SSEF 8001 ZÜRICH

Z. Dt. Gemmol. Ges.	36	Nr. 1/2	S. 33–49	Stuttgart, Juni 1987

Die Smaragde der Belmont-Mine bei Itabira, Minas Gerais, Brasilien: Vorkommen und Charakteristika

H. A. Hänni, Basel, D. Schwarz, Ouro Preto, und M. Fischer, Basel

Zusammenfassung

Die Smaragd-produzierende Belmont-Mine bei Itabira im Bundesstaat Minas Gerais, Brasilien, wird vorgestellt, ihre regionale und lokale Geologie erklärt, die Eigenschaften der Smaragde werden diskutiert.

Die Smaragde, welche sehr selten mit Chrysoberyll bzw. Alexandrit assoziiert sind, liegen in präkambrischen Schiefern, ehemaligen Pegmatiten und Quarzmassen der „Supergrupo Minas".

Verglichen mit ähnlichen Vorkommen zeigen die Itabira-Smaragde relativ tiefe Gehalte an FeO, MgO und Na_2O.

Die wichtigsten Substitutionen lauten:

$$Al^{3+,VI} = (Mg, Fe)^{2+,VI} + Na^{+,Kanal}$$
$$\text{und } Al^{3+,VI} = (Fe, Cr, V)^{3+,VI}$$

Mineraleinschlüsse sind selten. Glimmer dominieren mit ihrer Vielfalt an Formen und Farben; ihr hoher Gehalt an Fluor (2–3 Gew.-%) legt einen Einfluß bei der Smaragd-Genese nahe. Neben Glimmern kommen auch Quarz, Tremolit, Dolomit, Andesin, Apatit und Molybdänit als Mineraleinschlüsse vor.

Sehr verbreitet sind Wachstumsröhren. Sie sind entweder einzeln, parallel zur Smaragd-c-Achse, oder in Schichten dicht angeordnet und zeigen verschiedene Füllungen: eine oder zwei Flüssigkeiten, eventuell mit einer Gasblase und/oder einem Festkörper kombiniert. Am häufigsten sind Wachstumsröhren mit einem doppelbrechenden weißen Kristall (Apatit?), assoziiert mit einem meist rechteckigen Hohlraum mit zweiphasiger Füllung. Mehrphasige Einschlüsse sind häufig.

Charakteristisch für die Itabira-Smaragde sind scheibchenförmige Spannungsrisse; sie besitzen in der Regel im Zentrum einen mit Flüssigkeit gefüllten Hohlraum.

Die Itabira-Smaragde sind typisch für die Assoziation zwischen mafisch-ultramafischen Gesteinen und Pegmatiten. Ihre minimalen Bildungstemperaturen und -drucke können aufgrund ihrer Gas- und Flüssigkeitseinschlüsse mit 380 °C und 1400 bar bestimmt werden.

Abstract

The emerald producing Belmont mine at Itabira in the state of Minas Gerais, Brazil, is presented, the regional and local geology and the properties of the emeralds are discussed.

The emeralds, which are very rarely associated with chrysoberyll and alexandrite, are found

0343-7892/87/0036-0033 $ 4.25

© 1987 E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, D-7000 Stuttgart 1

within precambrian schists, former pegmatites and quartz masses of the "Supergrupo Minas".

Compared to similar occurrences the Itabira emeralds have relatively low contents of FeO, MgO and Na_2O.

The most important substitutions are

$$Al^{3+,VI} \rightleftharpoons (Mg, Fe)^{2+,VI} + Na^{+,channel}$$
$$\text{and } Al^{3+,VI} \rightleftharpoons (Fe, Cr, V)^{3+,VI}$$

They have few mineral inclusions. Micas dominate with a large diversity of forms and colours; their high fluorine content (2–3 wt-%) supposes an influence on the emerald genesis. In addition to micas, quartz, tremolite, dolomite, andesine, apatite and hematite/molybdenite are found as mineral inclusions.

Growth tubes are very widespread. They are arranged either as single tubes, parallel to the c-axis of the emeralds or in dense layers and show different kinds of fillings: one or two fluids possibly combined with a gas bubble and/or a solid. Most numerous are growth tubes consisting of a birefringent white crystal (apatite?) associated with a mostly rectangular cavity with a bi-phase filling. Polyphase inclusions are common.

Typical for the Itabira emeralds are disc-shaped tension cracks, which in their centre as a rule contain a cavity filled with a fluid.

The Itabira emeralds are typical of the association of mafic-ultramafic rocks with pegmatites. Based on fluid and gas inclusions the minimal temperature and pressure conditions of emerald formation can be determined as 380 °C and 1400 bars.

1. Einleitung

Nachdem Brasilien lange Jahre hindurch hauptsächlich wegen seiner Vorkommen von Achat, Turmalin und Aquamarin berühmt geworden ist, kann zur Zeit der Smaragd als wichtigstes brasilianisches Edelsteinmineral angesehen werden.

Die Suche nach der „Serra das Esmeraldas", einem sagenhaften Smaragdland im Nordosten des heutigen Bundesstaates Minas Gerais, hat eine nicht unbedeutende Rolle bei der Erschließung des Landesinnern durch die Bandeirantes im 16. und 17. Jahrhundert gespielt. Die ersten größeren Smaragdfunde wurden jedoch erst 1963 in Bahia gemacht. Mit der Entdeckung weiterer Vorkommen in den Bundesstaaten Bahia, Goiás und Minas Gerais ist Brasilien mittlerweile in die vorderste Reihe der Smaragdproduzenten gerückt.

Die derzeit produzierenden brasilianischen Smaragdminen sind Carnaiba und Socoto (beide im Bundesstaat Bahia), Santa Terezinha (Goiás) und Itabira (Minas Gerais). Daneben gibt es noch eine Reihe weiterer Vorkommen, deren Ausbeute nie oder nur vorübergehend von wirtschaftlichem Interesse war (Abb. 1).

Die Smaragd-Mine „Belmont" liegt bei Oliveira Castro (Gemeindebezirk von Itabira, Minas Gerais), etwa 13 km südöstlich der Stadt Itabira und 120 km nordöstlich von Belo Horizonte, der Hauptstadt des Bundesstaates Minas Gerais.

Die ersten Smaragde in Itabira wurden 1978 nahe der Eisenbahnlinie Belo Horizonte – Vitoria entdeckt. Auf einer Fläche von etwa 60 × 120 m wurde der bis zu 6 m tiefe Tagabbau zunächst mit primitiven Mitteln von Garimpeiros in Angriff genommen. In der Anfangsphase des Abbaus wurden aus rund 20000 m³ Gestein ca. 40 kg Smaragde gewonnen und in den Handel gebracht.

Seit 1981 erfolgt der Abbau unter Einsatz von modernen Maschinen mechanisch. In der vom Abbau wenige hundert Meter entfernten Aufbereitungsanlage werden zu-

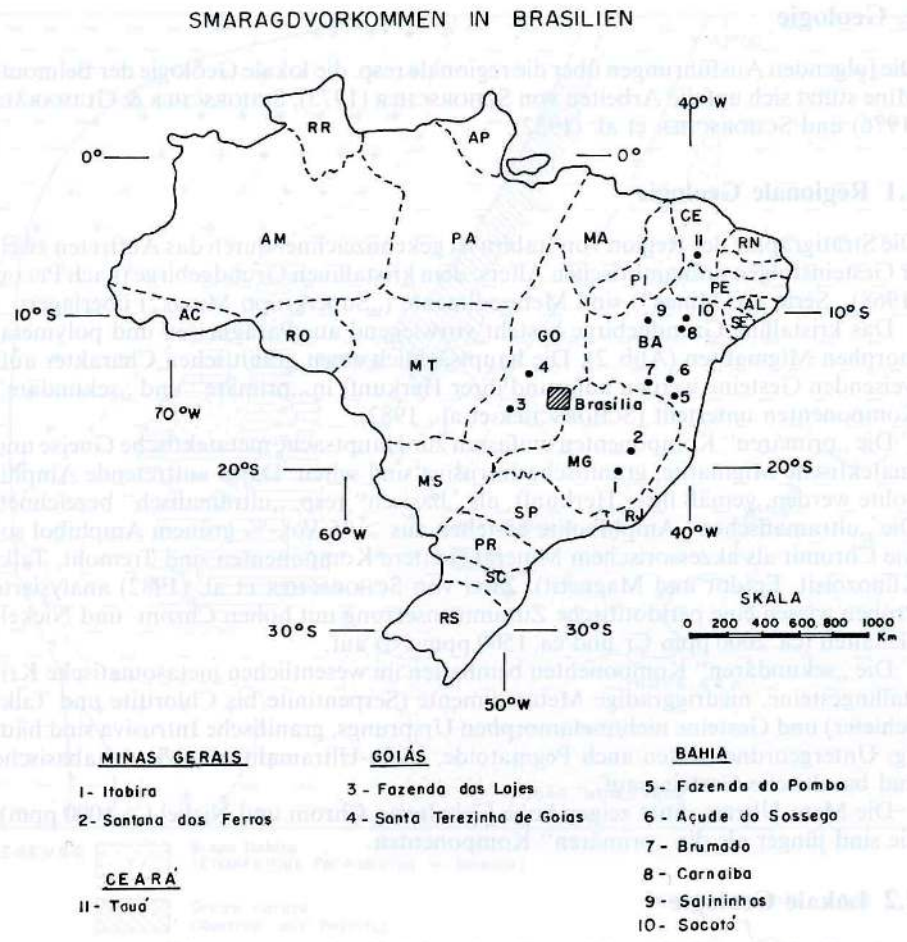

Abb. 1. Smaragdvorkommen in Brasilien.

nächst mit Hilfe einer Wasserstrahlkanone die feineren Komponenten abgetrennt und weggespült. Dann werden gröbere Gerölle abgesondert, bevor das restliche Material über Förderbänder in eine große Halle transportiert wird, in der die Auslese der Smaragde manuell erfolgt.

Der mittlere Gehalt an Smaragd in Biotit-Schiefer wurde mit 165 gr/t berechnet. Somit ist die Mine Belmont wahrscheinlich das reichste Smaragdvorkommen Brasiliens, was das Verhältnis von mineralisiertem Gestein und mittlerer Qualität der geförderten Smaragde anbelangt.

2. Geologie

Die folgenden Ausführungen über die regionale resp. die lokale Geologie der Belmont-Mine stützt sich auf die Arbeiten von SCHORSCHER (1973), SCHORSCHER & GUIMARÃES (1976) und SCHORSCHER et al. (1982).

2.1 Regionale Geologie

Die Stratigraphie der Region von Itabira ist gekennzeichnet durch das Auftreten zweier Gesteinsfolgen präkambrischen Alters: dem kristallinen Grundgebirge (nach PFLUG (1968) „Série pré-Minas") sind Metasedimente („Supergrupo Minas") überlagert.

Das kristalline Grundgebirge besteht vorwiegend aus Paragneisen und polymetamorphen Migmatiten (Abb. 2). Die hauptsächlich einen granitischen Charakter aufweisenden Gesteine werden aufgrund ihrer Herkunft in „primäre" und „sekundäre" Komponenten unterteilt (SCHORSCHER et al., 1982).

Die „primären" Komponenten umfassen zur Hauptsache metatektische Gneise und anatektische Migmatite, granitische Intrusiva sind selten. Darin auftretende Amphibolite werden, gemäß ihrer Herkunft, als „basisch" resp. „ultramafisch" bezeichnet. Die „ultramafischen" Amphibolite bestehen aus $\geqslant 95$ Vol.-% grünem Amphibol sowie Chromit als akzessorischem Mineral (weitere Komponenten sind Tremolit, Talk, Klinozoisit, Epidot und Magnetit). Zwei von SCHORSCHER et al. (1982) analysierte Proben wiesen eine peridotitische Zusammensetzung mit hohen Chrom- und Nickel-Gehalten (ca. 2000 ppm Cr und ca. 1500 ppm Ni) auf.

Die „sekundären" Komponenten beinhalten im wesentlichen metasomatische Kristallingesteine, niedriggradige Metasedimente (Serpentinite bis Chloritite und Talk-Schiefer) und Gesteine nichtmetamorphen Ursprungs, granitische Intrusiva sind häufig. Untergeordnet treten auch Pegmatoide, Meta-Ultramafitite sowie metabasische und basaltische Gesteine auf.

Die Meta-Ultramafitite zeigen hohe Gehalte an Chrom und Nickel ($\geqslant 1000$ ppm). Sie sind jünger als die „primären" Komponenten.

2.2 Lokale Geologie

In der Region von Itabira, Minas Gerais, wird die „Supergrupo Minas" von unten nach oben von den folgenden Untergruppen gebildet: Grünschiefer sowie die Gruppen Caraça, Itabira und Piracicaba. Die drei letztgenannten Gruppen sind durch eine strukturell und metamorph bedingte Diskordanz von den Paragneisen (Grundgebirge, „Série pré-Minas") getrennt.

Die Paragneise sind das Ergebnis der Metamorphose von Grauwacken und anderen Sandsteinen. Die Gruppe Caraça wird von glimmerhaltigen Quarziten und, untergeordnet, Phylliten aufgebaut. Dank ihrem Gehalt an Itabirit und Hämatit-Eisenerzen stellt die Gruppe Itabira die wirtschaftlich wichtigste Einheit der Minas-Gesteinsabfolge dar. In der Gruppe Piracicaba herrschen Quarzite, Sericite und Phyllite vor.

Die Abfolge der „Supergrupo Minas" zeigt einen einheitlichen strukturellen Stil, welcher durch Falten mit horizontalen oder subhorizontalen Achsen gekennzeichnet ist. Die gesamte Abfolge unterlag einer progressiven Regionalmetamorphose.

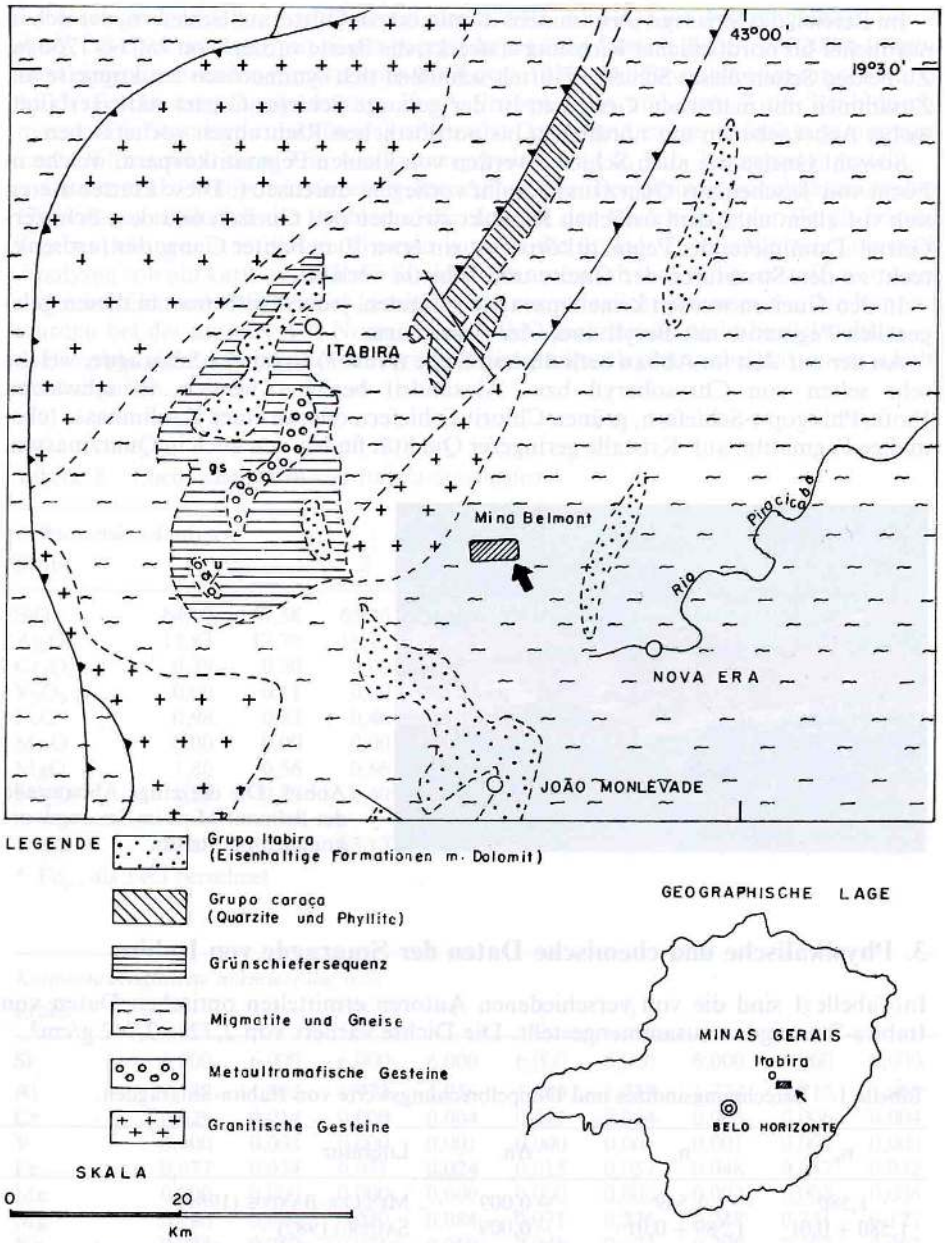

Abb. 2. Regionale Geologie des Smaragdvorkommens der Belmont-Mine bei Itabira, Minas Gerais, Brasilien.

Im Bereich des Smaragdvorkommens dominiert ein Gürtel aus Schiefern, der sich in nördlicher bis nordöstlicher Richtung erstreckt; die Breite variiert von 750 bis 1200 m. Zu beiden Seiten dieses Schiefer-Gürtels schließen sich symmetrisch Leukogneise an. Zusammen mit mafischen Gesteinen ist der gesamte Schiefer-Gürtel stark verfaltet, wobei Achsenebenen mit nördlichen bis nordöstlichen Richtungen vorherrschen.

Sowohl Gneise wie auch Schiefer werden von kleinen Pegmatitkörpern, welche in Form von Taschen aus Quarz und Kaolin vorliegen, durchsetzt. Diese konzentrieren sich vor allem nahe dem östlichen Kontakt zwischen den Gneisen und dem Schiefer-Gürtel. Dominierender Pegmatitkörper ist ein etwa 10 m breiter Gang, der fast senkrecht zu den Strukturen der Gneise und Schiefer verläuft.

In den Gneisen werden keine Smaragde gefunden, jedoch trifft man in diesen gelegentlich Pegmatite mit Beryll und/oder Aquamarin.

An der zur Zeit im Abbau befindlichen Stelle (Abb. 3) treten die Smaragde, welche sehr selten von Chrysoberyll bzw. Alexandrit begleitet werden, in schwarzen Biotit/Phlogopit-Schiefern, grünen Chlorit-Schiefern oder in einer Kaolinmasse (ehemalige Pegmatite) auf. Kristalle geringerer Qualität finden sich auch in Quarzmassen.

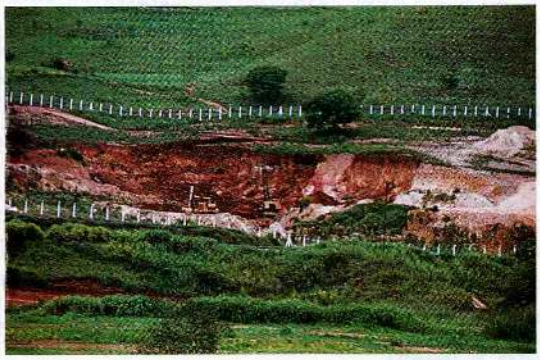

Abb. 3. Die derzeitige Abbaustelle der Belmont-Mine im Smaragdvorkommen bei Itabira.

3. Physikalische und chemische Daten der Smaragde von Itabira

In Tabelle 1 sind die von verschiedenen Autoren ermittelten optischen Daten von Itabira-Smaragden zusammengestellt. Die Dichte variiert von 2,728–2,742 g/cm³.

Tabelle 1. Berechnungsindizes und Doppelbrechungswerte von Itabira-Smaragden.

n_e	n_o	Δn	Literatur
1,580	1,589	− 0,009	MULLER-BASTOS (1981)
1,580 + 0,01	1,589 + 0,01	− 0,009	SAUER (1982)
1,574 − 1,578	1,580 − 1,583	− 0,004 − 0,006	diese Arbeit, hellgrüne Smaragde
1,581 − 1,582	1,589 − 1,590	− 0,007 − 0,008	diese Arbeit, dunkelgrüne Smaragde

Mikrosondenanalysen wurden mit einem ARL-SEMQ Gerät durchgeführt, wobei die WDS-Spektrometer mit einem energiedispersiven System (EDS, TN 2000) kombiniert eingesetzt wurden (SCHWANDER & GLOOR, 1980). Die Betriebsbedingungen waren 15 kV Beschleunigungsspannung, 30 nA Probenstrom und etwa 2 µm Strahldurchmesser. Die Standards umfaßten synthetische Oxyde und einige einfach zusammengesetzte Silikatmineralien. Die Analysenergebnisse sind in Tab. 2 zusammengestellt.

FRANZ et al. (1986) diskutieren in ihrer Arbeit über Berylle in regionalmetamorphen Gesteinen ausführlich die Probleme, die sich bei der Berechnung der Beryll-Formel ergeben können. Aus diesem Grunde wurden die in Tab. 2 aufgeführten Smaragd-Analysen sowohl kationisch (auf 6 Si) wie auch anionisch (auf 15 Sauerstoff) normiert; da leichte Elemente wie Be oder Li mit der Mikrosonde nicht gemessen werden können, wurden bei der anionischen Normierung 3 BeO rechnerisch nicht berücksichtigt.

Es zeigte sich, daß beide Normierungsarten praktisch identische Kationenverhältnisse ergaben.

Tabelle 2. Chemische Daten von Itabira-Smaragden.

Mikrosonden-Analysen

Probe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO_2	64,00	67,58	65,46	66,00	65,59	66,99	66,48	66,35	68,05
Al_2O_3	15,83	17,79	18,25	18,25	18,42	16,66	16,21	16,09	18,92
Cr_2O_3	0,39	0,20	0,00	0,05	0,18	0,91	0,07	0,08	0,06
V_2O_3	0,00	0,11	0,00	0,02	0,00	0,07	0,02	0,00	0,00
FeO*	0,98	0,33	0,40	0,32	0,19	0,76	0,64	0,62	0,43
MnO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,07	0,08
MgO	1,86	0,56	0,66	0,62	0,52	1,69	1,84	1,79	0,97
Na_2O	1,29	0,29	0,40	0,34	0,26	0,99	1,18	1,18	0,37
Total	84,35	86,86	85,17	85,60	85,16	88,07	86,47	86,18	88,88

* Fe_{ges} als FeO berechnet

Kationenverhältnisse normiert auf 6 Si

Probe	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Si	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000	6,000
Al	1,749	1,862	1,972	1,956	1,986	1,759	1,724	1,715	1,966
Cr	0,029	0,014	0,000	0,004	0,013	0,064	0,005	0,006	0,004
V	0,000	0,008	0,000	0,001	0,000	0,005	0,001	0,000	0,000
Fe	0,077	0,024	0,031	0,024	0,015	0,057	0,048	0,047	0,032
Mn	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,005	0,006
Mg	0,260	0,074	0,090	0,084	0,071	0,226	0,248	0,241	0,127
Na	0,234	0,050	0,071	0,060	0,046	0,172	0,206	0,207	0,063
Total	8,349	8,032	8,164	8,129	8,124	8,283	8,234	8,221	8,198

Aus strukturchemischen Überlegungen sind die folgenden Substitutionen für die untersuchten Itabira-Smaragde in Betracht zu ziehen:

(a) $Al^{3+,VI} = (Mg, Fe)^{2+,VI} + Na^{+,Kanal}$

(b) $Al^{3+,VI} = (Fe, Cr, V)^{3+,VI}$

Die Berechnungen der Kationenverhältnisse (Tabelle 2) belegen, daß vor allem der Substitutionstyp (a) vorliegt. Bei diesem gekoppelten Ersatz werden auch Kanal-Positionen besetzt und die Ladungsdifferenzen zwischen Mg^{2+} und Fe^{2+} gegenüber Al^{3+} durch Na^{+} ausgeglichen.

Abb. 4 zeigt mit seiner Steigung < 1 einen geringen Überschuß an (Mg + Fe) gegenüber Na an. Dies kann durch einen kleinen Anteil an Fe^{3+} erklärt werden, das nicht durch Na^{+} ladungsmäßig kompensiert werden muß. Bei Mikrosonden-Analysen werden weder die Oxidationszustände von Fe noch dessen Positionen im Kristallgitter erfaßt. Da Fe als Fe^{2+} und Fe^{3+} sowohl substitutionell auf Oktaeder- und Tetraederplätzen wie auch auf Kanalpositionen untergebracht werden kann, bleibt eine gewisse Unschärfe in der kristallchemischen Behandlung dieses Elementes.

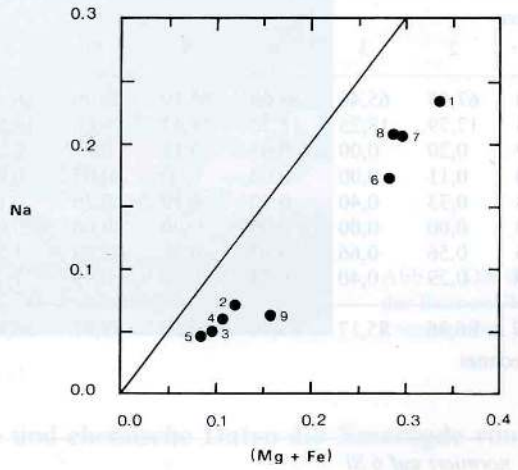

Abb. 4. Beziehung der Kationenverhältnisse von Na gegen (Mg + Fe) in Smaragden von Itabira.

Nach (b) wird gleichzeitig auch Cr^{3+} und V^{3+} im Kristallgitter eingebaut.

Die Smaragd-Analysen zeigen Gehalte von FeO, MgO und Na_2O, die für vergleichbare Biotit-Schiefer-Vorkommen eher als niedrig betrachtet werden müssen (Hänni 1982; Hänni & Klein, 1982, Hänni & Kerez, 1983).

4. Einschlüsse

Die Smaragde aus der Mine Belmont bei Itabira, Minas Gerais, können aufgrund ihrer Einschlußmerkmale im allgemeinen ohne größere Schwierigkeiten von ihren Gegenstücken aus Santa Terezinha, Goias, Carnaíba/Bahia und Socotó/Bahia unterschieden werden.

Bei der mikroskopischen Untersuchung fällt zunächst auf, daß die Itabira-Smaragde relativ arm an Mineraleinschlüssen sind. Häufigstes Einschlußmineral sind ohne Zweifel Glimmer, welche sich durch eine große Variation bzgl. Form und Farbe auszeichnen.

Die Farbe der Glimmereinschlüsse variiert nicht nur innerhalb der einzelnen Smaragde, oft zeichnen sich auch im selben Wirtkristall auftretende Glimmer durch verschiedene Farbtöne aus. Es sind dies vorwiegend Brauntöne, beginnend mit einem gelblichen braun über graubraun bis fast schwarz. Grünliche Töne treten ebenfalls auf, sind jedoch selten.

Die Glimmerplättchen sind meist sehr stark gerundet oder unregelmäßig begrenzt (Abb. 5, 6); daneben beobachtet man aber auch längliche Formen oder praktisch ideal ausgebildete (pseudo-)hexagonale Kristalle (Abb. 7). Man kann die Glimmereinschlüsse in zwei Typen (Generationen) einteilen, wobei der erste schon vor der Smaragd-Bildung bestand (protogenetisch), der zweite zusammen mit dem Wirtkristall (syngenetisch) gebildet wurde. Die protogenetischen Glimmer zeichnen sich durch unregelmäßige, mehr oder weniger stark gerundete Formen aus und besitzen meist eine kräftig braune Farbe. Bei entsprechender Dicke können sie fast opak erscheinen. Sie sind unregelmäßig im Smaragd verteilt und lassen keine bevorzugten Orientierungen erkennen (Abb. 5). Die syngenetisch entstandenen Glimmer dagegen sind dünne, transparente Plättchen, die länglich ausgebildet sind oder einen, manchmal etwas verzerrten, (pseudo-)hexagonalen Umriß aufweisen (Abb. 7). Meist sind diese Plättchen orientiert im Smaragd-Wirtkristall eingelagert: die länglichen Kristalle mehr oder weniger exakt in Richtung der c-Achse, die (pseudo-)hexagonalen parallel zur Basisfläche. Wie Mikrosondenanalysen gezeigt haben, handelt es sich bei den Glimmern um Glieder der Biotit-Phlogopit-Reihe (Tab. 3). Fluor-Gehalte in diesen Glimmern von 2–3 Gew.-% (Tab. 3) deuten darauf hin, daß Fluor-Komplexe bei der Smaragd-Genese, d.h. insbesondere bei der Bildung von migrationsfähigen Ionenkomplexen, eine Rolle gespielt haben können.

Neben Verwachsungen von Glimmer-Kristallen mit anderen Mineraleinschlüssen (Abb. 8) beobachtet man gelegentlich sehr interessante Erscheinungen an den Glimmern, die offenbar auf Auflösungs- und Rekristallisationsvorgänge zurückzuführen sind. Abb. 9 zeigt einen Glimmer-Kristall, der an seinem vorderen (schmalen) Ende teilweise aufgelöst bzw. in eine andere Mineralspezies umgewandelt wurde. Am hinteren Teil ist neben Auflösungserscheinungen die Sprossung eines (neuen?) Minerals in Form eines Dendritenwachstums zu erkennen.

Wie oben bereits erwähnt, treten die übrigen Mineraleinschlüsse in den Itabira-Smaragden gegenüber den Glimmern stark zurück. Neben einem opaken Mineral (Hämatit oder Molybdänit?) konnten bisher Quarz, Tremolit, Dolomit, Andesin und Apatit röntgenographisch oder durch Mikro-Röntgenspektroskopie identifiziert werden.

Andesin (vgl. chemische Analyse in Tab. 3) ist in Form farblos-transparenter, tafeliger Kristalle ausgebildet (Abb. 10). Quarz bildet farblos-bräunliche, meist rundlich-korrodierte Kristalle. Ebenfalls korrodierte Formen zeigen normalerweise die Beryll- und Karbonat-Einschlüsse (Fe-Dolomit; vgl. Tab. 3), wobei letztere als Gruppen mit farblosen Kristallen auftreten. Tremolit zeigt in der Regel transparente, nadelige Kristalle, während Apatit rundlich-hexagonale Formen aufweist. Nicht endgültig geklärt werden konnte die Natur des opaken (pseudo-?)-hexagonalen Kristall-Einschlusses, der in Abb. 8 in Verwachsung mit einem Glimmerplättchen zu erkennen ist. Es handelt sich dabei möglicherweise um Molybdänit oder Hämatit.

Tabelle 3. Mikrosondenanalysen von einigen in Itabira-Smaragden beobachteten Mineraleinschlüssen.

	Andesin	Biotit/Phlogopit	Fe-Dolomit
SiO_2	59,95	38,15	0,12
TiO_2	0,00	0,86	0,00
Al_2O_3	25,64	15,01	0,00
Cr_2O_3	0,00	0,35	0,00
FeO	0,06	9,26	6,32
MnO	0,00	0,11	0,69
MgO	0,20	16,65	16,62
CaO	7,99	0,10	33,40
Na_2O	7,35	0,35	0,00
K_2O	0,14	9,15	0,01
F	0,00	3,09	0,00
Total	101,33	93,08	57,16

An 37,2% Ab 62,0% Or 0,8%

Die Angaben von GÜBELIN & KOIVULA (1986), wonach „Biotit, Chromit und Pyrit vorzugsweise die innere Paragenese der Smaragde von Itabira bestimmen", konnten im Verlaufe unserer Untersuchungen (es wurden ca. 300 Itabira-Smaragde auch im Edelsteinmikroskop untersucht) nicht bestätigt werden.

Größere diagnostische Bedeutung als den Mineraleinschlüssen kommt in den Itabira-Smaragden normalerweise den sehr verbreiteten Wachstumsröhren zu. Bei diesen handelt es sich i. a. um winzige Kanäle, die in Richtung der Smaragd-c-Achse orientiert sind, wobei sie unterschiedliche Füllungen aufweisen können. Vielfach sind diese winzigen Wachstumsröhren so zahlreich, daß sie dem Smaragd ein etwas trübes Aussehen oder einen fast seidigen Glanz verleihen können (Abb. 11). Durch ihre Anordnung in parallelen Schnüren sind sie für den sogenannten „Regen-Effekt" verantwortlich, der auch in vielen brasilianischen Aquamarinen beobachtet werden kann (Abb. 12).

* Die angegebenen Vergrößerungen leiten sich von der vorgegebenen optischen Einheit aus Objektiv, Okular, Kameraabstand, etc. ab. Alle Photographien wurden unter Verwendung einer Immersionsflüssigkeit aufgenommen.

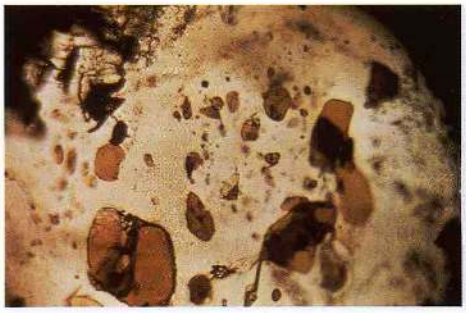

Abb. 5

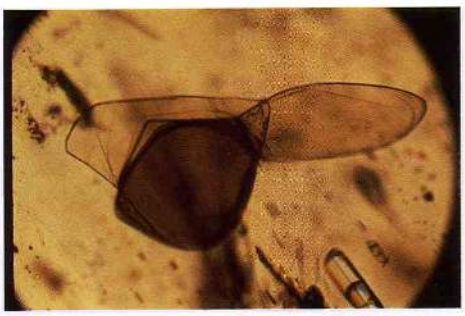

Abb. 6

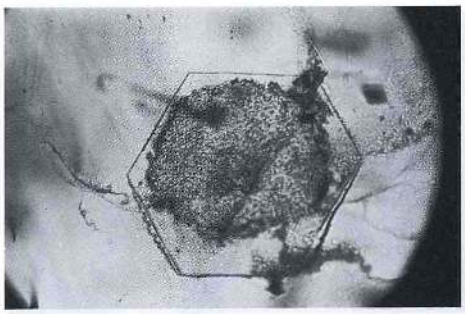

Abb. 7

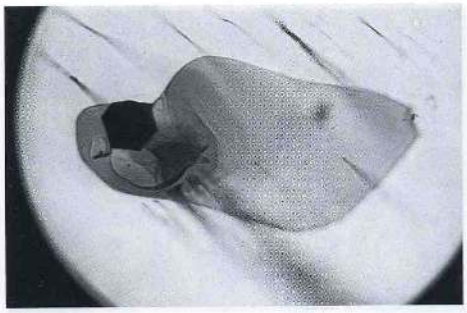

Abb. 8

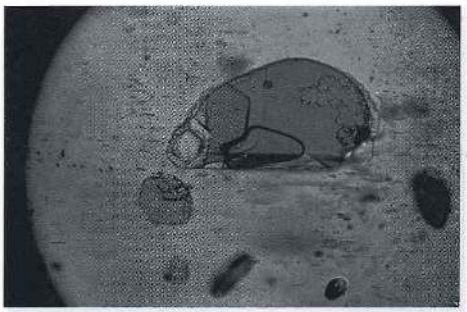

Abb. 9

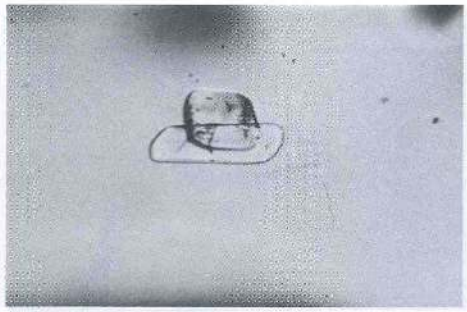

Abb. 10

Abb. 5*. Protogenetische Glimmereinschlüsse (Biotit/Phlogopit) mit unregelmäßig-abgerundetem Umriß. Diese Kristalle sind ohne kristallographische Orientierung im Wirtkristall eingelagert. – × 20.

Abb. 6. Biotit/Phlogopit-Einschlüsse protogenetischen Ursprungs. Die Kristalle zeigen abgerundete Umrisse und ihre Farbe variiert von hell- bis dunkelbraun. – × 100.

Abb. 7. Glimmerplättchen syngenetischen Ursprungs mit praktisch ideal ausgebildetem pseudohexagonalem Umriß. Orientierung parallel der Basis des Smaragd-Wirtkristalls. An der Oberfläche teilweise korrodiert. – × 100.

Abb. 8. Verwachsungen eines Glimmerkristalls mit einem opaken Mineralplättchen, das einen (pseudo-)hexagonalen Umriß aufweist (wahrscheinlich Hämatit oder Molybdänit). – × 70.

Abb. 9. Glimmerplättchen, das Auflösungs- und Rekristallisationserscheinungen zeigt. – × 100.

Abb. 10. Farblos-transparenter, tafeliger Kristalleinschluß (Andesin). Die Natur des anderen Einschlusses konnte nicht bestimmt werden. – × 70.

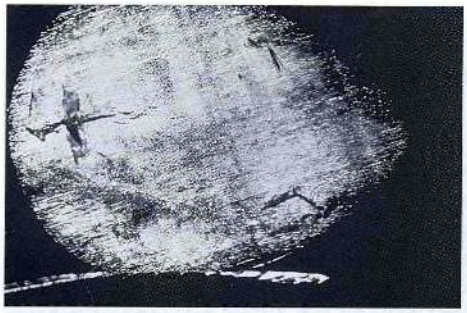

Abb. 11

Abb. 12

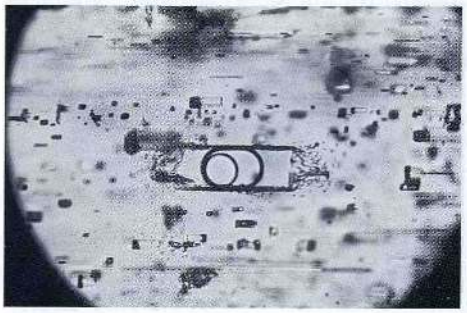

Abb. 13

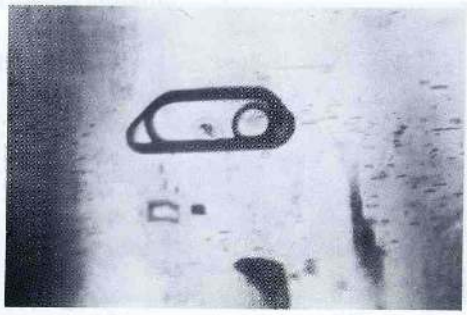

Abb. 14

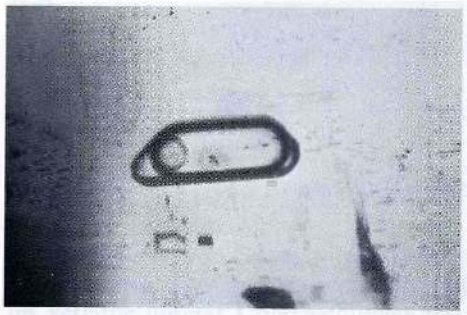

Abb. 15

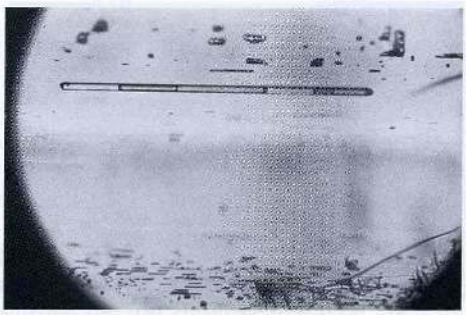

Abb. 16

Abb. 11. Itabira-Smaragde, die sehr viele feine Wachstumsröhren enthalten, haben ein etwas trübes, „seidiges" Aussehen. × 20.

Abb. 12. Vielfach sind feine Wachstumsröhren in parallelen Schnüren angeordnet, was den sogenannten „Regen-Effekt" hervorruft und Chatoyance ermöglicht. – × 35.

Abb. 13. Rechteckiger Hohlraum, in Richtung der c-Achse orientiert, mit einer fluiden Dreiphasenfüllung des Typs liquid/liquid/gas (‚l-l-g'). – × 70.

Abb. 14, 15. Negativer Kristall mit ‚l-l-g'-Dreiphasenfüllung. Man beachte die bewegliche Gasblase, die sich einmal am linken, einmal am rechten Ende des Hohlraums befindet. – × 70.

Abb. 16. Länglicher, in c-Richtung orientierter Hohlraum mit einer interessanten Füllung: die Phasensequenz von links nach rechts lautet l_1-g-l_2-l_1-g-l_2. – × 70.

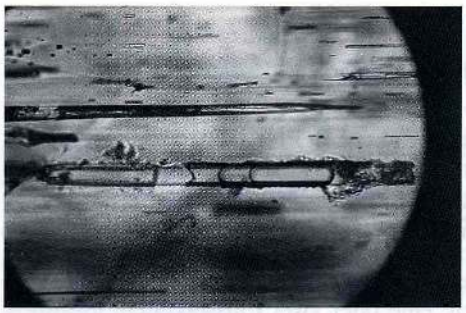

Abb. 17

Abb. 18

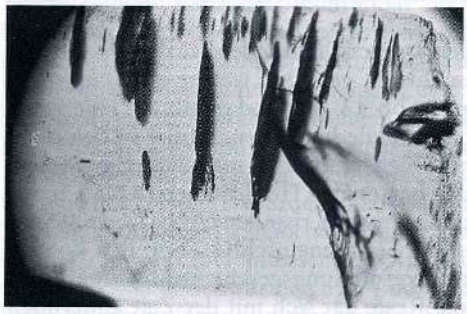

Abb. 19

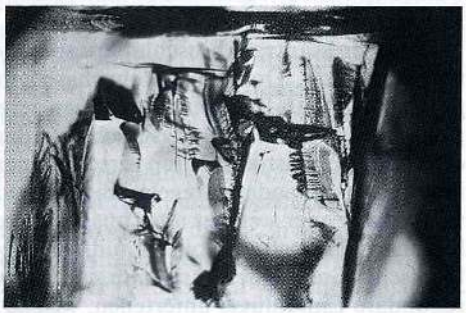

Abb. 20

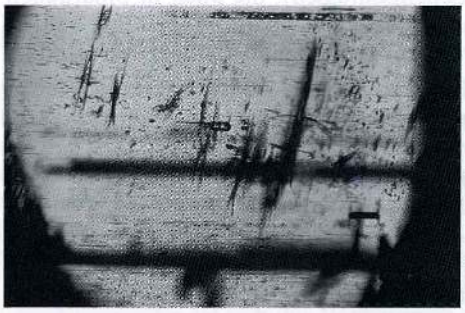

Abb. 21

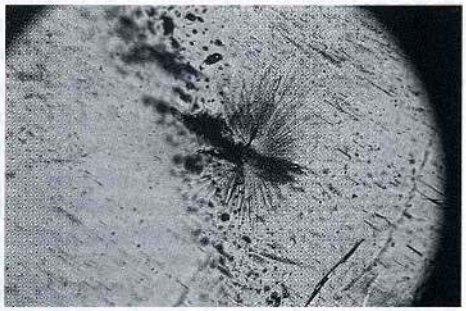

Abb. 22

Abb. 17. Länglicher Mehrphaseneinschluß, der in Richtung der Smaragd-Hauptachse orientiert ist. – ×100.

Abb. 18. Häufiger und charakteristischster Einschlußtyp in den Itabira-Smaragden: doppelbrechende Kristalle, die von Hohlräumen mit unterschiedlichen Füllungen (d.h. verschiedenen fluiden Einschlüssen) begleitet werden. – ×100.

Abb. 19. Schwarm von basis-parallelen, nicht ausgeheilten Rissen. – ×20.

Abb. 20. Unorientiert verlaufende, nicht ausgeheilte Risse. – ×20.

Abb. 21. Zu den fundpunktspezifischen Einschlüssen in den Itabira-Smaragden gehören scheibchenförmige Risse, die in ihrem Zentrum meist einen Hohlraum mit unterschiedlicher Füllung aufweisen. – ×70.

Abb. 22. Oft bilden die Risse von Abb. 21 Schwärme, die mehr oder weniger basis-parallel orientiert sind. – ×35.

Manchmal sind die winzigen Wachstumsröhren auch in Ebenen bzw. Schichten, die parallel zur Smaragdbasisfläche verlaufen, angereichert. Ihre Entstehung könnte durch staubfeine fremde Mineralpartikel auf der ~~chemischen~~ Basisfläche verursacht worden sein, wobei sich die Wachstumsröhren in den Kristallisationsschatten dieser Partikel gebildet hätten. Häufig sind die feinen Wachstumsröhren von einer mehr oder weniger großen Anzahl beträchtlich größerer Röhren oder Kanäle begleitet, die verschiedenartige Füllungen aufweisen können: eine oder zwei Flüssigkeiten, eventuell mit einer Gasblase und/oder einer festen Phase kombiniert (s. u.). Bei genügender Dichte an feinen Wachstumsröhren zeigen solche Steine im Cabochon-Schliff starken Katzenaugeneffekt (Chatoyance).

Die interessanteste Einschlußgruppe in den Itabira-Smaragden wird ohne Zweifel von den Zwei-, Drei- und Mehrphaseneinschlüssen gebildet, welche eine ungemein große Vielfalt an Erscheinungsformen zeigen (Abb. 13–18) und damit auf eine komplexe, mehrphasige Bildungsgeschichte der Smaragde hinweisen. Außer in den oben erwähnten Wachstumsröhren verschiedener Größen beobachtet man diese Einschlüsse in unregelmäßig oder in regelmäßig-rechteckig begrenzten Hohlräumen (Abb. 13), sowie in mehr oder weniger ideal ausgebildeten negativen Kristallen (Abb. 14, 15). Analog den „klassischen" solid/liquid/gas-(s-l-g)-Dreiphaseneinschlüssen in den kolumbianischen Smaragden kann man sie aufgrund ihrer Bildungsgeschichte in primäre und sekundäre Einschlüsse unterteilen, welche die Reste der sich mit der Zeit ändernden Smaragd-Mutterlösung aufgenommen haben. Neben Flüssigkeits/Gas-Einschlüssen (d. h. bei Zimmertemperatur ‚l-g'-Zweiphaseneinschlüssen), die auch in Smaragden anderer Vorkommen sehr verbreitet sind, beobachtet man gelegentlich ‚s-l-g'-Dreiphaseneinschlüsse. Interessanter und von größerem diagnostischem Wert sind jedoch andere Phasenkombinationen:

1. Hohlräume mit zwei nicht mischbaren Flüssigkeiten
   (fluide ‚l-l'-Zweiphaseneinschlüsse)
2. Hohlräume mit zwei nicht mischbaren Flüssigkeiten und einer Gasblase
   (fluide ‚l-l-g'-Dreiphaseneinschlüsse; Abb. 14, 15)
3. Hohlräume mit zwei nicht mischbaren Flüssigkeiten, einer Gasblase und einem Kristall
   (fluide ‚s-l-l-g'-Vier- oder Mehrphaseneinschlüsse)

Zu den für Itabira-Smaragden typischsten Einschlüssen gehören Gebilde, die aus doppelbrechenden weißen Kristallen bestehen, welche mit einem meist rechteckigen Hohlraum assoziiert sind (Abb. 18). Die Hohlraumfüllung kann von unterschiedlicher Natur sein (meist ‚l-g'- oder ‚l-l-g'-Typ). Die Natur der Kristalleinschlüsse konnte bisher noch nicht eindeutig bestimmt werden. Dieselben sind meist kurz- bis langprismatisch und lassen z. T. eine vermutlich hexagonale Symmetrie erkennen (Apatit?). Oft treten diese Einschlüsse in sehr großer Anzahl auf, normalerweise entweder in Richtung der Smaragd-c-Achse orientiert (mit primären Hohlräumen) oder aber in Heilungsrissen.

Als letzte Einschlußart in den Itabira-Smaragden sollen die verschiedenen Riß-Typen einer genaueren Betrachtung unterzogen werden. Was zunächst auffällt, ist die relativ große Anzahl von nicht ausgeheilten Rißflächen (Abb. 19, 20).

Dies deutet darauf hin, daß diese Risse epigenetischen Ursprungs sind und erst

gebildet wurden, nachdem das Kristallwachstum bereits abgeschlossen war und der Smaragd nicht mehr in Kontakt mit seiner Nährlösung stand. Stattdessen werden diese Risse oft von Fremdlösungen (meist Fe- oder Mn-haltige Wasser) ausgefüllt, in denen wegen der hohen Kristallisationsgeschwindigkeit Kristalle in Skelett- oder Dendritenform wachsen. Anders als bei den durch Fremdsubstanz ausgefüllten Rissen wird im Verlaufe des sogenannten „Ausheilens" ein Riß mit der gleichen Substanz wie der des Wirtkristalls geschlossen.

Die Nährlösung hat i. a. eine komplizierte chemische Zusammensetzung und enthält Komponenten, die nicht unmittelbar für die Bildung weiterer Wirtkristallsubstanz benötigt werden. Diese Restbestandteile sammeln sich normalerweise in kleinen Hohlräumen. Sie bilden dann selten einphasige fluide Einschlüsse, meist aber die bekannten Zwei-, Drei- oder Mehrphaseneinschlüsse. Den so gebildeten Heilungsrissen kommt infolge ihres oft charakteristischen Aussehens eine wichtige Rolle bei der Untersuchung natürlicher und synthetischer Steine zu.

Einen Einschlußtyp, der in Smaragden anderer brasilianischer Vorkommen bisher noch nicht beobachtet wurde, und der damit offenbar fundpunktspezifisch für Itabira-Smaragde ist, stellen scheibchenförmige Spannungsrisse dar, die i. a. in ihrem Zentrum einen Hohlraum mit unterschiedlicher Füllung besitzen (Abb. 21, 22). Meist treten diese Rißchen in Schwärmen auf, sind untereinander parallel und verlaufen auch parallel zu den basalen Spaltflächen des Smaragds.

5. Bildungsbedingungen

Genetisch gesehen gehört das Smaragdvorkommen von Itabia zu jenem Bildungstyp, bei dem mafisch-ultramafische Gesteine (oder deren metamorphe Derivate) mit Pegmatiten assoziiert sind. Letztere sind hierbei die Beryllium-Lieferanten, während die (Ultra-)Mafite die für die Grünfärbung des Smaragds notwendigen Elemente (Cr, Fe) bereitstellten. Basierend auf dem fundpunktspezifischen Einschlußbild der Itabira-Smaragde scheint es jedoch gerechtfertigt, diese Lagerstätte in einer Systematik der Smaragdvorkommen als einen eigenen Untertyp aufzuführen (SCHWARZ, 1987).

Von anderen ebenfalls an metamorphe Schiefer gebundenden Smaragd-Mineralisationen unterscheidet sich das Vorkommen von Itabira durch die offenbar niedrigeren Bildungsbedingungen (P, T), welche wahrscheinlich auch für das typische Einschlußbild und die chemischen Charakteristika verantwortlich sind.

Aufgrund von mikrothermometrischen Untersuchungen an einer ausgewählten Probe mit 25 vierphasigen Einschlüssen kann eine minimale Bildungstemperatur von 380 °C und ein minimaler Bildungsdruck von 1400bar hergeleitet werden (vgl. MULLIS, 1979). Der Druck ist aufgrund der Homogenisations-Temperatur mit Hilfe der P-V-T-Daten des Systems H_2O-CO_2-NaCl nach BOWERS & HELGESON (1983) berechnet worden.

Die Entstehung der Itabira-Smaragde wird mit dem Eindringen der Pegmatitmassen kaum direkt verknüpft sein. Vielmehr ist die Smaragdbildung das Resultat einer späteren metamorphen oder retrograden Überprägung.

Das Vorliegen mehrerer Typen von Gas-Flüssigkeits-Einschlüssen in ein und demselben Kristall läßt den Schluß auf eine komplexe, mehrphasige Bildungsgeschichte zu.

Danksagung

Herrn Ronaldo Fonseca Ribeiro von der Belmont gemas ltda danken wir für das großzügige Entgegenkommen bei den Besuchen in der Mine, sowie für das Überlassen von Probematerial und einigen unveröffentlichten Berichten.

Einer der Autoren (D.S.) ist folgenden Institutionen für finanzielle Unterstützung und die Bereitstellung von Sachmitteln zu Dank verpflichtet.

Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD), Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) und Fritz Thysen Stiftung.

Herrn Prof. H. Schwander, Basel, danken wir für seine Unterstützung bei den Mikrosondenuntersuchungen, Herrn Dr. J. Mullis, Basel, danken wir für seine Untersuchungen an Gas-Flüssigkeitseinschlüssen.

Literatur

Bowers, T.S. & Helgeson, H.C. (1983): Calculation of the thermodynamic and geochemical consequences of non-ideal mixing in the system H_2O-CO_2-NaCl on phase relations in geologic systems: Equation of state for H_2O-CO_2-NaCl fluids at high pressures and temperatures. – Cosmochim. Acta. **47**, 1247–1275.

Gübelin, E. & Koivula, J.I. (1986): Bildatlas der Einschlüsse in Edelsteinen. – Zürich, ABC Verlag.

Franz, G., Grundmann, G. & Ackermand, D. (1986): Rock forming beryl from a regional metamorphic terrain (Tauern Window, Austria): Parageneses and crystal chemistry. – Tscherm. Mineral. Petrograph. Mitt. **35**, 167–192.

Hänni, H.A. (1982): A contribution to the separability of natural and synthetic emeralds. – J. Gemmol. **18**, 138–144.

Hänni, H.A. & Klein, H.H. (1982): Ein Smaragdvorkommen in Madagaskar. – Z. Dt. Gemmol. Ges. **31**, 71–77.

Hänni, H.A. & Kerez, C.J. (1983): Neues vom Smaragdvorkommen in Sta. Terezinha de Goiás, Gioás, Brasilien. – Z. Dt. Gemmol. Ges. **32**, 50–57.

Muller-Bastos, F. (1981): Emeralds from Itabira, Minas Gerais, Brazil. – Lapidary Journal Dec. 1981.

Mullis, J. (1979): The system methane-water as a geologic themometer and barometer from the external part of the Central Alps. – Bull. Mineral. **102**, 526–536.

Pflug, H. (1968): Observações sobre a estratigrafia da Série Minas na região de Diamantina, Minas Gerais. – D.N.P.M., Div. Geol. Min., Notas prelim. e estudos **142**, 20p.

Sauer, D. (1982): Emeralds from Brazil. – International Gemmological Symposium Proceedings 1982, 359–377; Santa Monica – New York, GIA.

Schorscher, H.D. (1973): Zur liegenden Abgrenzung der präkambrischen Minas-Gruppe, am Beispiel des Raumes Itabira, Minas Gerais, Bras. – Münster. Forsch. Geol. Paläont., **31/32**, 29–53.

Schorscher, H.D. & Guimarães, P.F. (1976): Estratigrafia e Tectonica do Supergrupo Ferrífero de Itabira. – 29° Cong. Bras. Geol., Roteiro des Excursões, 75–86, Belo Horizonte.

Schorscher, H.D., Santana, F.C., Polonia, J.C., Moreira, J.M.P. (1982): Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais State: Rio das Velhas Greenstone Belt and Proterozoic Rocks. – ISAP, Excursions annex, Salvador, Bahia – Brazil.

Schwander, H. & Gloor, F. (1980): Zur quantitativen Mikrosonden-Analyse von geologischen Proben mittels kombiniertem EDS/WDS. – X-Ray Spectrometry **9**, 134–137.

Schwarz, D. (1987): Esmeraldas. – Imprensa Universitária, Ouro Preto – MG. (in Vorbereitung).

Bei der Schriftleitung eingegangen am 18. November 1986.

Anschriften der Verfasser:
Dr. HENRY A. HÄNNI, MARKUS FISCHER, Universität Basel, Mineralog.-Petrograph. Institut, Bernoullistraße 30, CH-4056 Basel, Schweiz.
Dr. DIETMAR SCHWARZ, Deutscher Akad. Austauschdienst, Centro Gemologico/DEGEO, Universidade Federal de Ouro Preto, 35400 Ouro Preto – Minas Gerais, Brasilien.