleiner als 0,25 mm überwiegen oder vom Fuß desselben, weil dort das Korngrößenmaximum in der 0,5 mm Fraktion liegt.

Kleinere Sandakkumulationen am Fuß von Inselbergen (z. B. Becken von Zouar, westliches Vorland des Tibesti, Toummo) ergeben ein verfälschtes Bild, wenn nicht auch eine Gesteinsprobe vom vergrusenden Fels untersucht wird, weil die an diesem Ort angesammelten äolischen Akkumulationen sich mit dem Abgrusungsdetritus des verwitternden Gesteins mischen.

Proben von Sandbänken und Strudeltöpfen in den klammartig eingetieften Wadis der fluviatil geprägten Höhenstufe des Tibesti unterscheiden sich im Anteil der glänzenden ungeformten Körner um 15%.

3. Wegen des langsameren Reagierens der 0,125 Fraktion (Tab. I und II, S. 11 und 14) ist aus dem Morphogramm einer einzelnen Probe eine Aussage hinsichtlich der Unterscheidung kurzzeitiger von längerandauernder Bearbeitung möglich.

Da es längere Zeit bedarf, ehe auch die kleineren Korngrößen innerhalb einer Probe bearbeitet worden sind, kann man folgern, daß die vorhergehende Einwirkung länger andauerte, wenn sie durch eine Oberflächenskulptierung in den kleineren Korngrößen ausgewiesen wird (so auch im Prinzip Cailleux 1961).

c) Fehlerbetrachtung

Die Tabellen I und II enthalten die Ergebnisse von Fehlerberechnungen.

Berechnet werden Beobachtungsfehler, die den Grad der Genauigkeit der Messung abschätzen.

Vorausgesetzt werden muß, daß die zu messende Größe konstant bleibt und sich die Ursachen der Fehler von einer Beobachtung zur anderen nicht ändern und mit der Beobachtung in keinem nachweisbaren Zusammenhang stehen.

Daß letzteres doch eintreten kann, liegt am Beobachter. Zählt er nämlich viele gleichartige Proben hintereinander aus, so besteht die Gefahr, daß er unwillkürlich die Anforderung an die Güte der Oberflächenbeschaffenheit des dominierenden Bearbeitungszustandes steigert und die anderen Korntypen überbewertet.

Dies kann nur dadurch ausgeschaltet werden, daß der Beobachter zwischendurch immer wieder Standardproben betrachtet, um zu einem einheitlichen Maß zu gelangen. Der durchschnittliche Fehler gibt Auskunft über die Zuverlässigkeit der verwendeten Meßmethode. Die Resultate werden miteinander verglichen und ihre Abweichungen von dem arithmetischen Mittel berechnet.

Die mittlere Abweichung ist ein Hilfsmittel zur Beurteilung der Verläßlichkeit einer einzelnen Beobachtung.

$$S = \pm \sqrt{\frac{\Sigma x^2}{n}}$$

Durch den mittleren Fehler (m), wird der Tatsache Rechnung getragen, daß bei unbekanntem Wert der zu messenden Größe eine Beobachtung noch keinen Fehler ergibt.

$$m = \pm \sqrt{\frac{\Sigma x^2}{n-1}}$$

Die obigen Fehlerberechnungen (vgl. Tabelle I und II) beziehen sich auf die Verläßlichkeit von Einzelbeobachtungen; wichtiger ist die Genauigkeit des aus Einzelbeobachtungen berechneten Mittelwertes (m_M).

Über die Betrachtung, wie sich die mittlere Abweichung der Summe von beobachteten Größen aus der mittleren Abweichung der Summanden zusammensetzt, kommt man zu dem Ergebnis, daß sich die mittlere Größe umgekehrt wie die Wurzel verhält und sich mit der Anzahl der Beobachtungen verkleinert (nach H. Sirk 1956).

$$m_M = \pm \sqrt{\frac{\Sigma x^2}{(n-1)\,n}}$$

Für den mittleren Fehler des Mittelwertes gelten die gleichen Überlegungen.

Der mittlere Fehler des Mittelwertes m_M schützt bei der Angabe des Mittels vor unkritischer Anwendung einer nur rechnerischen Genauigkeit, er wird hinter der Zahlenangabe durch ± angefügt.

Um ein von Zufälligkeiten freies Bild zu erhalten, sind nach meiner Erfahrung mindestens 200 Körner auszuzählen.

Werden dieselben Körner von zwei Personen untersucht, so liegen die Abweichungen der Ergebnisse nach einiger Übung um ±2% (ähnliche Ergebnisse bei Schneider und Cailleux 1959).

Dagegen ergab sich aus der Auszählung verschiedener Proben aus dem selben Sediment folgendes Bild:

Anzahl	ronds-mats	em.-luisants	non-usés
100	30,2	25,1	45,7
147	36,5	32,8	30,6
150	40,0	26,5	33,5
235	44,7	29,3	25,9
223	50,2	23,8	26,0
230	49,1	23,0	28,9
250	49,8	24,1	26,1
250	50,0	23,6	26,4
259	50,3	24,2	25,5

Ausgezählt wurde eine Probe aus einer glazifluviatilen Ablagerung aus der Lüneburger Heide.

(Herrn Prof. Dr. Hövermann und Herrn Dr. Hagedorn danke ich sehr für die Kontrollmessungen).

Erst bei über 100 Körnern gleichen sich die Werte an. Besonders wenn die Unterschiede in der Verteilung der Korntypen gering sind, ist eine große Kornzahl erforderlich. Aus der obigen Tabelle ist ablesbar, daß bei 100 Körnern eine 1,5:1:1 Verteilung ermittelt wird, erst die größere Zahl läßt eine 2:1:1 Relation erkennen.

Ein weiterer Fehler kann bei zu kleiner Kornzahl dadurch entstehen, daß beim Anordnen der Körner unter dem Binokular mehrere Körner des gleichen Bearbeitungszustandes hintereinander liegen. Zählt man dann nur 25 Körner, wie es Cailleux (1942) vorschlägt, wird das Ergebnis vom Zufall abhängig.

Eine weitere Fehlerquelle, die durch die Fehlerrechnung nicht erfaßt werden kann, stellen die Körner dar, auf deren Oberfläche sich ein Wechsel in der Bearbeitung auszuprägen beginnt.

Es wäre daher angebracht, auch den Bearbeitungsgrad, etwa die Anzahl der Perkussionstrichter pro Flächeneinheit, anzugeben. Dies stößt aber auf sehr große Beobachtungsschwierigkeiten. Ich habe daher nicht eindeutig definierbare Bearbeitungszustände den Analysen als Bemerkung beigefügt, sonst müssen 2/3 des sichtbaren Kornes die charakteristischen Bearbeitungsmerkmale aufweisen, um zu entsprechenden Typen gezählt werden zu können.

Die Problematik, die in der Beurteilung der Übergangstypen enthalten ist, wird etwas weniger bedeutungsvoll durch die Tatsache, daß die zeitlich verschiedenen Reaktionen der Korngrößen auf die Bearbeitung (vgl. Tabelle I und II) eine Aussage ermöglichen, die sonst allein aus den Übergangstypen abgeleitet werden müßte.

d) Folgerungen aus den Experimentaluntersuchungen

In der Cailleuxschen morphoskopischen Sandanalyse werden Kornform und Kornoberfläche gleichermaßen berücksichtigt, offenbar in der Annahme, daß Kornform und Kornoberfläche in gleicher Weise und mit gleicher Geschwindigkeit umgestaltet werden.

Die Änderung der Kornform*) erfordert jedoch sehr viel mehr Zeit als die Veränderung der Kornoberfläche; die Umwandlung einer mattierten in eine polierte und v. v. kann, ohne daß sich die Kornform wesentlich ändert, erfolgen.

Es ist daher zu unterscheiden, zwischen der Kornformung, die eine Veränderung der geometrischen Gestalt zur Folge hat und der Kornbearbeitung, die durch das Feinrelief der Kornoberfläche ausgedrückt wird.

Die von Cailleux und Tricart (1963, S. 73) nur als Übergangstypen Non-usés>Emoussé-mat>Rond-mat, Non-usé>Subanguleux-Luisant>Emoussé-Luisant und Emoussé-Luisant>Rond-mat behandelten Korntypen erhalten unter diesem Gesichtspunkt eine gesteigerte Bedeutung.

Die aus der Untersuchung der Kornform gezogenen Schlüsse hinsichtlich des Sedimentationsmilieus können mit denen, die auf Grund der Oberflächenstruktur gewonnen wurden, übereinstimmen; dies ist aber nicht notwendigerweise so, wie die Konstanz der Kornform bei wechselnder Oberflächenstruktur belegen (siehe Tabelle I und II).

Dieser Ansatz, durch Experimente bewiesen, rechtfertigt eine Betrachtungsweise, die die Korngestalt und die Oberflächenbearbeitung getrennt voneinander analysiert. Somit erweitert sich die Zahl der drei Grundtypen der morphoskopischen Sandanalyse um die des mattierten-ungerundeten (Alimen 1951) und des glänzenden-ungerundeten Korns.

Erstere sind häufig in den Proben des Serirsediments (Serir El Gattusa, Serir Tibesti) und übereinstimmend mit Alimen (1951) in Barchansanden vertreten.

Die glänzenden-ungerundeten Körner traten in Proben mariner Sedimente der Mittelmeerküste (Homs), der Nordseeküste (Sahlenburg, Küste bei Duhnen im Elbe-Weser Winkel) auf. Einschränkend muß darauf hingewiesen werden, daß die Unterscheidung dieser glänzenden-ungerundeten Körner von den in situ freigesetzten wegen der glänzenden Kristallbruchflächen problematisch ist.

In dieses System von Korntypen können auch die Körner eingefügt werden, deren Oberfläche nicht durch mechanische Einwirkungen, sondern durch chemische Agentien skulptiert worden ist.

In welcher Weise die Geomorphologie eine Hilfe bei der Lösung ihrer Probleme, etwa Datierungs- und Herkunftsfragen, aus dieser Erweiterung erwarten darf, muß untersucht werden. Die Erfassung von Sandwanderungen mit Hilfe des Ätzungsgrades von Granatakzessorien ist dazu ein erster Schritt (Ackermann 1955).

Die Beobachtung von marinen Sedimenten ließ sehr rasch deutlich werden, daß nicht nur Quarz, sondern auch die Kalkschalen der kleinen Meerestiere glänzend poliert werden, die gleiche Beobachtung wird von Cailleux für Feldspat, Phosphat, Basalt und Kalk mitgeteilt. Bei Kalkkörnern ist die Oberflächenbearbeitung und die Formung des Korns durch mechanische Einwirkung bedeutender als die durch chemische Lösungsvorgänge (nach experimentellen Untersuchungen von Crommelin, Alimen, Melle, Tee und Cailleux, angeführt bei Cailleux und Tricart 1963, Seite 103).

Ein Vergleich von marinen Sanden (Basalt) der Ostküste von Teneriffa (Bucht von Puerto de la Cruz) mit sehr gut gerundeten Basaltkörnern von der Serir Tibesti zeigen deutlich eine Mattierung der letzteren und glänzende Flächenteile bei ersteren.

Bei der experimentellen Bearbeitung der Barchansande wurden die Akzessorien an gerundeten Basaltkörnern und Eisen-Mangan-Hartkrustenteilchen schneller als Quarz glänzend poliert.

Für Feldspat gibt Küenen (Küenen und Perdock 1951) an, daß er nicht wesentlich schneller eine Kornformänderung bei experimenteller mariner Bearbeitung erfährt als Quarz.

Wie erwähnt, ist beim Quarz die Erfassung der Übergänge von glänzend nach mattiert und v. v. für einen geübten Beobachter relativ leicht. Bei anderen Mineralkörnern, z. B. Basalt, Eisen-Mangan-Krustenteilchen,

*) Curray und Griffiths (1955) verlangen zur Rundung eines Quarzkornes mehrere Zyklen, Sedimentation, Transport über große Wegstrecken, Sedimentation.

gestattet die von vornherein körnige Oberfläche keine sichere Aussage über eine Mattierung durch den Wind, die sich ja durch Schlagtrichter dokumentiert.

Auch die fluviatile Bearbeitung ist schwer zu diagnostizieren, weil sie sich nicht auf das Feinrelief, wie beim Quarz, stützen kann. Daher ist die Beurteilung nicht frei von subjektiver Entscheidung. Die Messung der Lichtreflektion bietet sich vielleicht als Ausweg an.

Die Oberflächenstruktur eines Körpers ist mitentscheidend für die Menge des von ihm reflektierten Lichtes. Eine mattierte Fläche hat einen anderen Reflektionswert als die gleichgroße polierte.

Hiervon ausgehend wurde unmittelbar über dem Okular, erschütterungsfrei und unter sorgfältiger Abdunkelung zur Vermeidung des Einfalls von Fremdlicht, das Meßauge eines Belichtungsmessers (Microsix-L), angebracht.

Auf dem Objekttisch wurde eine gründlich gesiebte Probe des Untersuchungsmaterials so angeordnet, daß das Licht der punktförmigen Lichtquelle unter einem Winkel von 45° auf die Probe fällt.

Mit dem Lichtstrahl wurde nun das Probenfeld abgefahren und die Meßwerte registriert.

Folgende Bedingungen müssen bei diesem Verfahren streng eingehalten werden:

Nur mit gleicher Vergrößerung und Schärfe darf das Bildfeld abgefahren werden; die Körner müssen möglichst dicht gepackt in einer Ebene liegen. Daher muß ihre Größe möglichst einheitlich sein. Der Mineralbestand soll homogen gewählt werden. Der Objekttisch besteht aus einer matt-geschwärzten Metallplatte, ihre Reflektion verursacht am Meßgerät keinen Zeigerausschlag.

Die Erprobung ergab folgende Resultate:

Beim Barchansand wird mit einer Meßreihe von 7,4; 7,5; 7,4; 7,3 ... Mittelwert 7,42 der Unterschied zum gleichen Sand nach 725 stündiger experimenteller mariner Bearbeitung mit einer Reihe von 8,7; 8,8; 8,6; 8,7 ... Mittelwert 8,70 sehr deutlich. Die Reflektionswerte sind verschoben in Richtung auf die maximale Reflektion bei Seesand (Homs) 8,8; 8,9; 8,7; 8,9 ... mit einem Mittelwert 8,91. Bei äolischer Bearbeitung dieses Sandes ergibt die Meßreihe 6,8; 6,9; 7,0; 6,7; 6,9 ... Mittelwert 6,95.

Bei Basaltsand war die Reflektionsmessung die einzige Möglichkeit, die marine Bearbeitung genauer zu fassen. Vor der Bearbeitung entstand die Meßwertreihe 4,6; 4,5; 4,7; 4,8 ... Mittelwert 4,61 und nach 347 stündiger Bearbeitung 5,1; 5,0; 4,9; 4,9; 5,1 ... Mittelwert 4,98.

Bei Verwendung empfindlicher Geräte könnte die Ablesegenauigkeit sicherlich gesteigert werden. Eine Einschränkung aber hat sich schon jetzt als notwendig erwiesen: Sobald in den Proben, besonders bei Quarzsanden, viele unbearbeitete Körner vorliegen, deren reflektierende Absplißflächen nicht wie beim Barchansand mattiert sind, kommt es zu sehr unterschiedlichen Reflektionswerten, die eine deutliche Abhängigkeit von der jeweiligen Exposition des einzelnen Korns und seiner am stärksten reflektierenden Absplißfläche zum einfallenden Licht beweist.

Dies gilt natürlich auch bei der Reflektionsmessung einzelner Körner, aber dann können die extremen Werte herausgemittelt werden und beweisen sich als zu den unbearbeiteten gehörend aus.

Bei Basaltsanden erwies sich die Methode der Reflektionsmessung der bisher geübten Verfahrensweise überlegen.

DIE ANWENDUNG DER MORPHOSKOPISCHEN SANDANALYSE

1. Äolische Sedimente

Die reinste Ausprägung äolischer Überarbeitung findet man bei den Barchan- und Flugsanden der Sahara. Das Morphogramm eines solchen Sediments wird geprägt durch den steilen Anstieg des Anteils der mattierten Körner auf über 70% in den gröberen Fraktionen und der gegenläufigen Kurve der ungeformten Anteile.

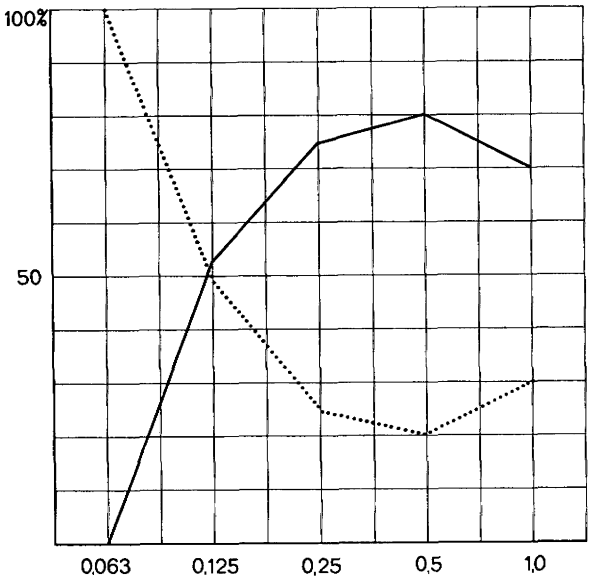
Der Schnittpunkt beider Kurven, das Gleichgewicht zwischen Bearbeitung und Verharrungsvermögen des Sediments anzeigend, liegt im Bereich der 0,125 Fraktion. Grundsätzlich gleichen Aufbau zeigen Barchane aus anderen Teilen der Sahara.

		RM	RG	Un	
a) Ouigh el Serir	1,0	98,00	—	2,00	
	0,5	95,00	—	5,00	(a)
	0,25	80,00	—	20,00	
	0,125	7,50	—	92,50	
b) Um el Araneb	1,0	78,50	—	21,50	
	0,5	85,00	—	15,00	(b)
	0,25	94,60	—	5,40	
	0,125	5,00	—	95,00	
c) Toummo Auffahrt	1,0	93,60	—	6,40	
	0,5	95,90	—	5,10	(c)
	0,25	95,00	—	5,00	
	0,125	4,30	—	5,70	

Beispiele für Flugsanddecken aus der Sahara:

a) Serir el Gattusa	1,0	85,00	—	15,00	
	0,5	90,50	—	9,50	(a)
	0,25	75,00	—	25,00	
	0,125	15,00	—	85,00	
b) Ouigh el Serir	2,0	100,00	—	—	
50 km südl.	1,0	100,00	—	—	
El Gatroun	0,5	100,00	—	—	(b)
	0,25	39,10	—	60,90	
	0,125	2,00	—	98,00	

		RM	RG	Un	
c) Serir Tibesti	1,0	98,00	—	2,00	
200 km südl.	0,5	78,00	—	22,00	(c)
Wau en Namus	0,25	79,00	—	21,00	
	0,125	1,50	—	98,50	
d) Toummo-Serir	0,5	87,50	—	12,50	(d)
DEA-Airstrip	1,0	90,00	—	10,00	
	0,25	94,50	—	5,5	
	0,125	3,50	—	96,50	
e) Paß Kurizou	1,0	93,00	—	7,00	
	0,5	90,50	—	9,50	(e)
	0,25	87,00	—	13,00	
	0,125	2,00	—	98,00	



Barchan, Erg von Murzuk

Generell ist zu beobachten, daß auch die ungeformten Quarzkörner mattiert sind.

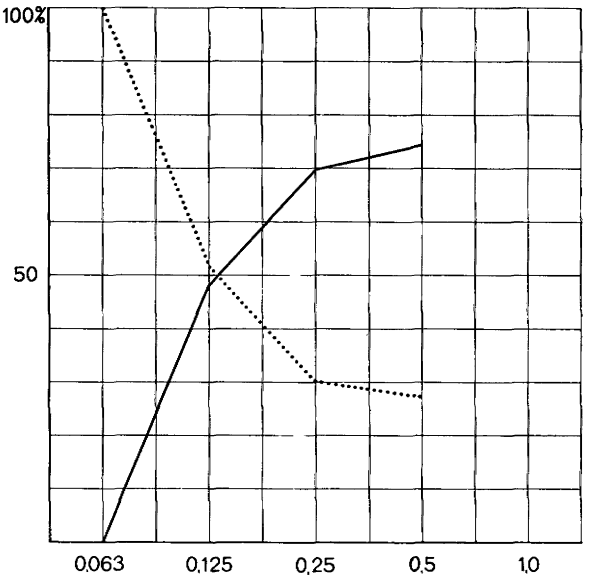
Der Typ des ungeformten-mattierten Quarzkornes ist zur Charakterisierung dieser Sedimente sehr wichtig. Wenn nicht anders vermerkt, ist in den Analysenergebnissen des vorliegenden Kapitels der Anteil der ungeformten (punktierte Kurve) als ungeformt-mattiert zu verstehen.

Alimen (1959) beobachtete in Barchansanden der westlichen Sahara den gleichen Korntyp.

Ich kann jedoch nicht der Auffassung Alimens zustimmen, daß auch in Korngrößen von 0,097 bis 0,085 mm ⌀ der Korntyp des ungeformten-mattierten vertreten sei.

Auf Grund meiner Beobachtungen an Barchan- und Flugsanddecken sowie nach den Ergebnissen experimentell erzeugter Mattierung, endet die äolische Oberflächenbearbeitung im Bereich der 0,125 mm Fraktion (so im Prinzip auch Cailleux 1961).

Wie die Untersuchungen an Sanden aus Granitgrus ergaben, liegt ein Unterschied zwischen der chemischen und äolischen Bearbeitung gerade darin, daß auch die unteren Korngrößen durch die Verwitterung mattiert sind, während die als Schweb transportierten Fraktionen nicht mechanisch bearbeitet werden.

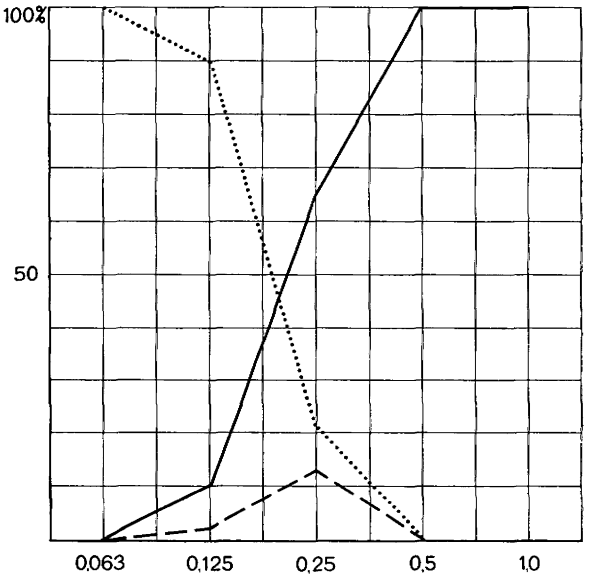


Barchan, nördl. Largeau (Tschad)

Am Aufbau der Barchane können auch fluviatil bearbeitete Körner beteiligt sein (vgl. die Barchane im Bardagué, Nordabdachung des Tibesti); bis zu 12% glänzende Körner enthalten die Sande der Barchane im Hongraben.

Die Barchane und die bis zu 90 m hohen Dünengebirge (Ghrourd) liegen in einem relativ häufig beregneten Gebiet, in welches zudem zahlreiche Wadis entwässern.

Die Feldbeobachtung ergab, daß der Sand dieser Akkumulationen auch bei geringen Windgeschwindigkeiten bewegt wird, Fußspuren sind schon nach wenigen Stunden verweht.



Dünengebirge (Ghrourd) im Hongrabfi. Entnahme in ca. 25 m Höhe, aus 15 cm Tiefe.

Diese Bewegung der Quarzkörner über einen körnigen Untergrund hat Mattierung zur Folge. Es ist daher anzunehmen, daß die glänzenden Quarzkörner nicht fossil sind, sondern aus den rezenten Alluvionen der Wadis stammen.

Die Kornverteilung mit einem Maximum von 59,0 % in der 0,25 Fraktion und nur 8,4 % in den Fraktionen kleiner als 0,125 weisen das Dünengebirge als Deflationsrückstand aus.

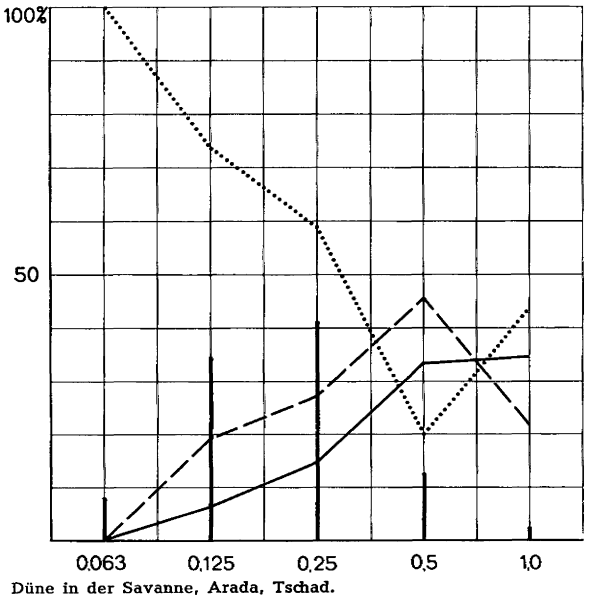
Der Vergleich von Barchan-Morphogrammen aus dem Wüstenbereich, in dem es keine Spuren eines fluviatilen Reliefs mehr gibt, in dem der Wind dominierender morphologischer Faktor ist und aerodynamisch geformte Gesteinsrücken modelliert (Hövermann 1962, Abb. 1), mit Dünen aus dem Sahelbereich ergibt einen deutlichen Unterschied.

Die Korngrößenverteilung lehrt: In den vom Passat ständig bewegten und getriebenen Barchanen liegt das Maximum der Korngrößenverteilungskurve mit über 75 % in der 0,25 Fraktion.

Die Probe aus der Savanne (Savane herbeuse) ergibt eine gleichmäßigere Kornverteilungskurve; das Maximum in der 0,25 Fraktion mit 40,20 % ist gegenüber der 0,125 Fraktion mit 35,00 % nicht ausgeprägt (s. unten).

Die äolischen Sedimente im Bereich dominierender Windformung unterscheiden sich in der Korngrößenverteilung wesentlich. Erstere haben den Charakter von Deflationsrückständen. In der Trockensavanne reicht die Kraft des Windes nicht aus, das Feinmaterial auszublasen.

Das ausgeprägte Maximum in der 0,25 Fraktion der Barchane gestattet die Errechnung der Windgeschwindigkeit, die nach der Sokolowschen Tabelle (1894) 4,5 bis 6,7 m/sec. beträgt.



Düne in der Savanne, Arada, Tschad.

Das Morphogramm der Düne im Sahel (Arada) zeigt, daß nicht nur die für die Barchane so typische Schere zwischen den Kurven der gerundet-mattierten und der ungeformt-mattierten Quarzkörner völlig verändert ist, sondern es tritt auch ein hoher Prozentsatz an fluviatil bearbeiteten Körnern (gerissene Kurve) hinzu.

Diese Düne liegt im Übergangsbereich von Trockensteppe und Savanne (Blatt Oum Chalouba, Maßstab 1 : 200 000, Institut Geographique National Paris, Annexe de Brazzaville, 1952).

Die im Nord-Westen und Süd-Osten liegenden Dünenfelder sind mit Steppenvegetation überzogen. Die Dünenfelder im Süd-Osten haben ein älteres Gewässernetz überwandert. Es handelt sich also um eine Kampfzone zwischen fluviatiler Erosion und äolischer Akkumulation. Diese Situation wird in der Probenanalyse deutlich wiedergegeben und soll wie folgt interpretiert werden.

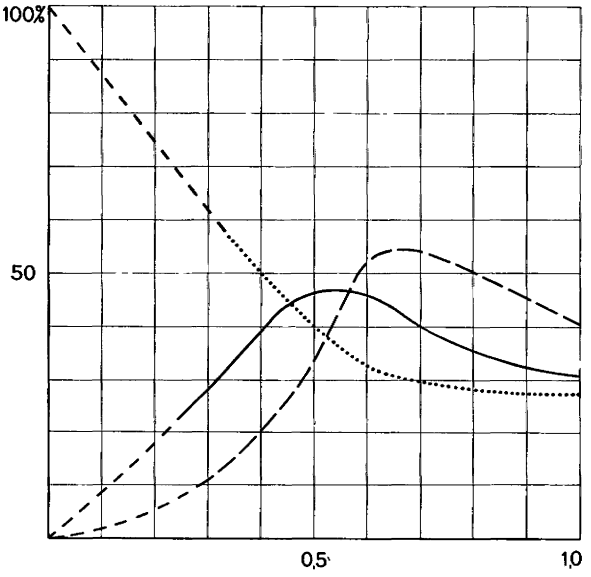
Fluviatil überarbeitete Sande wurden aus Flußbetten ausgeweht und zu Dünen aufgehäuft. Die fluviatile Phase kann aber nur kurzzeitig angedauert haben, weil das Maximum der fluviatilen Bearbeitung in der 0,5 und 0,25 mm Fraktion liegt. Wäre eine ausgeprägtere Feuchtphase mit länger fließenden Flüssen vorhergegangen, müßten auch die kleineren Korngrößen fluviatil bearbeitet worden sein.

Dieses Beispiel zeigt, daß bei der Charakterisierung eines Sediments die Korngrößenanalyse nicht ausreicht. Mit ihrer Hilfe könnte man die Düne erkennen — dies kann aber einfacher und mit gleicher Genauigkeit morphologisch geschehen —, aber nicht den direkten Nachweis einer der Dünenaufwehung vorhergehenden Feuchtphase führen.

Darüber hinaus deuten diese Vergleiche an, daß sich die äolischen Akkumulationen der Mittel- und Randwüste (Mortensen 1927) von denen der rein äolischgeprägten Wüstengebiete (Hövermann 1963 und Berliner Geographisches Colloquium Sommersemester 1965) unterscheiden. Sie sind nur morphographisch Kongruenzformen, von der Genesis ihres Materials her sind sie Konvergenzerscheinungen.

2. Kombinierte Wind- und Wasserwirkung

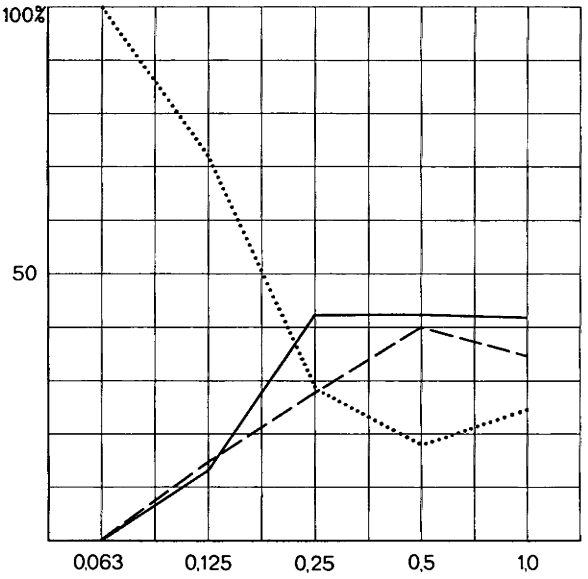
Der Vergleich der Morphogramme kombinierter Wind- und Wasserwirkung aus verschiedenen Klimazonen ergibt allein aus dem Kurvenverlauf der Korntypenanteile keine Unterscheidungsmöglichkeit.



Düne nach Cailleux und Schneider (1959) a

Cailleux und Schneider beschreiben z. B. einen Dünensand im Rahmen einer Arbeit über die „Sandkornformen der USA" (1959), durch das Morphogramm a, das als charakteristisch für gleichstarke Wind- und Wasserwirkung interpretiert wird (vgl. hierzu das Morphogramm Seite 19 für die Düne aus dem Sahel).

Das Morphogramm b, das die Korntypen einer Düne aus der Lüneburger Heide (östlich von Celle) wiedergibt, zeigt einen grundsätzlich gleichen Aufbau.



b

Das Morphogramm c schließlich entstammt einer periglazialen Flugsanddecke aus dem Berliner Urstromtal. Mit der Schere der runden-mattierten und unbearbeiteten Körner ergibt sich eine Parallele zum Barchan (vgl. Seite 9 und 18). Die ungeformten Quarzkörner sind aber im Gegensatz zum Barchan nicht mattiert.

Mit Hilfe des ungeformt-mattierten Korntyps und des von Cailleux eingeführten Typs des ronds-mats-sales (vgl. Seite 5) wird eine Unterscheidung der Sedimente aus unterschiedlichen Klimabereichen mit gleichem Kurvenverlauf der Korntypenanteile möglich.

Die Registrierung allein der Oxydauflagerung genügt nicht, um die humiden und ariden Sedimente von einander zu unterscheiden, weil Quarzkörner aus Bodenprofilen mit Ortssteinbildung Eisen-Mangan-Hydroxydkrusten tragen, die sich nur durch die dunklere Färbung von den Auflagerungen aus ariden Sedimenten unterscheiden. Nach der „Munsell Farbskala" unterscheiden sich die Eisen-Mangan-Hydroxydkrusten des feuchten Klimabereichs mit 5YR; 2/2 dark reddish brown von denen der ariden mit 5YR; 6/8 reddish yellow.

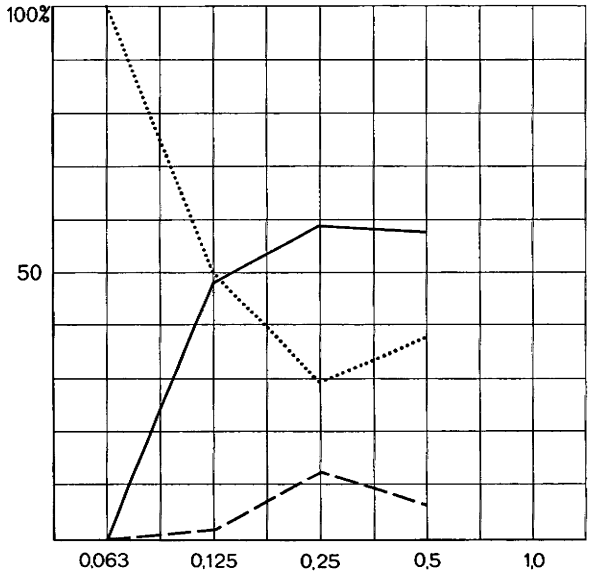
Die Bestimmung der Farbe der Oxydauflagerungen ist somit ein wichtiges Kriterium bei der Unterscheidung humid äolischer Sande von arid äolischen. Die Auflagerungen sind sehr beständig. Noch nach 100 stündiger experimenteller mariner Bearbeitung bleiben Reste von Oxyden in besonders geschützten Winkeln des Kornes erhalten.

Wie auch die Reihenuntersuchungen Cailleuxs (1959) ergeben haben, ist die Auszählung der mats-sales-Körner mit einem größeren Fehler behaftet als die der übrigen Korntypen. Daher ziehe ich es vor, diese Beobachtung dem Analysenergebnis nur in Form einer Bemerkung beizufügen.

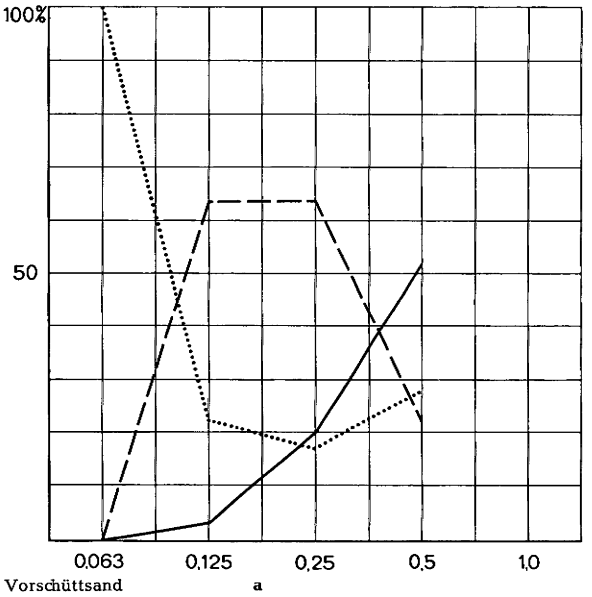
3. Marine und fluviatile Sedimente

Allein die Brandung vermag im marinen Bereich die Sande zu bearbeiten. Cailleux hat Proben vom Meeresgrund in 500 km Entfernung von der Küste untersuchen können. Die Quarzkörner wiesen keine Bearbeitungsspuren auf. Schneider und Cailleux (1959) konnten zeigen, daß nur sehr große Binnenlandseen, wie die Großen Seen in Nordamerika, eine der Meeresbrandung vergleichbare Bearbeitung vollbringen.

Cailleux (1961) ordnet typische Morphogramme bestimmten Küstenformen zu. Die Morphogramme a und b (Seite 21) zeigen, daß die Aussage noch weiter differenziert werden kann.



c



Vorschüttsand a

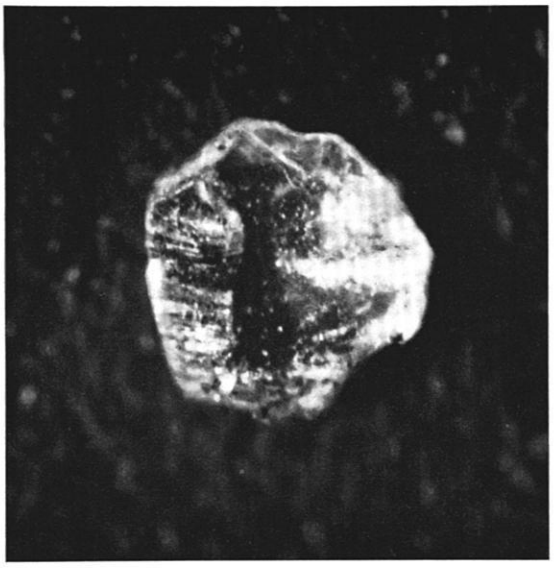


Abb. 1 0,25 Fraktion Vergr. 50 fach Typ des non-usés (Bardagué-Alluvionen, Tibesti)

Abb. 2 0,125 mm Fraktion Vergr. 112,5 fach Typ non-usés (Sandr d. Briikdalsbree)

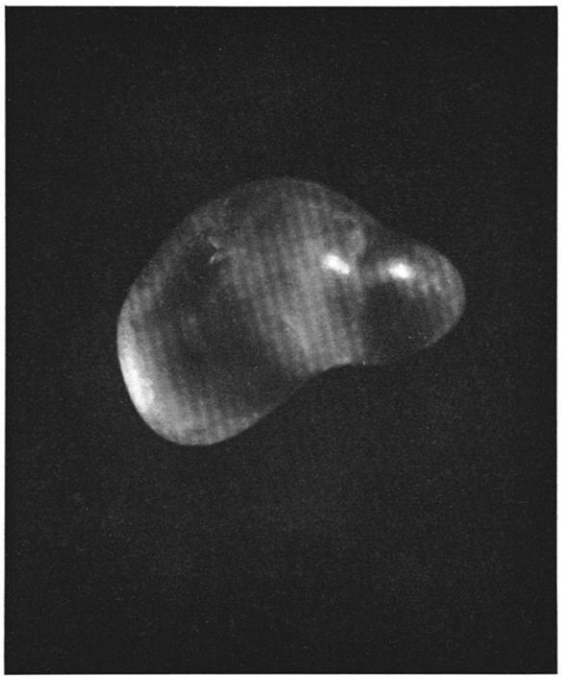


Abb. 3 0,25 Fraktion Vergr. 50 fach
Typ émoussés-luisant (Glazifluviatile Akkumulation mit rezenter fluviatiler Uberarbeitung, Uelzener Becken, Lüneburger Heide).

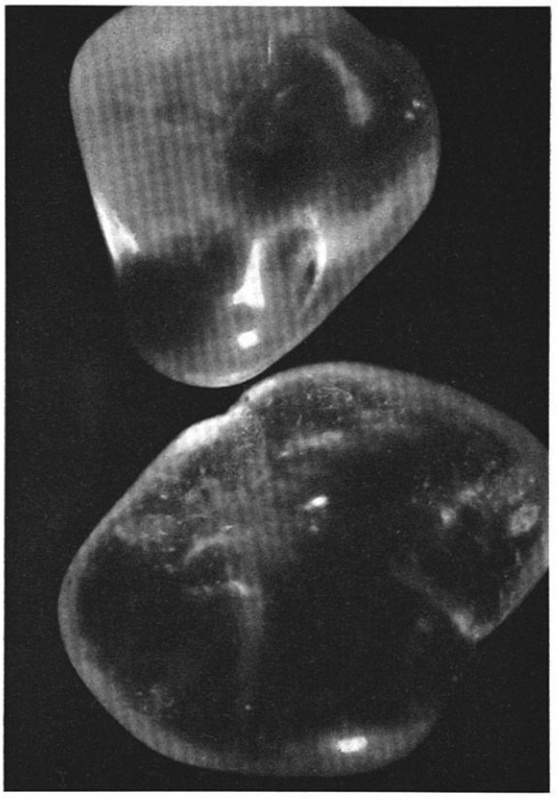
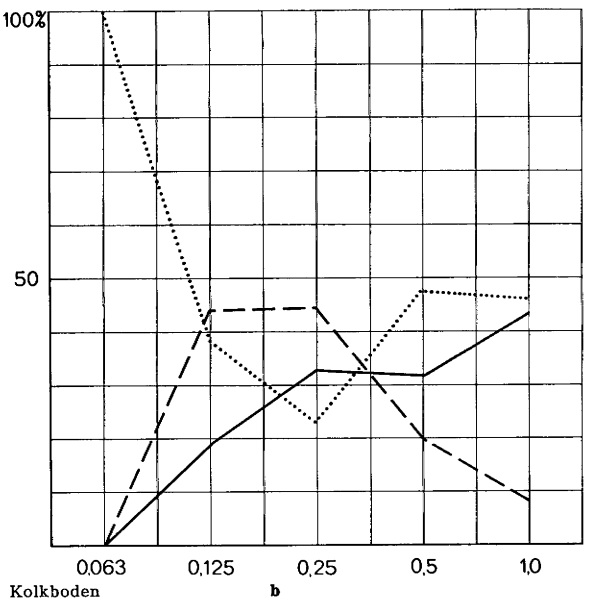


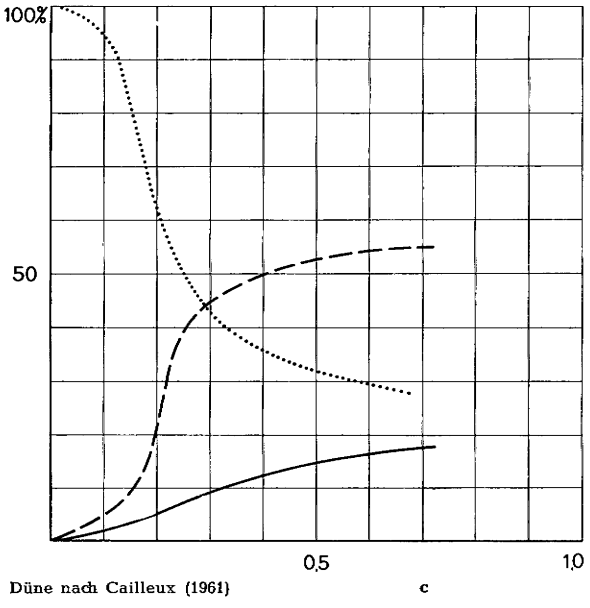
Abb. 4 0,5 Fraktion Vergr. 50 fach
Typ émoussés-luisant (Glazifluviatile Akkumulation mit rezenter fluviatiler Uberarbeitung, Uelzener Becken, Lüneburger Heide).



Kolkboden b

Die Probenentnahmeorte liegen etwa 20 m auseinander; b ist einem Kolkboden entnommen und a den Vorschüttsanden (Hagedorn 1965) kurz nach der Sturmflut 1961. Der relativ hohe Anteil an mattierten und glänzenden Körnern gibt ein getreues Abbild der dynamischen Verhältnisse; Dünensand wird in die Brandung befördert und marin überarbeitet.

Der relativ hohe Anteil von marin bearbeiteten Körnern in den Küstendünen wiederum beweist die Auswehung des in der Brandung bearbeiteten Sandes (siehe Morphogramm c und d).



Düne nach Cailleux (1961) c

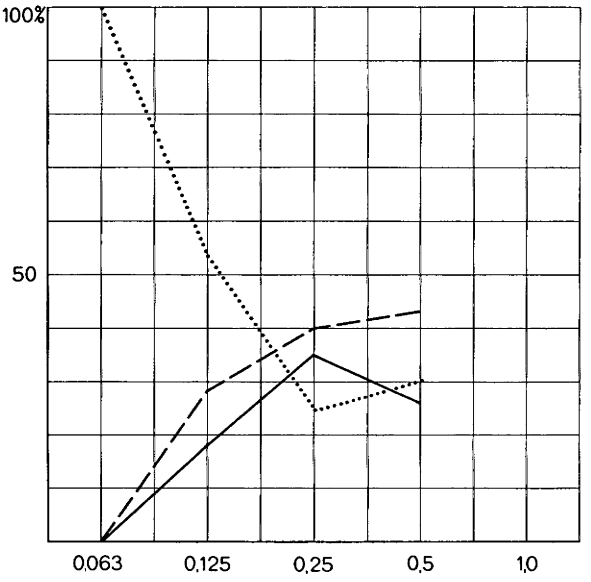
In den Küstendünen sind häufig Übergangskorntypen vertreten, windbearbeitete Körner mit glänzend-abgerundeten Ecken, glänzende Körner wiederum weisen auf exponierten Stellen Windwirkung auf.

Die Betrachtung der Korngrößenfraktion kleiner als 0,5 mm ⌀ gewinnt besondere Bedeutung bei der Unterscheidung mariner von fluviatiler Bearbeitung, weil diese Korngröße besonders empfindlich reagiert (vgl. Tabelle II, Seite 14).

Cailleux benutzt daher die 0,3 mm Fraktion als Marke. Steigen von ihr die Anteile der runden-glänzenden steil an, handelt es sich um marine Sande.

Es wird ein Sicherheitsgrad angegeben (Cailleux 1961, Seite 64). Über 30 % an runden-glänzenden Körnern bedeutet Strandablagerung, 20 bis 30 % Abnutzung auf Stränden wahrscheinlich, unter 28 % unsicher ob Strand oder Fluß.

Wie Untersuchungen aus dem eiszeitlichen Akkumulationsgebiet der Lüneburger Heide zeigen, gibt es Ablagerungen, die über 30 % glänzende Körner enthalten, ohne durch eine Brandung bearbeitet worden zu sein.



Küstendüne bei Northeim Stiftung, südl. Cuxhaven d

In der Abschmelzzone des Inlandeises sind z. B. in subglaziären Rinnen Verhältnisse zu erwarten, die einer Brandung an Intensität der Sedimentbewegung nicht nachstehen.

Die Interpretation des Anteiles der glänzenden Körner muß also stets unter Berücksichtigung der morphologischen Gegebenheiten geschehen.

Cailleux schließt aus dem Bearbeitungszustand der glänzenden Körner auf den zurückgelegten Weg. Die Berechtigung dieses Ansatzes muß, zumindest für die Ablagerungen aus Eisrandgebieten, bezweifelt werden (siehe die Morphogramme des folgenden Abschnittes).

4. Beispiele für Regionaluntersuchungen

Die Anwendung der Sandanalyse auf große Gebiete mit unterschiedlichem Formenschatz kann nur in Anpassung an die morphologische Situation geschehen.

In der Lüneburger Heide (Dreieck zwischen Celle, Müden/Aller und Blauer Berg) wurden Sandproben untersucht. Das Spektrum der Korntypenverteilung reicht von einem stark äolisch bearbeiteten Sediment über Ablagerungen mit einem Maximum an unbear-

beiteten Körnern bis zu stark fluviatil bearbeiteten, mit Prozentsätzen, die nach Cailleux (1961) für Strandablagerungen gelten könnten.

Weil die Sandanalyse differenzierte Aussagen gestattet, wird ihr bei Bauschanalysen, die sich über die Oberflächenform hinwegsetzen, Unzulässiges abverlangt.

Die Bedeutung der Mineralkornanalyse liegt für die Geomorphologie in der Möglichkeit, Sedimentkörper nicht nur wie bisher durch ihre Form zu beschreiben, sondern über die Kenntnis des Bearbeitungsgrades ihres Materials zur Genesis der Form und damit zu einer klimatisch morphologischen Aussage fortzuschreiten.

Die folgenden Beispiele,

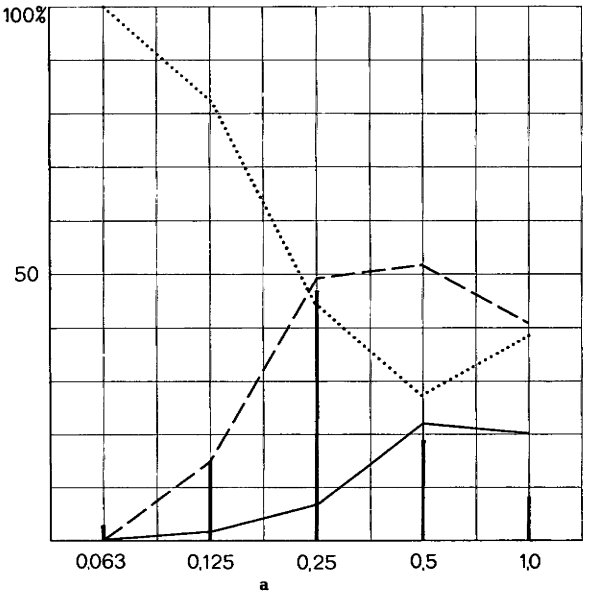
a) aus der Lüneburger Heide für die Differenziertheit der Korntypenverteilung in einem kleinen Raum,

b) das Probenprofil entlang eines Wadi im Tibesti und

c) über die Serir Tibesti
für die Ausdeutung in klimatisch-geomorphologischer Sicht,

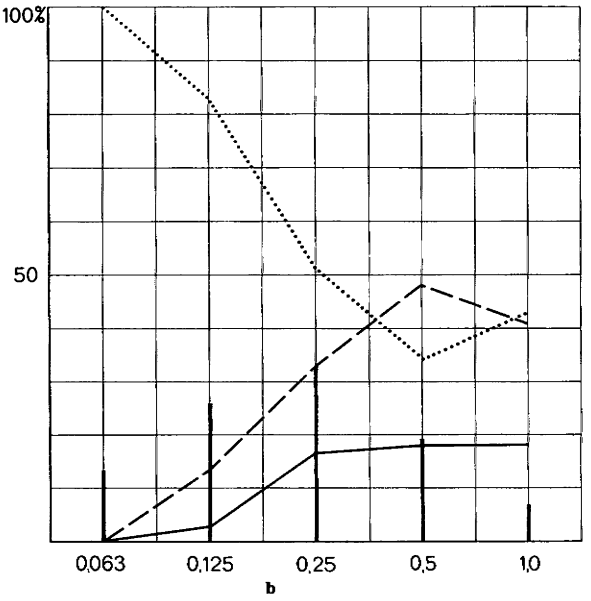
sollen diese Auffassung belegen.

a) In der Wurzelzone des Sandr der Moräne des Seeve Stadiums (Hövermann 1956), wo sich die Bundesstraßen 191 und 4 treffen (Breitenhees) (Topograph. Karte 1 : 25 000, 3128 Suderburg) und den Sandr in südlicher Richtung nachzeichnen, wurde ein Probenprofil in Nord-Süd-Richtung gelegt.



Die Entnahmetiefe schwankt um 110 cm ± 10 cm.

Hinter Hagen (Topograph. Karte 1 : 25 000, 3228 Sprakensehl) knickt die Profilrichtung nach Westen um. Von hier ab ändert sich die morphologische Ausstattung. Bisher flachte sich das Gelände gleichmäßig nach Süden ab. Hinter Hagen beginnt eine ackerbaulich genutzte Ebenheit, die neben flachen weitgespannten Mulden von einigen engumgrenzten Hohlformen unter-

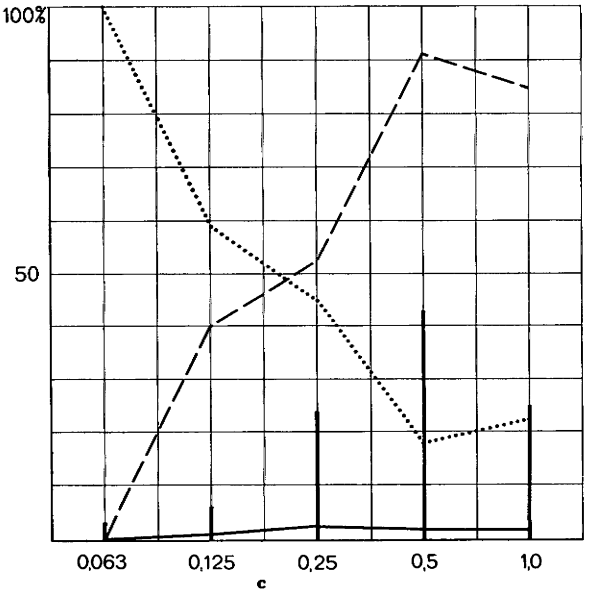


gliedert wird. Das Aufschlußprofil ändert sich gleichfalls: vorher Sandboden mit schwach ausgeprägtem Ortsstein und einem Deflationspflaster im C-Horizont (Probenentnahme unterhalb desselben); gegen die Fläche steigender Feinsandgehalt und stärkere Podsolierung; auf der Fläche überwiegend lehmiges, schwach sandiges Material.

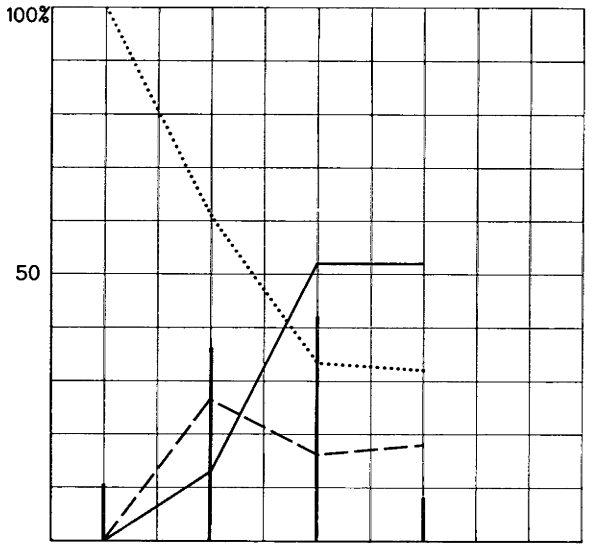
Der Sandr schließt offenbar an eine Moränenplatte an. Das Verbindungsstück ist von einer mehr als 1,50 m starken Flugsanddecke verdeckt.

Die Morphogrammreihe a bis c gibt die Korntypenverteilung der Proben wieder. Die Entfernung zwischen den Probeentnahmestellen beträgt 750 m (senkrechte Linien = Korngrößenanteile in %).

Es zeigt sich eine deutliche Zunahme der fluviatil bearbeiteten Körner. Die mattierten nehmen ab. Stets bleibt der Anteil der ungeformten unter dem der fluviatil bearbeiteten Quarzkörner.



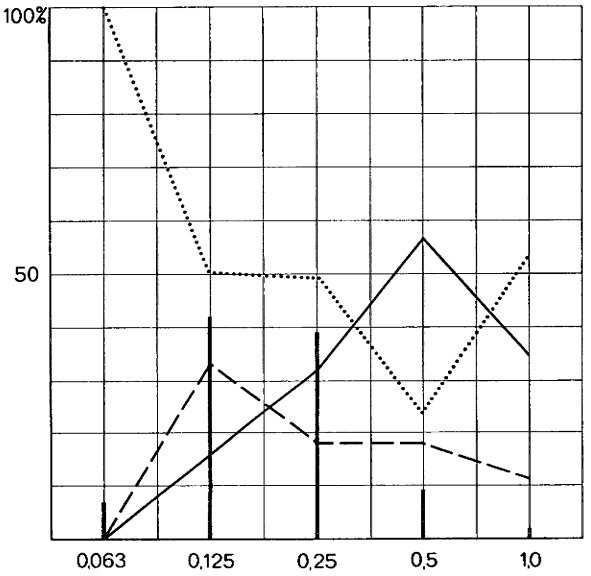
Die Flugsanddecke wird deutlich im Anteil der mattierten Körner des Morphogramms d und e und in der Korngrößenverteilung (senkrechte Linien), die ein Maximum in der 0,125 Fraktion wiedergeben. Probenentnahme aus einer Tiefe von 1,40 m.



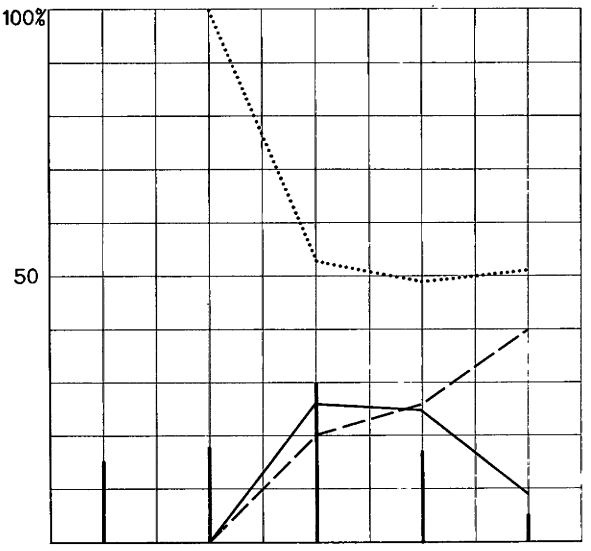
d

Die Probe f stammt von der Verebnung, das Morphogramm ist verändert: Einem hohen Prozentsatz ungeformter Quarzkörner steht ein kleiner an mattierten und glänzenden Körnern gegenüber. Die Korngrößen sind gleichmäßig verteilt, bis zur Schluffraktion, ein auffälliger Gegensatz zur Verteilung im Sandr.

Die Probe g ist dem südlichen Rand der Verebnung entnommen. An dieser Stelle greift ein Trockentälchen auf die Platte hinauf. Dementsprechend steigt der Anteil der fluviatil bearbeiteten Körner. Das Morphogramm nimmt den Charakter eines fluviatil-äolisch überarbeiteten Sandes an, während die Korngrößenverteilung noch weitgehend der Probe f gleicht.



e

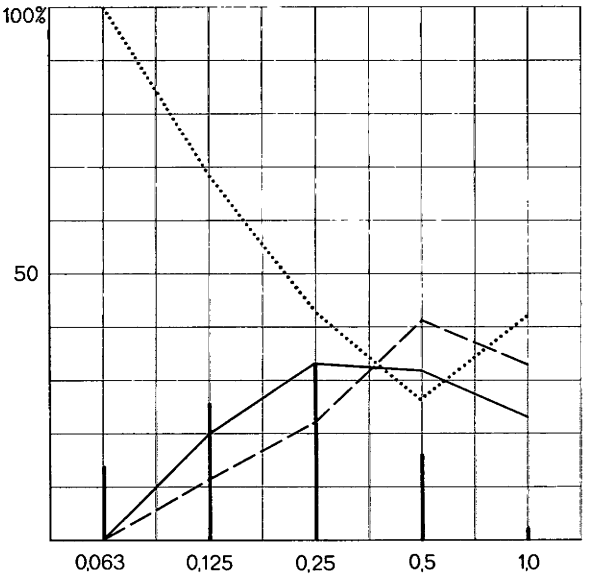


f

Das Morphogramm der Probe h ist 100 m unterhalb Probe g aus der Tiefenlinie des Trockentals entnommen (Entnahmetiefe 1,10 m) (Seite 24).

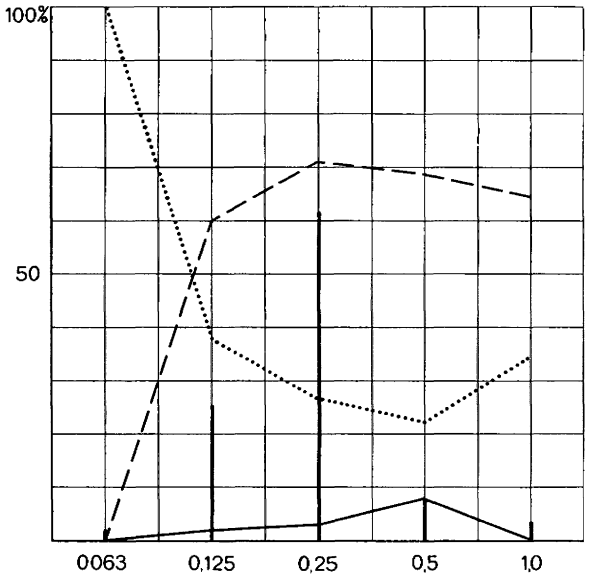
Der Anstieg der fluviatil bearbeiteten Körner ist evident, die Gleichmäßigkeit in der Verteilung über alle Fraktionen deutet auf eine sehr intensive fluviatile Bearbeitung hin.

Diesem Ergebnis aus nur einem Probenprofil würde man keine Bedeutung beimessen, wenn sich nicht an anderen Örtlichkeiten bei vergleichbarer morphologischer Situation ganz ähnliche Morphogramme ergeben hätten.



g

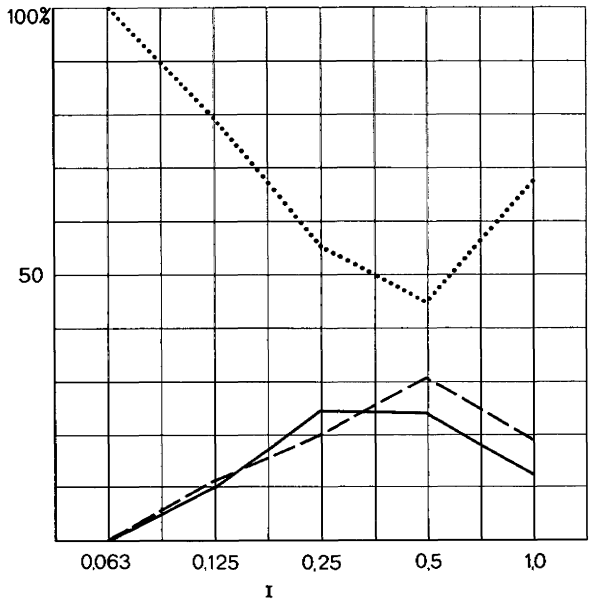
Morphogramm I ergab die Probe vom Blauen Berg (Topograph. Karte 1 : 25 000, 3128 Suderburg; H 58616; R 35997), einer Moräne aus schichtungslosem kiesigen Sand (Entnahmetiefe 1,80 m). Den grundsätzlich gleichen Aufbau zeigt Morphogramm II aus den Moränenstaffeln südlich Hösseringen (Entnahmetiefe 1,70 m, H 58585; R 35962, Topograph. Karte 1 : 25 00, 3128 Suderburg).



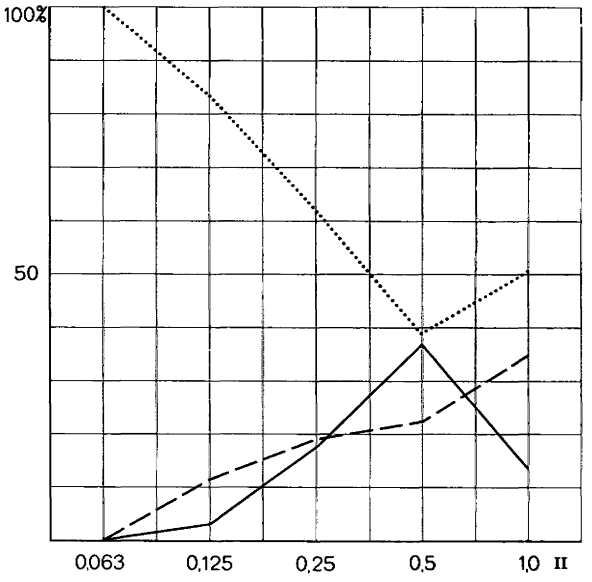
Morphogramm III — Material entnommen dem Fahlen Berg (Moräne, aus 1,50 m Tiefe, kiesiger Sand) an der Straße nach Suderburg (Entnahmepunkt H 58588; R 35985) — zeigt den gleichen Morphogrammtyp.

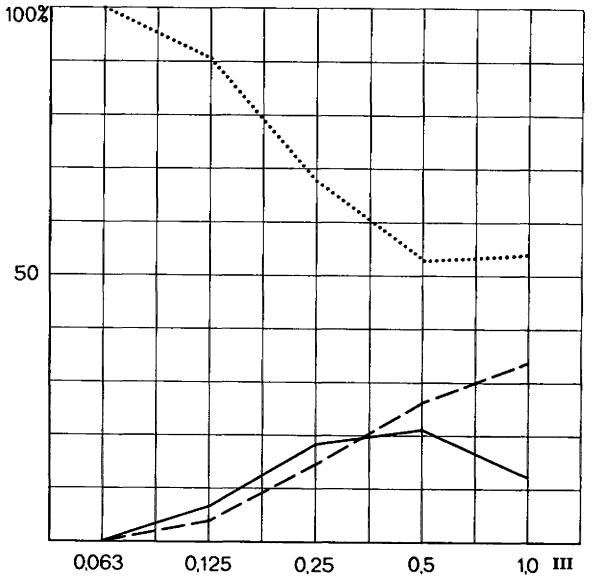
Die Morphogrammtypen des Sandr und der Moräne wurden in einer Vertikalabfolge in einem Aufschluß neben dem Waldweg, der von der Bundesstraße 191 nach Hösseringen abzweigt, die verschiedenen Moränenzüge querend, gefunden.

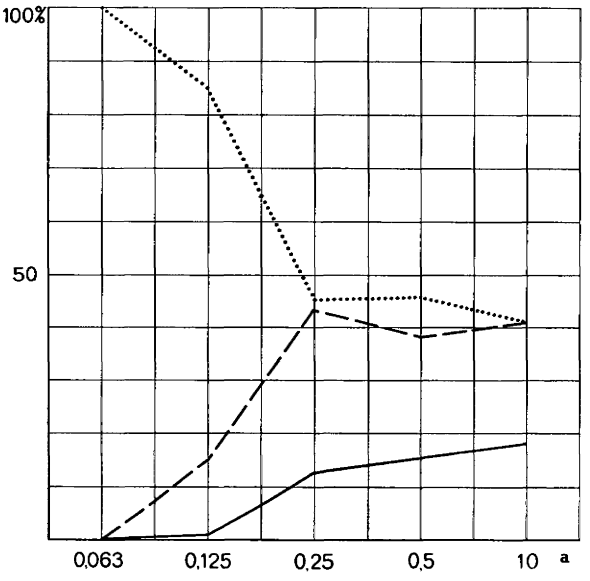
Der Aufschluß liegt zwischen zwei Moränenzügen (H 58576; R 35965, Topograph. Karte 1 : 25 000, 3128 Suderburg).

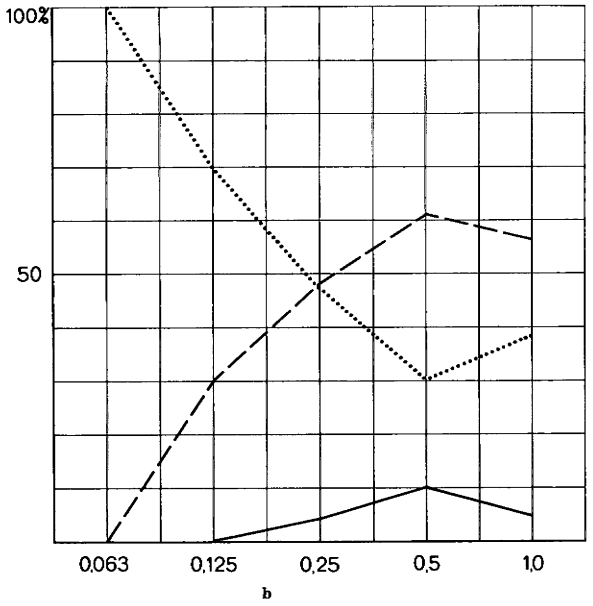


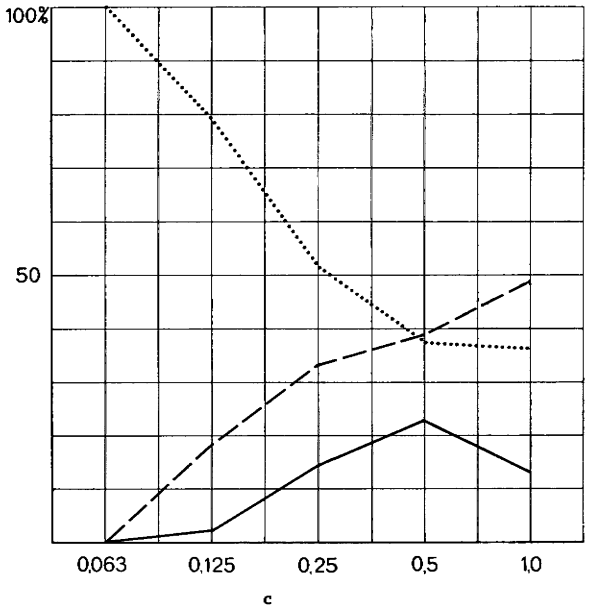
Die Tiefe des Aufschlusses beträgt 2,20 m. Steiniges, festverbackenes Material taucht von Nord-West nach Ost unter eine Sandschicht, in der eine Nord-West nach Süd laufende Schütterungsrichtung erkennbar ist. In











dieser Sandschicht sind zwei Horizonte unterschiedlicher Korngrößenverteilung, grob nach fein von unten nach oben sichtbar.

Die Morphogramme a bis c von unten nach oben geben die Korntypenanteile wieder.

Der verhältnismäßig hohe Anteil an glänzenden Körnern in der Grobkiesschicht weist darauf hin, daß ein fluviatil bearbeitetes Material vom Eis aufgeschoben und dann von Sandr-Ablagerungen b überdeckt worden ist, dessen Material dann zunehmend vom Wind mattiert wurde (c).

b) Mit der Verfolgung eines Tallängsprofils auf der Nordabdachung des Tibesti ergab sich die Möglichkeit zu prüfen, ob die Sandanalyse einen Beitrag zur sedimentologischen Charakterisierung der Höhenzone dieses Wüstengebirges und damit zu ihrer Abgrenzung zu leisten vermag.

Im Sprachgebrauch der Tubu führt das Bardagué-Tal von der Mündung des Toudoufou den Namen Enneri Toudoufou und später Enneri Torkou.

Dies hat wahrscheinlich einige Berechtigung hinsichtlich der Wasserführung, denn der Bardagué wird von den Schwemmfächern des Toudoufou abgedämmt, so daß wohl selten ein durchgehender Wasserstrom das Tal bis in die Endpfanne durchzieht.

Im wissenschaftlichen Sprachgebrauch wird jedoch ein Fluß nicht nach seiner hydrologischen Situation benannt, sondern die durchgehend zu verfolgende Tiefenlinie ist namengebend; die Bezeichnung Bardagué-Tal wird daher beibehalten.

Das Tallängsprofil führt über 276 km Distanz und beginnt etwa 25 km süd-östlich Bardai in ca. 1080 m Höhe.

Das obere Einzugsgebiet des Bardagué liegt in der Höhenzone dominierender fluviatiler Formung — mit klammartig eingetieften Nebenwadis und den breiteren Hauptwadis — in deren Gerinnebett gegenwärtig akkumuliert wird.

Im Flußbett des Bardagué-Oberlauf sind keine Dünen oder andere äolische Akkumulationsformen zu finden.

Das häufige, im Unterlauf täglich mittags einsetzende Sandfegen, bewegt meist nur eine sehr dünne, im Korngrößenbereich von 0,063 mm bis 0,125 mm Durchmesser liegende, Flugsanddecke.

In diesem Wadibereich dominieren eindeutig die ungeformten Quarzkörner. Der Anteil äolisch bearbeiteter Körner in den höher liegenden drei Entnahmestellen (vgl. Abb. III in der Kartentasche) erklärt sich aus der Zufuhr von äolisch bearbeiteten Quarzkörnern aus dem anstehenden Sandstein.

An diesem Beispiel erweist sich erneut die Notwendigkeit, neben den Akkumulationen auch das umgebende Gestein zu analysieren. Im Oberlauf der vom Toummo abgehenden Wadis wird z. B. vom umgebenden Sandstein 70% an mattierten Quarzkörnern geliefert, ein Wert, der sonst nur bei Barchanen gefunden wird.

In der Höhe von Zoui hat sich in der Materialbearbeitung und seiner Farbe der fluviatile Charakter durchgesetzt.

Vereinzelt treten die ersten fluviatil bearbeiteten Quarzkörner auf. An den ungeformten Körnern lassen glänzende Flächenteile und abgerundet glänzende Kanten fluviatile Bearbeitung erkennen. In der 0,5 mm Fraktion der ungeformten Körner beträgt dieser Prozentsatz etwa 3,5. Wegen der Gefahr, die glänzenden, fluviatil erzeugten Flächen mit Kristallflächen zu verwechseln, ist dieser Befund nicht im Profil vermerkt.

In dieser Probe gibt es keine ungeformten Körner mit äolischer Mattierung.

Bis zur Mündung eines Seitenwadis (Enneri Aurenat) bleibt die Sedimentzusammensetzung ungestört, der Anteil der glänzenden Quarzkörner steigt. Das Band der ungeformten Körner bleibt relativ einheitlich, ihr hoher Anteil ist auch charakteristisch für Flüsse aus Gebirgsregionen des humiden Klimabereiches (vgl. Cailleux 1948, 1961 etc.).

Bei km 58 beginnt ein Talabschnitt der nach Nordosten geöffnet ist. Aus den einmündenden Nebentälern reichen Schwemmfächer bis an die Bardagué-Gerinnebahn, von der sie unterschnitten werden.

In der Sedimentzusammensetzung beweist sich aber bereits ihr Einfluß. Der Anstieg der äolisch mattierten Körner, charakteristischer Weise in der 0,25 mm Fraktion, die am schnellsten auf die äolische Bearbeitung reagiert, läßt den Einfluß des Fremdmaterials vermuten. Die Farbe der Körner ist die charakteristische grauweiße der fluviatilen Sedimente.

Zehn km weiter nördlich mündet das Enneri Sourkidé. Die Zunahme des ungeformten Materials macht seinen Einfluß deutlich.

Die weiter wachsende Zunahme der mattierten Körner in der 0,5 mm Fraktion hält in der folgenden Talweitung an. Gleichlaufend ändert sich aber auch die Farbe der Quarzkörner. Bisher waren sie grau gefärbt, vorherrschend war also die Mineralfarbe. Neben diese Körner treten in steigendem Maße gold-gelb gefärbte Eisenoxydauflagerungen tragende hinzu.

In der anschließenden Talverengung steigt der Anteil der glänzenden plötzlich an, da auf Grund der Exposition das durch den Fluß transportierte Material äolisch nicht aufgearbeitet werden kann. Die engen Talzüge stellen Refugien für das fluviatil bearbeitete Material dar. Darauf weist auch das Maximum in der 0,125 mm Fraktion hin, jener Fraktion, die besonders träge auf Milieuveränderungen reagiert.

Die Entwicklung dieser Fraktion bestätigt dies. Während die fluviatil bearbeiteten Körner der 0,25 Fraktion abnehmen, bleibt der Anteil in der 0,125 Fraktion noch auf über 30 km Wegstrecke als Indikator für die fluviatile Bearbeitung erhalten. Es darf aber nicht unerwähnt bleiben, daß die Fehlerrate bei der Analyse dieser Fraktion größer als bei den übrigen ist.

Die Mündung des Enneri Toudoufou bezeichnet einen neuen Abschnitt. Die bisher gleichmäßig zu niederen Prozentsätzen abfallende Kurve der ungeformten Körner geht in ein regelloses Nebeneinander von Maxima- und Minimakurvenständen über; erst beim km 187,8 wird das Kurvenbild wieder einheitlich.

Besonders die Entwicklung der Kurve der mattierten Quarzkörner ist aus den fluviatilen Sedimentationsbedingungen nicht mehr zu erklären. Erst die Situation des gesamten Formenschatzes dieses Gebietes löst das Problem.

Die bisher den Bardagué begleitenden Nebentäler waren tief eingesenkt, der Talboden wurde durch die Farbe der grauweißen Alluvionen deutlich markiert, Talboden und Hang bildeten einen scharfen Knick. Stattdessen wird im anschließenden nördlicherem Gebiet die Farbe der Alluvionen verdeckt durch gelbgefärbten, in der Kurvengrößenverteilung relativ einheitlichen Sand. Während die Höhen noch ein feinzisiliertes Netz von Gerinnebahnen, die ins Anstehende eingesenkt sind, überzieht, sind die tiefer liegenden Talböden durch hineingewanderten gelbgefärbten Sand muldentalförmig ausgebildet, weil der scharfe Knick von Talsohle und Hang durch Sand ausgeglichen ist. In den Talschlüssen liegen häufig kleine Barchane. Folgt man dem Tal in der Längsachse, muß man zum Talende hin mehrere solcher Sandriegel überwinden. Dort wo sich zwei entgegengesetzt verlaufende Täler durch die rückschreitende Erosion genähert haben, ist der Riedel häufig von einer Sandschicht, aus der nur noch größere Gesteinsblöcke herausragen, bedeckt. Im Luftbild wird deutlich, wie die nordost-südwest orientierten Kluftrichtungen bevorzugtes Einwanderungsgebiet des Sandes sind.

Diese Kampfzone, in der ein fluviatil angelegtes Gerinnenetz vom Sand überwältigt wird, spiegelt sich in der Probenzusammensetzung durch den hohen Anteil an mattierten Quarzkörnern wieder.

Nur noch in den engen Talstrecken, km 128,8 bis km 133,8, in denen es keine Dünen gibt, kann sich die fluviatile Bearbeitung behaupten. Auch hier ist wieder die 0,125 Fraktion mit dem Maximum an fluviatiler Bearbeitung der entscheidende Kornanteil, der nachweist, daß es sich nicht um eine kurzzeitige fluviatile Bearbeitung handelt.

Es ist also nicht das Material, welches vom Tiefpunkt bei km 125,8 bis zum km 142,8 fluviatil bearbeitet wurde, sondern in den engen Talstrecken hat sich weiter — oder längere Zeit — fluviatil transportiertes Material gegenüber der Windwirkung behaupten können.

Während in der humiden Klimazone der Anteil fluviatil bearbeiteter Körner mit der Länge des Transportweges wächst (siehe die Profile Cailleuxs 1961, Seite 71—72), ist auf dem Weg zur Endpfanne im Wadi die Frage, wie lange — im Flußlängsprofil wie weit — kann sich die fluviatile Bearbeitung gegenüber der äolischen behaupten.

Mit dem Eintritt des Bardagué in den Bereich der Depression d'Ediouay, km 153,8, setzt verstärkt die Windwirkung ein, die aber das aus dem verwitternden Granit hinzukommende Fremdmaterial auch nicht bewältigen kann, demzufolge steigt der Anteil der ungeformten Quarzkörner.

Die Auszählung der ungeformten-mattierten und der gerundet-mattierten Körner wird aus den auf Seite 7 dargelegten Gründen problematisch. Das unverhältnismäßig starke Ansteigen der mattierten Körner (0,5 mm Fraktion) kann daher mit einem bedeutenden Fehler behaftet sein.

Trotzdem beweist das Absinken der glänzenden Kornanteile, daß ein Gebiet eigener Bearbeitungstendenz erreicht ist (km 155,8, Depression d'Ediouay).

Bei der Mündung des Enneri Tourkou mit anschließender Talengstrecke wiederholt sich das Bild der Einmündung des Enneri Toudoufou; noch einmal kann sich fluviatil bearbeitetes Material — wenn auch gegenüber der Talverengung von km 128,8 bis km 142,8 um einige Prozent abgeschwächt — gegen den Einfluß der mattierenden Kräfte durchsetzen.

Bei km 177,8 beginnt der Einfluß der Endpfanne; im Sediment ausgedrückt durch den Abfall der fluviatil bearbeiteten Körner und dem kontinuierlichen Anstieg der mattierten.

Die auf gleicher Höhe aus einem Seitental entnommene Probe — es handelt sich um eine fossile Talverschüttung (ca. 15 m über dem Niedrigwasserbett des Bardagué) — die durch eine rötlichbraune Farbe, welche auf den Quarzkörnern als Kruste auftritt, deutlich gegenüber den rezenten Alluvionen abgehoben ist, enthält einen ungewöhnlich hohen Anteil fluviatil bearbeiteter Körner, einen Prozentsatz, der eine sehr intensive fluviatile Bearbeitung beweist, wie sie unter den gegenwärtigen Bedingungen nicht möglich ist.

Die morphologische Ausstattung ändert sich auf kurze Distanz. Die das Tal bisher begleitenden Höhenzüge werden niedriger und bilden schließlich nach Norden die tief zerlappte Grenze zur Endpfanne des Bardagué. Seine Gerinnebahn zerfasert sich in einzelne Arme, beherrschendes Element werden die am Rande der Pfanne liegenden Barchane und einige aus der graugetönten von einer Tonschicht bedeckten Einheit aufragende Inselberge.

Die Proben aus der Endpfanne zeichnen sich durch einen bis zu 25 % betragenden Gewichtsanteil der 0,063 und kleinerer Fraktionen aus. Das Ansteigen der mattierten Kornanteile, der Abfall der fluviatil bearbeiteten Körner auf 0 % und der hohe Prozentsatz an mattierten ungeformten Quarzkörnern beweist die Dominanz der Windwirkung (km 187,8 bis km 208,5).

Ohne deutlichen Übergang, in breiten Zungen vor und zurück springend, gehen die graufarbenen, durch beigemengte Glimmerteilchen in der Sonne glitzernden Bardagué-Alluvionen, in eine gelblich-graue Sand- und Grustenne über, aus der vereinzelt Granitblöcke emporwachsen. Kleine, wenige Zentimeter hohe Dünen untergliedern die Fläche.

Das Material ist gleichmäßig in der Korngrößenverteilung aufgebaut; die feineren Fraktionen unter 0,125 mm liegen unter 10 %, fluviatil bearbeitete Quarzkörner fehlen (km 218,8 bis 276,8).

Das Längsprofil wird ergänzt durch die Untersuchung zweier Tiefenaufschlüsse, eines Brunnens (II) bei km 127,8 und eines zweiten (I) bei km 120,8.

Brunnen II: siehe Kartentasche.

Der Aufschluß ist in zweifacher Hinsicht wertvoll, beweist er doch die beträchtliche fluviatile Akkumulation und in der Zusammensetzung der Quarzkorntypen eine deutliche Tendenz zunehmender äolischer Sedimentation.

Während in dem unteren Aufschlußbereich die Kies- und Schotterlage ein ehemals schnellfließendes Gewässer beweist, steigt zu den oberen Teilen des Brunnens der Anteil des fluviatil sedimentierten Feinmaterials bis zur Ausbildung von Tonbändern an. Dies bedeutet, daß das Flußgebiet in steigendem Maße fluviatiler Sedimentationsraum wurde.

Der kontinuierliche Anstieg der mattierten Quarzkornanteile und die Beimengung von Fremdmaterial, welches extremer äolischer Bearbeitung unterlag, weisen auf zunehmende Windwirkung und äolische Sedimentation hin. Im Vergleich mit der Situation des umliegenden Reliefs — ein Gerinnenetz wird vom Sand zugeschüttet — scheint die Vermutung, daß sich die Zone dominierender Windwirkung auf der Nordseite des Tibesti zumindest ausgedehnt hat, berechtigt.

Brunnen I: siehe Kartentasche.

Im Gegensatz zum talabwärts gelegenen Aufschluß (Brunnen II), verlaufen die Bearbeitungskurven wesentlich unregelmäßiger. Die Zufuhr von Fremdmaterial aus dem Enneri Toudoufou, das einen vielfach untergliederten Schwemmfächer in den Bardagué schüttet, stört das Bild.

Die vorherrschende Tendenz bleibt jedoch erkennbar: die Zunahme des Feinmaterials zur Oberfläche hin, der wachsende Anteil äolisch bearbeiteter Quarzkörner. Es ergibt sich allerdings ein wesentlicher Unterschied, weil die Zumischung von gelbgefärbten, sehr intensiv äolisch bearbeiteten Körnern ausbleibt. Der Einfluß äolischer Sedimentation in diesem Teil des Wadigebietes ist nicht nachweisbar.

Das Anstehende wird auch in diesem Aufschluß nicht erreicht. Eine Sedimentmächtigkeit von mindestens 20 m beweist die beträchtliche fluviatile Sedimentation, die, wie Kies- und Tonlage belegen, während unterschiedlicher Wasserführung erfolgte. Eine Abschätzung der Sedimentationsleistung pro Zeiteinheit kann auf Grund des vorliegenden Materials nicht gewagt werden, sie wäre vielleicht möglich, wenn eine Abzählung der Tonbänder vorgenommen würde.

Die Entwicklung des Probenprofils längs des Bardagué läßt neben der fluviatilen Sedimentation eine äolische erkennen. Es ist daher an den im Bardagué-Tal auftretenden äolischen Akkumulationen und den auf den Randhöhen liegenden Flugsanddecken zu prüfen, ob sie aus ausgewehten Wadialluvionen oder Fremdmaterial bestehen.

Die Längsachse der Dünen steht fast senkrecht auf der Richtung des Flusses. Die Längsachse ist nord-ost-süd-west-orientiert. Der Fuß der äolischen Akkumulationsform liegt im Hochwasserbett und ist deutlich gegen die graugefärbten Alluvionen abgesetzt.

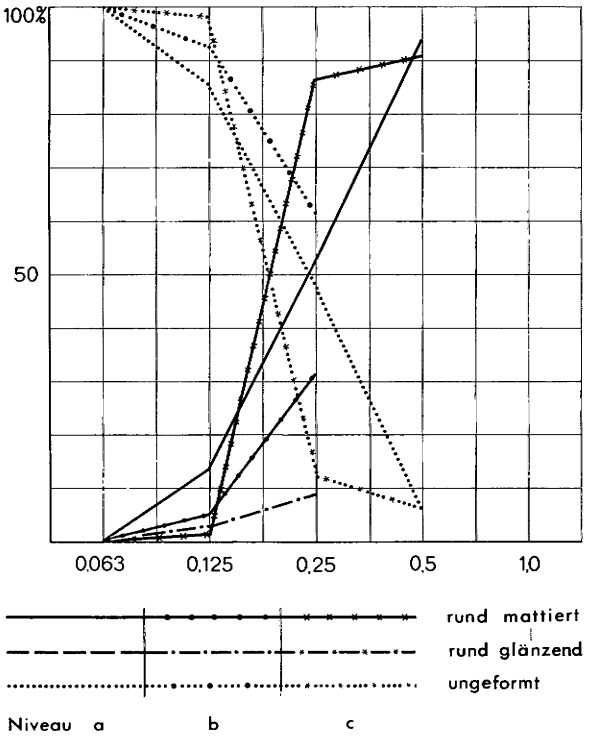
Im vertikalen Aufbau ist eine Dreigliederung zu erkennen (siehe folgendes Morphogramm).

a) Von dem Grat wird ständig feiner Sand geweht. Bei etwas stärkerer Luftbewegung, die im Wadibett noch keinen merklichen Sandtransport verursacht, heben sich breite Sandschleier ab.

Dieses Feinmaterial, das Korngrößenmaximum liegt in der 0,125 Fraktion, enthält dunkel gefärbte Bestandteile, Quarze mit der Flußsandfarbe, Basalte und Glimmer. In den Windrippeln häuft sich dieses Material an, so daß diese Zone dunkel gefärbt erscheint.

Mit einem Anteil von 7,8 % in der 0,25 Fraktion und 3 % in der 0,125 Fraktion an fluviatil bearbeiteten Körnern wird die Herkunft aus den Wadialluvionen bewiesen.

b) Etwa 5 m unter dem Grat befindet sich kein graugefärbtes Material mehr. Das Maximum in der Korngrößenverteilung liegt in der 0,25 Fraktion. Die Sandbewegung nimmt sichtlich ab, es gibt aber noch Windrippel. Fluviatil bearbeitete Quarzkörner treten nicht mehr auf.



Korntypenanteile eines Barchanes (km 125,8).

c) Sieben Meter unterhalb Zone b stehen vereinzelt auf Stelzwurzeln Gräser. Windrippel sind kaum noch zu erkennen, der Sand ist gleichmäßig gelb gefärbt, das Korngrößenmaximum liegt in der 0,5 Fraktion.

Der Anteil der mattierten Quarzkörner ist höher als 80 %, fluviatil bearbeitetes Material fehlt.

In den Flugsanddecken auf den Randhöhen des Bardagué-Tals, welche auf der Leeseite (Süd-West) bis zu 2 m hohe Sandwächte ausbilden, ist kein Anteil fluviatil bearbeiteter Quarzkörner zu finden. Basalt- und Glimmerakzessorien fehlen ebenfalls. Der Anteil der gerundet-mattierten Körner liegt im Gegensatz zu den Windakkumulationen im Tal mit maximal 73,7 % gegenüber 93,2 % niedriger. Die ungeformten Quarzkörner sind ausnahmslos mattiert.

Der Vergleich des Formungsgrades, der Korntypenanteile und der Mineralkornfarbe, der Bestand an Glimmer-, Basalt- und Tuffakzessorien, von Wadialluvionen und äolischen Akkumulationen ergibt — bis auf die Gratzone der Dünen — keine gemeinsamen Züge. Düne, Flugsanddecken auf den Randhöhen und Barchane sind selbständige, von der Materialzufuhr aus dem Wadibett unabhängige Sedimentkörper.

Als ein Unterscheidungskriterium zwischen fluviatilen und äolischen Sedimenten ist die goldgelbe bis rötlichgelbe Farbe der letzteren angeführt worden. Diese Färbung entsteht durch die Auflagerung eines dünnen wasserarmen Eisenoxydhäutchens.

Erhitzt man Quarzkörner mit Tonauflagerungen auf +70 ° C, so wandelt sich unter diesen Temperaturbedingungen die graue Farbe in eine rötlichbraune um (siehe auch Walter 1951).

Die Farbe der Quarzkörner scheint also weniger vom Alter als von besonderen Bedingungen, wie Trockenheit und höhere Temperatur abhängig zu sein, wobei die Farbtiefe offenbar vom Kristallwassergehalt bestimmt wird.

Nach dieser Vorstellung könnten auch die Tonauflagerungen tragenden Quarzkörner der Bardaguésedimente in rötlich-gelb gefärbte überführt werden.

Wenn die äolischen Akkumulationen im Bardaguégebiet aus fluviatilem Material aufgebaut wären, müßten Zwischenzustände im Übergang von grau gefärbten nach goldgelbfarbenen Quarzkörnern gefunden werden, was jedoch in keinem Fall nachgewiesen werden konnte.

Daher ist auch von dieser Seite, wenn auch durch einen negativen Befund, belegt, daß das Material der Barchane und Flugsanddecken von den Randhöhen nicht aus den ausgewehten Alluvionen stammt, sondern von fern herantransportierten Sand enthält; somit tritt neben die fluviatile Akkumulation im Flußbett eine äolische.

c) Wie die vorliegenden Beispiele bezeugen, vermag die Quarzsandanalyse sehr empfindlich Veränderungen der morphologischen Ausstattung über die wechselnde Sedimentzusammensetzung zu registrieren.

Die Anwendung der Methode kann daher nur in Verbindung mit der morphologischen Analyse des Formenschatzes angewendet werden. Dies gilt besonders dann, wenn Aussagen über größere Räume erarbeitet werden sollen; es sei denn, das Gebiet ist so wenig differenziert, daß es sich mit dem Sedimentkörper deckt.

Die Serirflächen der Sahara erstrecken sich über viele hundert Quadratkilometer; die sie bedeckenden Sedimente schienen für eine großräumige Untersuchung*) geeignet.

Die Serirflächen sind durch sehr flach eingesenkte Wadis, die sich häufig nur an der helleren Farbe ihrer Alluvionen von der Umgebung abheben, untergliedert.

Gesteinswechsel im Liegenden wird nur sichtbar, wenn der „top" einer Schicht die Oberfläche erreicht — die Fläche kappt den Schichtkopf — und durch die Bedeckung mit grobem in situ entstandenem Material, hervorgehoben wird. Zum Teil bilden diese Schichtköpfe kleine langgestreckte Hügel, deren Fuß ein Sedimentmantel verdeckt, der an diesen Stellen mächtiger als in der Umgebung ist.

An der Oberfläche dominiert äolisch bearbeiteter Quarzsand von gelber bis hellbrauner Färbung; Mattierungsgrad und Kornform sind wie bei Barchansanden entwickelt.

Die obere Flugsandschicht, die sich zwischen den 1—5 cm großen, die Fläche übersäenden Steinen ausbreitet, ist in Bewegung, wenn auch nicht in Form eines ständigen Sandfegens. Die Mattierung von wenigen Wochen auf der Serir liegenden Glasflaschen, die Polierung von Metallgegenständen, und nicht zuletzt natürlich der hohe Mattierungsgrad der Quarzkörner belegen die Bewegung des Sandes.

*) Herrn Dr. M. Fürst von der DEA-Libya danke ich sehr für die Überlassung des Probenmaterials von der Serir Tibesti und für die Möglichkeit, an geologischen Exkursionen in Libyen teilnehmen zu können.

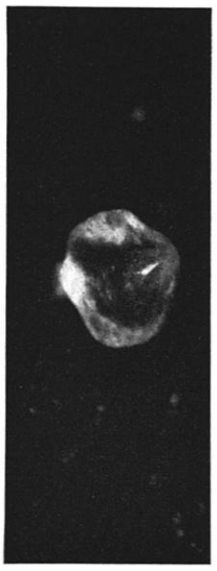


Abb. 5
0,05 mm ⌀ Vergr. 112,5 mal. Abgerundet glänzend poliertes Quarzkorn. Entnahmeort: Oberlauf des Bardagué (Tibesti).

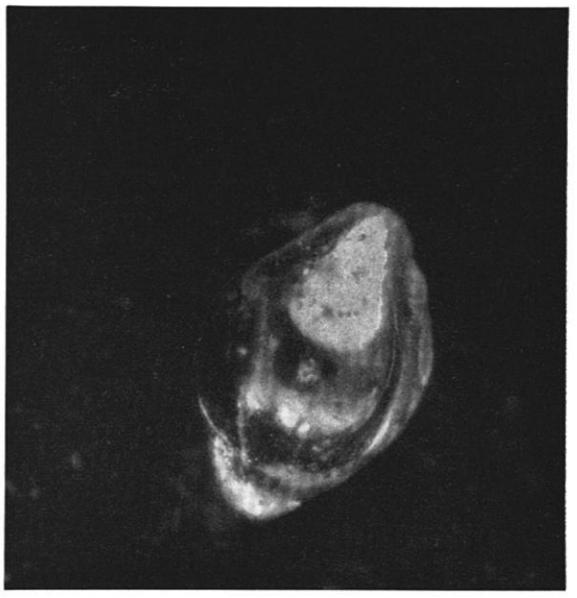


Abb. 6 0,25 Fraktion, Vergr. 50 mal, Quarzkorn aus Lateritkruste mit trigonalen Flächen und abgerundet glänzendem Kornteil.

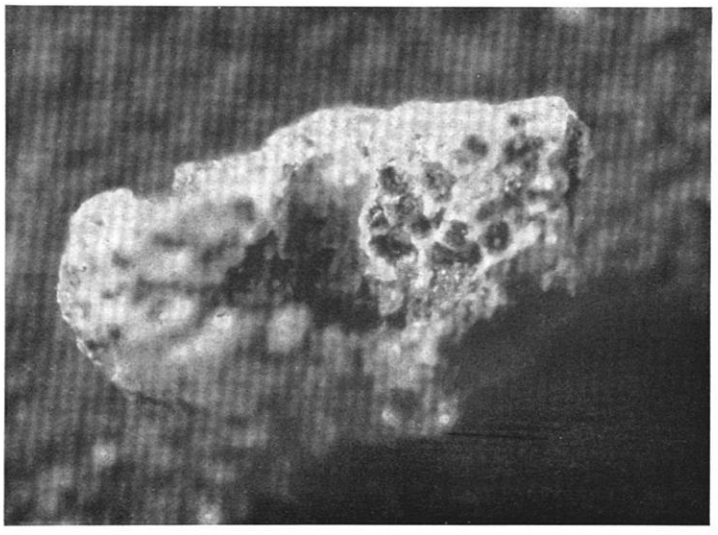


Abb. 7 0,75 mm Fraktion, Vergr. 50 mal
Quarzkörner aus dem Ortsteinhorizont von Dünen.

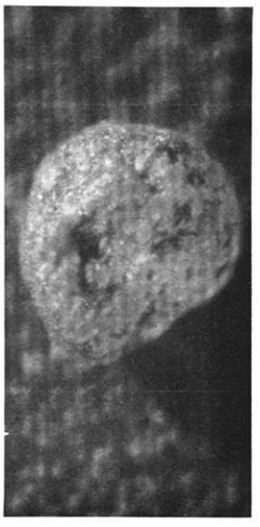


Abb. 8
Quarzkörner aus dem Ortsteinhorizont von Dünen.
0,25 mm Fraktion, Vergr. 50 mal

Daß trotzdem die Staubschicht (vgl. Seite 30) nicht abgetragen wird, liegt nicht an der Schutzfunktion des Steinpflasters — wie die Beobachtung lehrt, liegen die Steine stets mehrere Zentimeter voneinander entfernt — sondern an der, in der Vertikalen nach der Korngröße geordneten Sandkornschicht, die das Staubsediment abdeckt.

Es ist kein Widerspruch, daß diese Decke trotz ihrer Bewegung die schützende Funktion ausübt, denn sobald ein Korn aus dieser Decke herausgerissen wird, fällt in das entstehende Loch sofort ein anderes, einige Millimeter vor dieser Stelle herausgerissenes, die Sandkörner springen also gewissermaßen von einer Deflationsstelle zur anderen. Dabei wird in der Gesamtheit Sand transportiert, aber die Sandkorndecke bleibt bei mäßiger Windgeschwindigkeit erhalten.

Eine schützende Staubhaut, wie sie Mortensen (1927) für die chilenische Wüste als charakteristisch beobachtete, konnte ich in der Sahara nicht feststellen. Auch die Fesch-Fesch Gebiete — anstehende Tonmergel, die zu Zementmehl ähnlichem Staub verwittert sind — bedeckt eine dünne Lage dieser Sandkornschicht.

Bei der Deflation auf der Serir spielen auch die Niederschläge eine Rolle, die jedoch nicht über die fluviatile Erosion wirksam werden, sondern durch den Tropfenschlag wird die Sandkorndecke zerstört und der Wind erhält eine Angriffsmöglichkeit am Staubhorizont.

Es ist eine häufig zu beobachtende Erscheinung, daß nach ganz kurzen Regenfällen in den anschließenden Stunden der Staubtransport in der Luft merklich zugenommen hat.

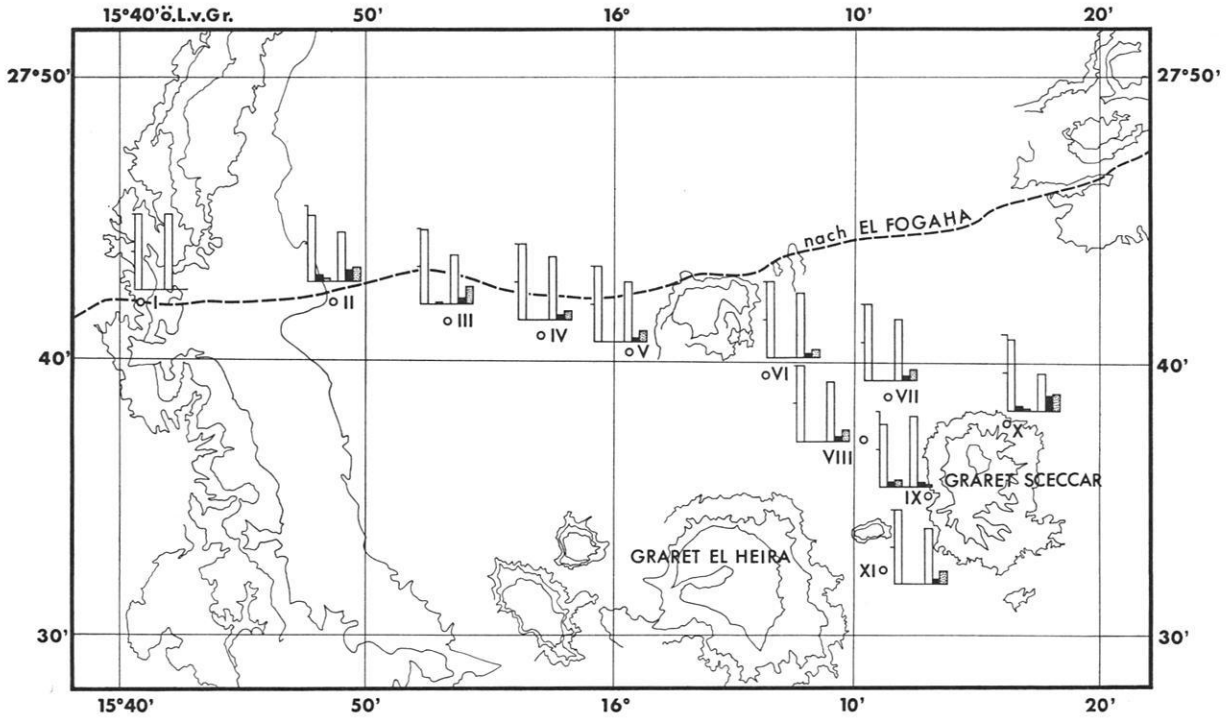
In etwa 15 cm Tiefe beginnt, durch eine stärker verfestigte, von Gängen (Wurzeln?) durchzogene Zone zur Oberfläche abgegrenzt, ein braun bis dunkelbrauner Horizont staubfeinen, kalkhaltigen Materials, der ohne deutlichen Übergang in das Anstehende übergeht; die zum Anstehenden hin zunehmenden Kalkbrocken sind ungerundet und von einer lehmig-tonigen Kruste überzogen.

Das Probenprofil führt über den nördlichen Zipfel*) der Serir El Gattusa zwischen 15° 40' und 16° 15' östlicher und 27° 45' und 27° 35' nördlicher Breite. Im Westen wird die Serir durch die Harudj und im Norden durch den Djebel es Soda, im Westen und Süden durch die Hamada auf der Schichtfläche der Kalke der Oberkreide (Campanien-Danien) und des Paleozäns (Hecht, Fürst, Klitsch 1963) begrenzt (Abb I, s. unten).

Die unter der Oberfläche aus ca. 40 cm Tiefe entnommenen Proben enthalten häufig Quarzkörner, bei denen die fluviatile Bearbeitung nur an den glänzend-abgerundeten Kanten erkennbar ist. Allgemein überwiegt die äolische Bearbeitung, auch die ungeformten Quarzkörner sind mattiert.

*) Die von Meckelein (1959, Seite 36) für dieses Gebiet verzeichnete Kalksteinhamada existiert nur als schmale Zone im Westen und Süden.

Abb. I, vergl. Legende in der Kartentasche



Maßstab 1:500000

In den Proben gibt es neben gerundeten Kalkkonkretionen und Quarz keinen wesentlichen Anteil an anderen Mineralkörnern. Basalt fehlt völlig.

Dieser tritt erst in Proben vom südlichen Rand des Djebel es Soda auf. Die aus 45 cm Tiefe entnommenen Proben enthalten auch hier 5,03 % fluviatil bearbeitete Körner in der 0,25 Fraktion.

Die Analyse einer Probe aus den Alluvionen des Wadi al Quat (2 km östlich der Asphaltstraße nach Sebha) gab mit folgender Korntypenverteilung von der Oberfläche die rezente fluviatile Bearbeitung wieder:

(mm ϕ)	rund-matt (RM)	rund-glänzend (RG)	ungeformt (Un)
0,5 Fraktion	11,00	2,50	86,80 davon 30 % matt
0,25 Fraktion	76,70	2,60	20,70 davon 15 % matt
0,125 Fraktion	15,80	1,64	82,50 davon 28,5 % matt

In 40 cm Tiefe steigt der Anteil der fluviatil bearbeiteten Körner:

	RM	RG	Un	matt von Un in %
0,5	53,00	13,00	34,00	40,0
0,25	72,90	20,40	6,70	60,0
0,125	6,70	12,30	81,00	31,0

Auch in den Wadialluvionen dominiert eindeutig das äolisch bearbeitete Material.

Erste Probe: (Abb. I, Seite 29)

I Kahlksteinhamada. Entnahme aus 10 cm Tiefe, schon im Kontakt mit dem Anstehenden.

Zweite Probe:

Entnahmetiefe (cm):

0—5 Seriroberfläche am Rande der Hamada, vereinzelte Kalkscherben nicht größer als 1 cm im Durchmesser. Dazwischen eine Flugsanddecke aus goldgelb gefärbten Quarzkörnern;

5—12 übergehend in einen hellbraunen, zellig porösen Boden. Wenige mm im Durchmesser messende, hellgrau umrandete Gänge durchziehen diesen Horizont.

12—45 II Hellbrauner Staubboden, Anteil der zum Teil runden Kalkkörnchen zum Quarz im Verhältnis 300:1

Neben eindeutig fluviatil bearbeiteten Quarzkörnern viele Übergänge von mattiert zu glänzend.

RM %	RG %	Un %	mattiert in % von Un
87,4	9,3	3,3	60,2
64,0	16,3	19,7	45,6
17,0	4,9	78,1	30,0

Diese Zone geht ohne deutlichen Übergang in das bei 65 cm Tiefe erreichte Anstehende über. Die in dem hellbraunen Staub liegenden Kalkbrocken tragen rötlich-braune Verwitterungsleisten.

Dritte Probe:

III Das bei der zweiten Probe beschriebene Profil ändert sich nicht.

Die Flugsanddecke enthält ausschließlich mattierte Körner, der Anteil ungeformter ist gering (3,3 %).

Aus 40 cm Tiefe gewonnene Quarzkörner sind nur in der 0,25 Fraktion mit einem Anteil von 8,8 % und in der 0,125 Fraktion mit 6,05 % fluviatil bearbeitet.

Vierte Probe:

IV Profil unverändert.
Fluviatil bearbeitete Quarzkörner aus 45 cm Tiefe, 0,25 Fraktion 5,8 %
0,125 Fraktion 0,1 %

Fünfte Probe:

V Profil unverändert
Fluviatil bearbeitete Quarzkörner aus 45 cm Tiefe, 0,25 Fraktion 5,0 %
0,125 Fraktion 2,1 %

Sechste Probe:

VI Profil unverändert
Fluviatil bearbeitete Quarzkörner aus 45 cm Tiefe, 0,25 Fraktion 4,7 %
0,125 Fraktion 3,5 %

Siebente Probe:

VII Profil unverändert
Fluviatil bearbeitete Quarzkörner aus 45 cm Tiefe, 0,25 Fraktion 5,4 %
0,125 Fraktion 3,6 %

Achte Probe:

VIII Profil unverändert
Fluviatil bearbeitete Quarzkörner aus 45 cm Tiefe, 0,25 Fraktion 6,9 %

Neunte Probe:

IX Das Gelände steigt zum Graret fast unmerklich an. Die nach außen von dieser Aufwölbung, in deren Zentrum das Graret liegt (Fürst 1965), abfließenden Wadis sind wenige Zentimeter tiefer eingesenkt als die Wadis in der Umgebung. Ihr Gerinnenetz ist dichter. Das Aufschlußprofil ändert sich im stofflichen Bestand nur wenig. Während bisher das Verhältnis von Kalkkörnchen zu Quarz 300:1 betrug, ist es hier auf 500:1 gestiegen. Die „Staubzone" ist wesentlich mächtiger geworden, auch nach 1,50 m ist das Anstehende noch nicht erreicht.

Die Quarzkörner aus 50 cm Tiefe enthalten in der 0,25 Fraktion 7,0 % und in der 0,125 Fraktion 6,0 % fluviatil bearbeitete Körner.

Zehnte Probe:

X Probenentnahmeort im Bereich der in das Graret entwässernden bis 60 cm tief eingesenkten und 100 cm breiten Wadisohle. Sie liegen im quarzsandfreien Tonmergeln, nur die Wadisohle enthält vom Graretrand herabtransportierten Quarzsand. Diese wohl rezente fluviatile Bearbeitung drückt sich in dem hohen Anteil der glänzenden Körner in der 0,25 Fraktion aus. Entnahmetiefe 5 cm.

RM %	RG	Un %	mattiert in % von Un	Fraktion (mm ⌀)
92,70	5,90	1,50	—	0,5
58,00	20,00	22,00	52,5	0,25
7,20	3,92	88,90	20,6	0,125

Elfte Probe:

XI Probenentnahmeort außerhalb der Graretaufwölbung. Das Aufschlußprofil entspricht den Proben II bis VIII. Fluviatil bearbeitete Körner aus 40 cm Tiefe,

0,25 Fraktion 5,5 %
0,125 Fraktion 3,8 %

Das Probenprofil über den nördlichen Zipfel der Serir El Gattusa (Abb. I) beweist die gegenwärtig dominierende Windwirkung bei der Bearbeitung des Oberflächenmaterials; der Prozentsatz an fluviatil bearbeiteten Quarzkörnern unterhalb dieses Horizontes deutet auf eine Feuchtphase in der Geschichte der Serirsedimente hin.

Die Ausdehnungen der Untersuchungen auf die Serir Tibesti (Abb. II, siehe Kartentasche) ergibt nur hinsichtlich des Anteils der fluviatil bearbeiteten Körner einen Unterschied. Ihr Anteil wechselt stärker, ist aber ebenfalls bis auf die Wadialluvionen nur in den tieferen Sedimenthorizonten anzutreffen.

Die dominierende Windbearbeitung an der Erdoberfläche wird durch alle Proben belegt. Aber selbst in den Proben 23—27 ist der Anteil der fluviatil bearbeiteten Körner nicht dominierend, zumal auch die ungeformten Körner mattiert sind.

Für einen fluviatilen Transport der Serirsedimente gibt es, auf Grund der Quarzkornanalyse, keinen unmittelbaren Beweis, wie eine steigende Anzahl fluviatil bearbeiteter Körner mit der Länge des Transportweges oder Regelhaftigkeiten in der Korngrößenverteilung.

Aus der Korntypenverteilung der Tiefe geht hervor, daß bei der Sedimentation Bedingungen vorherrschender Windwirkung bestanden haben. Der Aufschluß mit den Proben 23—27 aus den Entnahmetiefen 10—15 cm, 15—30 cm, 30—45 cm, 45—60 cm und 60—75 cm zeigt die Verhältnisse deutlich. Es schwankt der Anteil der fluviatil bearbeiteten Körner in den verschiedenen Horizonten. Er wird aber niemals dominierend, stets bleibt der Wind entscheidendes Bearbeitungs-Agens.

Das Material kann jedoch auf Grund des hohen Anteils an ungeformten Körnern keinen langen Weg unter äolischem Milieu zurückgelegt haben.

Es muß daher ein fluviatiler Transport vermutet werden, setzt man die geringen Prozentsätze an fluviatil bearbeiteten Körnern, den Glimmerreichtum und andere Akzessorien wie Feldspäte, Lydite und Quarzite, die aus dem im Tibesti anstehendem Grundgebirge (Hecht, Fürst, Klitzsch 1963, Fürst 1964) stammen müssen, in Rechnung.

Die früheren Abfluß- und Sedimentationsbedingungen können jedoch von den gegenwärtigen nicht wesentlich verschieden gewesen sein. Ruckweiser Wasserabfluß, weil hoher Anteil an ungeformten Quarzkörnern, der durch trockene Zeiten unterbrochen war, in allen Horizonten mattiertes Material, bestätigen diese Annahme.

Längere Zeit existierende Endseen können aus den Ergebnissen des vorliegenden Probenmaterials nicht erschlossen werden.

Für die südliche Serir Tibesti gibt es keinen Hinweis für eine gegenwärtige fluviatile Akkumulation. Die Endpfanne des Bardagué ist nur wenige km auf die Serir hinaus zu verfolgen. Dann beginnt Materialtransport in entgegengesetzter Richtung. Dies beweisen die Expositionen der in den Bardaguémündungstrichter hineinwandernden Barchane, der Aufbau aus Fremdmaterial der das Bardagué-Tal begleitenden Sandaufwehungen und die Sandbedeckung der Randhöhen und schließlich der Nachweis von äolisch extrem bearbeitetem Fremdmaterial in den Alluvionen des Bardagué.

Nach diesen Befunden ist die Serir Tibesti gegenwärtig ein Deflationsraum. Wie sich die aus dem Erg von Rebiana auf die Serir Tibesti hinausziehenden Sandzungen auf die Gesamtbilanz des Gebietes auswirken, kann nicht abgeschätzt werden. Diese gewaltigen Sandzungen, die nicht der Schwerkraft, also der Abdachung der Serir (vgl. M. Fürst 1965, Karte 1) folgend, sondern dem Passatwind gehorchend auf die Serir hinausziehen, sind am Materialaufbau der Serirsedimente wohl nicht wesentlich beteiligt, denn nur in den oberen Horizonten der Probenentnahmeorte, die im Bereich dieser Sandzungen liegen, ist Material vertreten, das nach Kornfarbe und Mattierungsgrad aus dem Erg stammen könnte. Leider stehen zum Vergleich keine Proben aus der Rebiana Sand-See zur Verfügung. Die Zusammensetzung der Sandproben aus dem Murzuk Erg macht jedoch wahrscheinlich, daß neben den Serirsedimenten, welche gegen die Oberfläche durch eine Kalkverkrustung abgegrenzt sind, ein weiteres, über sie hinwegziehendes, rein äolisch bearbeitetes Material existiert.

Der hier vorgelegte Befund, der in der Hauptzone (kalkige Verbackung der Quarzkörner) keine Dominanz fluviatil bearbeiteter Körner registriert, scheint im Gegensatz zu den Untersuchungen M. Fürsts (1965) zu stehen.

Einen Prozentsatz von über 70 (Probe 431) und über 40 (Abb. 23 und 24, M. Fürst 1965) fluviatil bearbeiteter Körner habe ich nur in Seesandablagerungen, z. B. bei Homs (max. 50 % glänzende Quarzkörner) zählen können. Der scheinbare Gegensatz im Befund ergibt sich jedoch in Wahrheit aus Unterschieden in der Methode:

M. Fürst hat offenbar Kornformung und Kornbearbeitung nicht gesondert betrachtet und die fluviatile Einwirkung vornehmlich aus dem Rundungsgrad abgeleitet. Die Kornoberfläche ist auch in seinen Proben offenbar vornehmlich äolisch bearbeitet. „Es (das Lockermaterial der Serir, Bemerkung des Zitierenden) liegt jetzt auf den die Serir unterlagernden Karbonatgesteinen des Paläozäns und des Untereozäns. Es ist allochthon. Die Bearbeitungsformen von Körnern der 2 und 4 mm Fraktion aus der Hauptzone sind fluviatil

vornehmlich und repräsentieren im allgemeinen den B-Typ Cailleuxs, der in den Fraktionen 2—4 mm dominiert. Jedoch zeigen ihre Oberflächen äolische Mattierung und Feinhämmerung".

Auch in der 1,0 mm Fraktion tragen nach Fürst die Körner äolische Zurundung, wenn auch die „ursprünglich fluviatil entstandene Flächentracht nicht nur erkenntlich, sondern häufig noch dominierend" ist.

Daß die fluviatile Formung bei der Entstehung der Serirsedimente nicht absolut dominierte, hat M. Fürst in seinen Ausführungen über das Vorzeitklima dargelegt.

ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSS

Die von Cailleux begründete morphoskopische Sandanalyse wird in ihrer Grundlage hinsichtlich der Mattierung der Quarzkornoberfläche durch den Wind und der Polierung in marinem und fluviatilem Milieu bestätigt und durch die Trennung von Kornformung und Kornbearbeitung modifiziert.

Die Auffassung Küenens (1961), daß allein „chemical frosting" als Ursache der Quarzkornmattierung anzusehen ist und die Walters (1951), daß sie entscheidend temperaturbedingt ist, wird durch den Nachweis mechanisch erzeugter Mattierung ergänzt.

Die Skulptierung der Quarzkornoberfläche durch Verwitterungsvorgänge wird als eine wichtige Fehlermöglichkeit bei der Auswertung von Sedimenten aus Granitgrus erkannt.

Die Untersuchung belegt, daß zur Klärung von Spezialfragen das Laboratoriumsexperiment auch der geomorphologischen Forschung gemäß ist, wobei nicht in erster Linie die sich ergebenden Probleme, z. B. die Klärung der Vorgänge im molekularen Bereich bei der Oberflächenpolierung des Quarzes interessieren, sondern die Möglichkeit über Form und Oberflächenbeschaffenheit des Sandkornes zum Verständnis der formenden Kräfte des Akkumulationskörpers zu gelangen. Da diese auch Korrelata bestimmter Oberflächenformen sein können, sind Werden und Vergehen der Oberflächenformen kausal-genetischer Betrachtungsweise zugänglich. Der Weg zu diesem Ziel ist zwar gekennzeichnet durch die Methode, aber in erster Linie bestimmt durch die geomorphologische Fragestellung.

Die Bedeutung der Methode liegt nach meiner Auffassung in der Detailuntersuchung. Der Schritt von einer sedimentanalytischen zur geomorphologischen Aussage erfolgt durch den Vergleich des Materialbearbeitungszustandes der äolischen, fluviatilen oder marinen Sedimentkörper. Dies wird belegt durch die Untersuchungen von Probenmaterial aus Europa und der Sahara.

Mit der Verfolgung eines Probenprofils längs des Wadi Bardagué wird der Versuch unternommen, einen Beitrag zur Vertikalgliederung des Tibesti zu leisten. Die Befunde über den Bearbeitungszustand der Sedimente der Serir El Gattusa und der Serir Tibesti werden dahingehend interpretiert, daß die Akkumulation unter ariden Klimaverhältnissen erfolgt. Der Wind war und ist dominierendes Bearbeitungsagens.

Die morphoskopische Sandanalyse erscheint als geeignet zur Charakterisierung der Sedimente eines Untersuchungsgebietes. Sie stellt damit eine Forschungsmethode dar, die Fakten für eine geomorphologische Bestandsaufnahme eines bestimmten Gebietes zu liefern vermag.

LITERATURVERZEICHNIS

Ackermann, M.: Die Umlagerung des Sandes im Seegebiet von Norderney und auf der Insel. Forschungsstelle Norderney. Jahresbericht 1955, Bd. 7, 1956

Anderson, G. E.: Experiments on the rate of wear of sand grains. Journ. Geol. Bd. 34, S. 144—158, 1926

Alimen, H.: Variations granulométriques et morphoscopiques du sable le long de profils dunaires au Sahara occidental. Coll. Intern. C. N. R. S., 1951

Alimen, H.: Roches gréseuses à ciment calcaire du Stampien. Etude pétrographique. Bull. S. G. F. p. 307—329, 1944.

Bagnold, C. H.: The physics of desert dunes and blown sand. London 1938

Bentz. A.: Lehrbuch der angewandten Geologie. Stuttgart 1961.

Beskow, A.: Erdfließen in Strukturböden der Hochgebirge im Lichte der Frosthebung. Geol. För. Förh. 52, S. 622—639, 1930

Cailleux, A.: Les actions éoliennes périglaciaires en Europe. Mémoire de la Société Géol. de France, nouv. Serie 21, Paris 1942

Bond, W. L.: Etch figures of quartz. Z. Krist. 99, S. 488—450, 1938

Cailleux, A.: Les actions éoliennes périglaciaires quaternaires en Europe. Comptes Rend. Som. et Bull. de la Soc. Géolog. France, Set. 5, 1936

Cailleux, A.: Observation à l'article de M. Walter sur les sables éoliens. Rev. Geom. Dyn., 1952

Cailleux, A.: Morphoskopische Analyse der Geschiebe und Sandkörner und ihre Bedeutung für die Paläoklimatologie. Geol. Rundschr. Bd. 40, S. 11—19, 1952

Cailleux, A.: Application à la géographie des méthodes d'etude des sables et des galets. Universidade do Brasil; Curso de altos estudos geograficos, 1961

Cailleux, A. et Tricart, J.: Initation a l'étude des sables et des galets. Centre de documentation universitaire, 1963

Capoy-Rey, R. und Gremion, M.: Remarques sur quelques sables sahariennes. Traveaux de l'Institut de Recherches Sahariennes. Université d'Alger T 23, p. 153—163, 1964

Curry, J. R. und Griffiths, J. C.: Sphericity and roundness of quarts grains in Sediments. Bull. Geol. Am. Bd. 66, S. 1075—1095, 1955

Dechend, W.: Untersuchung der Kornverteilung von Strandsanden der ostfr. Inseln. (3. Bericht zur Sandwanderung an der Küste der Deutschen Bucht) 1948

Drescher-Kaden, F. K.: Die Feldspat-Quarz-Reaktionsgefüge der Granite und Gneise. Berlin 1948, Springer Verlag

Dubief, J.: Les vents de sable dans le Sahara Francais. Traveaux de l'Institut de Recherches Sahariennes, 1943

Dücker, A.: Die Periglazialerscheinungen im holsteinischen Pleistozän. Gött. Geogr. Abh. Nr. 16, 1954

Dücker, A.: Frosteinwirkung auf bindige Böden. Straßenbau Jahrbuch, 1939/40

Dücker, A.: Uber Strukturböden im Riesengebirge. Ein Beitrag zum Bodenfrost- und Lößproblem. Ztschr. Dtsch. Geol. Ges. Bd. 89, 1937

Edelmann, C. H.: Ergebnisse der sedimentpetrologischen Forschung in den Niederlanden und den angrenzenden Gebieten. Geol. Rundschr. Bd. 29, S. 1932—1937, 1938

v. Engelhardt, W.: Untersuchungen über die Schleifhärte des Quarzes und anderer fester Stoffe in verschiedenen Flüssigkeiten. Nachr. der Akad. der Wiss. Göttingen, Math.-phys. Kl., 1942

Freise, F. W.: Untersuchung von Mineralien auf Abnutzbarkeit bei Verfrachtung im Wasser. Min. u. Petr. Mitt. Bd. 41, N. S., S. 1—7, 1931

Fürst, M.: Bau und Entstehung der Serir Tibesti. Unveröffentlichtes Manuskript 1965

Fürst, M.: Hamada-Serir Grarets. Unveröffentlichtes Manuskr. 1965

Gry, H.: Eine Methode zur Charakterisierung der Kornverteilung klastischer Sedimente. Geol. Rundschr., Bd. 29, S. 176—195, 1938

Gotz, F. W. P.: Sahara Sand im Rauhreif. Das Wetter, vol. 57, 1940

Hagedorn, H.: Die morphologische Wirkung der Sturmflut vom 16./17. Februar 1962 auf die Küste bei Duhnen im Elb-Weser-Winkel. Peterm. Mitt., 2. Quartalsheft, 1965

Harrassowitz, H.: Laterit. Berlin 1926

Hecht, F., Fürst, M. und Klitzsch, E.: Zur Geologie von Libyen. Geol. Rundschr., Bd. 53, S. 413—470, 1963

Heimann, R.: Untersuchungen zur Morphologie und Reaktionsanisotropie von Quarzeinkristallen bei der Auflösung in F_2H_2 und der Reaktion in Alkali-fluoridschmelzen. Diplomarbeit der Math.-Nat. Fakultät der Freien Universität Berlin, 1963

Hintze, C.: Handbuch der Mineralogie. Berlin 1910

Hofmann, F.: Ein experimentelles Verfahren zur Bestimmung der Kornform von Sanden. Ecl. Geol. Helv., Bd. 49, 1956

Hövermann, J. und Poser, H.: Morphometrische und morphologische Schotteranalysen. Proc. Third. Intern. Congress of Sedimentology Groningen-Wageningen, 1951

Hövermann, J.: Vorläufiger Bericht über eine Forschungsreise ins Tibesti-Massiv. Die Erde, 94. Jg., Heft 2, S. 126—135, 1963

Kleber, W.: Über die topochem. Adsorptionstheorie der Einkristallätzung. Ztschr. f. Elektrochemie, 62/5, 1958

Kleber, W. und Himmel, H.: Ätzversuche an Konkavkörpern. N. Jb. Mineral., Beilagenbd. 69 u. 70, 1935 u. 1936

Krinsley, D. und Takahashi, T.: Surface Textures of Sand Grains: An Application of Electron Microscopy. Science, V. 135, Seite 923—925, 1962

Krinsley, D. und Takahashi, T.: Surface Textures of Sand Grains — an Application of Electron Microscopy: Glaciation. Science, V. 138, Seite 1262—1264, 1962

Kölbl, L.: Über die Aufbereitung fluviatiler und äolischer Sedimente. Min. und Geol. Mittl., Bd. 41, S. 129—141, 1931

Köster, E.: Granulometrische und morphometrische Meßmethoden an Mineralkörnern, Steinen und sonstigen Stoffen. Stuttgart 1964

Knight, S. H.: Eolian abrasion of quartz grains. Geol. Soc. Am. Bull., Bd. 35, S. 107—108, 1924

Kuenen, Ph.: Experimental abrasion and eolian action. Journ. Geol. Bd. LXVIII, 1960

Kuenen, Ph. und Perdock, W. G.: Experiments of frosting and defrosting of sand. Journ. Geol., Bd. 70, 1962

Lincio, G.: Auflösungs- und Wachstumskörper des Quarzes. Beitr. zur Kristallographie, S. 87—101, 1914—1918

Lindner, A.: Statistische Methoden für Naturwissenschaftler, Mediziner und Ingenieure. Stuttgart 1960

Magers, W. u. Wagner, E.: Untersuchungsergebnisse von Gießereiquarzsanden der BR., Düsseldorf 1952

Meckelein, W.: Forschungen in der zentralen Sahara. Klimageomorphologie. Braunschweig 1959

Meyer, O. und Penfield, S. L.: Results by etching a sphere and cristall of quartz with hydrofluorid acid. Trans. Conn. Acad., Vol. VIII, 1889

Mortensen, H.: Der Formenschatz der nordchilenischen Wüste. Ein Beitrag zum Gesetz der Wüstenbildung. Abhl. d. Ges. d. Wis. Göttingen, Math.-phys. Kl., N. F., Bd. XII, Berlin 1927

Müller, G.: Einführung in die Grundlagen der Sedimentpetrographie. Stuttgart 1965

Monod, Th.: Majebat al-Koubra. Mémoires de l'Institut Francais D'Afrique noire. Nr. 52, 1958

Pettijohn, F. J.: Sedimentary rocks. New York 1949

Poltev, N. F.: Die Veränderung der granulometrischen Zusammensetzung von Sandböden unter Einwirkung von Salzlösungen und des Gefrier-Auftau-Prozesses (russisch). Merzlotnye issledovanija U. VI, S. 199—206, 1966

Poser H. und Hövermann, J.: Beiträge zur morphometrischen und morphologischen Schotteranalyse. Abh. d. Braunschw. Wiss. Gesellsch., Bd. IV, S. 12—36, 1952

Poser, H.: Äolische Ablagerungen und Klima des Spätglazials in Mittel- u. Westeuropa. Naturw., 35, S. 269—276 u. 307—312, 1948

Schneider, H. E. und Cailleux, A.: Signification géomorphologique des formes des grains de sables des Etats Unis. Ztsch. f. Geom. NF, Bd. 3, H. 2, S. 114—125, 1959

Schnitzer, W. A.: Die Quarzkornfarbe als Hilfsmittel für die stratigraphische und paläographische Erforschung sandiger Sedimente. Erlanger Geol. Abh. H. 23, 1957

Schoklitsch, A.: Über Schleppkraft und Geschiebebewegung. Leipzig 1914

Sirk, H.: Mathematik für Naturwissenschaftler und Chemiker. Dresden und Leipzig 1956

Smekal, W.: Molekulare Festigkeit und technische Festigkeit. Nova Acta Leopold. N. F. 11, 1942

Sokolow, N. A.: Die Dünen. Berlin 1894

Talbot J. H. und Kennes, E. B.: Effect of grainding of quartz partikel. Natur, Bd. 197, 1963

Thiel, G. A.: The relative resistance to abrasion of mineral of sand size. J. Sed. Petrol., Bd. 10, S. 103—125, 1940

Tricart, J. und Schaeffer, R.: L'indice d'émoussé des galets, moyen d'étude des systémes d'érosions. Rev. Géom. Dyn. 1, 1950

Udden, J. A.: The mechanical composition of wind deposits. A. L. Pub. 1898. Ref. N. Jh. f. Mineral. ect. 1900

Walter, W.: Neue morphologische-physikalische Erkenntnisse über die Flugsande und Dünen. Rhein-Main. Forschg. H. 31, S. 1—34, 1951

KARTENVERZEICHNIS

Topographische Karten im Maßstab 1:25 000

3128 Suderburg

3228 Sprakeusehl

Croquis de l'A. E. F. et du Cameroun. Maßstab 1:200 000. ND-34-XXI Oum Chalouba. Institut Géographique National Paris, Annexe de Brazzaville. 1952

Minute photogrammetrique, Maßstab 1:200 000. Dressée à la direction des mines et de la géologie de l'A. E. F.
NF-33-XVII Aray
NF-33-XI Bardai

Topographic map of United Kingdom of Libya, Maßst. 1:2 Mill., 1962

Für die Abb. I wurde ein Luftbild im Maßstab 1:100 000 verwandt.

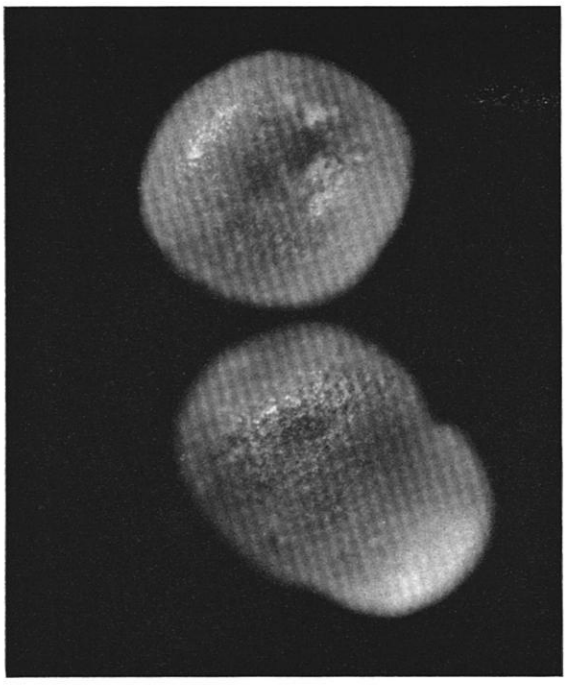


Abb. 9 0,25 mm Fraktion, Vergr. 96 fach, Oberflächenskulptierung durch den Wind, Barchansand (Largeau, Tschad).

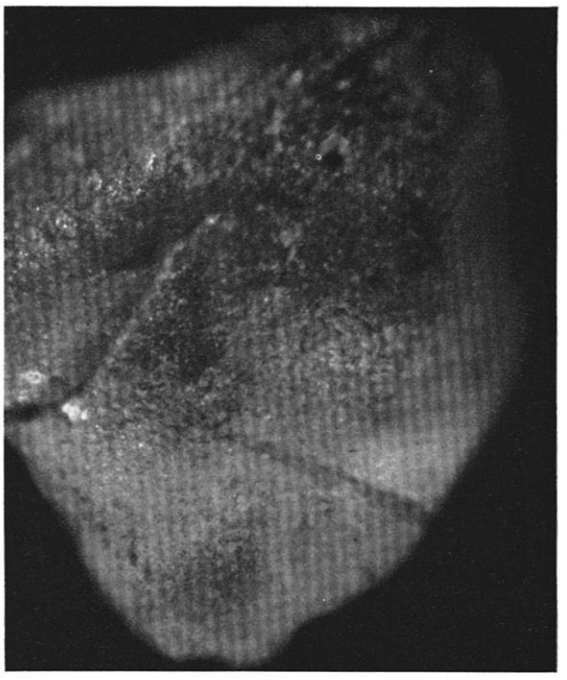


Abb. 10 0,5 mm Fraktion, Vergr. 96 fach, Oberflächenskulptierung durch Verwitterungsvorgänge, Granitgrus (Depression d'Ediouay Tibesti).

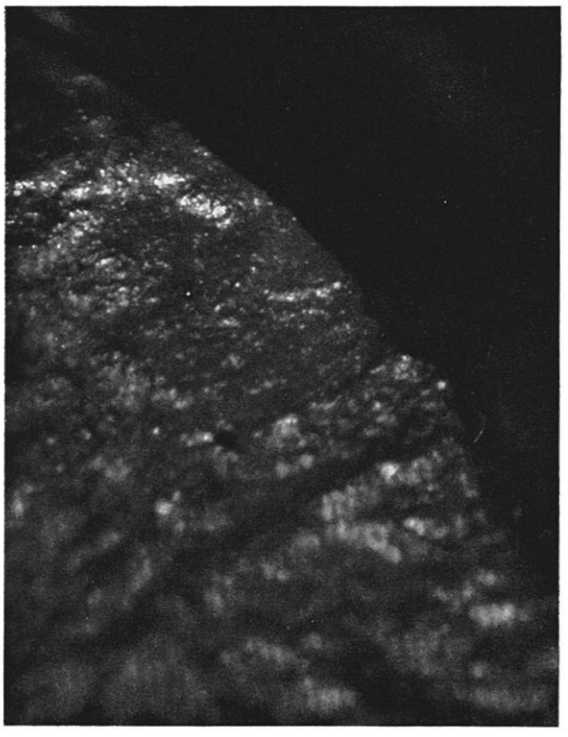


Abb. 11 0,75 mm Fraktion, Vergr. 112,5 fach. Aus Granitgrus isoliertes Quarzkorn (Depression d'Ediouay Tibesti). Scharfkantige Verschneidung der Flächen. Die Grate sind wellenschliffartig untergliedert.

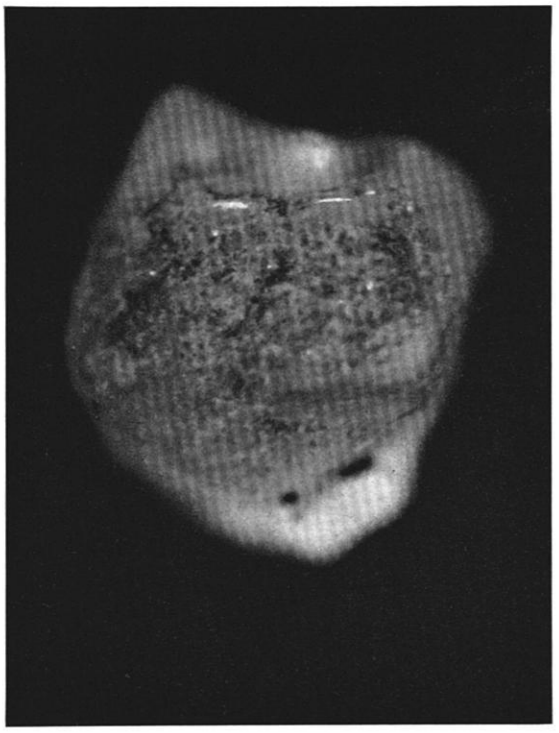


Abb. 12 0,25 mm Fraktion, Vergr. 50 fach, Oberflächenskulptierung eines Quarzkornes; wahrscheinlich durch chemische Einflüsse. Fundort: Bardagué-Alluvionen im Oberlauf, Tibesti.

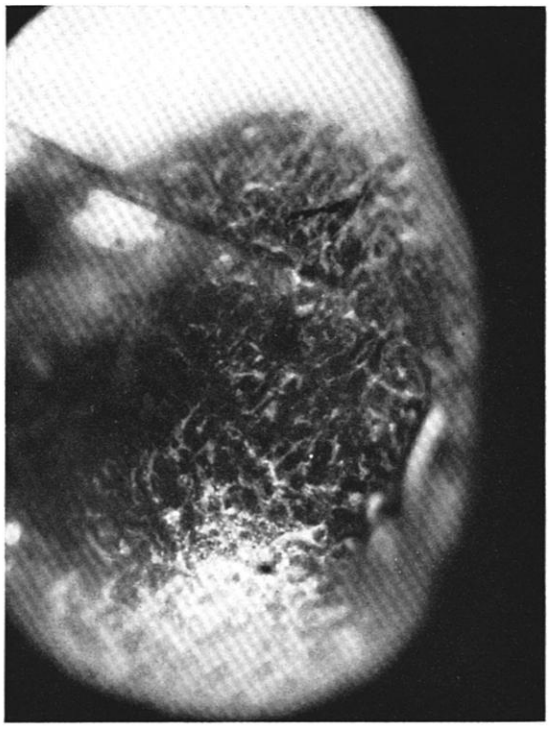


Abb. 17 0,5 Fraktion, Vergr. 112,5 fach. Beginnende äolische Perkussierung eines fluviatil bearbeiteten Quarzkornes. (Glazifluviatiles Sediment mit rezenter fluviatiler Bearbeitung, Lüneburger Heide). Nach 60 stündiger äolischer experimenteller Bearbeitung.

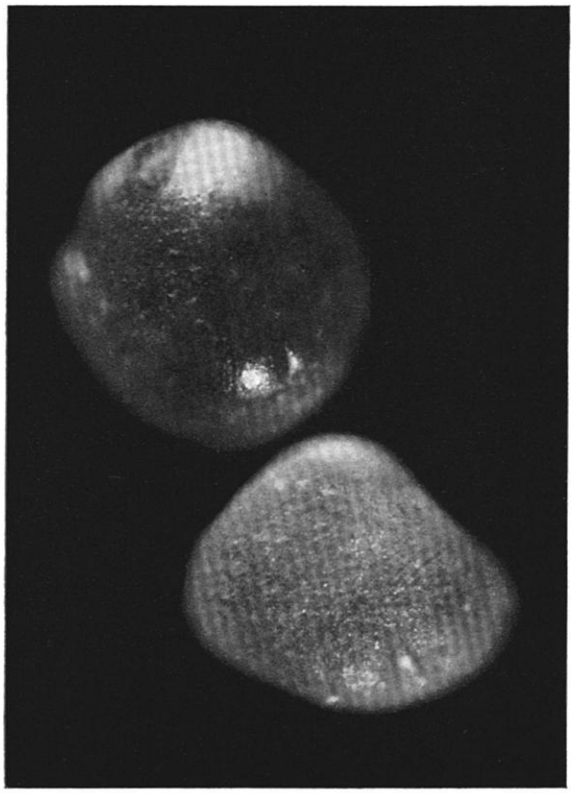


Abb. 13 0,25 mm Fraktion, Vergr. 48 fach. Die Abbildung zeigt die Oberfläche eines windbearbeiteten Kornes (rechts) und die eines nach 250 stündiger „mariner" Bearbeitung. Auf letzterem sind die Spuren äolischer Bearbeitung noch sichtbar, aber die Zahl der Perkussionstrichter ist zugunsten glänzender Flächenteile zurückgegangen. Dies äußert sich auch in der Transparenz des Kornes. Die Transparenz ist keine zufällige Erscheinung eines besonders ausgewählten Kornes. Die auf dem windbearbeiteten Korn umrandete Zone stellt keinen Schatten dar, sondern den hindurchschimmernden dunklen Untergrund. Die aufgerauhte mattierte Oberfläche maskiert nur die Transparenz auch dieses Kornes.

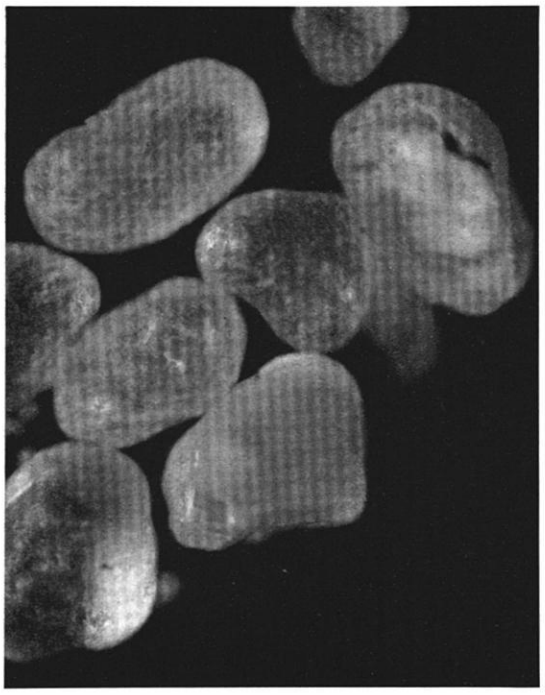


Abb. 14 0,25 Fraktion, Vergr. 50 fach. Ausschnitt aus der Barchansandprobe vor der experimentellen „marinen" Bearbeitung.

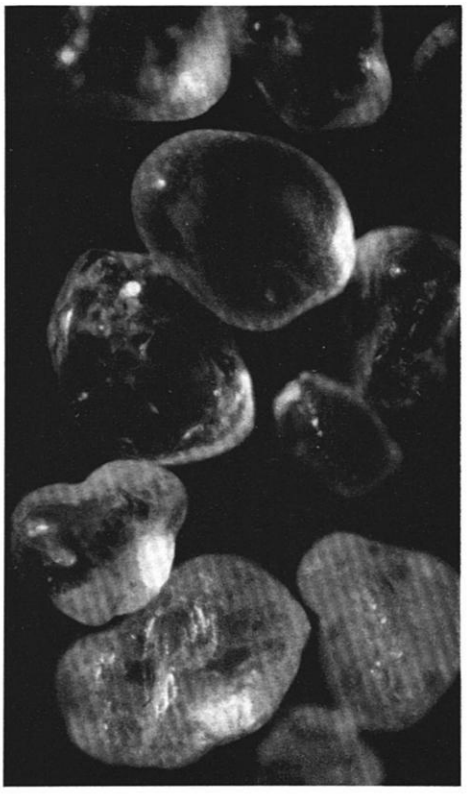


Abb. 15 0,25 Fraktion, Vergr. 50 fach. Ausschnitt aus der selben probe von Bild 14 nach 400 stündiger „mariner" Bearbeitung.

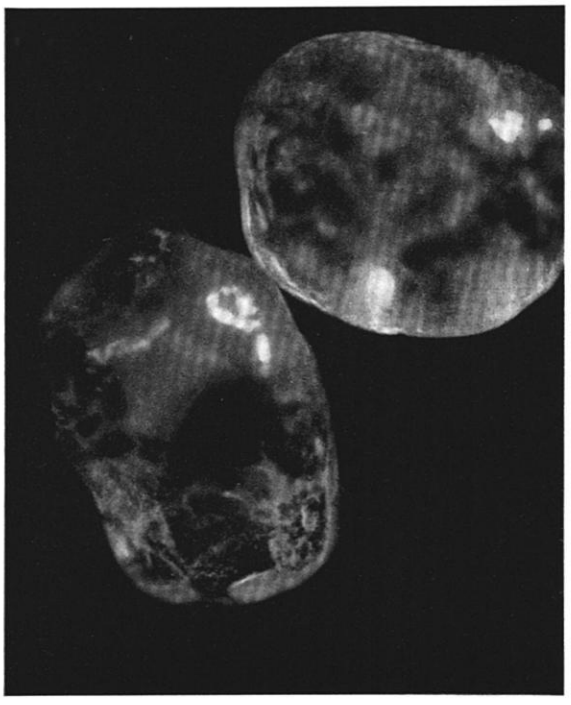


Abb. 16 0,25 Fraktion, Vergr. 96 fach.
Quarzkörner nach 400 stündiger „mariner" Bearbeitung. Der „marine" Habitus der Oberfläche ist fast erreicht (Vergl. Abb. 3 und 4). Nur am linken Korn ist in der Schlagspur Mattierung konserviert. Da dies eine allgemeine Erscheinung ist, sind die weniger exponierten Oberflächenteile besonders aufmerksam zu studieren.

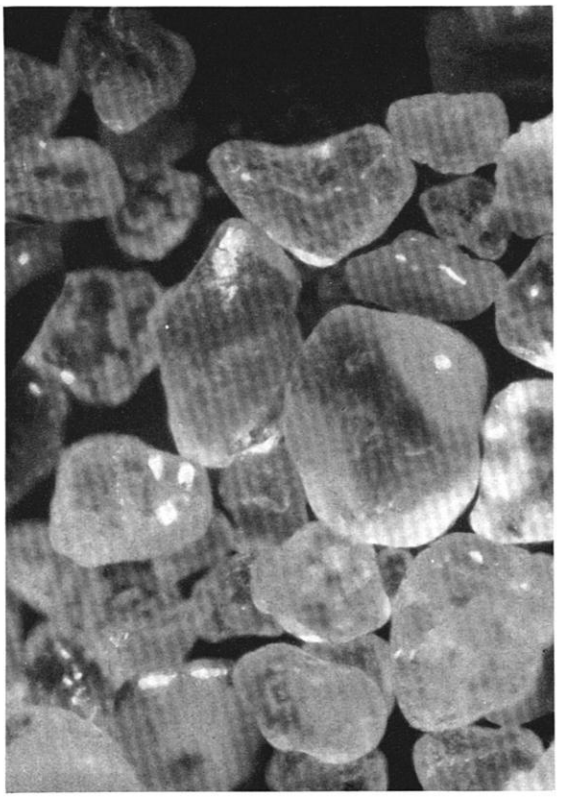


Abb. 18 Vergr. 40 fach. Zufälliger Probenausschnitt (Seesand, Libysche Küste bei Homs) vor der experimentellen äolischen Bearbeitung.

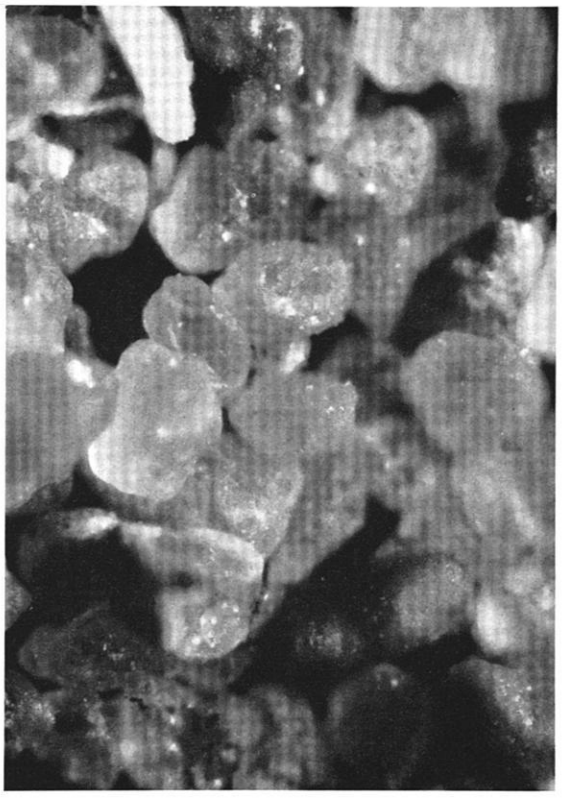


Abb. 19 Vergr. 40 fach. Zufälliger Ausschnitt aus gleicher Probe (links) nach 85 stündiger experimenteller äolischer Bearbeitung.

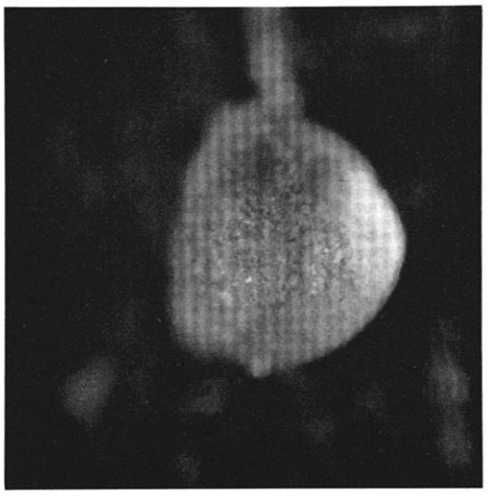


Abb. 20 Vergr. 96 fach. Perkussionstrichter mattieren die Quarzkornoberfläche eines vormals glänzend-polierten Kornes nach 85 stündiger experimenteller äolischer Bearbeitung.

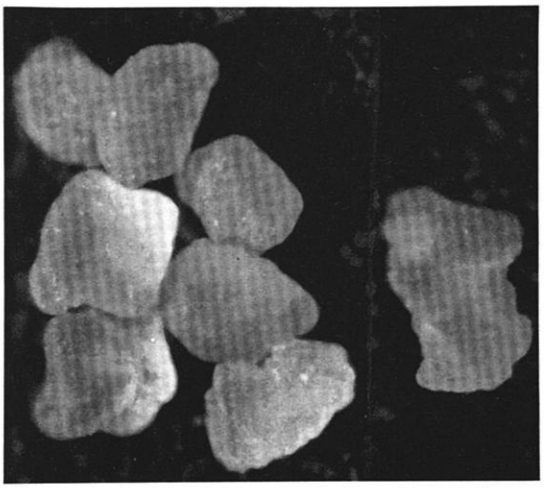


Abb. 21 Vergr. 40 fach. Ungerundete mattierte Quarzkörner entstanden aus ungerundet-glänzenden nach 85 stündiger experimenteller äolischer Bearbeitung.

Abb. II

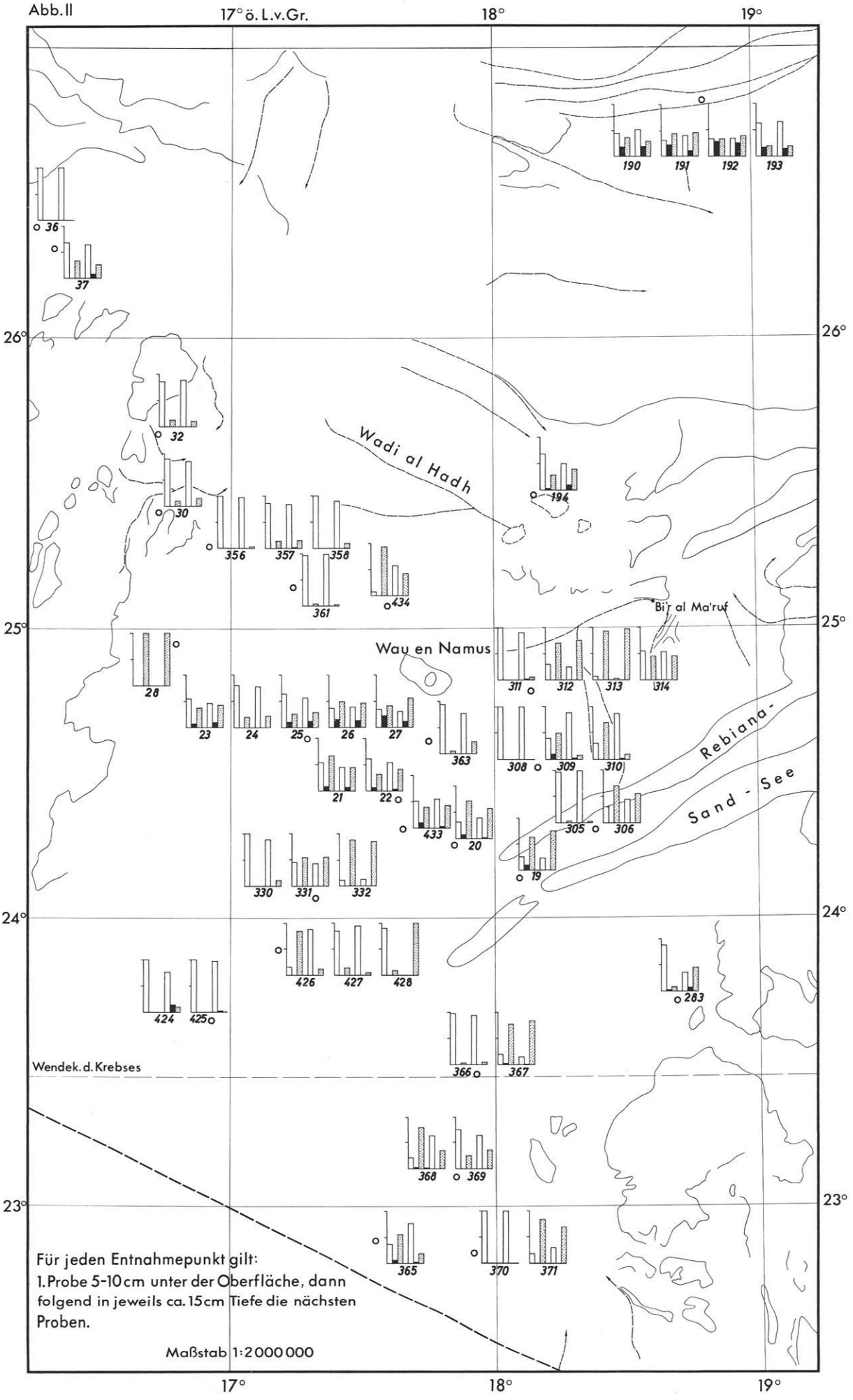
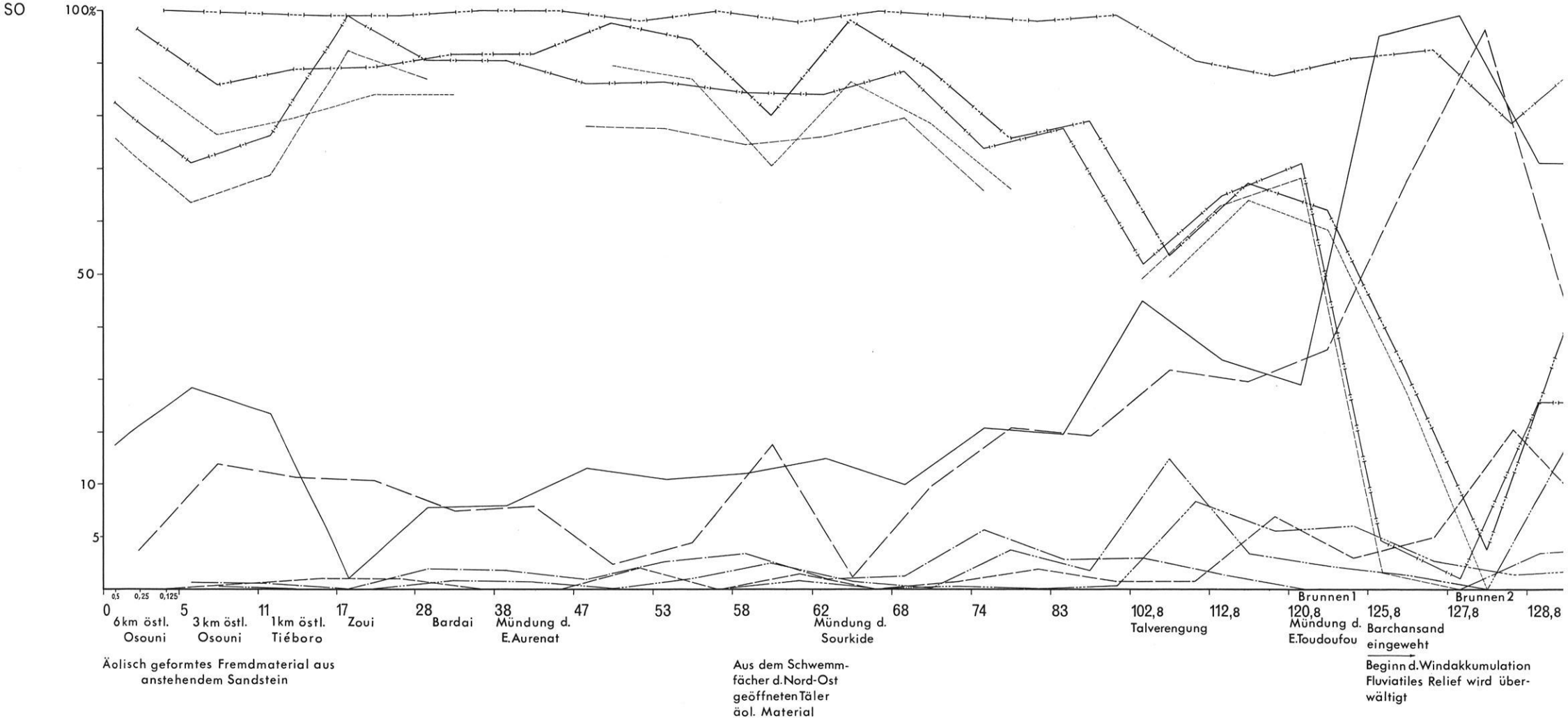
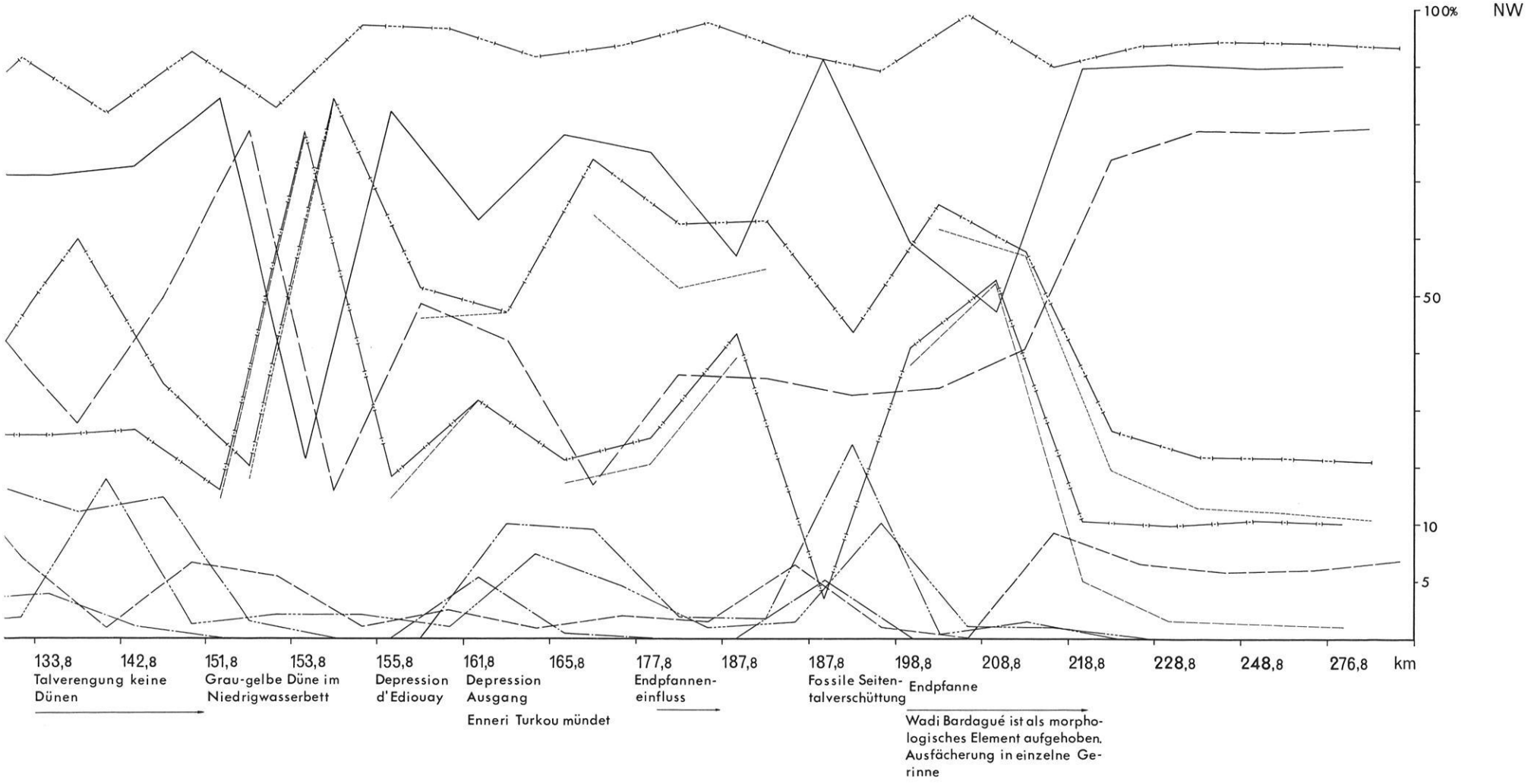

17° ö. L.v.Gr.
18°
19°
26°
25°
24°
23°
Wadi al Hadh
Wau en Namus
Bir al Ma'ruf
Rebiana-
Sand-See
Wendek. d. Krebses
190
191
192
193
36
37
32
30
194
356
357
358
361
434
28
23
24
25
26
27
363
311
312
313
314
308
309
310
21
22
433
20
305
306
19
330
331
332
426
427
428
424
425
283
366
367
368
369
365
370
371
Für jeden Entnahmepunkt gilt:
1. Probe 5-10 cm unter der Oberfläche, dann folgend in jeweils ca. 15 cm Tiefe die nächsten Proben.
Maßstab 1:2000000

Abb. III

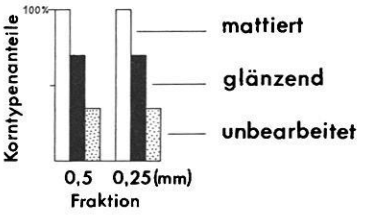

SO
100%
50
10
5
0,5
0,25
0,125
0
5
11
17
28
38
47
53
58
62
68
74
83
102,8
112,8
120,8
125,8
127,8
128,8
Brunnen 1
Brunnen 2
6 km östl. Osouni
3 km östl. Osouni
1 km östl. Tiéboro
Zoui
Bardai
Mündung d. E. Aurenat
Mündung d. Sourkide
Talverengung
Mündung d. E. Toudoufou
Barchansand eingeweht
Äolisch geformtes Fremdmaterial aus anstehendem Sandstein
Aus dem Schwemmfächer d. Nord-Ost geöffneten Täler äol. Material
Beginn d. Windakkumulation
Fluviatiles Relief wird überwältigt


100%
NW
50
10
5
133,8
142,8
151,8
153,8
155,8
161,8
165,8
177,8
187,8
187,8
198,8
208,8
218,8
228,8
248,8
276,8
km
Talverengung keine Dünen
Grau-gelbe Düne im Niedrigwasserbett
Depression d'Ediouay
Depression Ausgang
Enneri Turkou mündet
Endpfannen-einfluss
Fossile Seiten-talverschüttung
Endpfanne
Wadi Bardagué ist als morphologisches Element aufgehoben. Ausfächerung in einzelne Gerinne

LEGENDE ZU DEN PROFILEN Abb. III

		Korngröße (mm)	
———	rund-mattiert	0,5	Fraktion (mm)
— — — —	"	0,25	"
— — — — — —	"	0,125	"
—·—·—	rund-glänzend	0,5	
—··—··—	"	0,25	"
—···—···—	"	0,125	"
—+—+—+—	ungeformt	0,5	
—+··—+··—	"	0,25	"
—+···—+···—	"	0,125	"
— — — — — —	ungeformt mattiert	} in % der Ungeformten Quarz Körner	
- - - - - -	" "		

LEGENDE ZU ABB. I u. II



Zu Abb. I
Proben aus ca. 40 cm Tiefe,
außer X

LEGENDE ZU DEN MORPHOGRAMMEN

——— rund mattiert

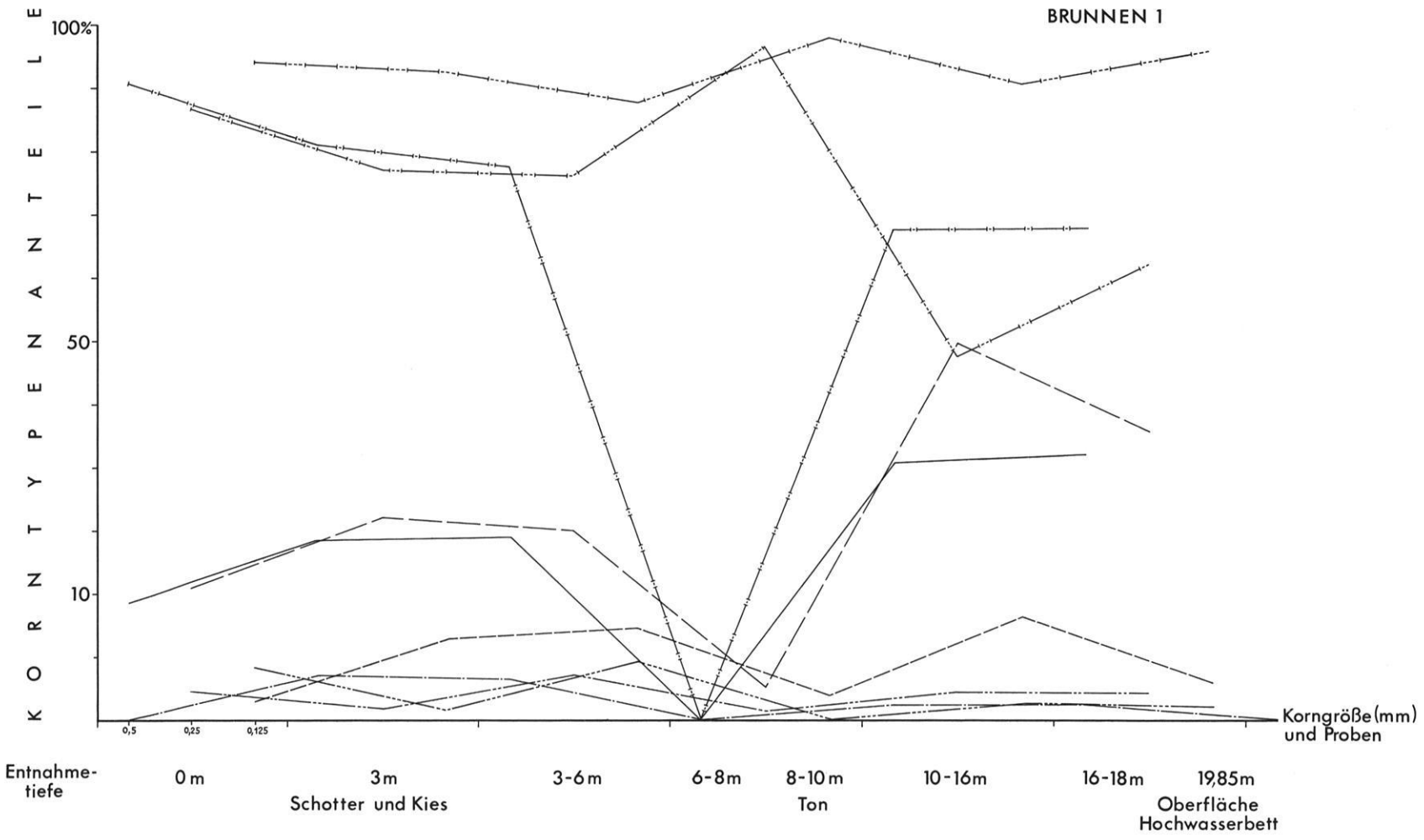
— — — — — — rund glänzend

····· ungeformt

Korntypenanteile

Gewichts %

Korngrößenfraktion


BRUNNEN 1
KORNTYPENANTEILE
100%
50
10
0,5
0,25
0,125
Korngröße (mm) und Proben
Entnahme-tiefe
0 m
3 m
3-6 m
6-8 m
8-10 m
10-16 m
16-18 m
19,85 m
Schotter und Kies
Ton
Oberfläche Hochwasserbett

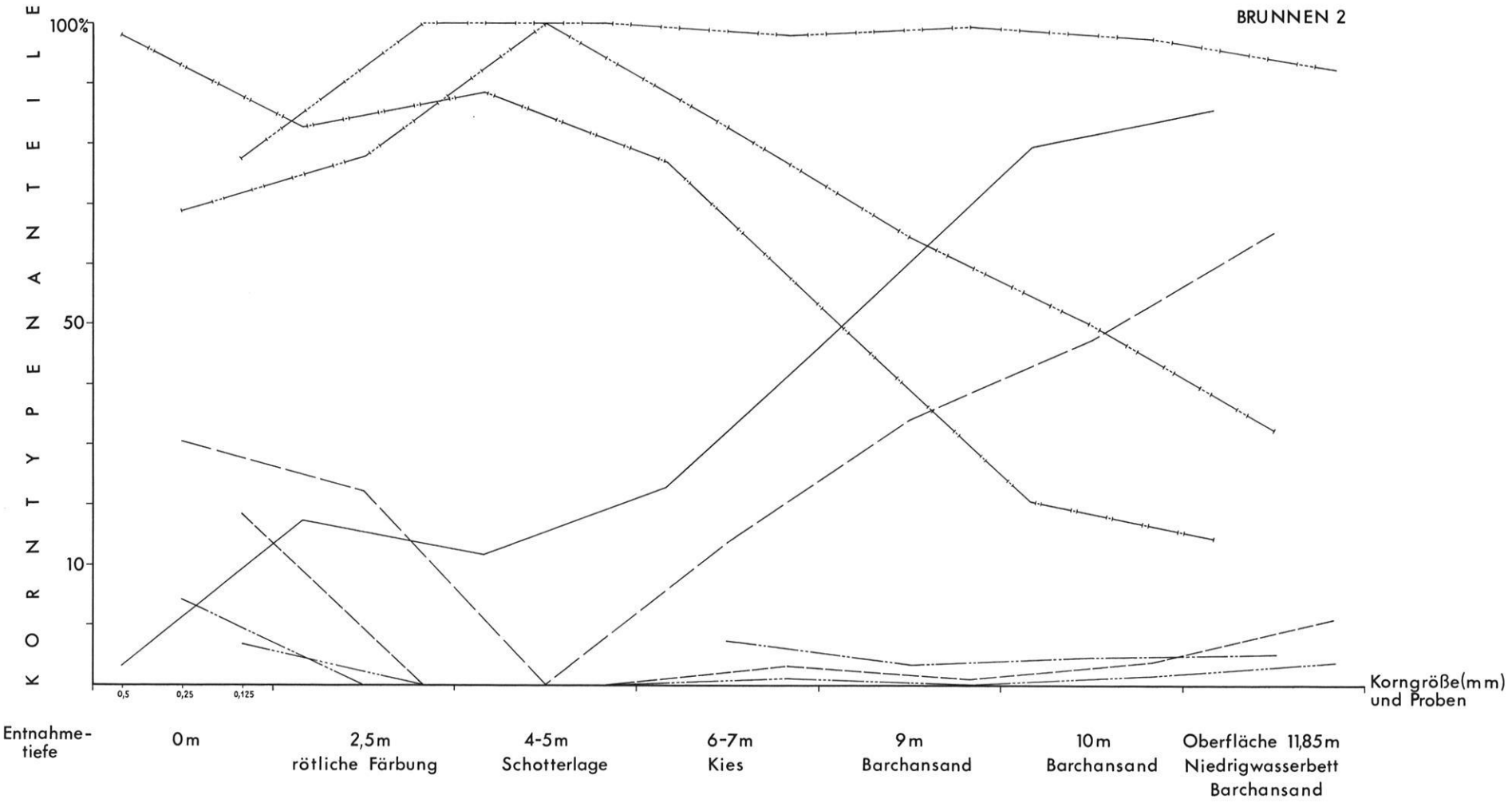

BRUNNEN 2
KORNTYPENANTEILE
100%
50
10
0,5
0,25
0,125
Korngröße(mm)
und Proben
Entnahme-
tiefe
0m
2,5m
rötliche Färbung
4-5m
Schotterlage
6-7m
Kies
9m
Barchansand
10m
Barchansand
Oberfläche 11,85m
Niedrigwasserbett
Barchansand

Abb. III

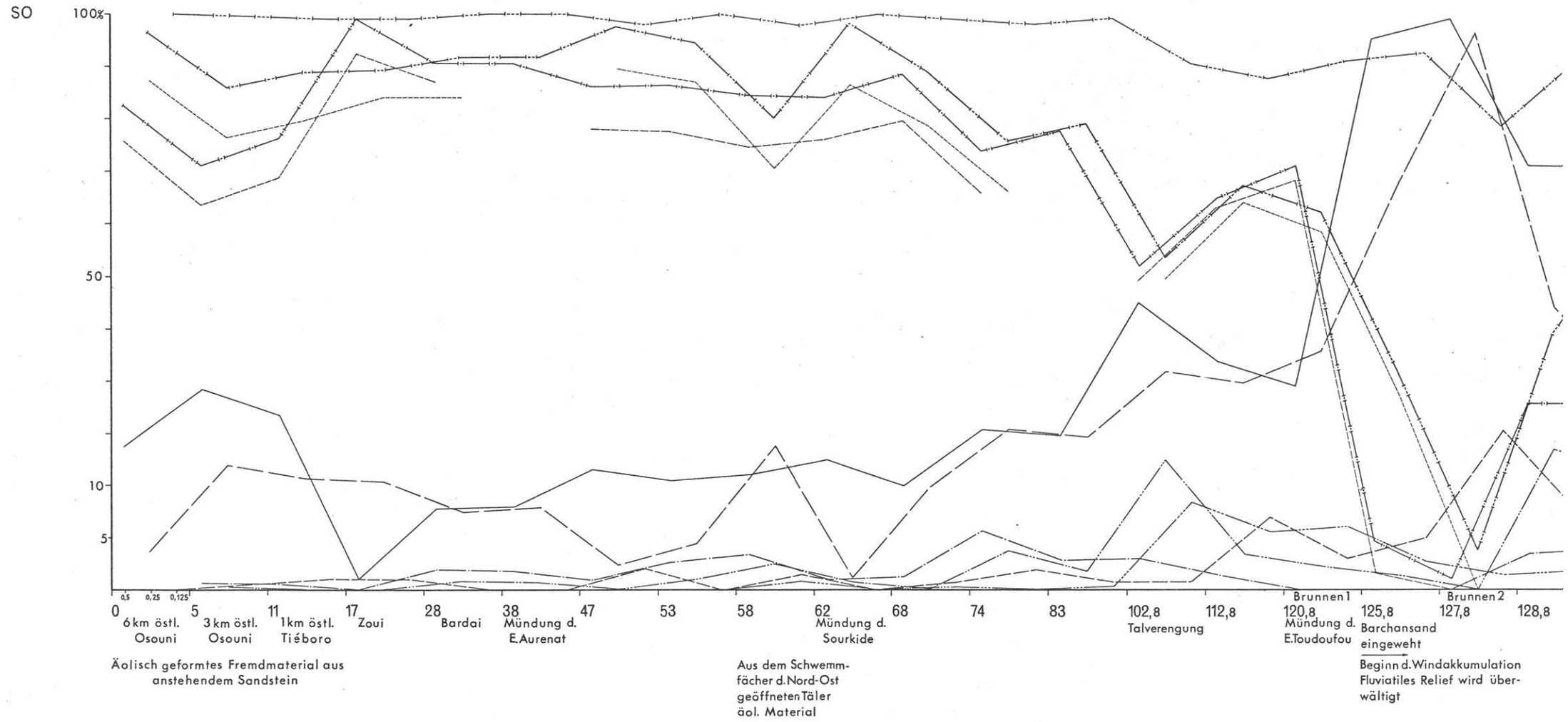
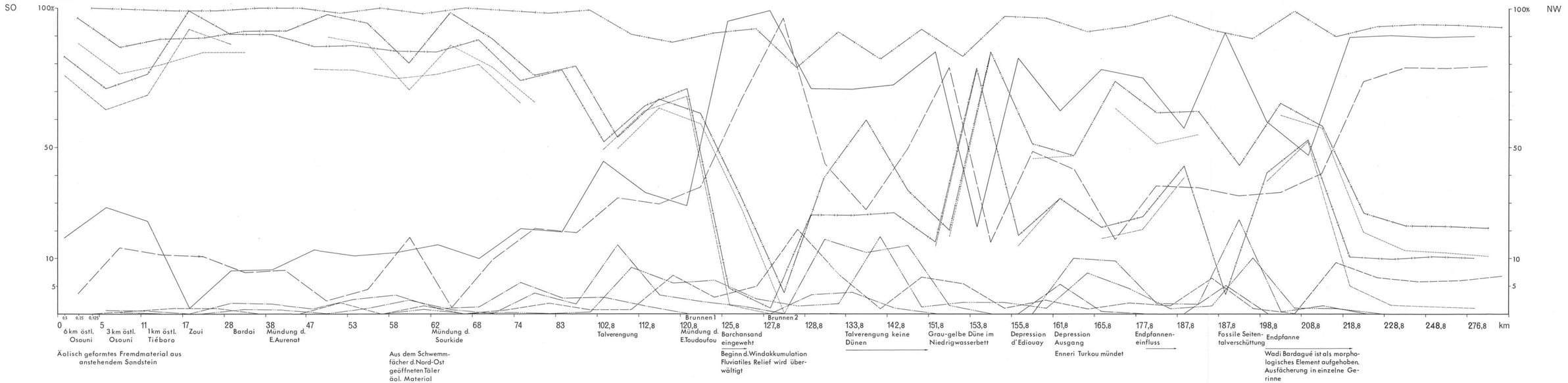

SO
100%
50
10
5
0,5
0,25
0,125
0
5
11
17
28
38
47
53
58
62
68
74
83
102,8
112,8
120,8
125,8
127,8
128,8
Brunnen 1
Brunnen 2
6 km östl. Osouni
3 km östl. Osouni
1 km östl. Tiéboro
Zoui
Bardai
Mündung d. E. Aurenat
Mündung d. Sourkide
Talverengung
Mündung d. E. Toudoufou
Barchansand eingeweht
Äolisch geformtes Fremdmaterial aus anstehendem Sandstein
Aus dem Schwemmfächer d. Nord-Ost geöffneten Täler äol. Material
Beginn d. Windakkumulation
Fluviatiles Relief wird überwältigt

Abb. III


SO
NW
100%
50
10
5
0,5
0,25
0,125
0
6 km östl. Osouni
5
3 km östl. Osouni
11
1 km östl. Tiéboro
17
Zoui
28
Bardai
38
Mündung d. E.Aurenat
47
53
58
62
Mündung d. Sourkide
68
74
83
102,8
Talverengung
112,8
Brunnen 1
120,8
Mündung d. E.Toudoufou
125,8
Barchansand eingeweht
Brunnen 2
127,8
128,8
133,8
Talverengung keine Dünen
142,8
151,8
Grau-gelbe Düne im Niedrigwasserbett
153,8
155,8
Depression d'Edjouay
161,8
Depression Ausgang
Enneri Turkou mündet
165,8
177,8
Endpfannen-einfluss
187,8
187,8
Fossile Seiten-talverschüttung
Endpfanne
198,8
208,8
218,8
228,8
248,8
276,8
km
Äolisch geformtes Fremdmaterial aus anstehendem Sandstein
Aus dem Schwemm-fächer d. Nord-Ost geöffneten Täler äol. Material
Beginn d. Windakkumulation
Fluviatiles Relief wird über-wältigt
Wadi Bardagué ist als morpho-logisches Element aufgehoben. Ausfächerung in einzelne Ge-rinne