

BEITRÄGE ZUR GEOLOGIE DER SCHWEIZ
KLEINERE MITTEILUNGEN

Nr. 31

**Die Bohnerzfunde in den Tiefbohrungen
von Limberg (Küsnacht, Kt. Zürich) und
Eglisau II**

von

W. EPPRECHT

mit Beiträgen von

U. Büchi, F. Hofmann und Th. Hügi

Vorwort der Schweizerischen Geotechnischen Kommission

Die bis in die jüngste Zeit viel ausgebeuteten Bohnerze der eozänen Siderolithformation sind bisher erzmikroskopisch und geochemisch kaum näher untersucht worden. Die Studie von W. Epprecht (mit Beiträgen von U. Büchi, F. Hofmann und Th. Hügi): „Die Bohnerzfunde in den Tiefbohrungen von Limberg (Küsnacht, Zürich) und Eglisau II“ gibt an zwei charakteristischen Bohnerzvorkommen erstmalig interessante Einblicke in Aufbau und Gehalte an Spurenelementen dieser Bildungen. Den Autoren sei bestens gedankt, dass sie ihre in den „Schweizerischen Mineralogischen und Petrographischen Mitteilungen“ erschienene Arbeit für die „Kleineren Mitteilungen“ zur Verfügung stellten.

Zürich, Mai 1963.

Der Präsident der
Schweiz. Geotechnischen Kommission

Prof. F. DE QUERVAIN

Erscheint gleichzeitig in „Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen“, Band 43, Heft 1, 1963

Die Bohnerz-Funde in den Tiefbohrungen von Limberg (Küsnacht, Kt. Zürich) und Eglisau II*)

Von *Willfried Epprecht* (Zürich),
mit Beiträgen von *Ulrich Büchi* (Zürich), *Franz Hofmann* (Neuhausen)
und *Theodor Hügi* (Bern)

Mit 6 Textfiguren

Zusammenfassung

Die Bohrung der SEAG bei Limberg traf unter der Süsswassermolasse zwischen etwa 2006 und 2026 m u. M. autochthones Bohnerz in den Wangenerkalken an. Es enthält Hämatit- und Goethit/Kaolinit-Bohnen und -Knollen. Der Bohnerzton besteht aus einer dunkelroten bis violetten Kaolinit-Hämatit-Masse. Die Mineralien wurden röntgenographisch bestimmt, die mannigfaltige mikroskopische Struktur der Erzbohnen beschrieben, Angaben über den Gehalt von Spurenelementen gemacht und Vermutungen über die Entstehung des Erzes mitgeteilt.

Das Bohnerz, welches in der Bohrung Eglisau II in einer Tiefe von 156 bis ca. 149 m ü. M. angetroffen wurde, ist nicht autochthones Bohnerz, sondern unter ariden Bedingungen aufgearbeiteter, bohnerzhaltiger Malmkalk. Bruchstücke des autochthonen, ockergelben Goethit-Kaolinit-Bolus mit eingeschlossenen Goethit-Kaolinit-Bohnen sowie Einzelbohnen und Malmkalk-Grus liegen hier in einem kalkhaltigen Kaolinit-Mergel eingebettet. Neben ockerfarbenen Goethit-Kaolinit-Bohnen wurde auch eine Hämatit-Bohne gefunden.

Abstract

Autochthonous pisolitic bean ore was observed in a deep test drilled near Limberg at a depth of 2006 to 2026 meters subsea in upper jurassic limestones. It contains hematite- as well as goethite-kaolinite- pisolites. The bean ore clay consists of dark-red to violet kaolinite-hematite aggregates. The minerals were identified by X-ray methods. The manifold microscopic textures of the bean ore are described. The amount of trace elements is reported and possibilities for the origin of the ore are discussed.

*) Erscheint gleichzeitig als „Beiträge zur Geologie der Schweiz, Kleinere Mitteilung Nr. 31“.

The bean ore found in the water well of Eglisau II at a depth of + 156 to approx. + 149 meters a. s. l. was formed under arid conditions rather than as autochthonous bean ore body. Brecciated fractions of the autochthonous ochraceous yellow goethite-kaolinite bean ore as well as single pisolites and upper jurassic limestone debris are here embedded in a calcareous kaolinite marl. A hematite pisolite has been found besides ochraceous goethite-kaolinite pisolites.

1. Einleitung

Tertiäre Bohnerze sind im schweizerischen Jura, insbesondere östlich der Linie Biel-Pruntrut weit verbreitet und früher vielfach abgebaut worden. Ihr Vorkommen zieht sich über den Kanton Schaffhausen bis in die Schwäbische Alb hinein und ist an die alte Karstoberfläche gebunden, welche die Malmkalke nach oben begrenzt. Die südlichsten Bohnerzvorkommen in den Kantonen Zürich und Schaffhausen liegen am Südabhang der Lägern, am Rheinfall und im Reiat. Dort tauchen sie mit den Malmkalken gegen Süden unter die Molasseschichten ein und erscheinen erst wieder im Autochthon und Parautochthon der Alpen auf der Linie Grindelwald-Engelhörner-Gental-Titlis-Hoh Faulen-Zutreibistock.

Die Tiefbohrung der AG. für Schweizerisches Erdöl (SEAG) bei Limberg (Küsnacht, Kanton Zürich) traf im Sommer 1960 unter der Molasse Bohnerze von erheblicher Mächtigkeit, so dass es angezeigt ist, diesen zwischen den Jura- und Alpenvorkommen einzigartigen Bohnerzaufschluss etwas näher zu untersuchen. In den Jahren 1956/57 wurde ferner bei Eglisau eine zweite Tiefbohrung durch die Mineralquelle Eglisau AG. abgeteuft, welche ebenfalls Bohnerze zutage förderte. Da uns auch von diesem Fund Proben zur Verfügung gestellt wurden, ergriffen wir die Gelegenheit, auch sie in die Untersuchung einzubeziehen.

Die schweizerischen Bohnerze sind petrographisch sehr wenig untersucht worden. Insbesondere fehlt eine erzmikroskopische Bearbeitung. Es wird daher im folgenden vor allem auf den Mineralbestand und das Gefüge der beiden Bohnerzvorkommen eingegangen. Auf eine eingehende chemische Prüfung musste leider verzichtet werden, da ihre Durchführung den zum vorneherein eng gesteckten Rahmen dieser Arbeit gesprengt hätte; immerhin war es möglich, einige vom „Arbeitsausschuss für die Untersuchung schweizerischer Mineralien und Gesteine auf Atombrennstoffe und seltene Elemente“ (Arbeitsausschuss Atombrennstoffe) ausgeführte Bestimmungen zu übernehmen. Unsere Publikation soll zeigen, dass eine umfassende Bearbeitung der schweizerischen Bohnerze sehr lohnend wäre.

2. Lage und Geologie der Fundpunkte

a) LIMBERG

Die Tiefbohrung „Küsnacht I“ der SEAG wurde beim Koordinatenpunkt 689.296/241.485 von der Höhe 642 m ü. M. aus abgeteuft und erreichte eine Endteufe von 2692,5 m. Sie durchteufte zunächst die obere Süsswassermolasse (bis 545 m), obere Meeresmolasse (bis 1065 m) und untere Süsswassermolasse (bis ca. 2650 m). Unter einer Schichtlücke durchfuhr man hierauf bis zum ca. 2670. m die Bohnerzformation mit Malmkalk und darunter von 2670 bis 2692,5 m die Wangenerschichten. Die wahre Teufenlage der Bohnerzformation erstreckt sich nach dem Schlumbergerdiagramm von 2648 bis 2668 m; sie liegt somit zwischen 2006 und 2026 m unter dem Meeresspiegel. Die geologischen Ergebnisse wurden von U. P. BÜCHI und Mitarbeitern (1961) zusammenfassend publiziert. Dem Schichtenverzeichnis der SEAG ist im speziellen folgendes zu entnehmen:

- 2647,5 bis 2652,5 m: Im Sandrückstand der Spülprobe des 2652,5 m lassen sich mit der Binokularlupe Hämatitkristalle und einzelne gerundete Bohnerzkügelchen feststellen. (Darüber waren keine Anzeichen der Bohnerzformation vorhanden.)
- 2649,75 m: Der Seitenkern besteht — wie in den darüberliegenden Molasse-schichten häufig getroffen — aus braunvioletttem Mergel- bis Tonmergelstein mit ca. 40 % dunkelgelb-grauen bis olivstichigen, schwach kalkigen, cm-grossen Einlagerungen von Tonstein, z. T. scharf begrenzt, z. T. durch Übergänge mit der braunvioletten Grundmasse verbunden. Undeutliche und unregelmässige Schichtung schwach angedeutet.
- 2650,0 m: Der zerbohrte Seitenkern enthält einige bis 2 cm grosse Bröckchen Bolustonsteine, dunkelrot bis violettbraun, kalkig, mit bis 0,5 mm grossen, ockergelben, runden oder ovalen Konkretionen von Tonstein; dicht, hart, glatt. Schichtung nicht erkennbar; 1 mm dicke, mit Calcit verheilte, unebenflächig verlaufende Kluft.
- 2652,0 m: Seitenkern: Komponenten wie bei 2650,0 m; zusätzlich mehrere mm grosse, kantengerundete Gerölle aus schmutziggrauem Hornstein.
- 2652,5 m: Seitenkern aus hellgrauem Kalkstein, schwach tonig, dicht, hart.
- 2653,0 m: Seitenkern: einige Bröckchen zerbohrten Kalksteins wie 2652,5 m.
- 2653,5 m: Desgl., mit schwarzen, glänzenden Rutschharnischen.
- 2653,85 m: Seitenkern: Kalkstein wie darüber, hell-mittelgrau, braunstichig. Bis 1 cm dicke Kluftfüllung von hell-lauchgrünem, tonigem Kalkstein mit mm-grossen, braunroten Flecken; feinbrecciöses Aussehen. Calcitverheilte Klüfte von bis 5 mm Dicke, seitlich rasch auskeilend.
- 2660,5 bis 2663,0 m: Kern: 0,35 m Kalkstein, hellbräunlichgrau, schwach tonig. Auf Drucksuturen fragliche Pyritthäute. Mehrere unregelmässige Apo-

physen von braunvioletter, von Calcit-Kluftnetzen durchzogenem Boluston. Zu unterst 0,17 m an einer Seite des Kernes ein nach unten breiter werdender, bis 2 cm dicker randlicher Teil einer Apophyse von braunrotem Boluston mit ockergelben, fetten Tongallen, mit hellgrünem Saum. Ferner fette, konzentrisch geschalte Tongallen, weisslich grün oder dunkelgrün, seltener violett-braun, sowie eckige Bohnerzkonkretionen bis 1 cm Grösse; Kalkoberfläche gegen den Bolus von zahlreichen mm-grossen Grübchen bedeckt; darüber folgt mm-dicke Tontapete, kalkseits schwarz, gegen den Bolus zu weisslichgrün. Kalkstein hart, dicht, glatt. Bolus mürbe bis bröckelig, fettig. Schichtung nicht erkennbar. Bolus von zahlreichen, z. T. mit Calcit-Tapete überzogenen Harnischflächen durchsetzt.

2663,0 bis 2676,0 m: Kern: a) oberste 15 cm Kalk, hellbraungrau, durchzogen von einer mit Calcit verheilten, bis 3 cm breiten, steil einfallenden Kluft, deren Flächen horizontal gerieft und mit einem schwarzen Tonbelag überzogen sind. Die Kluft trennt den oben genannten Kalk von einem mehr grünstichigen Kalk, der einen kleinnarbigen Bruch besitzt und von zahlreichen feinen Suturen durchzogen wird.

b) Darunter 2,90 m Boluston, braunviolett, ganz selten rotbraune Partien; nicht in Wasser dispergierbar; mit zahlreichen ockerfarbenen, z. T. konzentrisch schaligen, runden, ovalen, unregelmässig niedrigen und seltener eckigen Tonsteinkonkretionen, eisenschüssig, z. T. mit schwarzgrauen Bohnerzkernen und Adern (Hämatit); daneben nicht selten feine, schwarzgraue Bohnerzkonkretionen; Grösse der Konkretionen bis 5 cm, meist nur 1 cm. Anteil der Bohnerz- und Tonkonkretionen am Gesamtgestein in den oberen 0,8 m 5—10 %, im restlichen Kernteil ca. 25—30 %. Auf einigen Harnischflächen Beläge von hellgrau-grünem, ockenbraun umrändertem, feinschuppigem, fettem, jedoch nicht dispergierbarem Tonstein; ziemlich fest, dicht, glatt; Schichtung nicht erkennbar. Bruch eckig bis stückig nach Harnischflächen. Besonders in der oberen Hälfte des Kernteiles zahlreiche unregelmässige, kurze Adern von weissem Calcit und milchigem Tonstein, die Bohnerzkörner teils durchsetzend, teil umfahrend.

c) Darunter 0,42 m Kalkstein, bräunlichgrau, schwach tonig, mit rotbraunen, unregelmässig ovalen Verfärbungen bis 1 cm Durchmesser; daneben bis 1 mm grosse, etwas heller gefärbte rundliche Koprolithen, Verschiedene Drucksuturen sowie eine 45° einfallende Harnischfläche mit zuunterst schwarzem, darüber graugrünem, braungeflecktem Tonbelag.

d) Darunter ca. 1,97 m Boluston wie oben bei b) beschrieben. Anteil der Konkretionen am Gesamtgestein ca. 10—15 %, von ca. 1,0 bis 1,1 m auf der einen Hälfte des Kernes eine Einschaltung von Kalkstein entsprechend c).

e) 0,56 m weitgehend zerbohrter Kalk entsprechend c).

2676,0 bis 2678,0 m: Meisselstrecke.

2678,0 bis 2682,5 m: Kern: 2,35 m Kalkstein, mittelgrau stark braunstichig, oben sehr schwach, unten schwach tonig. Verschiedentlich kleine, bis 1 mm grosse, zackige Pyritkonkretionen mit bunten Anlauffarben. Unten

zahlreiche, feine, wellige Tonlagen von Papierdicke bis 1 mm. Einzelne kompakte Tonlagen bis 5 mm Mächtigkeit. Sehr hart, dicht, glatt. Schichtung durch Tonlagen angedeutet. Einfallen 0 bis 5°.

Diese (etwas gekürzten) Angaben aus dem Bohrprotokoll zeigen deutlich, dass zwischen dem 2650. und 2676. Meter eine oder mehrere Bohnerztaschen im Wangener Kalk getroffen wurden. Die Lagerungsverhältnisse des Bohnerzes stimmen mit den von E. BAUMBERGER (1923) beschriebenen, für den schweizerischen Jura geltenden Verhältnissen überein.

b) EGLISAU II

In den Jahren 1820—1823 wurde am Rheinufer (345 m ü. M.) die Bohrung Eglisau I erstellt (Koordinaten 681.600/270.000) und dabei nach BAUMBERGER (1923) in 260 m Tiefe, das heisst ca. 85 m ü. M., Bohnerz angefahren.

Die 1956/57 abgeteufte Bohrung Eglisau II (Koordinaten 680.850/269.850) durchfuhr nach J. CADISCH (1959) von 382 m ü. M. an bis zum 229. Meter untere Süsswassermolasse und hierauf Bolus mit Bohnerz bis zum 236. Meter. Von dort an sind Malmkalke durchteuft, welche bis zum 269. Meter bohnerzhaltige Spalten und Schlote aufweisen. Die Endteufe liegt bei 562 m im Malmkalk (β). Das Bohnerz liegt somit zwischen 156 und 113 m ü. M., wobei die oberen 7 Meter offenbar eine durchgehende, bohnerzhaltige Schicht aufbauen, währenddem darunter noch mindestens 33 Meter tief in den Malmkalk hinab reichende Vorkommen nachgewiesen sind. Die uns vorgelegten Kern-Proben stammen aus dem oberen, schichtartigen Teil; die tieferliegenden Spalten- und Schlotfüllungen wurden nur anhand von Spülproben erkannt.

3. Charakterisierung der Erze

a) LIMBERG

α) Makroskopisches Aussehen

Das Aussehen der Bohrkerns ist durch den oben wiedergegebenen Auszug aus dem Schichtenverzeichnis der Bohrung bereits weitgehend charakterisiert. Der Boluston ist im Gegensatz zu den Vorkommen des Jura hart und in Wasser nicht leicht dispergierbar. Seine Farbe ist fast durchwegs dunkelbraunrot bis violett; selten ist er bleich und dann

von grünlich-weisslicher Tönung. Er zeigt nirgends Spuren einer Schichtung. Hie und da sind darin bis etwa 1 mm grosse, rundliche Quarzkörner erkennbar. Der Bolus enthält nesterartig angehäuften, scharf gegen ihn abgegrenzte, kugelige oder unregelmässig geformte, zum Teil auch eckige „Bohnen“ und Knollen, die entweder aus ockerfarbenem Erz (im Schichtenverzeichnis als „Tonsteinkonkretionen“ oder „Tongallen“ bezeichnet) oder stahlgrauem bis fast schwarzem Hämatit bestehen. Die Figur 1 gibt die Oberfläche eines Bohrkernstückes wieder, wobei die

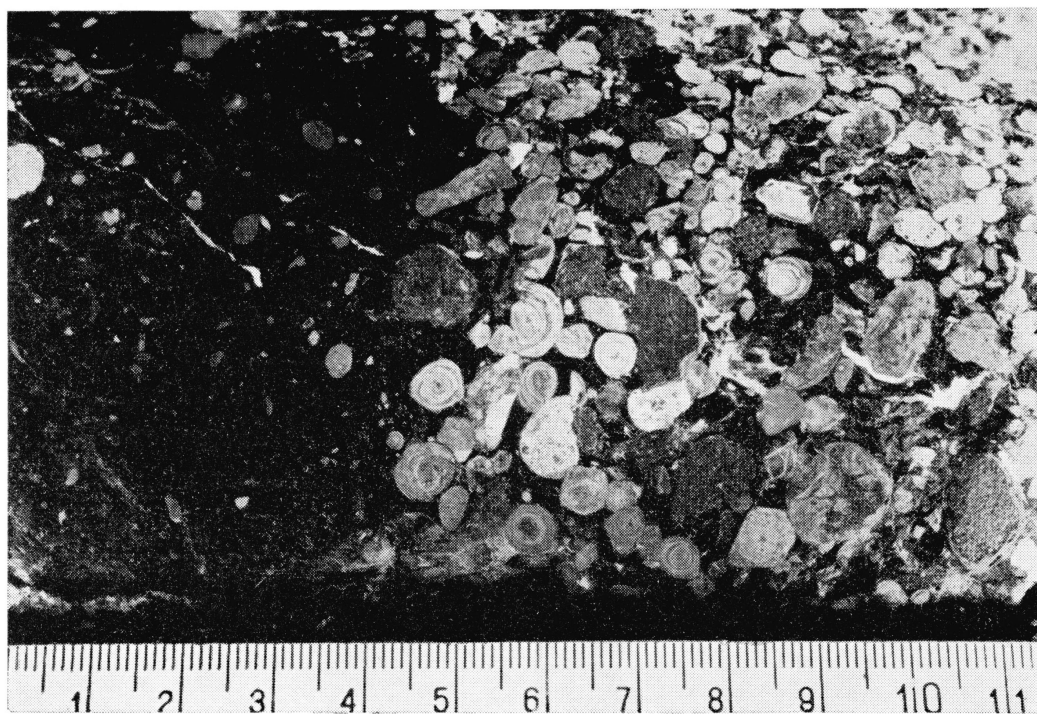


Fig. 1. Bohrkern aus Bohnerz, Limberg, ca. 2663. m. Rechts = unten. Dunkel = roter Bolus, hell = ockerfarbene Bohnen aus Kaolinit + Goethit. Grau, meist körnig aussehend = Hämatit. Weiss = schlierige Adern aus fast reinem Kaolinit.

starke Anhäufung unten im Kern (im Bild rechts) deutlich zum Ausdruck kommt. Der Innenbau der Bohnen ist ausserordentlich mannigfaltig, doch kann man schematisierend einige Grundtypen unterscheiden: sowohl die ockergelben wie die Hämatitbohnen können entweder einen homogenen, schlierig oder wolkig gebauten, jedenfalls ungeschichteten Aufbau besitzen (Fig. 2a, b, i) oder aber konzentrisch-schichtig struiert sein (Fig. 2c, d, e, f, g, h, k, l, m). Die konzentrisch-schaligen ockerfarbenen Bohnen besitzen meistens einen ungeschichteten, schlierig-wolkig oder homogen gebauten Kern (2c, d), der auch aus mehreren Teilen (zum Beispiel älteren, kleinen Bohnen oder Bruchstücken von

solchen; 2f) oder aus Hämatit (h, l, m) bestehen kann. Auch rundliche oder eckige Bruchstücke von konzentrisch-schaligen, ockergelben Gebilden sind häufig als solche im roten Bolus eingebettet (2e, f, g). Geschichtete Konkretionen weisen oft starke Störungen der Schichtung auf (2d). Die Hämatitbohnen sind meistens relativ homogen gebaut (i, Kerne von k, l, m), können aber auch bis mm-grosse, homogene

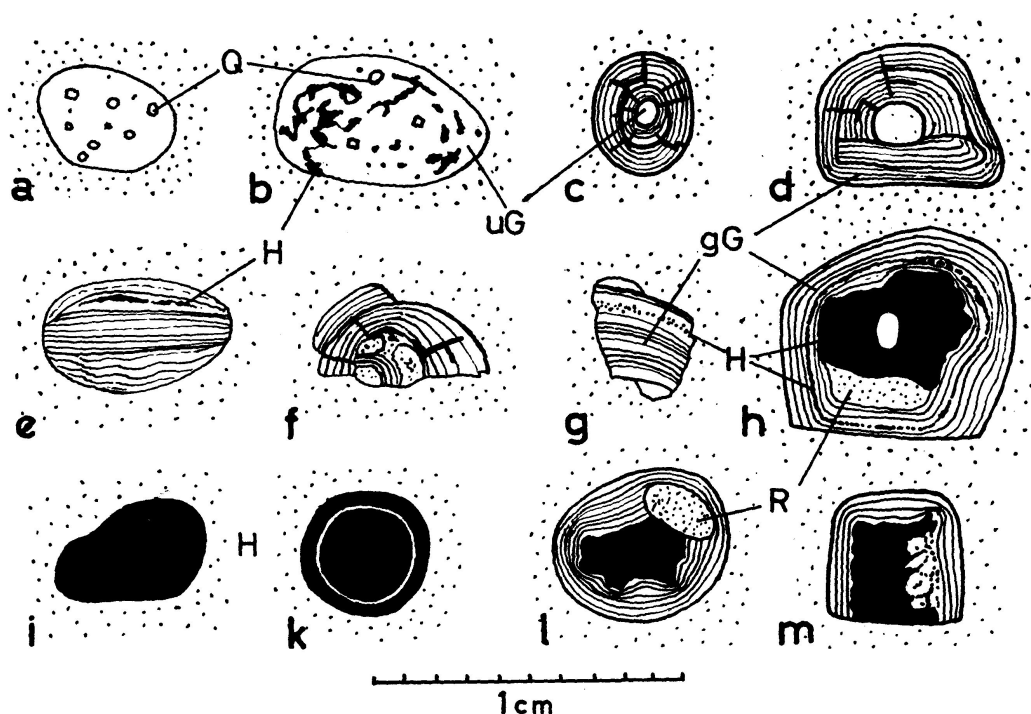


Fig. 2. Wichtigste Typen der Erzbohnen von Limberg. Weiss = Goethit/Kaolinit-Dispersion (in der Natur ockergelb): geschichtet (gG) oder ungeschichtet (uG). Schwarz = stahlgrauer Hämatit (H). Locker punktiert = dunkelroter Boluston, gegen alle Bohnen scharf abgegrenzt. R = bolusartig aussehende, rote Partien in Bohnen eingeschlossen.

Ockerkügelchen enthalten (h). Seltener besteht ein unregelmässiger Übergang zwischen mehr oder weniger homogenem Hämatit und einer ockerfarbenen, schlierigen Zone (m). Randlich an den Hämatit grenzen bei vereinzelt Knollen Partien von rotem, bolusartigem Aussehen, die mit dem Hämatit zusammen von ockergelben Schichten umhüllt sein können (h, l). Konzentrisch-schalige Hämatitbohnen sind selten und enthalten meist nur ganz wenige ockerfarbene Schichten (k). Hämatit tritt ferner auch als unregelmässige Flitter und Körnchen in ungeschichteten Ockerknollen (b) oder in einzelnen Schichtchen von schaligen

Ockerbohnen (e, g, h) auf. Die ockerfarbenen Bohnen sind — falls schichtig gebaut — selten über 1 cm gross, falls ungeschichtet oft relativ gross (bis 5 cm). Die Hämatitgebilde können bis 3 cm erreichen. Wie die Figur 1 zeigt, ist die Verteilung der verschiedenen Bohnen-Sorten völlig regellos. Ganz selten treten auch graugrünliche Tongallen auf.

Das Bohnerz ist stellenweise von Rutschharnischen durchsetzt, die mit dunkeln Tonhäuten belegt sind. Ferner treten vereinzelte oder auch eng gescharte, weisse Adern auf, welche mit Calcit oder Tonsubstanz gefüllt sind. Die Kontaktfläche zum Kalk ist oben (2660,5—2663,0 m) beschrieben worden.

β) Röntgenographische Identifikation der Mineralien

Die Bestandteile des Bolus und der darin eingebetteten Bohnen sind fast durchwegs so feinkristallin, dass sie mikroskopisch nicht einwandfrei identifiziert werden können. Aus diesem Grunde wurde eine grössere Anzahl von Röntgen-Pulveraufnahmen nach dem Debye-Scherrer-Verfahren hergestellt, und zwar sowohl von Durchschnittsproben ganzer Gesteinsstücke (Bolus, Querschnitt ganzer Bohnen) wie auch von herauspräparierten, mehr oder weniger monomineralischen Partien. Die Aufnahmen wurden mit Fe-K-Strahlung (gefiltert mit Mn) in einer Kamera vom Durchmesser 57,2 mm gewonnen. HARKORT (1939) hat seinerzeit zahlreiche entsprechende Röntgenaufnahmen an Bolus und Erzbohnen von Lohn (Kt. Schaffhausen) hergestellt, und EICHLER (1961) veröffentlichte Röntgendiagramme von Bohnerzen aus Süddeutschland, was Vergleiche mit den nördlicheren Vorkommen ermöglicht.

Der rote Bolus lieferte ein Pulverdiagramm, welches die Interferenzlinien von *Hämatit*, *Kaolinit* und *Quarz* enthält. Die Intensität aller drei Liniensysteme ist etwa gleich stark, so dass alle drei Mineralien als Hauptbestandteile des roten Bohnerztones angesehen werden müssen. Die Linien von Hämatit und Kaolinit sind beide kontinuierlich geschwärzt, diejenigen von Kaolinit leicht verbreitert. Die Quarzinterferenzen sind ziemlich grob punktiert. Dies lässt darauf schliessen, dass die Kaolinit-Kriställchen sehr klein (unter 10^{-5} cm), die Hämatitkörner ca. 10^{-4} bis 10^{-5} cm gross sind und Quarz relativ grobkörnig ist. Im Gegensatz zu diesem roten, harten Hämatit-Kaolinit-Bolus von Limberg ist der leicht dispergierbare, ockergelbe Bolus von Lohn (nach HARKORT, 1939) und aus Süddeutschland (EICHLER, 1961) gemäss dem Röntgenbefund aus Kaolinit, Goethit (Nadeleisenerz, α -FeOOH) und etwas Quarz aufgebaut. Hämatit fehlt bei den jurassischen, ockerfarbenen bis

braunen Bolustonen, er ist jedoch als Nebengemengteil in den dortigen rotgefärbten Bohnerztonen vorhanden. Karbonate fehlen im Bolus von Limberg vollkommen, was auch durch eine qualitative, chemische Analyse bestätigt wurde. Der Bolus von Limberg ist somit entsprechend den jurassischen Bohnerztonen völlig entkalkt.

Eine graugrüne, tonige Schliere von ca. 1 cm Dicke, welche an den Kalk von Limberg grenzte, ergab ein Pulverdiagramm, das neben scharfen, ziemlich schwachen *Quarz*-Linien Interferenzen eines *Illit*-artigen Tonminerals enthält. Wegen der schwachen Intensität und grossen Linienbreite der Interferenzen konnten keine genauen d-Werte ermittelt werden, doch bestätigte ein direkter Vergleich mit einem Testpräparat eindeutig den *Illit*-Charakter dieses Tones. EICHLER fand in ähnlicher Lage auf Kalk unter dem Bohnerz graugrüne, plastische Tone, welche aus einem Gemisch von *Illit* und *Kaolinit* bestehen. Eine der bei Limberg selten vorkommenden grauen Tongallen im roten Bolus ergab demgegenüber ein fast reines *Kaolinit*-Diagramm sowie die stärkste Linie von relativ grobkörnigem Quarz.

Die häufigen ockergelben Bohnen und Knollen lieferten Röntgen-diagramme, welche vor allem aus den *Goethit*-Interferenzen und meist deutlich schwächeren *Kaolinit*-Linien bestehen, und zwar sowohl die ungeschichteten Knollen wie die geschichteten Schalen. Selten ist auch die stärkste *Quarz*-Interferenz nachweisbar. Dasselbe gilt für die ockerfarbenen Hüllen von Hämatit-Gebilden. Damit ist erwiesen, dass die ockergelben Konkretionen eigentliche Erzbohnen sind, welche röntgenographisch gleich zusammengesetzt sind wie die normalen Erzbohnen im Jura, die nach HARKORT und EICHLER *Goethit* und *Kaolinit* als Hauptgemengteile enthalten.

Die stahlblauen Hämatitbohnen und -kerne konnten röntgenographisch eindeutig als Hämatit identifiziert werden. Dunkle, rötliche Übergangszonen am Rande von dichtem Hämatit (zum Beispiel Partien „R“ der Figuren 2 h, m) bestehen aus Hämatit und *Kaolinit*.

Die weissen Adern sind entweder aus *Calcit* oder aus reinem *Kaolinit* aufgebaut, wobei insbesondere die kurzen, oft stückweise die Bohnen umhüllenden Adern (zum Beispiel auf Fig. 1 rechts) *Kaolinit*-Füllungen besitzen. Eine spiegelartige, schwarze Rutschharnischtapete lieferte ein Diagramm, welches die Linien von *Kaolinit*, *Quarz* und etwas *Calcit* enthält, aber keinen Hinweis auf den färbenden Bestandteil gibt. Jedenfalls handelt es sich nicht um einen Hämatitspiegel.

Die Pulverdiagramme zeigen in der Regel nur die Linien der oben genannten Mineralien. Selten sind auch wenige, schwache Zusatzlinien

erkennbar, die nicht mit Sicherheit einer bestimmten Kristallart zugewiesen werden konnten. Vermutlich handelt es sich um die stärksten Interferenzen von Schweremineralien und anderen Akzessorien. Die Lage der Goethit-Linien weicht entsprechend wie dies EICHLER beim süd-deutschen Bohnerz fand, etwas von denjenigen des reinen α -FeOOH ab. EICHLER (1961) vermochte dies auf einen isomorphen Einbau von Aluminium ins Goethitgitter zu erklären. Unsere mit kleinem Kameraradius hergestellten Aufnahmen sind zu wenig genau, um sichere Angaben hierüber zu machen, und zudem führten wir keine diesbezüglichen chemischen Untersuchungen durch.

γ) Mikroskopische Untersuchung

Es wurden sowohl Anschliffe wie Dünnschliffe untersucht, und zwar in den meisten Fällen von zwei vom gleichen Stück stammenden, wenige Millimeter auseinander gelegenen Flächen. Gemäss den auf Seite 319 gemachten Angaben (Fig. 2) sind verschiedene Typen von Erzbohnen und -knollen unterscheidbar, die im folgenden gesondert betrachtet werden.

Nicht geschichtete, ockergelbe Knollen und Bohnen

Diese bis 5 cm grossen Gebilde bestehen zur Hauptsache aus einem lichtmikroskopisch meist nicht auflösbaren, innigen Gemenge von *Goethit* und *Kaolinit*. Ihr Mengenverhältnis schwankt in der wolkigen bis schlierigen Masse stark. Im Anschliff ist der Goethit nur selten als

Fig. 3. Inneres einer nicht geschichteten, ockerfarbenen Knolle aus dem Bohnerz von Limberg. Anschliff, 73fach vergrössert. Zwischen mehr oder weniger homogenen Partien aus kryptokristalliner Kaolinit-Goethit-Dispersion (je nach Goethitgehalt unterschiedlich hell erscheinend) einerseits schlierige Stellen aus zum grössten Teil ebenfalls kryptokristalliner Goethit-Kaolinit-Dispersion, anderseits konzentrisch geschichtete Adern und Flecken aus Goethit (weiss) und grobkörnigem Kaolinit (körnig, dunkelgrau). In der Bildmitte oben und unten je ein Quarzkorn (homogen-grau) mit Kaolinit-Saum.

Fig. 4. Ausschnitt aus einer konzentrisch geschichteten, ockergelben Goethit-Kaolinit-Bohne von Limberg. Anschliff, 120fach vergrössert. Links der schlierig gebaute Innenkern, in der Mitte feinschichtige, hellere (mehr Goethit enthaltende) Schale; rechts weniger gut geschichtete, goethitarme Aussenschale mit feinen Schichten aus fast reinem Goethit (hell). Durch den feinschichtigen Teil verläuft von A über R nach B eine Abtragungsfläche an welche diskordant die rechts davon liegende, jüngere und goethitreiche, ziemlich homogene Mittelschale anschliesst. Bei R ein Rutilkorn (weiss), daneben ein Einschluss aus grobkörnigem Kaolinit.

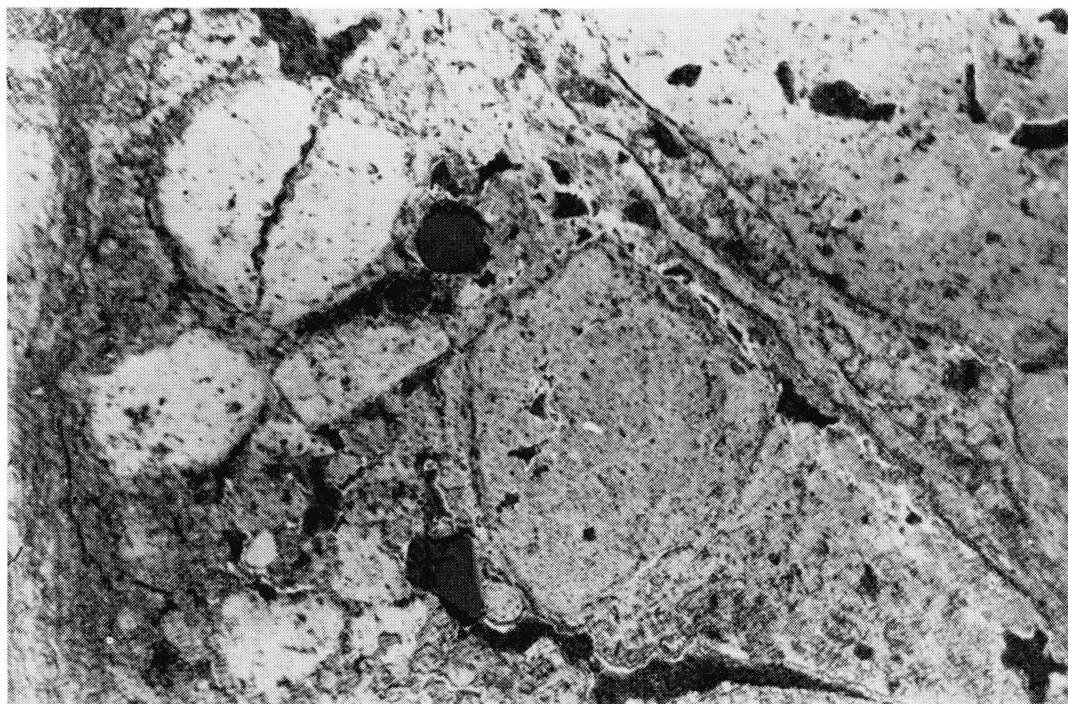


Fig. 3.

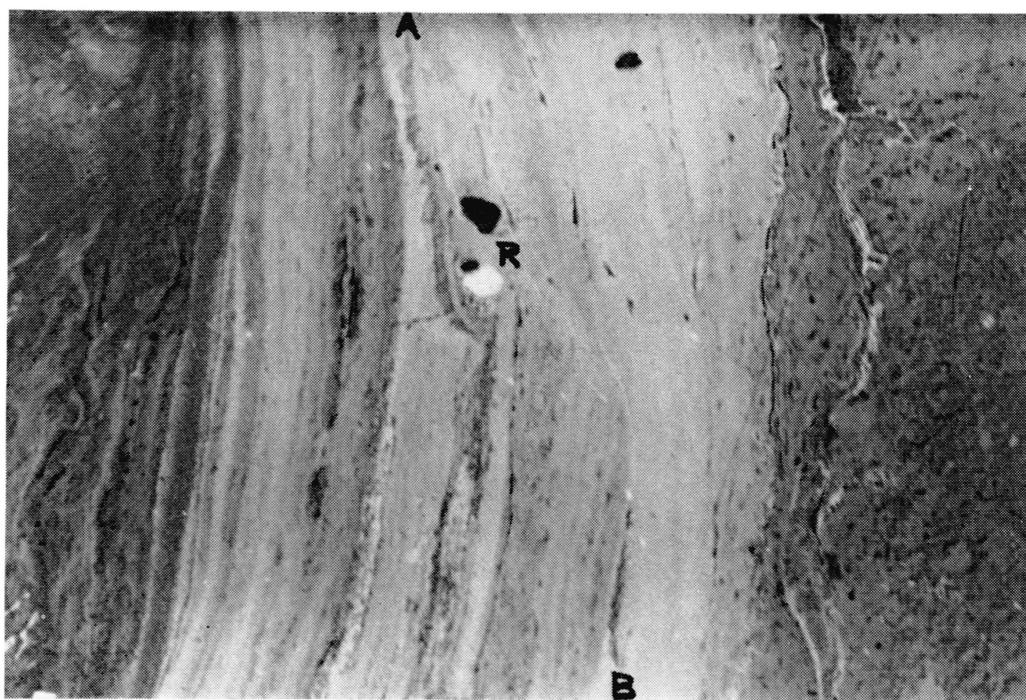


Fig. 4.

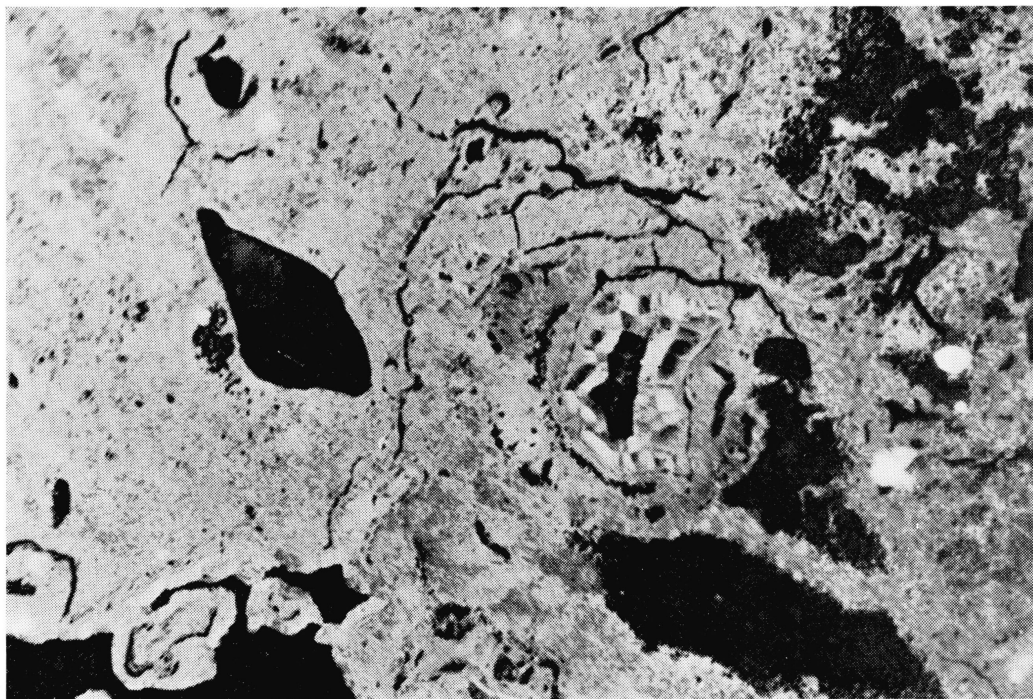


Fig. 5.



Fig. 6.

solcher erkennbar, sondern er manifestiert sich im Auflicht durch eine mehr oder weniger stark erhöhte Reflexintensität des Kaolinites, je nach seinem Mengenanteil. Bei intensiver Beleuchtung und vor allem unter gekreuzten Nicols oder im Öl leuchtet die ganze Masse orange-ocker auf, wobei die wolkig-schlierige Gehaltsverteilung des Goethites an der Intensität der Farbe sehr schön zum Ausdruck kommt. Im Dünnschliff erscheinen die goethitarmen Partien hellocker, durchscheinend, dicht und kryptokristallin. Goethitreiche Stellen sind dunkelockerbraun durchscheinend bis völlig opak. Die grösseren Knollen enthalten oft Partien aus weitgehend homogen gebautem, relativ scharf gegen die Umgebung abgegrenztem Material, das sich von ihr durch die Färbung unterscheidet (Fig. 3). Der ganze Aufbau gleicht demjenigen von aus mehreren, etwas verschieden zusammengesetzten und unterschiedlich plastischen Lehmkomponenten zusammengekneten Lehmklumpen. Während die grossen Knollen immer einen schlierigen, heterogenen Aufbau besitzen, sind kleine, rundliche Bohnen dieser Art meist völlig homogen gebaut. Als solche kommen sie auch in Hämatitbohnen eingeschlossen vor. Diese Bohnen und Knollen stellen offensichtlich eine erste Generation von Boluston dar, der zu Knollen und Bohnen aufgearbeitet wurde.

In die Kaolinit-Goethit-Bohnen sind häufig bis ca. 1 mm grosse Quarzkörner eingebettet, die zum Teil splitterartig geformt sind und scharfe Ecken besitzen, häufiger aber gerundet und oft auch tiefbuchtig korrodiert sind. Nur selten grenzen sie direkt an die Ockermasse, vielmehr sind sie in der Regel von einer Hülle aus *grobkristallinem Kaolinit* umgeben, welcher keinen Goethit enthält. Dieser Kaolinit füllt auch die Korrosionshöhlräume im Quarz aus. Während die splitterigen Quarz-

Fig. 5. Innenstruktur einer Hämatitknolle von Limberg. Anschliff, + Nicols, 120fach vergrössert. Links massiger, feinkörniger Hämatit. Links unten und Mitte rechts: Randschichten aus feinstrahligem Hämatit (? Pseudomorphosen nach Goethit). Im Zentrum des achatartigen Gebildes, ganz links unten sowie in der Mitte: körniger, reiner Kaolinit (dunkel), in der Mitte ein Quarzkorn (heller grau) umhüllend. Rechts körniges, wolkig gebautes Gemenge aus Hämatit und Kaolinit. Im massiven Hämatit (Mitte) Riss-System, mit reinem Kaolinit gefüllt.

Fig. 6. Randpartie einer Hämatitknolle mit Goethitsaum. Limberg. Anschliff, 73fach vergrössert. Links schlieriges Gemenge aus Hämatit (weiss) und Kaolinit (dunkel) vom Inneren der Knolle. Mitte: dichter bis feingeschichteter Goethit (etwas mehr grau als Hämatit, auf dem Bild kaum von Hämatit unterscheidbar). Äusserstes feines Schichtchen nochmals aus Hämatit. Rechts daran anschliessend feinschichtige Schale aus ockerfarbener Goethit-Kaolinit-Dispersion (dunkel).

körner den Anschein von Detritus-Körnchen machen, sind nicht sicher alle rundlichen Quarzkörner ehemalige Sandkörner. Oft erweckt ihre Form den Eindruck, dass es sich ursprünglich um Kieselsäuregel-Tröpfchen handelte, welche im Goethit-Kaolinit-Lehm eingebettet waren. Ihr Umriss gleicht oft auffallend dem grösseren Umriss des sie umgebenden Kaolinit-Saumes, und nicht selten liegen mehrere Quarz-„Tröpfchen“ in einer Kaolinit-Hülle. Es sieht so aus, wie wenn Geltröpfchen unter Quarzbildung geschrumpft wären und der dabei entstandene Hohlraum durch reinen Kaolinit ausgefüllt wurde. Die Quarzkörnchen sind jedoch immer nur aus einem Kristall aufgebaut und zeigen keine feinkristalline oder gar faserige Struktur, wie dies bei aus Gel entstandenem Quarz sonst häufig der Fall ist. Andere Quarzkörner sind durch zwei der mehr Systeme ungefähr paralleler Adern aus grobkörnigem, farblosem Kaolinit in isolierte Stücke unterteilt, welche unter + Nicols weitgehend parallel auslöschen. Hier liegen offenbar zerdrückte und längs den Rissen kaolinisierte Quarzkörner vor. Ferner kommen gerundete *Rutil*- und seltener *Zirkon*- und weitere nicht bestimmte Mineralkörner vor, die in der Regel keine Kaolinitsäume besitzen.

Der um die meisten Quarzkörnchen gelagerte, relativ *grobkörnige Kaolinit* ist stets farblos; seine Kriställchen sind etwa 2 bis 10 μ gross und meist leicht buchtig ineinander verzahnt. Er baut regellose, monomineralische Gefügepartien auf, welche durch ihre niedrige Doppelbrechung auffallen. Nicht selten füllt er auch scharfbegrenzte Äderchen aus, welche die Knollen durchsetzen. Es scheint, dass der grobkörnige Kaolinit immer jünger als derjenige des kryptokristallinen Goethit-Kaolinit-Gemenges ist und erst auskristallisierte, als die Knollen schon weitgehend erhärtet waren. Zwischen die kryptokristallinen Kaolinit-Goethitmassen sind stellenweise achatartig rhythmisch-schichtige, grobkristallinere Partien eingefügt, und zwar insbesondere in den Zwickeln zwischen knolligen Teilgebilden oder mehr aderförmig (in Fig. 3 angedeutet). Als Innerstes dieser Gebilde tritt häufig grobkristalliner, reiner Kaolinit auf, der gleich beschaffen ist wie derjenige der Quarz-Säume und Äderchen. Nach aussen grenzt er manchmal an einen Saum aus ebenfalls grobkristallinem Kaolinit, der jedoch nicht regellose Partien aufbaut, sondern dessen Kristalle mit der Blättchenebene ungefähr senkrecht zur Schicht stehen. Dieser Saum ist jeweils wie der kryptokristalline Kaolinit durch Goethitbeimengung braun gefärbt. Aussens ist diese Kaoliniteschicht auf kryptokristallinen, manchmal ebenfalls noch achatartig, rhythmisch geschichteten Kaolinit mit Goethit-Dispersion aufgewachsen. Es scheint, dass sich diese achatartigen Gebilde durch

rhythmische Anlagerung von aussen nach innen in Hohlräume und Risschen abschieden, wobei zuerst kryptokristalline, dann gröberkristalline Goethit-Kaolinit-Dispersion entstand und der restliche Hohlraum von massigem, reinem Kaolinit ausgefüllt wurde.

Geschichtete, ockergelbe Bohnen

Der Kern der geschichteten Bohnen besteht entweder aus ungeschichtetem Ockermaterial oder aus Hämatit. Die geschichtete Schale kann sehr dünn sein und nur einen kleinen Bruchteil des ganzen Gebildes ausmachen, was insbesondere bei grösseren Knollen und vielen Hämatitbohnen der Fall ist, oder aber den grössten Teil der Bohnen aufbauen; letzteres ist die Regel bei schön gerundeten Bohnen.

Der geschichtete Teil ist in der Regel sehr feinschichtig (Fig. 4). Wie die nichtgeschichteten Ocker-Knollen besteht auch er aus einem lichtmikroskopisch kryptokristallinen, innigen Gemenge aus Kaolinit und Goethit mit wechselndem Mengenverhältnis. Selten treten auch fast reine Goethit- oder Hämatit-Schichtchen auf oder solche mit eingestreuten Hämatitflitterchen. Die Schichtung wird hie und da von groben Quarz- und anderen Mineralkörnern (zum Beispiel Rutil) leicht gestört.

Völlig ideal konzentrisch geschichtete Bohnen fehlen praktisch ganz. Die Hülle ist fast immer durch mehrere radial verlaufende sowie ausgezeichneten Schichten peripher folgende *Risse* gestört, die ganz den Anschein von Schrumpfrissen machen. Diese sind fast immer von grobkristallinem Goethit oder schichtig mit ihm abwechselndem, reinem Kaolinit gefüllt. Die Aderfüllungen sind meist bilateral ausgebildet, was dafür spricht, dass offene oder sich langsam öffnende Risse ausgefüllt worden sind. Die Adern setzen oft an einzelnen Schichtchen zackig ab, was vermuten lässt, dass die Hülle weitgehend verfestigt war, als die Risse entstanden. Wie bei den ungeschichteten Knollen kommt der grobkristalline Kaolinit nur in relativ spät kristallisierten Partien vor und ist sicherlich jünger als die kryptokristalline Goethit-Kaolinit-Dispersion.

Des weiteren sind fast bei allen schichtigen Bohnen mehr oder weniger starke, ausserordentlich mannigfaltige *Unregelmässigkeiten im Schichtbau* zu erkennen, die auf zwei Grundstörungstypen zurückgeführt werden können. Der erste besteht darin, dass die betreffende Bohne offenbar nach einer gewissen Schichtbildungsperiode einem *Abtragungsprozess* unterworfen wurde, bei welchem die verschiedenen Stellen der Kugeloberfläche verschieden stark abgetragen wurden. Hierauf setzte ein neuer

Anlagerungsprozess ein, dessen Schichtchen die inneren diskordant umschliessen (zum Beispiel Figur 2d und 4). Beim Abtragungsprozess dürften die Bohnen zum Teil noch lehmartig plastisch gewesen sein, denn die verbleibenden Schichtchen sind oft verformt und randlich geschleppt (Fig. 2d). Der zweite Typ umfasst Störungen, welche bereits verfestigte Bohnen erfasst haben müssen, die scharfkantig zerbrochen wurden oder Teile der Hülle längs scharf gezeichneten Kanten verloren. Die Bruchstücke liegen heute als scharfkantige Trümmer im roten Bolus (Fig. 2f, g) oder sie wurden von einem neuen Anwachsprozess erfasst, sodass sie einzeln oder gruppenweise den Kern neuer, schichtiger Bohnen aufbauen (Fig. 2f); vereinzelt derartige komplexe Bohnen wurden sogar von mehreren solchen Prozessen erfasst (2e).

Der mikroskopische und makroskopische Bau der Bohnen spiegelt somit eine sehr wechselvolle Entstehungsgeschichte wider, die neben Wachstumsprozessen auch mechanische Umlagerungs-, Abtragungs- und Zertrümmerungs-Vorgänge einschliesst. Fast jede Knolle und Bohne weist eine etwas andere Geschichte auf.

Hämatitknollen und -bohlen

Die Hämatitbohlen können einerseits in fast vollkommen massive Hämatitknollen und andererseits solche eingeteilt werden, welche gegen den Rand hin mindestens stellenweise in ein stark schlieriges, oft gelartige Strukturen aufweisendes Gemenge von Hämatit, Kaolinit und teilweise auch Goethit übergehen oder ganz aus solchem bestehen (Fig. 2h, m). Dieses Gemenge ist makroskopisch rot gefärbt („R“ der Fig. 2). Alle diese Typen können als Kerne von geschichteten Ockerknollen auftreten. Ganz selten sind geschichtete Hämatitbohlen, wobei stets nur ganz wenige kryptokristalline Goethit-Kaolinit-Schichtchen im äusseren Teil vorhanden sind (Fig. 2k).

Die massiven Hämatitknollen bestehen aus feinstkristallinem *Hämatit* (Fig. 5). Stellenweise treten grobkörnigere Partien auf, die achatartig rhythmisch geschichteten Bau aufweisen, vollkommen aus Hämatit bestehen oder im Zentrum eine Füllung aus massigem, grobkristallinem *Kaolinit* besitzen. Die einzelnen Hämatitschichten weisen dabei einen radialfaserigen Bau auf, was vermuten lässt, dass es sich um Pseudomorphosen nach Nadeleisenerz handelt. Um solche Stellen herum treten oft Riss-Systeme auf, die ebenfalls mit farblosem, grobkristallinem Kaolinit gefüllt sind (Fig. 5). Des weiteren enthalten die Hämatitknollen häufig *Quarzkörner* mit Kaolinitssäumen, die ähnlich

wie diejenigen der Ockerknollen teilweise aus Geltröpfchen entstanden sein könnten. Stellenweise kommen auch relativ grobkörnige Gemenge aus Kaolinit und Hämatit vor (Fig. 5, rechts). Randlich sind die Hämatitknollen oft dichter als im Innern und dabei oft von einem zackig verlaufenden Adernetz mit Kaolinitfüllung durchsetzt. In einigen Hämatitbohnen fanden sich bis mm-grosse, homogen gebaute und scharf abgegrenzte Ockerkügelchen vor. Sehr viele Hämatitknollen weisen zu äusserst eine meist sehr dünne, geschichtete Ockerschicht auf.

Ein Teil der Hämatitkonkretionen geht randlich, und zwar oft nur einseitig, in ein rotes Hämatit-Kaolinit-Gemenge über, in welchem entweder eine gleichmässige Verteilung der beiden relativ grobkörnigen Gemengteile vorliegt, wie sie auch lokal in massiveren Hämatitbohnen (zum Beispiel Fig. 5, rechts) vorkommt, oder aber in einer mehr schlierigen Anordnung von *Hämatit*, *Kaolinit* und meistens auch *Goethit* besteht (Fig. 6, links). Sehr häufig sind in solchen Partien rhythmisch-konzentrisch geschichtete Stellen mit Schichtchen aus Hämatit, Goethit, kryptokristalliner Goethit-Kaolinit-Dispersion und etwas grobkörnigerem, fast reinem Kaolinit. Manchmal sind die Hämatitknollen aussen von einem scharf einsetzenden, dichten Goethitsaum umgeben, der nach aussen rhythmische Schichtungen mit Hämatit (relativ selten) und (oder) Kaolinit/Goethit-Dispersionen verschiedener Gehalte aufweist (Fig. 6). In allen diesen Fällen ist Goethit immer jünger als der Hauptteil des Hämatites, indem er auf Hämatit oder Hämatit-Kaolinit-Dispersionen aufgewachsen ist oder Äderchen in diesen ausfüllt.

An die goethithaltige, Gelstrukturen aufweisende Schicht kann nach aussen noch eine Zone aus kryptokristalliner Kaolinit-Goethit-Dispersion anschliessen, die makroskopisch und im Dünnschliff nicht mehr rot, sondern ockerfarben erscheint (Fig. 6, rechts). Diese Ockerschicht kann unregelmässig struiert sein und stellt vielleicht einen Rest des Tones dar, in welchem die Hämatitgebilde entstanden, anderseits aber auch feinschichtig und dann sicher jünger als der Hämatit sein. Die Altersfolge in einer solchen komplex zusammengesetzten Hämatitknolle gehorcht jeweils folgendem Bildungs-Schema:

1. Ältestes = ockerfarbene, homogene Lehmkügelchen (oft fehlend).
2. Bildung massiver Hämatitknollen, vermutlich aus Eisenhydroxyd-gelen unter direkter Ausscheidung von Hämatit, zuletzt manchmal auch von Goethit-Schichtchen, die noch in Hämatit umgewandelt wurden. Bildung von Rissen, welche mit reinem Kaolinit ausgefüllt wurden.

3. (Z. T. fehlend.) Randlich Übergang in unregelmässig körniges bis schlieriges Aggregat aus Hämatit und Kaolinit (vermutlich während der Verarmung des Gels an Fe und Anreicherung von SiO_2 und Al_2O_3).
4. (Z. T. fehlend.) Überkrustung und (oder) Riss-Ausfüllung mit rhythmischen Schichtchen aus relativ grobkörnigem Goethit (Hämatit) und Goethit/Kaolinit-Dispersionen. Dieser Vorgang fand möglicherweise infolge von erneuter Zufuhr von Eisen unter veränderten Bedingungen (zum Beispiel anderer p_{H} -Wert) statt, als die Hämatit-Gebilde in ockergelbem Lehm eingebettet waren.
5. (Z. T. fehlend.) Umhüllung mit ockerfarbenen, kryptokristallinen Goethit-Kaolinit-Dispersionen in Form feiner Schichtchen. Möglicherweise auch Anlagerung von ungeschichteter Dispersion.

Die Abfolge kann mit 2 abbrechen und aussen nur noch geschichtetes 5 enthalten oder erst bei 3 beginnen u.a.m. Zwischen 3 und 4 fand möglicherweise zum Teil eine mechanische Umlagerung der Knollen statt, vielleicht änderten sich aber auch nur die chemischen Bedingungen in situ sehr stark. Die Kügelchen 1 könnten Relikte des Erzlehmes sein, in welchem die Hämatitbildung erfolgte; dasselbe könnte auch für die ungeschichtete Goethit-Kaolinit-Dispersion, welche im Aussenteil stellenweise vorkommt, gelten.

Roter Boluston

Die Grundmasse des stets mit sehr scharfer Grenze an die Ocker- oder Hämatitgebilde angrenzenden, roten Bolustones besteht aus einem kryptokristallinen Gemenge aus *Kaolinit* und *Hämatit*. Beide Mineralien sind lichtmikroskopisch nur selten als solche bestimmbar. Im Auflichtmikroskop erscheint der Bolus einheitlich grau, unter gekreuzten Nicols oder in Öl leicht körnig mit dunkelroter Innenreflex-Farbe, im Dünnschliff opak oder schwach dunkelbraunrot durchscheinend. Es ist keine Schichtung und auch keine schlierige Textur vorhanden, sondern der Bolus ist weitgehend homogen, massig. Die Feinheit des Kornes und das Fehlen jeglicher Inhomogenitäten unterscheidet den roten Boluston von den makroskopisch ebenfalls rot erscheinenden Partien der Hämatitknollen („R“ der Fig. 2h, l).

Es sind oft und stellenweise gehäuft bis 2 mm grosse *Quarzkörner* eingestreut, die gerundet oder buchtig korrodiert und makroskopisch mattglänzend sind. Sie werden praktisch nie von Kaolinitsäumen umhüllt, wie dies in den Knollen und Bohnen der Fall ist. Es dürfte sich durchwegs um ehemalige Sandkörner handeln. Reiner, grobkörniger

Kaolinit tritt nur als stellenweise Umhüllung von Bohnen oder als scharf begrenzte Adern im roten Bolus auf. Ferner werden hie und da auch gerundete *Zirkon-* und *Rutilkörner* und seltener weitere Mineralkörner gefunden.

δ) Spurenelemente

Wie eingangs erwähnt, wurden keine eingehenden chemischen Untersuchungen angestellt. Da uns jedoch der „Arbeitsausschuss Atombrennstoffe“ die auf seine Veranlassung an einer Durchschnittsprobe eines Bohrkernstückes (roter Bolus + Ockerbohnen + Hämatitbohnen) hergestellten Analysen auf Spurenelemente zur Verfügung stellte, seien sie hier festgehalten. Das Gamma-Log zeigte im Bereiche des Bohnerzes eine Erhöhung, indem das Bohnerz eine 3- bis 5mal höhere Radioaktivität als der begleitende Kalkstein aufwies. Dies liess eine Prüfung auf Uran

Tabelle 1. *Spurenelemente in Bohnerzen* (in ppm)

Element	Durchschnittsprobe von Limberg		Bohnerz von Liptingen (EICHLER, 1961)	
	a	b	Erzbohnen	Bohnerzlehm
As	60	n. b.	n. b.	n. b.
Ba	230	210	n. b.	n. b.
Ca	3150	n. b.	600	1800
Co	n. b.	< 30	180	80
Cr	360	340	+	+
Cu	60	70	0 *)	n. b.
Ga	50	n. b.	n. b.	n. b.
Mn	110	115	8900	3300
Nb	75	n. b.	n. b.	n. b.
Ni	130	120	+	n. b.
Pb	60	40	0 *)	n. b.
Rb	65	n. b.	n. b.	n. b.
Sn	n. b.	< 30	n. b.	n. b.
Sr	410	n. b.	n. b.	n. b.
Th	< 20	n. b.	n. b.	n. b.
Ti	6750	8513 **)	6700	7200
U	< 20	n. b.	n. b.	n. b.
V	n. b.	n. b.	600	+
Y	260	n. b.	290	850
Zn	350	n. b.	+	n. b.
Zr	470	n. b.	580	860

n. b. = nicht bestimmt. *) 0,00 %, + = Spur. **) Eine freundlicherweise durch P.D. Dr. SCHWANDER (Mineralog. Institut, Basel) ausgeführte spektrographische Bestimmung ergab 8752 ppm Ti.

als angezeigt erscheinen. Die Tabelle 1 gibt in Kolonne a die Resultate einer Röntgenfluoreszenz-Analyse, hergestellt von der Analix S.A., Genf (Dr. WAKKER), in Kolonne b die im Laboratorium des „Arbeitsausschusses Atombrennstoffe“ durch TH. HÜGI mit Frl. S. STADLER durchgeführten spektrographischen Bestimmungen und in den Kolonnen c und d Vergleichswerte wieder, welche EICHLER (1961) mit der Röntgenfluoreszenz-Methode an süddeutschem Bohnerz erhielt.

Von TH. HÜGI wurde der *Urangehalt* des Limberger Bohnerzes auch noch photometrisch bestimmt und dabei ein Gehalt von 14 ppm U erhalten. Als Vergleichswert sei der von ERLÉNMEYER et al. (1950) an Bohnerz vom Kohlholz bei Lausen bestimmte Gehalt erwähnt, der 1 ppm U beträgt.

Der hohe *Titangehalt* beruht auf der Anwesenheit relativ vieler und grosser Rutilkörner. Er ist ausser von EICHLER auch von BAUMBERGER (1923) für die Bohnerze des schweizerischen Jura erwähnt worden. Der *Calcium*-Gehalt zeigt die weitgehende Entkalkung des Tones und liegt etwas über dem meist 0,1 bis 0,2% betragenden Durchschnittswert der jurassischen Bohnerze. *Mangan* ist gegenüber den süddeutschen und jurassischen Erzen (meist um 0,3%) auffallend niedrig. *Vanadium*, *Chrom* und *Arsen* sind von BAUMBERGER (1923) auch für die Bohnerze aus dem Jura erwähnt worden, und zwar sind ihre Gehalte dort oft beträchtlich höher, zum Beispiel bei Delsberg bis 1% V und bis 1,75% Cr.

ε) Zur Genese

Das Typische des Bohnerzes von Limberg besteht im gemeinsamen Vorkommen von goethit- und hämatithaltigen Bohnen in einem roten, hämatithaltigen Kaolinit-Bolus. Das Auftreten von Hämatitbohnen und -knollen ist unseres Wissens einzigartig für die schweizerischen (und süddeutschen) Vorkommen. Die obenstehenden Ausführungen über den Aufbau der Hämatitbohnen beweisen eindeutig, dass es sich dabei nicht einfach um metamorphe Goethit-Bohnen handeln kann, sonst wäre ihre Struktur anders gebaut, und es könnten weder nebeneinander Goethit- und Hämatit-Bohnen noch Hämatitknollen mit goethithaltigen Hüllen auftreten. Auch der Hämatitgehalt des roten Bolus scheint nicht metamorphen Ursprungs zu sein, da ja in ihm eingeschlossen Knollen aus goethithaltigem Bohnerzton vorkommen. Die Struktur des Erzes und seiner Bohnen spricht vielmehr für eine primäre Hämatitbildung.

Es wurde schon auf Seite 329 versucht, eine Bildungsgeschichte der Hämatitknollen abzuleiten. Die homogenen Einschlüsse aus ockerfarbe-

nem Goethit-Kaolinit-„Lehm“ zeigen, dass offenbar schon vor der Hämatitbildung Ocker-Lehm vorhanden war. Dieser gelangte entweder als solcher in Form kleiner Kügelchen in den Hämatitbildungsraum, oder aber die Hämatitknollen entstanden in diesem Lehm selbst. Der Hämatit wurde möglicherweise aus relativ reinen Eisenhydroxyd-Kieselsäure-Gelen ausgeschieden, in welche Lehmkügelchen eingeschwemmt wurden. Die fertigen Hämatit-Kaolinit-Knollen müssen später in Kaolinit-Goethit-Lehm gelangt sein, falls sie nicht schon in solchem entstanden, denn randlich gehen viele von ihnen in schlierig gebaute, ockerförmige Kaolinit-Goethitmassen über. Ob der Goethit-Ton zu den fertig gebildeten Hämatitknollen eingeschwemmt wurde oder die Knollen selbst umgelagert wurden, ist ebenfalls nicht zu entscheiden. Chemisch gesehen ist die örtlich separierte Bildung von Hämatit-Knollen und Goethit-Kaolinit-Hüllen (sowie solchen Einschlüssen) wahrscheinlicher, als die Ausscheidung von Hämatitknollen in Goethit-Kaolinit-Lehm.

Während der Hämatitknollen-Bildung, aber örtlich getrennt davon, müssen die ockerfarbenen Goethit-Kaolinit-Bohnen entstanden sein. Vielleicht ist auch zeitlich eine getrennte Bildung erfolgt. Nach Abschluss der Hämatitknollen-Entstehung müssen diese Gebilde jedoch unter Bedingungen gelangt sein, welche einen schichtigen Absatz von Kaolinit-Goethit-Dispersion erlaubte. Es ist sehr wohl möglich, dass die Hämatitbohnen nach und nach in einen Raum eingeschwemmt wurden, in welchem die Bildung von schichtigen Ockerbohnen im Gange war. Nach beendiger Schicht-Hüllen-Bildung muss ein erneuter Umweltwechsel stattgefunden haben, der nun sicher mit einer mechanischen Umlagerung verbunden war, da fertige Bohnen in Bruchstücke zerbrachen. Am endgültigen Ablagerungsort wurden alle verschiedenen Gebilde gemeinsam in den heute roten Bolus eingebettet. Sehr wahrscheinlich herrschten dabei chemisch andere Bedingungen als bei der Bildung des ockerfarbenen Bolus des Jura, denn es scheint, dass hier primär Hämatit neben Kaolinit vorhanden war. Ob der Bolus-Hämatit eingeschwemmt wurde oder in situ entstand, kann wiederum nicht entschieden werden.

Die Bedingungen, unter welchen sich einerseits Hämatit und andererseits Goethit bildeten, können heute noch nicht mit Sicherheit angegeben werden. Die Struktur des Limberg-Erzes spricht sehr dafür, dass beide primär entstehen konnten; vielleicht spielten der p_H -Wert und Lösungs-genossen eine Rolle. Spätausgeschiedene Schichtchen aus strahligem Hämatit sprechen dafür, dass sich in gewissen Fällen zuerst Goethit bildete, der dann in Hämatit umgewandelt wurde. Es ist jedoch sehr

zweifelhaft, ob aller Hämatit der Knollen aus Nadeleisenerz hervorging, jedenfalls fanden sich keine Argumente, welche dies beweisen können. Die Struktur der Hämatitknollen lässt es jedoch als sehr wahrscheinlich erscheinen, dass auch der Hämatit aus Gelen (Eisenhydroxyd) entstanden ist. Für den Goethit darf dies mit Sicherheit angenommen werden. Ferner dürfte auch ein Teil des Quarzes aus Geltröpfchen entstanden sein.

Der Kaolinit hat sich — wie dies HOFMANN (1958) und EICHLER (1961) darlegten — vermutlich aus den illitischen Tonmineralien der Kalkrückstände gebildet. Illit ist jedenfalls am Kontakt zwischen Kalk und Bolus in hellgrünlichen Tonlagen nachweisbar. Ob der kryptokristalline Kaolinit direkt aus Illit entstanden ist und sich die Eisenmineralien im Kaolinitton nach dessen Durchtränkung mit Eisenlösungen ausschieden, oder ob Kaolinit und die Eisenmineralien gemeinsam aus Gelen auskristallisierten, konnten wir nicht entscheiden. Es scheint uns vieles dafür zu sprechen, dass sich der Hämatit aus relativ reinen Eisenhydroxydgelen ausschied, währenddem die kryptokristallinen Kaolinit-Goethit-Dispersionen eher Imprägnationen von vorgebildetem Kaolinitton zu sein scheinen, in denen möglicherweise auch die Entstehung der schichtigen Ooidhüllen aus Kaolinit und Goethit vor sich ging. Der grobkörnige, reine Kaolinit, welcher sich in Hohlräumen und Adern ausschied, ist sicher jünger als der kryptokristalline Kaolinit und scheint in situ neu gebildet worden zu sein.

Über den Bildungsmechanismus der Bohnen und Knollen, insbesondere der geschichteten Ooide besteht ebenfalls noch keine Klarheit. Er könnte nur im Rahmen einer grösseren Untersuchung abgeklärt werden, wobei auch Beobachtungen an rezenten Vorgängen festländischer Verwitterung unter tropisch-humiden Bedingungen mitberücksichtigt werden müssten.

b) EGLISAU

α) Makroskopisches Aussehen des Erzes

Im Gegensatz zum Bohnerz von Limberg ist dasjenige aus der Bohrung Eglisau II nicht stark verfestigt, sondern bröckelig und leicht zerfallend. Ein hellockergelb gefärbter, leicht dispergierbarer Mergel klebt zahlreiche kleinste und bis mehrere cm grosse rundliche bis eckige Malmkalkstücke, Erzbohnen und Quarzsandkörner zusammen. Auch ein eckiges Stück aus festem, dunkelocker gefärbtem Bolus mit eingelagerten Bohnen aus Goethit fand sich in diesem Mergel. Es handelt sich offen-

sichtlich um einen aufgearbeiteten Malmkalk mit Bohnerzbruchstücken, nicht aber um echtes Bohnerz.

β) Röntgenographische Identifikation der Mineralien

Die röntgenographische Pulveranalyse ergab, dass der gelbe Mergel zur Hauptsache aus *Calcit*, *Quarz* und *Kaolinit* besteht. Helle Partien ergaben fast ausschliesslich die *Calcit*-Interferenzen sowie die stärksten Quarzlinien, stärker gefärbte Partien enthalten eher etwas mehr *Kaolinit*. Der Eglisauer „Bohnerzton“ ist somit ganz anders zusammengesetzt als die normalen, autochthonen Bolustone des Jura-, Schaffhauser- und süddeutschen Gebietes, die nach HARKORT (1939) und EICHLER (1961) vorwiegend aus *Kaolinit*, *Quarz* und *Goethit* bestehen und keinerlei *Calcit* enthalten. Der färbende Bestandteil, vermutlich *Goethit*, konnte röntgenographisch nicht nachgewiesen werden. *Kaolinit* ist äusserst feinkörnig; seine Interferenzlinien sind breiter als diejenigen des Limberg-Bolus. *Calcit* ergibt stets scharf gezeichnete, kontinuierlich geschwärmte Linien, was auf eine Korngrösse von etwa 10^{-4} bis 10^{-5} cm schliessen lässt. Die Quarzkörnchen sind grösser, ergeben sie doch punktierte Röntgenlinien. Die abgeschlämmte Fraktion $< 0,02$ mm ergab bei der chemischen Prüfung einen Gehalt von 12% Kalk und 2% Dolomit. Es handelt sich somit nicht um einen absolut entkalkten, echten Bohnerzton, sondern wie beim Vorkommen vom Rheinfeld um einen *Kaolinit*-Mergel (HOFMANN und PETERS, 1962).

Eine konzentrisch geschichtete, harte, dunkelocker gefärbte Bohne ergab ein fast reines *Goethit*-Diagramm, das nur andeutungsweise die stärksten *Kaolinit*-Linien aufweist. Eine sehr harte, etwas unregelmässig geformte rote Bohne lieferte ein Pulverdiagramm, das neben den *Hämatit*linien schwächere *Kaolinit*-Interferenzen nebst einigen punktierten *Calcit*linien erkennen lässt.

Ein etwa 8 mm grosses, rundliches, weisses Kalkgeröll lieferte das für reinen *Calcit* typische Pulverdiagramm, und ein scharf abgegrenzter, mulmiger Einschluss im Mergel ergab ebenfalls die *Calcit*linien neben den stärksten *Quarz*interferenzen.

γ) Mikroskopische Untersuchung

Die mikroskopische Untersuchung beschränkte sich auf die im Mergel enthaltenen Erbsen und das bereits erwähnte Bruchstück von Bohnerz aus Bolus mit Ooiden, somit auf die Reste des aufgearbeiteten Bohnerzes.

Ockerfarbene, ungeschichtete Bohnen

Entsprechend wie bei Limberg treten ungeschichtete und geschichtete Bohnen auf. Die ungeschichteten Knollen wie auch die Kerne der geschichteten bestehen aus einem lichtmikroskopisch kaum auflösbaren Gemisch aus *Kaolinit* und *Goethit*, das vollkommen mit demjenigen der entsprechenden Knollen von Limberg übereinstimmt, nur dass es viel ärmer an Quarz und Schweremineralen ist; falls solche auftreten, sind sie viel feinkörniger.

Ockerfarbene, geschichtete Ooide

Die geschichteten Ooide gleichen in ihrem Aufbau sehr stark den ockerfarbigen Erzbohnen von Limberg sowie den aus dem Jura und aus Süddeutschland bekannten Erzbohnen. Sie besitzen ebenfalls einen nichtgeschichteten Kern, der schlierig oder homogen gebaut sein kann und stets goethitärmer ist als die geschichtete Hülle. Die geschichtete Aussenschale besteht aus einer oft sehr goethitreichen, kryptokristallinen *Goethit-Kaolinit-Dispersion*. Die Schichtung ist meist feiner und der Goethit-Gehalt höher als bei den Ockerbohnen von Limberg. *Quarz* ist dagegen darin viel seltener und nur als viel kleinere Körnchen enthalten. *Hämatitflitterchen* sind selten und nur in gewissen ausgezeichneten Schichtchen enthalten.

Die Schichtung ist analog wie bei den Bohnen von Limberg auf mannigfache Weise gestört, wenn auch in der Regel nicht so stark wie dort. Die Risse in der Hülle sind fast immer mit nahezu reinem Goethit ausgeheilt. Grobkristalliner Kaolinit als Aderfüllung oder als Säume um Mineralkörner konnte nicht gefunden werden.

Dunkelrote Hämatitbohne

Die Hämatitbohne besitzt einen sehr unregelmässigen, schlierigen Aufbau. Stellenweise liegt ein körniges Gemenge aus *Hämatit* und feinkörnigem *Kaolinit* vor, das stark an den auf Fig. 5 oben rechts abgebildeten Teil einer Limberger Hämatitknolle erinnert. Grosse Teile zeigen schöne Gelstrukturen mit rhythmischer Hämatit-Kaolinit-Schichtung. Im Gegensatz zu den entsprechenden Knollen von Limberg tritt jedoch hier *Calcit* und nicht grobkristalliner Kaolinit zentral in den achatartig konzentrisch geschichteten Partien auf. Calcit-Monokristalle füllen jeweils den ganzen, buchtig begrenzten Zentralteil aus. Sie dürften erst nach Abschluss der Erzknollen-Bildung die Hohlräume ausgefüllt haben, möglicherweise erst nach der Aufarbeitung und Umlagerung der Knolle

in den Kalkmergel. Das Vorkommen dieser Knolle zeigt, dass auch im Gebiet von Eglisau seinerzeit teilweise Bedingungen herrschten, welche direkt zur Ausscheidung von Hämatit führten, wenn auch die Goethit-Bildung sehr viel häufiger war. Es wäre wünschenswert, wenn die Vorkommen im Jura und Schaffhauser Gebiet neu auf Hämatitknollen untersucht würden.

Ockerfarbener Bohnerzton

Der in einem mehrere Zentimeter grossen Bruchstück von Bohnerz zwischen Erbsen erhaltene Bolus besteht aus kryptokristalliner *Goethit-Kaolinit*-Dispersion mit ungeschichteter, wolkiger Verteilung der Komponenten. Stellenweise ist er sehr goethitreich. Vereinzelte Äderchen bestehen aus *Calcit* und dürften erst während oder nach der Aufarbeitung gefüllt worden sein. Der ockergelbe Bolus setzt etwas weniger scharf an den Erbsen ab als der rote Bolus von Limberg. Ferner reichen Goethit-Äderchen, welche auch in die Hülle der Ooide hineingreifen, oft in den Bolus hinein und verlieren sich dort. Es scheint, dass das primäre, autochthone Bohnerz von Eglisau bei seiner Entstehung weniger starken Umlagerungen ausgesetzt war als dasjenige von Limberg. Da jedoch nebeneinander schichtige und ungeschichtete Erbsen im echten Bolus eingelagert sind, dürfte zwischen der Erbsenbildung und der Einlagerung in den Bohnerzton auch bei Eglisau eine mechanische Umlagerung stattgefunden haben. Die Goethitäderchen können sich allerdings erst nachher gebildet haben.

δ) Zur Genese der Bohnerz-haltigen Schicht von Eglisau

Es handelt sich zweifellos um ein aufgearbeitetes, mit Malmkalk-Grus vermisches Bohnerz, das nicht wie das Limberg-Bohnerz autochthon ist. Sein Aussehen stimmt in allen Details mit dem „Bohnerz“ überein, das am Rheinfall und im Stadtgebiet von Schaffhausen auftritt und nach F. HOFMANN (1960) sowie HOFMANN und PETERS (1962) eine postsiderolithische, prämolassische Formation darstellt. Im Rheinfallgebiet sind Indizien dafür vorhanden, dass sie unter ariden oder semiariden Bedingungen entstanden ist; durch Winderosion und Verfrachtung sind offenbar bohnerzhaltige Malmkalke aufgearbeitet worden. Wir möchten daher das „Bohnerz“ aus der Eglisauer Bohrung wie die Vorkommen vom Rheinfall und Schaffhausen als terrestrisches Äquivalent der unteren Meeresmolasse s. l. (Altligozän bis inklusive Rupélie) auffassen.

Zum Schluss möchten wir der *AG für Schweizerisches Erdöl* dafür danken, dass sie uns die Bohnerzproben zur Untersuchung überliess und die vorliegende Veröffentlichung bewilligte. Auch der *Mineralquelle Eglisau AG* möchten wir hiefür danken, ebenso wie dem *Arbeitsausschuss für die Untersuchung schweizerischer Mineralien und Gesteine auf Atombrennstoffe und seltene Elemente* für die Überlassung der Analysenresultate. Nicht zuletzt sind wir Herrn KÖPPEL, Dipl.-Ing. Petr., für die sorgfältige Herstellung der Erzanschliffe und Herrn Prof. Dr. F. DE QUERVAIN für seine Unterstützung dankbar.

Literaturverzeichnis

- BAUMBERGER, E. (1923): Die (Bohnerz-)Vorkommen im Juragebirge. In: „Die Eisen- und Manganerze der Schweiz“, Beitr. Geol. d. Schweiz, Geotechn. Serie, XIII. Lief., 1. Band, S. 3—125.
- BÜCHI, U. P. und Mitarbeiter (1961): Geologische Ergebnisse der Bohrung Küssnacht I. Bull. Ver. Schweizer. Petrol.-Geol. u. Ing., Vol. 28, Nr. 74, S. 7—16.
- CADISCH, J. (1959): Geologische Ergebnisse der Mineralquellenbohrung Eglisau II. Bull. Ver. Schweizer. Petrol.-Geol. u. Ing., Vol. 26, Nr. 70, S. 5—8.
- EICHLER, J. (1961): Mineralogische und geologische Untersuchungen von Bohnerzen in Baden-Württemberg, besonders der Vorkommen bei Liptingen, Kreis Stockach. N. Jb. Mineral., Abh. 97, S. 51—111.
- ERLENMEYER, H. und Mitarbeiter (1950): Die Bestimmung von Uran in Gesteinen. Helv. Chimica Acta 33, S. 25—38.
- HARKORT, H.-J. (1939): Zur Methodik der Korngrößen- und Mineralanalyse von Peliten. Dissertation der Universität Zürich.
- HOFMANN, F. (1952): Zusammenhänge zwischen Entstehungsbedingungen und Beschaffenheit toniger Sedimente mit gleichartigem Ausgangsmaterial an einem Beispiel aus dem Tertiär des Kantons Schaffhausen. Eclogae geol. Helv. 51, S. 980—989.
- (1960): Sedimente einer ariden Klimaperiode zwischen Siderolithikum und Molasse in Lohn, Kanton Schaffhausen, und am Rheinfall. Eclogae geol. Helv. 53, S. 27—32.
- HOFMANN, F. und PETERS, T. (1962): Kaolinitische Mergel unter der Molassebasis im Rheinfallgebiet. Schweiz. Min. Petr. Mitt., 42, S. 349—358.

Manuskript eingegangen am 3. Dezember 1962.