

**Silikatkarst in Nord- und Ostniger -  
Einbindung der Verkarstung in die tertiäre und quartäre  
Landschaftsgeschichte**

Horst Hagedorn und Barbara Sponholz, Würzburg

***Zusammenfassung***

*Im Nordosten der Republik Niger sind Karstformen in Sandsteinen, Silcretes, Eisenkrusten und im Kristallin weit verbreitet. Aufgrund geomorphologischer Untersuchungen und mikromorphologischer Analysen läßt sich eine echte Verkarstung im Sinne lösungsbedingter Reliefformung nachweisen. Untersuchungen an Dünnschliffen und rasterelektronenmikroskopische Analysen von Quarzkornoberflächen zeigen extrem starke Kornkorrosion in den äußeren Probenbereichen (Wandungen von Karstformen) und allgemein starke Spuren von Kieselsäuremobilisierung. Die Ausfällung von Kieselsäure auf den Quarzkörnern kann bis zur Neukristallisation von Quarz reichen (Djado, Stufe von Bilma) oder nur als amorpher Überzug ausgebildet sein (Massive von Termit und Koutous). Die Gesamtheit der Befunde deutet auf eine Hauptphase der Verkarstung im frühen Tertiär hin, die von weiteren Lösungsphasen im jüngeren Tertiär und wahrscheinlich auch im Quartär gefolgt wird. Die jeweils über weite Räume ähnlichen Befunde lassen eine Abhängigkeit des Verkarstungsgeschehens von den paläoklimatischen Bedingungen vermuten; vor allem durch die Ausbildung eines unterirdischen Entwässerungs- und Hohlraumsystems sind enge Wechselbeziehungen zwischen Karstformenschatz und der Entwicklung der übrigen Reliefelemente gegeben.*

***Summary***

*In the northeastern part of the Republic of Niger karstic features in sandstones, silcretes, ironcrusts and cristalline rocks occur very commonly. On the base of geomorphological field studies and micromorphological analyses real karst forming caused by rock dissolution is verified. Analyses of thin sections and scanning electron microscopy of quartz grain surfaces show extreme corrosion in the exterior parts of the samples and an important mobilisation of silica. Precipitation of silica on quartz grains may reach the state of recrystallisation of quartz (Djado, cuesta of Bilma) or of only amorpheous*

*silica coatings (massifs of Termit and Koutous). The results indicate a main period of karst formation during early Tertiary, followed by others during late Tertiary and Quaternary. The widespread distribution of similar results indicates the dependence of karstification on palaeoclimatic conditions; the subterranean drainage and cave systems cause a significant dependence between karst and the development of other landforms.*

### **Résumé**

*Dans la partie nord-est de la République du Niger des phénomènes karstiques sont très fréquents dans des grès, des silcretes, des croutes ferrugineuses et dans le socle cristallin. A la base des études géomorphologiques et micromorphologiques une vraie karstification (modèle du relief par des processus de dissolution) est vérifiée. L'analyse des lames minces et des grains de quartz sous le microscope électronique à balayage montre une corrosion extrême dans les parties extérieures des échantillons et une forte mobilisation de la silice.*

*La précipitation de silice sur les grains peut arriver à la néocristallisation de quartz (Djado, Falaise de Bilma) ou simplement à une pellicule de silice amorphe entourant les grains (Massifs de Termit et de Koutous). L'ensemble des résultats indique une période principale du modèle karstique pendant le Tertiaire inférieur, succédée par d'autres phases de karstification pendant le Tertiaire supérieur et le Quaternaire. Selon la répartition des résultats pareils une dépendance de la karstification des conditions paléoclimatiques semble probable; le drainage souterrain et les cavités causent une forte dépendance entre le karst et le développement des autres éléments du relief.*

### **Einführung**

Mehrere Forschungsreisen nach Niger während der letzten Jahre haben eine weite Verbreitung karsttypischer Formen in der südlichen zentralen und der südlichen Sahara sowie im Sahel gezeigt. Dabei treten diese Karstphänomene in gemeinhin als "nicht löslich" geltenden Gesteinen auf, vor allem in kambrischen und mesozoischen Sandsteinen (Djado, Stufe von Bilma, Stufe von Tiguidit und Massif de Koutous), in Silcretes und in tertiären Eisenkrusten (Massif de Termit). Auch Karstvorkommen im Kristallin des Air-Gebirges und des Damagaram wurden beobachtet. Aufgrund dieses petrographischen Aspektes der Karstverbreitung reiht sich die Untersuchung in die Diskussion um "Karst-" oder "Pseudokarst-"Erscheinungen in silikatischen Gesteinen ein. Sie ist damit in enger Verbindung mit Arbeiten zum Verwitterungsgeschehen an diesen Materialien zu sehen, das unter anderem Gegenstand der umfassenden Untersuchung von KLAER (1956) war.

Aus der weiten Verbreitung der Karstformen und aus dem bis zu 3 Vol.-% erreichenden Hohlraumanteil in den am stärksten verkarsteten Gebieten ergeben sich

weitreichende Konsequenzen für die Beurteilung der hydrologischen Situation im Untersuchungsraum. Vor dem Hintergrund der aktuellen, ariden bis semiariden Klimabedingungen und angesichts der umfangreichen Förderung fossiler Grundwasser ist es von Interesse, nähere Kenntnis über die Verkarstungsphänomene in silikatischen Gesteinen zu gewinnen.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sei für die finanzielle Förderung des Forschungsvorhabens an dieser Stelle nochmals gedankt.

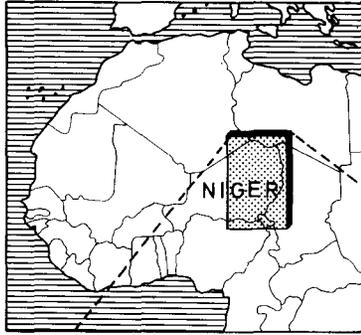
### Geomorphologische Untersuchungen

Die Untersuchungsgebiete, in denen die nachfolgend dargestellten Befunde gewonnen wurden, liegen im Nordosten der Republik Niger (vgl. Abb. 1). Im wesentlichen handelt es sich um isoliert aufragende Schichtstufenkomplexe innerhalb des Erg du Ténéré/Erg de Bilma. Die Erhebungen lehnen sich an grob NW-SE-gerichtete, mesozoische Störungssysteme an. Allgemein zeigen die Schichten ein schwaches Einfallen nach Osten.

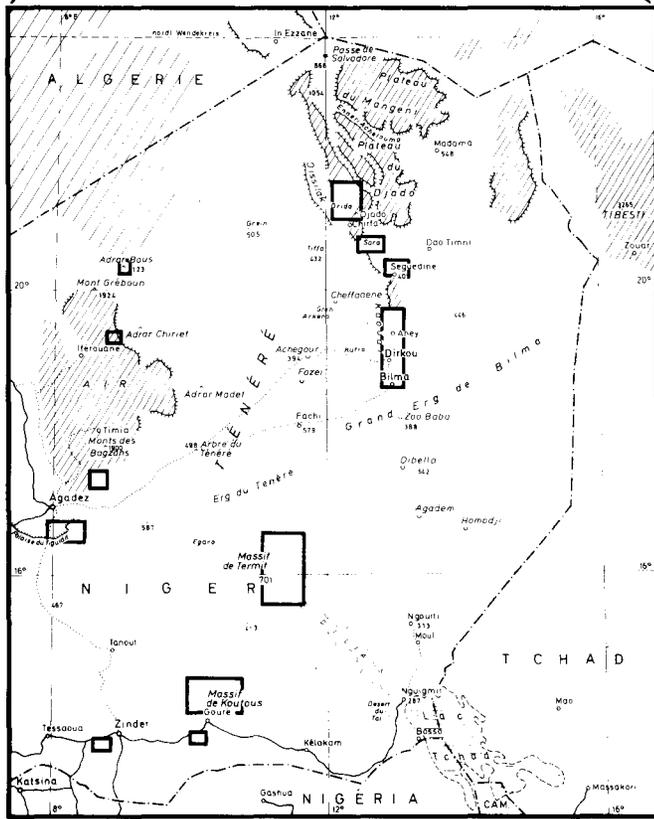
Die Stufe von Djado mit den ihr vorgelagerten Inselbergen wird aus kambrischen Sandsteinen aufgebaut. Sie sind teils quarzitisch gebunden, teils ist das Bindemittel durch den Einfluß tertiärer Grundwasserverwitterung entfernt (BUSCHE, 1982; SKOWRONEK, 1984). Das gleiche gilt für die kretazischen Sandsteine der Stufe von Bilma ("Continental Intercalaire"; FAURE, 1966). Die kretazischen und tertiären Sedimente des Massif de Termit ("Continental Terminal") sind durch einen erhöhten Eisengehalt stärker verfestigt. Den Abschluß der Schichtenfolge in diesem Bereich bilden sedimentäre Eisenkrusten. Auch sie zeigen extreme Verkarstung.

Die untersuchten Karstformen umfassen alle Arten der aus dem Karbonatkarst bekannten, typischen Lösungserscheinungen. Dabei treten Formen sowohl des phreatischen als auch des vadosen Karstes auf. Verbreitet sind zum einen senkrecht in die Dachflächen der genannten Schichtstufen eingreifende Depressionen unterschiedlichster Ausdehnung und vertikale Röhrensysteme. Zum anderen sind durch das heutige Relief zahlreiche unterirdische, verzweigte Höhlen- und Röhrensysteme an den steilen Stufenpartien oder an Inselbergflanken angeschnitten. Typisch für alle genannten Formen ist das Auftreten von flächenhafter Verkrustung der Wände. Es handelt sich vorwiegend um Kieselkrusten minimaler Mächtigkeit (meist unter 1 mm), die als Ausfallungsprodukte aus langsam zirkulierenden, Si-reichen Wässern angesehen werden können. Ihre Ausbildung dokumentiert die erste Formungsphase nach Abschluß der Gesteinslösung - bei wahrscheinlich noch wassererfüllten Karstgefäßen. Damit können die verkrusteten Höhlen- und Röhrenpartien als unmittelbare Zeugen des ursprünglichen Formenschatzes angesehen werden.

Zur Klärung der Frage nach echten Verkarstungsprozessen im Sinne lösungs-gesteuerter Reliefformung wurde der Karstformenschatz nach geomorphologischen Methoden aufgenommen. Daraus und aus der mikromorphologischen Unter-



LAGE DES  
ARBEITSGEBIETES  
REPUBLIK NIGER



Source: Carte de la République du Niger 1: 2,5 Mill.,IGN Paris  
Carte Michelin 153, 1: 4 Mill.

Abb. 1: Lage des Arbeitsgebietes und der untersuchten Karstvorkommen

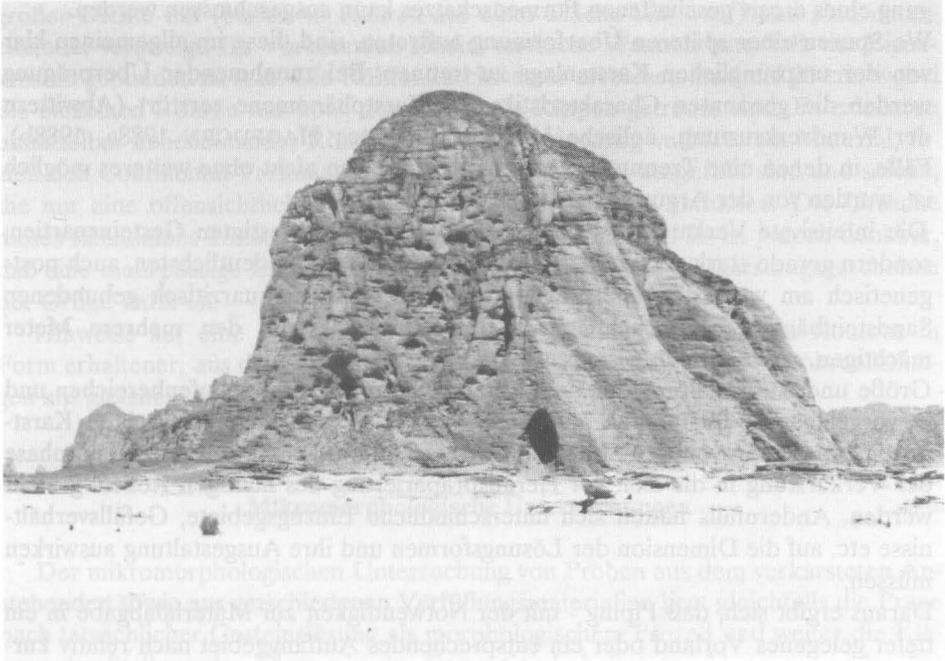


Abb. 2: Der Ehi Ouarek im südwestlichen Vorland des Djado-Plateaus (Blick nach NE)

Durch den Schattenfall deutlich zu erkennen ist das Eingangsportale der erstmals von RENAULT (1953) aufgenommenen Höhle mit 30 m Höhe. Die relative Höhe des Inselbergs beträgt rund 300 m. Zwischen dem Standort des Betrachters und dem Inselberg ist der Abfall des Geländes in die den Inselberg umgebende Depression zu erkennen. Links oberhalb des Höhlenportals tritt eine Vielzahl weiterer Höhlen und Röhren aus - auch hier sind die Öffnungen durch den Schattenfall nachgezeichnet. Die Durchmesser der Höhlenausgänge betragen in der Regel mehrere Meter. Die Höhlen auf unterschiedlichen Niveaus sind durch vertikale Lösungsröhren verbunden. Das Karstvolumen des Ehi Ouarek liegt bei 3%.

Im linken Bildhintergrund sind weitere, kegelförmige Inselberge zu erkennen, die gleichfalls in der Stufenfußdepression des Djado-Plateaus stehen und die in gleichem Ausmaß wie der Ehi Ouarek Verkarstungserscheinungen aufweisen.

suchung von Gesteinsproben haben sich folgende Einzelbefunde ergeben (vgl. BUSCHE & SPONHOLZ 1988; SPONHOLZ 1988):

- Es besteht absolute Formenkonvergenz zu Lösungsformen in Karbonatgesteinen. Dies gilt auch für Details der Röhren- und Höhlengestaltung.
- Die Karstformen zeigen eine Ausgestaltung, die durch mechanisch-erosive Einwirkung nicht zu erklären ist. Es treten blind endende Lösungstaschen, gleichmäßig abgeschrägte Lösungssäulen in Höhlenräumen etc. auf. Postgenetische Überprä-

gung eines erosiv geschaffenen Formenschatzes kann ausgeschlossen werden.

Wo Spuren einer späteren Überformung auftreten, sind diese im allgemeinen klar von der ursprünglichen Karstanlage zu trennen. Bei zunehmender Überprägung werden die genannten Charakteristika der Karstphänomene zerstört (Abwittern der Wandverkrustung, äolische Umgestaltung etc.; HAGEDORN 1988a, 1988b). Fälle, in denen eine Trennung beider Prozeßbereiche nicht ohne weiteres möglich ist, wurden von der Argumentation ausgenommen.

- Die intensivste Verkarstung zeigen nicht die gering verfestigten Gesteinspartien, sondern gerade stark verfestigte Bänke. So finden sich die deutlichsten, auch postgenetisch am wenigsten überprägten Lösungsformen in quarzitisches gebundenen Sandsteinbänken und Dachflächensilcretes, außerdem in den mehrere Meter mächtigen, sedimentären Eisenkrusten des Massif de Termit.
- Größe und Ausgestaltung der Karstformen sind in den Hauptstufenbereichen und in vorgelagerten Restbergen gleich. Außerdem werden die untersuchten Karstsysteme eindeutig von den Stufenhängen geschnitten. Damit muß die Hauptphase der Verkarstung in die Zeit vor Herauspräparierung des heutigen Reliefs gestellt werden. Andernfalls hätten sich unterschiedliche Einzugsgebiete, Gefällsverhältnisse etc. auf die Dimension der Lösungsformen und ihre Ausgestaltung auswirken müssen.

Daraus ergibt sich, daß Piping - mit der Notwendigkeit zur Materialabgabe in ein tiefer gelegenes Vorland oder ein entsprechendes Auffanggebiet nach relativ kurzer Transportstrecke - nicht ursächlich für die Schaffung der unterirdischen Hohlraumssysteme verantwortlich sein kann.

- Piping als mechanischer Prozeß der unterirdischen Materialabfuhr führt zur Entstehung eines häufig ähnlichen Formenschatzes. Wo Pipingformen innerhalb des Arbeitsgebietes vorkommen, wurden sie vergleichend aufgenommen und bieten so die Möglichkeit einer direkten Gegenüberstellung zum Karst.
- Die geschlossenen Karstdepressionen auf den Dachflächen der Schichtstufen werden unterirdisch entwässert. In den ausgedehnten Depressionen des Massif de Termit, die entsprechend ihrem Habitus bereits als Uvalas angesprochen werden können, ist an der Oberfläche der Feinmaterialfüllung die zentripetale Entwässerung entlang kluftnetzorientierter "Schluckrinnen" zu erkennen. Bei kleineren Depressionen auf der Stufe von Bilma wurden in der Depressionsfüllung aus Lockermaterial Suffosionsröhren angeschnitten, die an Zahl und Durchmesser mit der Tiefe zunehmen.
- Die Karstdepressionen greifen wesentlich tiefer in das Gestein ein als dies bei Deflationswannen gleichen Durchmessers der Fall ist. Lockermaterialfüllungen von Deflationswannen, die vergleichend zu Karstverfüllungen aufgenommen wurden, sind nicht von Suffosionsröhren durchzogen.

Bei im allgemeinen weiter Verbreitung der typischen Karstformen: Dolinen/Uvalas, Höhlen, Röhrensysteme etc. wurde eine Art der senkrechten Röhrenverkarstung nur im Süden des Massif de Termit festgestellt. Diese Röhren treten in sehr

großer Dichte auf (bis zu 46 Röhren auf einer Fläche von 4 m<sup>2</sup>) und sind untereinander verzweigt. Ihr Vorkommen scheint an flache Wannen innerhalb der Eisenkrusten gebunden zu sein. Die Röhrendurchmesser erreichen maximal 20 cm, wobei die einzelnen Röhren nur noch durch schmale Rippen getrennt sind. Es existieren unmittelbar nebeneinander Röhren, die mit brekzienartig verhärtetem Material, fa-ziell den Continental-Terminal Sedimenten sehr ähnlich, ausgefüllt sind und solche, die nur eine offensichtlich jüngere Lockermaterialfüllung enthalten. Die Ursache dieses Phänomens konnte bislang noch nicht geklärt werden. Es ist jedoch denkbar, daß eine mehrphasige Entwicklung im Sedimentations- und Verkarstungsgeschehen der Grund dafür ist.

Hinweise auf eine gleichartige Entwicklung gibt es im Massif de Koutous in Form erhaltener, aus dem umgebenden Sandstein herauspräparierter Röhrenfüllungen aus gleichem Material.

### Mikromorphologische Untersuchungen

Der mikromorphologischen Untersuchung von Proben aus dem verkarsteten Anstehenden sowie aus verschiedenen Verfüllungsmaterialien liegt gleichfalls die Frage nach tatsächlicher Gesteinslösung als morphologischem Prozeß und weiter die Klärung der Stellung des Karstes in der Gesamtlandschaftsentwicklung zugrunde. Zur Klärung dieser Fragen wurden im wesentlichen zwei Untersuchungsmethoden angewandt:

- Die Untersuchung von Dünnschliffen, um gegebenenfalls Unterschiede in der Materialbeschaffenheit zwischen der Hohlräumwand und dem dahinterliegenden, "frischen" Gestein festzustellen. Im Vordergrund stand die optische Erfassung von Phänomenen der Quarzkornkorrosion nach der Klassifikation von BURGER & LANDMANN (1988), außerdem bei einem Teil der Proben chemische Punktanalysen an der Elektronen-Mikrosonde.
- Rasterelektronenmikroskopische (REM) Analysen von einzelnen, aus dem Gesteinsverband entnommenen Quarzkörnern, um auf deren Oberfläche eventuelle Spuren chemischer und/oder mechanischer Kornüberprägung in Zusammenhang mit den Karstformen festzustellen.

Über die Analyse der Dünnschliffe konnte für alle untersuchten Proben nachgewiesen werden, daß ein erheblicher korrosiver Einfluß von den Hohlräumen ausgehend auf das Gestein ausgeübt wird. Dies gilt auch für Proben, die insgesamt stärker verwittertem Ausgangsmaterial entstammen.

Der korrosive Einfluß auf die äußersten Gesteinspartien wird durch die teilweise extreme Zerstörung von Quarzkörnern deutlich. Der Anteil stark bis sehr stark korrodierter Quarzkörner (Stufe 4-5 nach BURGER & LANDMANN 1988) liegt im äußersten Probenbereich generell um ein Mehrfaches über dem des Probeninneren (Abb.

3). Der Übergang zwischen den jeweils vorherrschenden Korrosionsstufen liegt 1-3 mm unter der Gesteinsoberfläche.

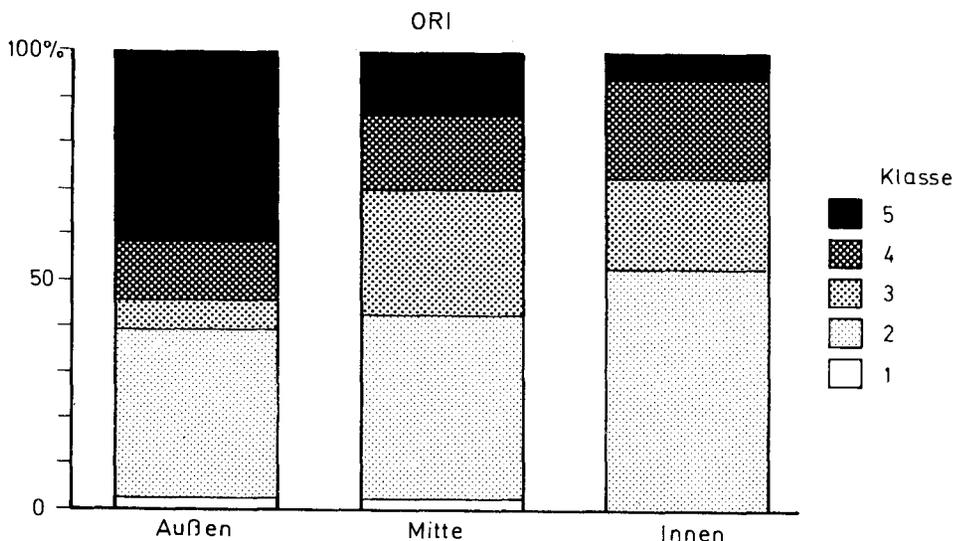


Abb. 3: Korrosionsbeanspruchung der Quarzkörner in verschiedenen Probenbereichen am Beispiel des Karstvorkommens von Orida/Djado

Die fünf Korrosionsklassen reichen von "nicht korrodiert" (= 1) bis "sehr stark korrodiert" (= 5) (Einteilung nach BURGER & LANDMANN 1988). Die Bestimmung der Korrosionsklassen erfolgte am Dünnschliff. Es zeigt sich eine deutliche Zunahme stark bis sehr stark korrodiert Körner im äußeren Bereich der Probe (Höhlenwand).

Ein ähnliches Bild - mit generell gleicher Verteilung der Korrosionsintensitäten - zeigen auch alle übrigen, im Dünnschliff untersuchten Proben von Höhlen und Röhrenwänden.

Wo in den Proben extreme Quarzkorrosion auftritt, sind die ursprünglichen Körner in Einzelfragmente zerlegt. Ansonsten treten Kornkanäle und Lösungsbuchten in unterschiedlichstem Maße auf: Das Spektrum reicht von leichten Einbuchtungen der Kornoberfläche bis zum Einfressen tiefer, kariöser Taschen, die einen Großteil des Kornvolumens ausmachen.

Die REM-Untersuchungen an einzelnen Quarzkörnern, die dem anstehenden Sandstein im Wandbereich von Karsthohlräumen entnommen wurden, belegen eine starke Mobilisation von Kieselsäure. Es fallen hauptsächlich Formen der Kieselsäureausfällung auf den Kornoberflächen auf. Dabei kommen neben zahlreichen Varianten amorpher Niederschlags auch alle Stufen der Neukristallisation von Quarz mit ebenen Kristallflächen vor. In Anlehnung an TIETZ (1987) wurden v-för-

mige Aussparungen auf den Kristallflächen eher als noch nicht vollständige Formen der Quarz Neubildung denn als Korrosionsformen interpretiert.

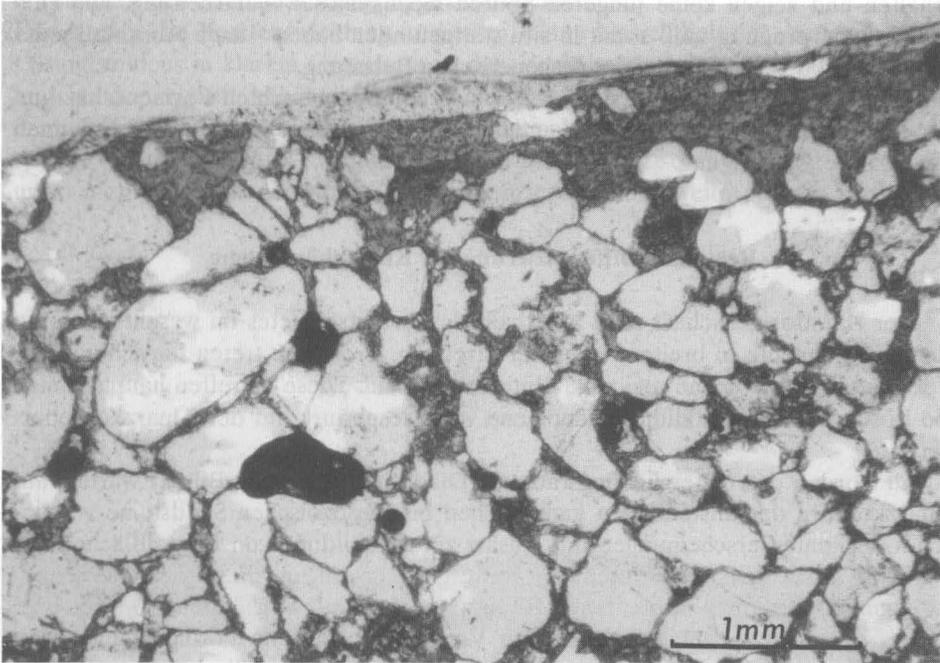


Abb. 4: Stark korrodierte Quarzkörner im krustennahen Bereich (Probe "Ori", vgl. Abb. 3.)

Im Kontaktbereich zwischen "frischem" Sandstein (unten im Bild) und Höhle (oben) sind die Quarzkörner stark korrodiert. Die Höhlenwand ist von einer dünnen Kieselkruste überzogen, die im Handstück grünlich-opak wirkt. Sie besteht aus wasserhaltiger, amorpher Kieselsäure.

Ursache für das Vorherrschen von Ausfällungsformen amorpher Kieselsäure bei den REM-Analysen dürfte zum einen der Umstand sein, daß die am stärksten korrodierten Körner der Hohlraumwände bei der Probenaufbereitung zerbrechen. Aufgrund der daraus resultierenden, feinen Fraktionierung können sie für eine morphoskopische Untersuchung nicht mehr verwendet werden. Zum anderen ist der Prozeß der Verkarstung im makro- wie im mikromorphologischen Bereich von Materialabfuhr in Lösung gekennzeichnet. Mit Ende des aktiven Lösungsvorganges - ursächlich verknüpft mit entsprechenden Milieueränderungen - tritt über die Zwischenstufe der Lösungsstabilität eine Tendenz zur Ausfällung auf, die sich zwangsläufig in Materialanlagerung und Verwischung der vorangegangenen Lösungsspuren ausdrückt.

Weiter hat die Analyse der Kornoberflächen ergeben, daß die chemische Beeinflussung in Form von Kieselsäurelösung bzw. -ausfällung eindeutig die letzte Form der Kornüberprägung darstellt. Auch feinstzisierte Oberflächenstrukturen sind erhalten und zeigen keine jüngeren Spuren mechanischer Aufarbeitung. Die chemische Überprägung muß somit in situ stattgefunden haben - nach Abschluß jeder mechanischen Verlagerung oder diagenetischen Belastung.

Aus dem Gesagten ergibt sich, daß es sich beim untersuchten Formenschatz um das Ergebnis echter Verkarstung handelt. Lösungsvorgänge im Gestein bestimmen die typische Ausprägung.

### **Regionale Differenzierung der Karstphänomene**

Der Karstformenschatz zeigt innerhalb des Arbeitsgebietes im wesentlichen die gleichen Elemente in breiter regionaler Streuung. Trotzdem treten hinsichtlich der Verkarstungsphänomene regionale Unterschiede auf. Diese betreffen hauptsächlich die Lösungs- und Ausfällungsphänomene von Kieselsäure auf den Quarzkornoberflächen.

Im Norden des Untersuchungsraumes (Djado und Stufe von Bilma) wurden auf Quarzkörnern der anstehenden kambrischen bis mesozoischen Sandsteine vorwiegend Ausfällungserscheinungen mit Ansatz zur Neubildung von Kristallflächen (= Quarz/SiO<sub>2</sub>) beobachtet. Spuren der vorausgegangenen, mechanischen Kornbeanspruchung im Rahmen der Sedimentationsgeschichte sind vollständig verwischt.

Bei den weiter südlich untersuchten Vorkommen besteht im allgemeinen eine gleichfalls vollständige Umhüllung der Quarzkörner mit ausgefällter Kieselsäure, die hier jedoch generell als wasserhaltiger, amorpher Niederschlag (H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub>) identifiziert wurde. Die Ausfällung ist nirgends bis zur Kristallneubildung fortgeschritten. Vielmehr sind den Quarzkörnern meist kugelige, nach der französischen Nomenklatur als "globules" bezeichnete Gebilde aufgelagert.

In Anlehnung an die Kornoberflächen-Interpretation von LE RIBAUT (u.a. 1975), KRINSLEY & DOORNKAMP (1973) sowie TIETZ (1987) lassen die Ausfällungs- und Lösungsformen auf den untersuchten Quarzkörnern folgende Deutung zu:

- Es existieren Anzeichen für eine langsame, langandauernde Ausfällung aus gering konzentrierten Lösungen im Norden des Arbeitsgebietes. Aufgrund des spezifischen Lösungs- und Ausfällungsverhaltens von Kieselsäure muß dabei sowohl von einer geringen Si-Konzentration als auch von einem geringen Gehalt anderer Ionen in der betreffenden Lösung ausgegangen werden. Ein reichliches Grundwasserangebot zur betreffenden Zeit ist wahrscheinlich.

Nennenswerte Gehalte an Aluminium- und Phosphorverbindungen sind erst in jüngeren Bindemittelschichten nachweisbar. Ob sie durch eine entsprechende Milieuänderung oder durch räumlich/qualitative Änderungen im Grundwassereinzugsgebiet zu erklären sind, muß vorerst offen bleiben.

- Im Süden des Untersuchungsraumes (Massif de Termit, Massif de Koutous) herrschen Formen der raschen Kieselsäureausfällung, bzw. der Ausfällung aus hoch Si-konzentrierten oder mit anderen Ionen verunreinigten Lösungen vor. Sie sind durch niedrigen Kristallisationsgrad gekennzeichnet.

Damit steht die Karstentwicklung in diesem Raum hinsichtlich der Änderung des Lösungsmilieus in klarem Gegensatz zu den Verhältnissen weiter im Norden. Angesichts der starken Abhängigkeit des Lösungsmilieus vom Grundwasserangebot - damit indirekt im wesentlichen von den klimatischen Bedingungen (Niederschlags-spende, Verdunstung...) - drängt sich eine paläoklimatische Deutung auf. Dies umso mehr, als sich die Nord-Süd-Differenzierung über weite Räume verfolgen läßt.



Abb. 5: Oberflächlich abflußlose Depressionen auf der Dachfläche des Massif de Termit östlich Dougoulé

Die Depressionen sind als Lösungsformen angelegt und können aufgrund ihrer Größe und Ausgestaltung als Uvalas angesprochen werden. Die Entwässerung erfolgt unterirdisch in Anlehnung an das Kluftnetz. Bedingt durch die höhere bzw. längeranhaltende Bodenfeuchte sind diese "Schluckrinnen" durch stärkeren Vegetationsbesatz nachgezeichnet. Oberflächige Entwässerung tritt ausschließlich in Erosionsrinnen innerhalb der Lockermaterialfüllungen auf. (Person als Größenmaßstab)

Aufgrund der Sedimentationsgeschichte und der petrographischen Verhältnisse kann die Ursache dieser differenzierten Entwicklung jedoch auch in nicht-klimatischen Unterschieden begründet liegen. Ein erheblicher Einfluß speziell der in den südlichen Untersuchungsregionen im Ausgangsgestein zusätzlich zur Kieselsäure zur Verfügung stehenden Fe- und Al-Verbindungen auf das Lösungsmilieu ist wahrscheinlich.

Bei den untersuchten Formen handelt es sich nach den vorliegenden geomorphologischen und laboranalytischen Befunden um die Ergebnisse echter Gesteinslösung. Lösungsvorgänge spielen für die typische Formgestaltung die ausschlaggebende Rolle - die Voraussetzungen für eine Bezeichnung als "Karst" sind damit gegeben (u.a. MAINGUET & CALLOT 1974; JENNINGS 1985).

Soweit zugänglich, sind die Karstformen im Untersuchungsgebiet als fossile Formen anzusprechen, die seit ihrer Kappung im Zuge der Herauspräparierung des heutigen Stufenreliefs durch andere Formungsprozesse überprägt worden sind. Für die zeitliche Einordnung der Verkarstung gibt es einige Zeitmarken: Die Sedimentation der jüngsten, extrem verkarsteten Sandsteine war mit der Oberkreide abgeschlossen. Die Aushärtung der gleichfalls stark verkarsteten Silcretedecken wird nach BUSCHE (1982) in das Miozän gestellt. Danach kamen nur noch stark eisen-schüssige Sedimente zur Ablagerung, so daß eine Kieselsäurelösung sedimentbedingt nur bis in das mittlere Tertiär nachweisbar ist.

Für spätere Phasen kann nur eine Mobilisierung von Fe-Verbindungen belegt werden. Für die Hauptanlage des Karstformenschatzes kommt somit das ältere Tertiär in Frage. Es existieren jedoch Hinweise im Rahmen hydrologischer und pedologischer Forschungen (u.a. FAURE 1963; VÖLKELE 1988), die eine teilweise Fortsetzung der Lösungsprozesse im grundwassererfüllten Bereich bis in das jüngere Quartär hinein wahrscheinlich machen. Damit ist auch eine rezente, geringfügige Weiterverkarstung in einigen Gebieten nicht auszuschließen.

Unter der Annahme einer Hauptphase der Verkarstung im frühen bis mittleren Tertiär muß der Karst seit dieser Zeit als ein wesentliches Landschaftselement im Untersuchungsraum angesehen werden. Dabei ist neben der Prägung des Reliefs durch karsttypische Einzelformen (Röhren, Höhlen, Dolinen etc.) vor allem die wechselseitige Beeinflussung von Karst und Hydrographie von Bedeutung. Dies beinhaltet auch Auswirkungen auf die Entwicklung des Großreliefs:

Systeme der Oberflächenentwässerung fehlen in weiten Teilen der Plateaus. So wird eine zusammenhängende Fläche von mehr als 45 km<sup>2</sup> in zentralen Teil des Massif de Termit ausschließlicly unterirdisch über eine Vielzahl von Karstdepressionen entwässert. Daß das Fehlen fluvialer Zerschneidung nicht die Folge der ariden Klimabedingungen in der jüngeren Vergangenheit sein kann, belegen gut ausgebildete, fossile Flußsysteme in benachbarten Gebieten und die extreme Wirksamkeit der episodischen fluvialen Aktivität unter heutigen Bedingungen.

Des weiteren existieren Hinweise darauf, daß durch das Vorhandensein unterirdischer Karsthohlräume der Verlauf von Stufen und Tälern im Zuge der jüngeren Zerschneidung und Tieferlegung des Reliefs maßgeblich mitbestimmt wurde.

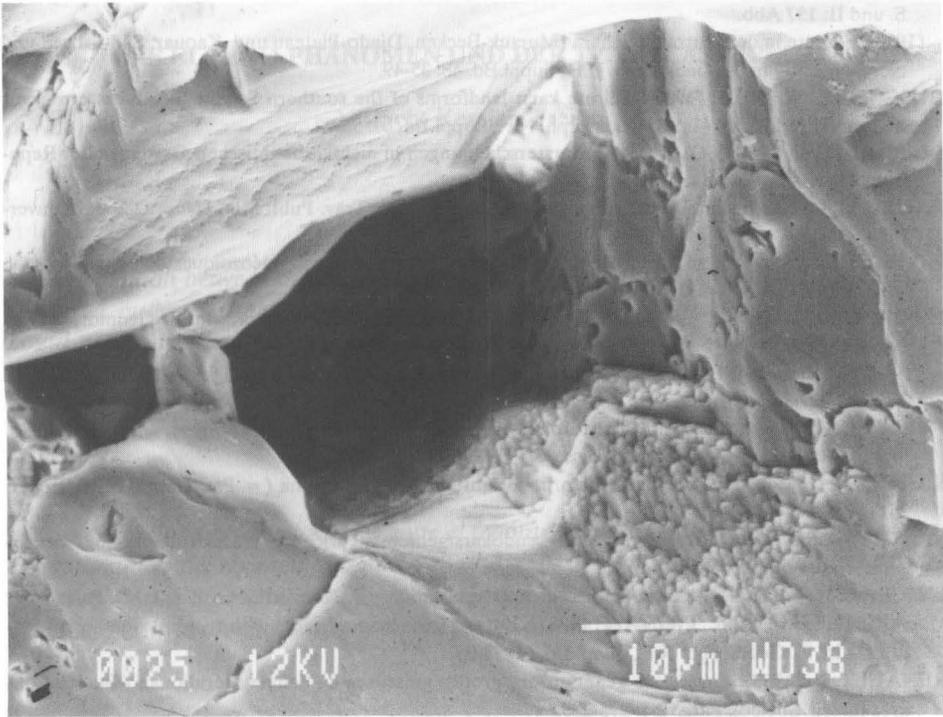


Abb. 6: REM-Aufnahme von Lösungs- und Ausfällungsformen an einem Quarzkorn (Kornkanal) (Probe "Chem 3"; Karstvorkommen "Chemidour" an der Stufe von Bilma)

Unmittelbar neben Formen der Neukristallisation von Quarz (teilweise in noch nicht vollständig geschlossenen Kristallflächen) sind unregelmäßige Korrosionsfurchen zu erkennen.

Der hohe Kristallisationsgrad der Quarzausfällung weist auf eine langandauernde Entwicklung bei geringer Lösungskonzentration und damit auf reichliches Grundwasserangebot zur betreffenden Zeit hin.

In jedem Fall ist mit dem Nachweis erheblicher Verkarstung im Untersuchungsraum die Notwendigkeit gegeben, für künftige Studien zur Landschaftsentwicklung und insbesondere zur Hydrologie diesen Faktor in Betracht zu ziehen.

## Literatur

- BURGER, D., M. LANDMANN (1988): Quantitative Mikromorphologie der Quarzverwitterung mit Beispielen aus dem tropischen Karst. - In: *Tübinger Geogr. Arb.*, 100, 169-183.
- BUSCHE, D. (1982): Die geomorphologische Entwicklung des westlichen Murzuk-Beckens, des Djado-Plateaus und des nördlichen Kaouar. - Unveröff. Habil.-Schrift, Geogr. Inst. Univ. Würzburg, I: 377 S. und II: 137 Abb.
- (1983): Silcrete in der zentralen Sahara (Murzuk-Becken, Djado-Plateau und Kaouar; Süd-Libyen und Nord-Niger). - In: *Z. Geomorph. N.F., Suppl.Bd. 48:* 35-49.
- BUSCHE, D., W. ERBE (1987): Silicate karst landforms of the southern Sahara (north-eastern Niger and southern Libya). - In: *Z. Geomorph. N.F., Suppl.Bd. 64:* 55-72.
- BUSCHE, D., B. SPONHOLZ (1988): Karsterscheinungen in nichtkarbonatischen Gesteinen der Republik Niger. - In: *Würzburger Geogr. Arb. 69:* 9-43.
- FAURE, H. (1963): Inventaire des évaporites du Niger. - *Min. Trav. Publ. Min. Hydraul.:* 260 S. (unveröff.)
- (1966): Reconnaissance géologique des formations sédimentaires post-paléozoïques du Niger Oriental. - *Mem. B.R.G.M. 47:* 630 S., Paris.
- HAGEDORN, H. (1984): Zur Reliefentwicklung der südlichen Zentralsahara. - In: *Z. Geomorph. N.F., Suppl.Bd. 50:* 53-58.
- (1988a): Äolische Abtragungsformen im Massiv von Termit (NE-Niger). - In: *Würzburger Geogr. Arb. 69:* 277-287.
- (1988b): Aktuelle und vorzeitliche Morphodynamik im Massif de Termit (Niger). - In: *Abh. Akad. Wiss. Göttingen, Mathem.-Phys. Klasse, 3/41:* 213-228.
- KLAER, W. (1956): Verwitterungsformen im Granit auf Korsika. *Gotha (= Pet. Geogr. Mitt., Erg.H. 261)*
- KRAUTHAUSEN, B. (1985): Karst- und Pseudokarstgebiete als wichtige Wasserreserven in Trockengebieten der dritten Welt. - In: *Die Höhle, 36/2:* 25-35.
- LE RIBAULT, L. (1975): *L'exoscopie: méthode et applications (= Notes et Mém. Total, 12).* Paris
- McFARLANE, M.J., C.R. TWIDALE (1987): Karstic features associated with tropical weathering features. - In: *Z. Geomorph. N.F., Suppl.Bd. 64:* 73-95.
- RENAULT, P. (1953): Caractères généraux des grottes gréseuses du Sahara méridional. - In: *1er Congrès Intern. Spéléol. Paris, 2/1:* 275-289.
- SCHNÜTHGEN, A., H. SPÄTH (1983): Mikromorphologische Sprengung von Quarzkörnern durch Eisenverbindungen in tropischen Böden. - In: *Z. Geomorph. N.F., Suppl.Bd. 48:* 17-34.
- SKOWRONEK, A. (1987): Böden als Indikatoren klimagesteuerter Landformung in der zentralen Sahara. (= Relief, Boden, Paläoklima 5)
- SPONHOLZ, B. (1988): Karsterscheinungen in nichtkarbonatischen Gesteinen der östlichen Republik Niger. - Unveröff. Diss.-Schrift, Univ. Würzburg
- TIETZ, G.F. (1987): Lösung und Ausheilung tropisch verwitterter Quarze aus einem Oberkreide-Sandstein (SW-Nigeria). - In: *Facies, 17:* 267-276.
- VÖLKEL, J. (1988): Geomorphologische und pedologische Untersuchungen zum jungquartären Klimawandel in den Dünengebieten Ost-Nigers (Südsahara und Sahel). Bonn (= *Bonner Geogr. Abh. 79*)

Prof. Dr. Horst Hagedorn und Dr. Barbara Sponholz  
Geographisches Institut  
Bayerische-Julius-Maximilians-Universität  
Am Hubland  
D-8700 Würzburg