

Die Stufe I unserer Klassifizierung (Druckbereich: ca. 100 bis ca. 300 kbar, Temperatur nach der Druckentlastung: ca. 100—300° C) ist durch plastische Deformationen der Minerale Quarz und Feldspat, die zur Ausbildung von planaren Deformationsstrukturen parallel zu niedrig indizierten kristallographischen Flächen führen, gekennzeichnet: diaplektische²⁾ Kristalle. Für die Stufe II (Druckbereich ca. 300—500 kbar, Temperatur nach der Druckentlastung: ca. 300—1300° C) ist die Isotropisierung von Quarz und Feldspat, d. h. die Umwandlung in optisch isotrope und röntgenamorphe Phasen weit unterhalb der Schmelzpunkte typisch: diaplektische Mineralgläser. Diese Umwandlung ist verknüpft mit der Bildung metastabiler Hochdruckmodifikationen des Quarzes, Coesit und Stishovit.

Gesteine der Stufen I und II zeigen keine Veränderung ihres Mineralgefüges. Die Stufe III (Druckbereich: ca. 500 bis ca. 650 kbar, Temperatur nach Druckentlastung ca. 1300 bis ca. 2300 kbar) wird im wesentlichen durch die Bildung von Schmelzen des Feldspates gekennzeichnet, wobei schlierige und blasenführende Gläser entstehen: normale Mineralgläser. Das Gesteinsgefüge wird zunehmend verändert, die Textur mehr und mehr porös. In der Stufe IV kommt es zu einer vollständigen Aufschmelzung des primären Gesteins, wobei inhomogene Gesteinsgläser gebildet werden (Druckbereich: ca. 650 bis ca. 1000 kbar (?). Temperatur nach der Druckentlastung: ca. 2000—5000° C). Die Genauigkeit der Druck- und vor allem der Temperaturangaben für bestimmte Umwandlungserscheinungen in heterogenen Gesteinen ist nicht sehr groß, da sie auf Grund von Experimenten im Labormaßstab an monomineralischen Gesteinen oder Einkristallen von den oben genannten Autoren berechnet wurden. Schätzungsweise muß mit Abweichungen bis zu 10 % und mehr gerechnet werden. Die Zahlenwerte liefern daher vorerst nur größenordnungsmäßige Anhaltspunkte.

Die Bedingungen einer progressiven Stoßwellenmetamorphose (dynamische Gesteinsmetamorphose) unterscheiden sich wesentlich von denen der normalen, endogenen Gesteinsmetamorphose, welche unter statischer Druckbeanspruchung stattfindet. Drucke und Temperaturen sind bei der dynamischen Metamorphose um ein Vielfaches, etwa zeh- bis hundertfach größer, ihre Einwirkungszeiten jedoch um einige Größenordnungen, d. h. etwa um den Faktor 10^{-13} (!) geringer als bei der statischen Metamorphose.

Die Stoßwellenmetamorphose ist daher durch extrem hohe Geschwindigkeiten der Druckbeanspruchung und Druckentlastung und extreme Kurzzeitigkeit der Druckeinwirkung charakterisiert, welche einerseits zu einem ungewöhnlichen mechanischen Verhalten der Mineralphasen und andererseits zu stark ausgeprägten chemischen Ungleichgewichten bei Phasenumwandlungen führen.

Schmelzvorgänge oder Modifikationsumwandlungen in bestimmten Phasen verlaufen nicht nach den Gleichgewichtsbedingungen, die für die Phasenbeziehungen in heterogenen Mehrstoff- oder Einstoff-Systemen gültig sind, wie dies für die normale Gesteinsmetamorphose im allgemeinen charakteristisch ist.

Beispielsweise werden in Schmelzprozessen, die durch Stoßwellen hervorgerufen werden, eutektische Reaktionen nicht beobachtet. Weiterhin sind z. B.

²⁾ Für die durch Stoßwellen ohne echte Schmelzung hervorgerufenen Veränderungen von Kristallarten wurde das Wort diaplektisch (von griechisch diaplesso = zerschlagen) vorgeschlagen (ENGELHARDT et al. 1967).

für die Bildung von Coesit und Stishovit durch dynamische Druckbeanspruchung von Quarz Drucke erforderlich, die den Phasengleichgewichten entsprechenden Bildungsdrucke um ein Mehrfaches übersteigen (vgl. STÖFFLER und ARNDT 1969, STÖFFLER 1970a).

1.3. Stoßwelleneffekte in den gesteinsbildenden Mineralen der Riesgesteine

Im folgenden wird versucht, die durch physikalische Meßmethoden insbesondere optische und röntgenographische Verfahren erkennbaren Veränderungen (mechan. Deformationen, Phasenumwandlungen) der gesteinsbildenden Minerale, welche nach der Stoßwellenbeanspruchung kristalliner Gesteine irreversibel oder metastabil erhalten bleiben, zu beschreiben. In manchen Fällen ist es möglich durch Vergleich mit Stoßwellenexperimenten an den entsprechenden Mineralen für bestimmte Umwandlungserscheinungen die ungefähren Druck- und Temperaturbedingungen anzugeben. Die meisten der beobachteten Umwandlungserscheinungen können nur durch Stoßwellen, nicht durch statische Druckbeanspruchung hervorgerufen werden und dienen daher als sichere Indikatoren für Stoßwellenprozesse in der Natur, d. h. für die petrographische Identifizierung von Meteoritenkratern.

1.3.1. Quarz (Coesit, Stishovit)

Die allgemeine Verbreitung und seine Empfindlichkeit gegenüber der Wirkung von Stoßwellen machen den Quarz zu einem wertvollen Indikator der Stoßwellenmetamorphose. Beobachtungen an den durch Stoßwellen beanspruchten Riesgesteinen und an experimentell mit Stoßwellen bekannter Intensität behandelten Quarzkristallen und Quarzgesteinen haben das folgende Bild über die Veränderungen ergeben, welche der Quarz bei steigender Stoßwellenbeanspruchung erleidet (Beobachtungen an Riesgesteinen: ENGELHARDT und STÖFFLER 1965, ENGELHARDT, HÖRZ, STÖFFLER, BERTSCH 1966, ENGELHARDT und BERTSCH 1969. Allgemeine und experimentelle Arbeiten: DE CARLI und JAMIESON 1959, WACKERLE 1962, AHRENS und GREGSON 1964, AHRENS und ROSENBERG 1966, MÜLLER und DEFURNEAUX 1968, HÖRZ 1968, STÖFFLER und ARNDT 1969).

Spitzendrucke unter etwa 100 kbar: Die Quarzkörner enthalten neben unregelmäßig verlaufenden Brüchen ebene, kristallographisch orientierte Bruchflächen. Die meisten verlaufen parallel zu (0001) oder (10 $\bar{1}$ 1), einige auch nach (10 $\bar{1}$ 3) (Abb. 2). Die breiteren dieser ebenen Brüche erscheinen unter dem Mikroskop als ehemals offene Spalten, die jetzt mit sekundären Mineralen wie Quarz oder Montmorillonit gefüllt sind. Sie kommen geschart vor, mit einem gegenseitigen Abstand von meistens mehr als 20 μ .

Spitzendrucke zwischen etwa 100 und etwa 400 kbar: Quarzkörner, welche durch Stoßwellen dieses Druckbereichs beansprucht wurden, sind durch das Vorkommen sogenannter planarer Elemente gekennzeichnet, Deformationsstrukturen, wie sie von anderen z. B. von tektonisch beanspruchten Gesteinen nicht bekannt sind. Planare Elemente erscheinen unter dem Mikroskop als optische Diskontinuitäten, die in Scharen parallel zu kristallographischen Ebenen verlaufen. Sie durchsetzen die einzelnen Quarzkörner oft in mehreren, sich kreuzenden Scharen und überschreiten niemals die Korngrenzen. In den Riesgesteinen kann man mehrere Arten unterscheiden: **Dekorierte planare Elemente** sind mit feinen Einschlüssen besetzt, welche wahrscheinlich Hohlräume sind, die entweder leer oder mit Gas oder Flüssigkeit gefüllt sind (Abb. 3). **Nicht dekorierte planare Elemente** sind ebene Diskontinuitäten, die auch bei höchster Vergrößerung im Mikroskop nicht auflösbar sind. Wenn sie parallel zur Mikroskopachse verlaufen, erscheinen sie als feine dunkle Linien (Abb. 4). Da sie im allgemeinen bei gekreuzten Nikols und bei Phasenkontrastbeleuchtung deutlicher sichtbar sind als bei normaler Beleuchtung, handelt es sich wahrscheinlich um sehr feine Lamellen, die nach Lichtbrechung und optischer Orientierung von der Umgebung abweichen. Insofern sind sie wahr-