

BAYERISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHE KLASSE

SITZUNGSBERICHTE

JAHRGANG

1961

MÜNCHEN 1962

VERLAG DER BAYERISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN

In Kommission bei der C. H. Beck'schen Verlagsbuchhandlung München

Die Erforschung der tonigen Sedimente

Von Theodor Ernst in Erlangen

Mit 14 Abbildungen auf zwei Tafeln und im Text

Vorgetragen in der gemeinsamen Sitzung der beiden Klassen

am 13. Januar 1961

Die herrschende Problematik einer naturwissenschaftlichen Fachrichtung auch Nicht-Naturwissenschaftlern näherzubringen, scheidert leicht daran, daß zur Erreichung des Zieles sehr viele unbekannte Begriffe und Fachworte vorher erläutert werden müssen, um überhaupt den tragenden Gedanken herausstellen zu können. Das Gebiet über die tonigen Sedimente erscheint trotz des nüchternen Titels und der Spezialisierung geeignet, auch dem Außenstehenden einen Begriff moderner mineralogischer Forschung zu vermitteln, gerade weil der Weg zu dem vorgeschlagenen Ziel relativ einfach ist und jeder Mensch für dieses Gebiet und für den Boden, auf dem und aus dem heraus er lebt, bestimmte Erfahrungen mitbringt.

Das Thema ist ganz bewußt mehrdeutig gewählt. Es soll sowohl über die Verfahren zur Erforschung dieser Sedimente wie über die Ergebnisse berichtet werden.

Zunächst kann leicht gezeigt werden, daß die Feinanteile der Böden und solcher Tone, die in der Keramik verwendet werden, bei entsprechender Vergrößerung oft deutliche Kristallformen zeigen und daher mineralogisch-kristallographische Objekte im landläufigen Sinne sind. Untersucht man beispielsweise das feinkörnige Material, das ein Regen aus dem Ackerboden ausschwemmt, wie es in dem glänzenden Film einer eingetrockneten Pfütze allen bekannt ist, oder die Ausschwemmung eines keramischen Tones (Taf. I, 1 und 2),¹ so zeigen diese sehr feinen Teil-

¹ Herr Kollege U. Hofmann-Heidelberg stellte die elektronischen Aufnahmen freundlicherweise zur Verfügung.

chen im Elektronenmikroskop deutliche Flächenbegrenzungen, also Kristallformen. Der Maßstab läßt erkennen, daß hier schon eine starke Vergrößerung vorliegt: die Teilchen haben meist eine Größe, die wesentlich kleiner ist als $1 \mu = 0,001 \text{ mm}$. Dadurch wird deutlich, daß das Hauptarbeitsinstrument des Mineralogen, nämlich das Mikroskop in seiner speziellen Ausführung des Polarisationsmikroskopes, bei der Untersuchung solcher Objekte versagen muß oder nur in besonders günstigen Fällen eingesetzt werden kann. So wird verständlich, daß erst nach der Einführung neuer Methoden, z. B. nach der Einführung des Elektronenmikroskopes, wir überhaupt in der Lage waren, den feinkörnigen Bestand der Sedimente näher zu erforschen. Im größeren Umfang haben daher erst nach dem letzten Kriege die Untersuchungen über dieses Forschungsgebiet eingesetzt, wenn auch Einzelergebnisse seit langem vorlagen. Man hat dabei nicht nur die keramischen plastischen Massen untersucht, sondern hat sich auch mit den technisch nicht verwertbaren feinkörnigen Sedimenten näher beschäftigt, auch mit solchen, die die feinkörnigen tonigen Anteile nur in geringen Mengen enthalten. Nach den ersten, orientierenden Untersuchungen, die die qualitative Verschiedenheit des Feinbestandes gegenüber dem größeren Material zeigten, wurde die Frage aufgeworfen, ob vielleicht gerade aus dem speziellen sehr feinkörnigen Mineralbestand sich Hinweise über die Bildungsbedingungen, etwa über die Ablagerungen in Meeresbecken oder Sumpfgebieten oder über das Klima und die herrschende Vegetation ableiten ließen. Mit den dazu notwendigen Methoden und mit einigen Ergebnissen soll sich dieser Bericht befassen.

Die vorher angeführte Untersuchung mit dem Elektronenmikroskop genügt nicht, da die Kristallformen vieler Tonminerale auffallend ähnlich sind. Es sind recht verschiedenartige physikalische und physikalisch-chemische Methoden angewandt worden, um den Aufbau dieser Sedimente und auch den der keramischen Massen näher kennenzulernen.

Die äußere Kristallform, von denen die Bilder hier ein willkürlich herausgegriffenes Beispiel waren, sind nur ein Ausdruck des gesetzmäßigen Aufbaus dieser Minerale, wie ihn die kristallisierte Natur überall erkennen läßt, auch dann, wenn äußere

Kristallformen fehlen. Die Kristalle zeigen einen periodischen Aufbau, etwa in der Art, wie ihn ein Tapetenmuster erkennen läßt, das nach einer bestimmten Strecke wieder auftaucht. So sind die Bausteine der Materie, d. h. die Atome bzw. Ionen, nach bestimmten, in diesem Fall räumlichen Mustern angeordnet, und zwar sprechen wir von der Kristallstruktur (Taf. II, 1). Um diesen Kristallbau verständlich zu machen, haben wir wieder nur einen kleinen Ausschnitt wiederzugeben, die sog. Elementarzelle. Durch die moderne Kristallstrukturforschung sind wir in der Lage, die Schwerpunkte dieser Atome in den Kristallen mit großer Genauigkeit anzugeben.

Auf den Weg, den der Kristallograph anwendet, um die Kristallstruktur zu ermitteln, kann hier nicht eingegangen werden. Seit etwa 50 Jahren, seit der Entdeckung von v. Laues, daß die Kristalle als Beugungsgitter für Röntgenstrahlen dienen können, ist es möglich, aus den Röntgengitterinterferenzen die Schwerpunkte der Atome in den Kristallgittern zu berechnen. Allerdings bereitet die Erforschung des Aufbaus der hier interessierenden Tonminerale erhebliche Schwierigkeiten, weil meist nur äußerst feinkörnige Pulver dieser komplizierten Mineralien vorliegen. Es darf daher nicht überraschen, daß in den Einzelheiten über den Aufbau mancher Tonminerale noch nicht völlige Klarheit herrscht. Das Strukturbild des Kaolinites (Abb. 1), eines der zahlreichen Tonminerale, das wir vor allem auch im Porzellanrohstoff Kaolin finden, zeigt einen charakteristischen blättchenförmigen Aufbau, den wir auch bei vielen anderen Tonmineralen finden. Man erkennt die einzelnen Bausteine Sauerstoff, Silicium, Aluminium und Hydroxyl (d. i. ein Baustein, der aus Sauerstoff und Wasserstoff besteht) und ihre charakteristische Folge in den Netzebenen, die nach einer bestimmten Periode wiederkehren (Abb. 2). So lassen sich einzelne Schichtpakete unterscheiden. Der Maßstab, der hier wiedergegeben ist, ist zehntausendmal kleiner als bei dem elektronenmikroskopischen Bild. Die angedeutete Einheit ist ein Ångström, der hundertmillionste Teil eines Zentimeters = 10^{-8} cm. Die Abmessungen der fast rechtwinkligen Elementarzelle betragen $a_0 = 5,14 \text{ \AA}$, $b_0 = 8,93 \text{ \AA}$ und $c_0 = 7,37 \text{ \AA}$. Dabei beträgt der Abstand von einem Schichtpaket zum anderen nicht ganz 3 \AA .

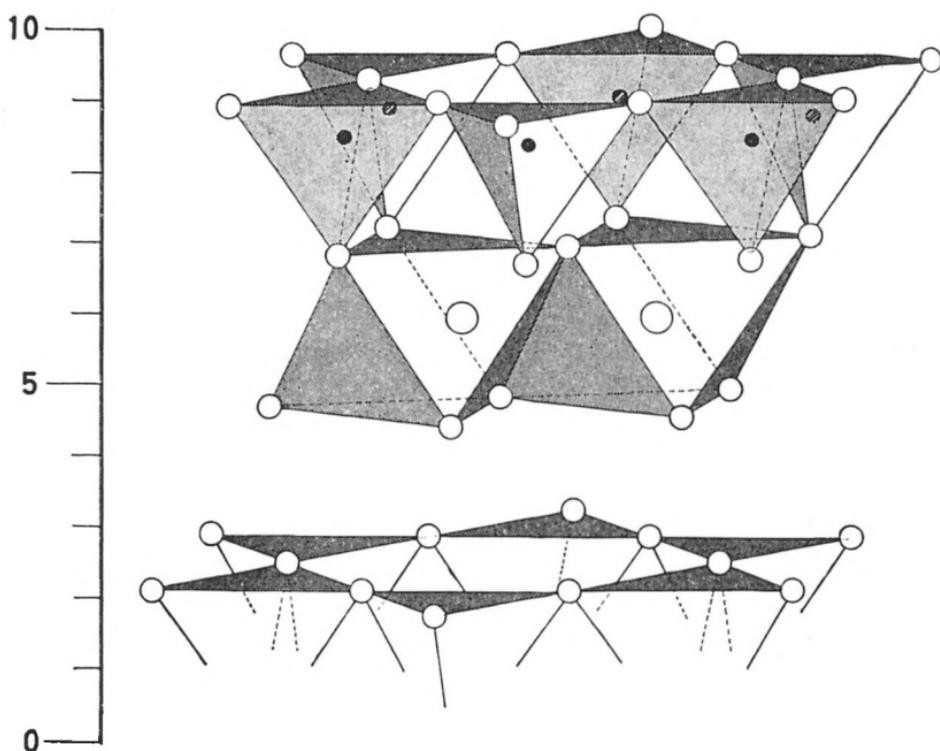


Abb. 1. Darstellung eines kleineren Bereiches der Kristallstruktur des Kaolinites bei stärkerer Vergrößerung gegenüber Abb. 3. Die Kenntnis dieser sogenannten Elementarzelle genügt, um den gesamten Aufbau der Kristalle zu verstehen. Die Kreise stellen die Schwerpunkte der einzelnen Atome dar.
 $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm.}$

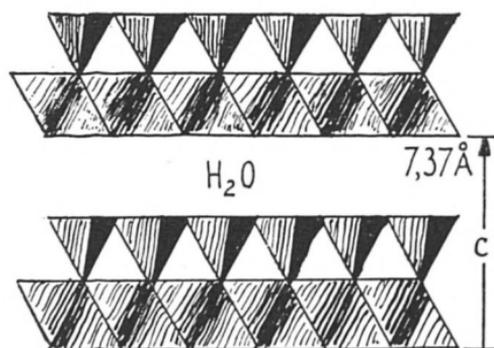


Abb. 2. Die Aufeinanderfolge von Kaoliniteschichten ist im Querschnitt senkrecht zur Schicht schematisch dargestellt.

Diese Zahlenwerte, die auch an feinen Mineralpulvern mit großer Genauigkeit bestimmt werden können, sind für dies eine Mineral Kaolinit charakteristisch, und man könnte meinen, daß man damit eine Universalmethode zur Verfügung hat, um alle Minerale mit Sicherheit unterscheiden zu können. Leider ist aber diese Sicherheit nicht gegeben, so daß noch andere Verfahren herangezogen werden müssen, besonders wenn es darauf ankommt, die prozentuale Zusammensetzung des Sedimentes kennenzulernen.

Diese Unsicherheit in der Bestimmung liegt weniger in der Methode an sich als vielmehr in der Art und Güte des zu bestimmenden Materials begründet. Grundsätzlich sind hier die Entstehungsbedingungen für das einzelne Mineral beteiligt, und wie später sich ergab, wurden die idealen und einfachen Strukturen mit der strengen Gesetzmäßigkeit nicht mehr erreicht. Gerade aber in diesen Abweichungen vom einfachen Strukturaufbau sind viele sonderbare und auffallende Eigenschaften dieser feinkörnigen Sedimente begründet, so daß man noch vor rund 30 Jahren vor allem an das Vorliegen im wesentlichen amorph, nicht kristallisierter Stoffe glaubte, weil diese Eigenschaften für die Kristallwelt nicht zu passen schienen.

Vor der Verwendung moderner Untersuchungsverfahren war man fast nur auf die chemische Untersuchung angewiesen. Ein Gestein, das verwitterte, zeigte mit zunehmender Veränderung eine Anreicherung des Aluminium-Oxydes und vor allem eine Verarmung an Alkalien, und damit ging parallel eine stärkere Wasseraufnahme, etwa nach Regenfällen, so daß diese Böden dann schmierig und plastisch wurden und an Volumen zunahmen. Sie zeigen damit ein Quellvermögen. Mit der Annahme nur kristallisierter Minerale schien dieses Quellvermögen unvereinbar, selbst unter Berücksichtigung, daß die vorliegenden Teilchen sehr klein sind (wir bewegen uns im kolloiden Bereich unter $1\ \mu$ Größe) und die Gesamtoberfläche für eine bestimmte Substanzmenge mit fortschreitendem Zerteilungsgrad immer mehr zunimmt. Während ein unzerteilter Würfel von $1\ \text{cm}$ Kantenlänge $6\ \text{cm}^2$ Oberfläche besitzt, hat die gleiche Substanzmenge, aber in kleine Würfelchen von $0,1\ \mu$ Kantenlänge zerteilt, bereits eine Oberfläche von $60\ \text{m}^2$. Damit gewinnt die Oberfläche relativ

zur Masse an Bedeutung, und eine stärkere Absorption an die Oberfläche bei sehr feiner Zerteilung wird zwar verständlich, doch reicht dieser Effekt nicht aus, und vor allem lassen sich bei gleicher Korngröße die weiterhin beobachteten großen Unterschiede nicht damit erklären.

Neben diesem Quellvermögen wurde weiterhin beobachtet, daß solche stark quellbaren Tone auch die Eigenschaft haben, Ionen auszutauschen, d. h. elektrisch geladene chemische Elemente. Rühren wir einen solchen trockenen Ton mit Wasser an, so kann beispielsweise ein bestimmtes Ion, etwa das Magnesium, nicht nachgewiesen werden. Nimmt man aber statt Wasser eine Kaliumchloridlösung, wie sie z. B. auch entsteht, wenn der Regen den ausgestreuten Kunstdünger löst, so kann dann in der Lösung Magnesium nachgewiesen werden und der Gehalt an Kalium in der Lösung verringert sich oder verschwindet. Dieses Ionenaustauschvermögen ist bei den verschiedenen Tonmineralen sehr unterschiedlich.

Und noch eine dritte sehr auffallende Eigenschaft muß bei diesen Tönen erwähnt werden, nämlich die Thixotropie. Das möge folgender Versuch erläutern: Läßt man eine Suspension bestimmter Tonminerale in Wasser längere Zeit stehen, erstarrt dieses Ton-Wasser-Gemisch in einer Art Gallerte, einem Gel, so daß man das Reagenzglas umkehren kann, ohne daß dieses Gemisch herausfließt. Eine äußere Erschütterung genügt aber, um dieses Gemisch wieder zu verflüssigen. Hier müssen die einzelnen Teilchen ein sehr lockeres Gerüst aufbauen, in dem die Wassermoleküle in einer ganz bestimmten Art festgehalten sind und die man durch einen einfachen Adsorptionsvorgang an der Oberfläche kaum erklären kann. Ionenaustausch und Thixotropie bestimmen weitgehend das plastische Verhalten der feinkörnigen Sedimente und der technisch wichtigen keramischen Massen. Durch Zugabe von Wasser zeigen diese Ton-Wasser-Gemische eine Verformbarkeit, die in der keramischen Industrie ausgenutzt wird.

Zum Teil kann diese Eigenschaft aus der Feinkörnigkeit erklärt werden. Jedes Teilchen umgibt sich mit einem dünnen Flüssigkeitsfilm; dabei werden die Wassermoleküle, die direkt an der Oberfläche des Teilchens liegen, stärker festgehalten als

die mehr äußeren Teilchen. Das plastische Verhalten sollte dann um so größer sein, je mehr feine Teilchen vorhanden sind. Es war zunächst auch für den Fachmann überraschend, daß in den Sedimenten, die man als „tonig“ bezeichnete, sich ganz bekannte Minerale wiederfanden, die auch das Ausgangsgestein führte, so Quarz, Feldspat und Glimmer, daneben allerdings auch neue Minerale, die man als Tonminerale bezeichnete. Es ist daher nicht verwunderlich, daß der Petrograph mit dem Begriff „Ton“ ganz allgemein Sedimente bezeichnet, deren Durchmesser der einzelnen Teilchen kleiner als 0,02 mm ist, ohne den chemischen oder mineralogischen Bestand zunächst zu berücksichtigen. Von dieser Größe an abwärts machen sich die typischen plastischen Eigenschaften bemerkbar. Da man auch in diesem Wissenschaftszweig nach quantitativen Zusammenhängen sucht, ist daher der erste Schritt einer solchen Tonanalyse die Ermittlung der Kornverteilung. Dabei wird festgestellt, wieviel Prozent der Gesamtsubstanz sich in bestimmten Korngrößenklassen findet. Bei der Feinkörnigkeit dieser Sedimente ist die Aufgabe nicht ganz einfach zu lösen. Im Prinzip kommt es dabei darauf an, mit welcher Schnelligkeit sich das feinkörnige Material aus einer Trübe absetzt. Das kann oft Stunden, bei sehr feinkörnigen Substanzen sogar viele Tage dauern; dieser Prozeß wird für eine Trennung nach verschiedenen Korngrößenklassen ausgenutzt.

Erst nach dieser Vorarbeit kann die Ermittlung des Mineralbestandes durchgeführt und dabei die Frage entschieden werden, auf welche Ursachen das teilweise beobachtete sehr starke Quellvermögen der Tone zurückzuführen ist, für das man noch in den 30er Jahren das Vorliegen von Bodenzeolithen oder amorpher Gläser annahm. Wir kennen sowohl Gläser wie vor allem Zeolithe - das sind wasserhaltige silikatische Minerale -, die je nach dem Wasserdampfgehalt der Umgebung das von ihnen gebundene Wasser stetig abgeben und auch wieder aufnehmen können und die außerdem ein Ionenaustauschvermögen besitzen, das man z. B. für die Wasserenthärtung verwenden kann, so daß das die Härte bedingende Calcium beim Durchsickern durch eine Zeolithschicht aus dem Wasser entfernt wird und dafür Natrium abgegeben wird.

Auf Grund der Röntgenverfahren ließ sich aber bald zeigen, daß bei diesen stark quellfähigen Tonen besonders ein spezielles

Tonmineral beteiligt ist, nämlich der Montmorillonit (ebenfalls ein wasserhaltiges Aluminium-Silikat).

Das Strukturbild des Montmorillonites zeigt gegenüber dem von Kaolinit einige bemerkenswerte Unterschiede. Zwar sind auch hier die ausgedehnten Schichtpakete zu erkennen (Taf. II, 2

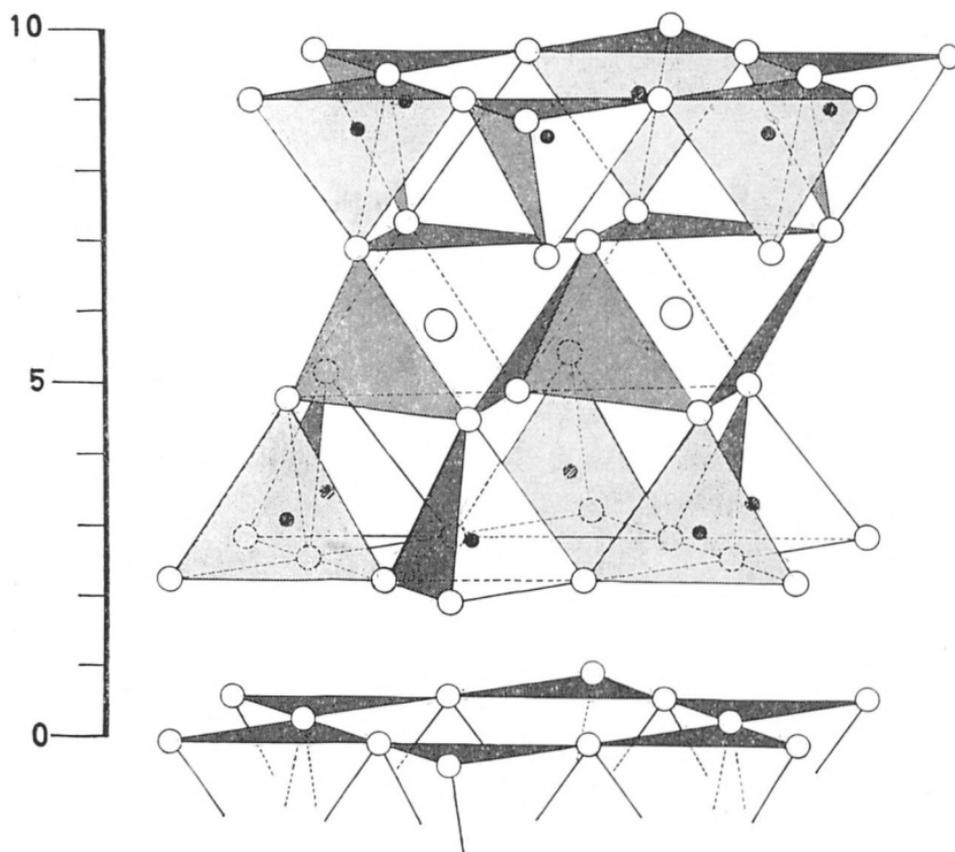


Abb. 3. Darstellung des Elementarbereiches des Montmorillonites.

u. Abb. 3), doch gibt es einmal einen symmetrischen Bau parallel zur Schichtebene, ferner findet man einen auch sonst in der Mineralwelt beobachteten Ersatz des Siliciums durch das Aluminium, vor allem hier aber einen Ersatz des 3-wertigen Aluminiums durch Mg und 2-wertiges Eisen. Durch diesen Ersatz eines 4-wertigen Atoms durch ein 3-wertiges bzw. eines 3-wertigen durch ein 2-wertiges werden die Ladungsverhältnisse des Schichtpaketes geändert, so daß außerhalb der Schichtebene zwischen den

Schichtpaketen weitere Ionen mit verhältnismäßig schwacher Bindung gehalten werden können, die daher gegen andere leicht austauschbar sind. Wahrscheinlich führt dieser variable Aufbau zur Ausbildung von Haftstellen, an die die Nachbarkriställchen gebunden werden, so daß ein sperriges Gerüst sich in einer Wasser-Suspension aufbauen kann.¹ Einen solchen thixotropen Aufbau kennt man bei vielen sehr feinkörnigen Substanzen, doch wird diese thixotrope Eigenschaft bei diesen speziellen Tonmineralen, z. B. bei den Bentoniten, durch die Anordnung der Wassermoleküle zwischen den Schichtpaketen verstärkt. Der Abstand der Schichtpakete ändert sich durch diesen Wassereinbau sehr auffallend, so daß je nach dem Wassergehalt $9,2 \text{ \AA} \dots 21,4 \text{ \AA}$ als Identitätsabstand festgestellt werden. Diese ausgedehnten Basisschichten haben also einen sehr variablen Abstand (Abb. 4).

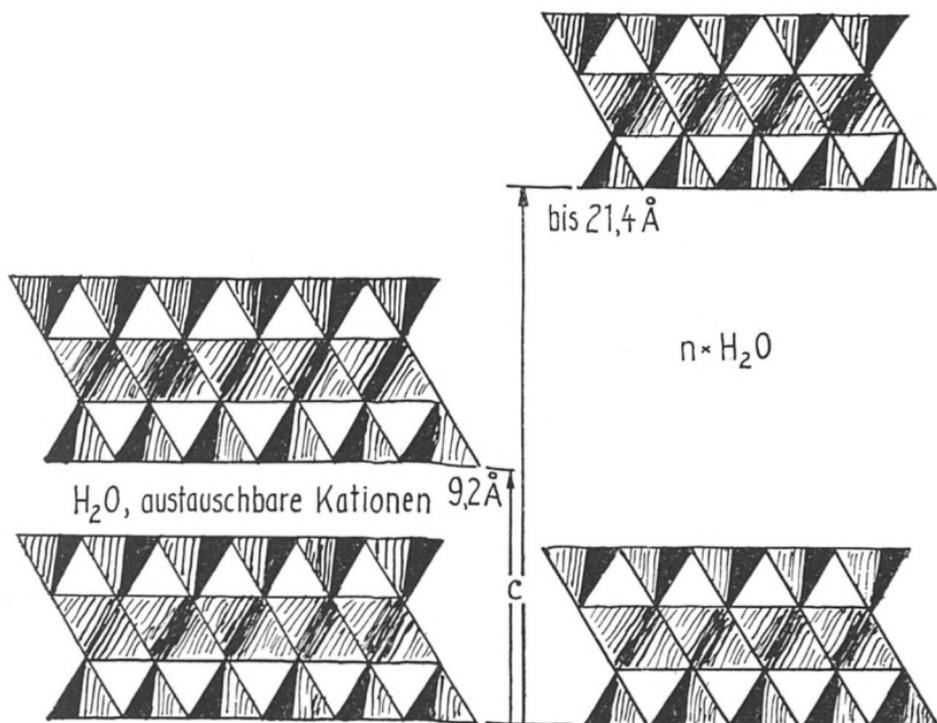


Abb. 4. Der schematische Aufbau des Montmorillonites ist in zwei verschiedenen Stadien der Quellung dargestellt, links mit einem Minimalabstand der Schichten, rechts bei stärkster Quellung. Zwischen den Schichten sind eingebaute Wassermoleküle zu denken.

¹ U. Hofmann, Angewandte Chemie 68, 1957, 53.

Zur Unterscheidung von den Absorptionen an der Oberfläche der Tonminerale spricht man hier von einer innerkristallinen Quellung. So ist jeder kleine Montmorillonitkristall für den Boden ein Wasserspeicher, der die Feuchtigkeit hält.

Alle diese Eigenschaften sind selbstverständlich durch Messungen zu belegen. So kann man einem Montmorillonit-Ton 4-mal soviel Wasser zufügen wie dem Kaolinit, um noch ein thixotropes gerade versteiftes Gemisch zu erhalten (Winkler), man kann andererseits röntgenographisch den Abstand messen, den identische Basisschichten miteinander haben.

Sehr anschaulich ist die Quellung einem Beispiel aus der Natur zu entnehmen. So kommen in der Südafrikanischen Union bei der Verwitterung bestimmter Basalte, die dort sehr große Decken bilden, Tone vor, die stark montmorillonithaltig sind. Regen und Trockenheit wechseln nur in großen Perioden miteinander ab: 9 Monate Trockenzeit, 3 Monate Regen. In dieser Regenzeit treten bei den Straßen verheerende Wirkungen auf, die unseren Frostaufbrüchen in der Wirkung sehr ähneln. Der Boden hebt sich und quillt und die Straßen werden unbefahrbar. Es kommen Quellungen vor, die eine Hebung der Straßendecke um 50 cm und mehr bewirken. Die Verhinderung solcher Schäden bereitet dort den Fachleuten die gleichen Schwierigkeiten wie hier bei uns die Verhinderung der Frostaufbrüche. – Es gibt aber auch gute Seiten dieses Minerals.

Das auffallend hohe thixotrope Verhalten der Montmorillonit-Tone kann vorteilhaft bei den Tiefbohrungen ausgenutzt werden. Um zu den Bodenschätzen zu gelangen, etwa zum Erdöl, werden z. T. Tiefbohrungen zu außerordentlich großen Tiefen von einigen Kilometern hinuntergebracht. Das Gestein wird durch die Bohrer zerrieben und das fein zermahlene Gesteinsmehl muß durch Wasserspülungen an die Oberfläche gefördert werden. Die Bohrung erfordert ein wiederholtes Stilllegen der Maschine, um z. B. das Gestänge beim weiteren Vordringen in größere Tiefen zu verlängern. Während dieser Zeit kann aber das zerriebene Gesteinsmehl absinken, und das würde bedeuten, daß keine Maschine der Oberfläche dann bei einer solchen Einzementierung durch das Gesteinsmehl wieder den Bohrer in Gang brächte. Hier ist der Montmorillonit ein Helfer, der, der Spülflüssigkeit zuge-

setzt, bei einer Ruhe des Gestänges ein gallertartiges Erstarren dieser Spülflüssigkeit bewirkt und damit auch ein Einzementieren der Bohrer verhindert. Durch die Rüttelung beim Ingangsetzen der Maschine bricht aber das ganze Gerüst zusammen und man erhält eine normale Spülflüssigkeit.

Auch in der Ziegelindustrie, die auch immer mehr wissenschaftlich durchdrungen wird, achtet man auf den Gehalt des Ziegelsteines an Montmorillonit. Bei der Dachpfannenherstellung ist ein gewisser Gehalt erwünscht, um dichte, regenundurchlässige Oberflächen zu schaffen, doch muß ein Überfluß vermieden werden, damit sich im Brennfeuer die Ziegel nicht verbiegen.

Dieses Mineral Montmorillonit hat man früher als Seltenheit in manchen Böden festgestellt. Mit der Verfeinerung der Untersuchungsverfahren hat sich aber herausgestellt, daß dieses Tonmineral und außerdem auch noch einige andere, die auch übersehen wurden, sehr viel verbreiteter sind, als man vorher annahm. Die Ionenaustauschfähigkeit dieses Minerals wirkt sich für die landwirtschaftliche Nutzung äußerst vorteilhaft aus. Die mit den Düngemitteln zugeführten Kationen, z. B. das Kalium, werden gegen das Calcium des Montmorillonites ausgetauscht, dadurch gegen das Auslaugen durch das Grundwasser festgehalten, und sie bleiben so für die Pflanzen lange Zeit verfügbar. Und das gleiche gilt für das Kalium, das durch den Verwitterungsprozeß aus den Feldspäten frei wird; auch dieses wird durch den gleichen Prozeß festgehalten.

Über die Ionenaustauschung können auch die physikalischen Eigenschaften der Böden verändert werden. Die stark Natriumhaltigen Böden mit hohem Montmorillonitgehalt sind äußerst quellfähig, dadurch dicht und wenig luftdurchlässig und für die landwirtschaftliche Nutzung wenig geeignet. Durch Kalken der Böden wird das Natrium gegen Calcium ausgetauscht: der Boden wird nun leichter krümeln und besser bearbeitbar. Auch durch Seewasser-Überflutung verdorbene Böden, denen zuviel Natrium zugeführt wurde, sind durch reichliche Kalkzuführung wieder regenerierbar, und auch hier wieder auf Grund des Ionenaustausches.

Die eingehenderen Untersuchungen über die Kapazität der Ionen, die ausgetauscht werden können, bestätigen das bisher entworfene Bild über den Mechanismus nach dem Strukturbild.

So kann der Montmorillonit im Durchschnitt über 10mal soviel Kationen austauschen wie etwa der Kaolinit. Die Verhältnisse können durch die folgende Tabelle unterbaut werden. Es möge darauf erkannt werden, daß für diese Untersuchungen auf genaue Bestimmungen nicht verzichtet werden kann.

Tabelle.¹ Kationen-Austauschkapazität von einigen Tonmineralen

Material	Kapazität (mval/100g)
Kaolinit	3-15
Illit	10-40
Montmorillonit . . .	80-150
Vermikulit	100-150.

Allerdings gewinnen diese Untersuchungen ihre volle Bedeutung erst durch die Gegenüberstellung der Ergebnisse, die durch andere Verfahren gewonnen wurden. Auch hier können diese Methoden an den beiden Beispielen der Tonminerale demonstriert werden, dem Kaolinit und dem Montmorillonit; allerdings sei auch hier wiederum darauf hingewiesen, daß es außer diesen beiden noch eine Reihe anderer Minerale gibt, die die Eigenschaften eines Tones entscheidend ändern können.

Kaolinit und Montmorillonit können durch die verschiedene Menge des aufgenommenen Wassers und durch die spezielle Art der Angabe beim Erhitzen unterschieden werden. Wird eine Tonprobe also erhitzt oder gebrannt, so erfolgt die Volumenschwindung für jedes der Minerale in einer charakteristischen Weise. Die Dilatometer gestatten, die Verkürzung einer Probe beim Brennen in Abhängigkeit von der Temperatur sehr genau zu erfassen (mit einer Genauigkeit von etwa $\frac{1}{1000}$ mm!), so daß selbst in Gemischen mehrere Minerale ein spezielles nicht nur qualitativ erkannt werden kann; es gelingt sogar, die prozentuale Beteiligung der einzelnen Minerale zu erfassen. Diese Methode gewinnt deshalb an Bedeutung, weil bei Störungen des strukturellen Aufbaus gerade diese mehr ungeordneten Minerale erfaßt werden können.

¹ Nach Grim, R. E., „Clay Mineralogy“. McGraw-Hill, New York, 1953. Zusammenstellung nach Amphlett, C. B., Endeavour, XVII, 1958, 149.

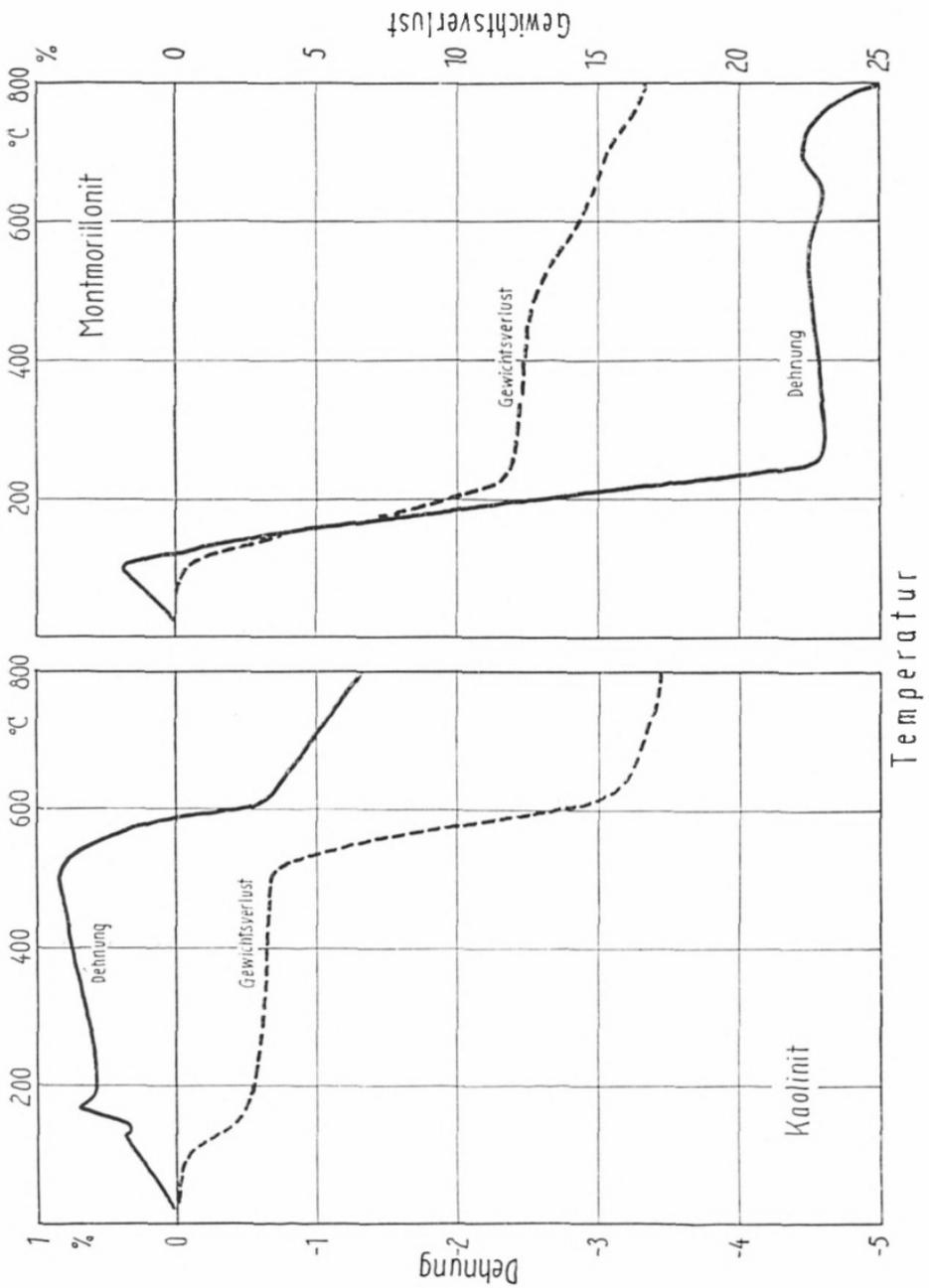


Abb. 5. Dehnung bzw. Schwindung und Gewichtsverlust von Kaolinit und Montmorillonit in Abhängigkeit von der Temperatur.

Die Abb. 5 möge die Verhältnisse erläutern. Man erkennt deutlich Temperaturgebiete mit stärkerer Schwindung gegenüber solchen, in denen sich die Länge einer Probe nur wenig ändert. Ob dabei auch immer noch Wasser abgegeben wird, ist aus dieser Kurve natürlich nicht zu entnehmen. Man hat daher automatische Waagen konstruiert, die die Gewichtsabgabe während der Erhitzung aufzeichnen. Durch die Kombination beider Verfahren ist man dann in der Lage, über die Festigkeit des gebundenen Wassers Aufschluß zu bekommen, und durch diese Ergebnisse wird das strukturelle Bild weiter gestützt. Parallel mit dieser Änderung der Wasserabgabe oder mit bestimmten chemischen Reaktionen, die beim Brennen eintreten können, entstehen sehr feine Wärmeeffekte, die durch die sogenannte differentielle Thermo-Analyse erfaßt werden können (abgekürzt DTA).

Man wird vielleicht fragen, warum man so viele verschiedenartige Untersuchungsverfahren anwendet. Jedes dieser Verfahren hat Vor- und Nachteile. Kommt es darauf an, sehr viele Proben aus einem größeren Gelände zu erfassen, so genügt es oft, nur wenige Beispiele genauer zu untersuchen und für alle anderen Schnellmethoden zur Verfügung zu haben, die dann nur anzuzeigen brauchen, ob eine Änderung in der Zusammensetzung eingetreten ist. Die gleichen Anforderungen werden zur Überwachung bei der technischen Verwendung der keramisch genutzten Tone an die Methoden gestellt.

Weiterhin gibt es bei den Tonmineralen einige „schwierige“ Fälle, die zwar nach unserer heutigen Kenntnis plausibel sind, deren Aufklärung aber viel Arbeit gekostet hat. Hier wechseln in jedem Kristall Schichten verschiedener Minerale ab, oft sogar in unregelmäßiger Folge. Diese Minerale verhalten sich gewissermaßen zwiefältig – ihre Deutung ist aber für die Frage der Entstehung von größter Bedeutung. Hier gelingt es bei der Untersuchung, durch die Kombination mehrerer Untersuchungsverfahren den wahren Sachverhalt zu erkennen.

Durch eine interessante Zusammenarbeit der verschiedenen Laboratorien, die auf diesem Gebiet arbeiten, hat man die Genauigkeit der verschiedenen Methoden ermitteln können. Für die Systematik aller dieser Tonsedimente ist eine solche Arbeit, die

auf Veranlassung der Deutschen Keramischen Gesellschaft durchgeführt wurde, von allergrößter Bedeutung geworden.¹

Diese Ausdehnung der Untersuchungsverfahren ist vor allem auch bedingt durch die Ausweitung der Fragestellung. In meiner bisherigen Darstellung ist bisher hauptsächlich von der Objekterfassung gesprochen worden, die vielleicht erkennen ließ, wieviel Einzelarbeit in allen diesen Aussagen steckte, um den Sachverhalt zu klären, die aber weitergehende Fragen nicht anschnitt. Es war die Erforschung von Neuland, für die die Untersuchungsmethoden erst speziell erprobt wurden. Mit immer neuen Ergebnissen und Erkenntnissen, die hauptsächlich während der letzten 10 Jahre erarbeitet wurden und die zeigten, wie verschiedenartig die Zusammensetzung der Tonsedimente und der keramischen Massen sein kann, wurde auch eine Revidierung unserer Ansichten über die Entstehung dieser speziellen Tonminerale notwendig.

Der Verwitterungsablauf ist im großen natürlich seit langem bekannt. Die primären Minerale des Gesteins, etwa eines Granites oder Basaltes oder eines Gneises, zerfallen, wenn auch in verschieden langer Zeit, so etwa die Feldspäte, die dunklen Gesteinsgemengteile: die Glimmer, Amphibole und Pyroxene, die Mg, Ca und Fe enthalten, und dann treten die gelösten Anteile z. T. zu Neubildungen, speziell zu Tonmineralen wieder zusammen. Entweder bleibt dieser gesamte Mineralbestand am Ort des Ursprungsgesteins liegen – man spricht dann von Verwitterungsböden –, oder aber es werden die Minerale durch das fließende Wasser oder den Wind transportiert und später irgendwie wieder abgelagert, in Binnenseen, in den Deltabildungen oder im Meer, und wir finden diese Tonminerale dann in den verschiedenen Sedimenten wieder.

Während in diesen Ablagerungen die gröberen Fraktionen i. a. zerriebene Restbestände des Ursprungsgesteins darstellen, handelt es sich bei dem feinkörnigen Anteil außerdem um Neubildungen dieser Tonminerale. Diese können bereits während der

¹ Fachausschußbericht Nr. 12 der Deutschen Keramischen Gesellschaft, erstattet von U. Hofmann, Darmstadt, unter Mitarbeit von Th. Ernst, Erlangen, und A. Zwetsch, Mettlach/Saar.

Verwitterung gebildet werden, doch ist die Möglichkeit nicht auszuschließen, daß sie erst in späterer Zeit, etwa während des Transportes oder während oder nach der Ablagerung im Sediment entstanden. Als man in den letzten Jahren dieser Frage mit den modernen Methoden nachging, war zunächst unbekannt, ob sich diese Feinbestände überhaupt unterscheiden, und wenn ja, so war unbekannt, woher diese Unterschiede herrühren. Mit einer Überlagerung verschiedener Einflüsse war dabei von vornherein zu rechnen, denn es konnte hier das Ursprungsgestein von Einfluß sein oder die Art des Transportes oder die Vegetation und das Klima und die speziellen Faktoren, die bei der Bodenbildung von Einfluß sind. Weiterhin konnte durch eine frühere – fossile – oder durch die jetzige rezente Verwitterung der ursprüngliche Tonmineralbestand verändert werden.

Um in diesem Buch der Erdgeschichte zu lesen, kann man allerdings auf die Erkenntnisse zurückgreifen, die wir aus der heutigen Verwitterung gewinnen, welche nach dem herrschenden Klima, dem Ausgangsgestein, der Vegetation und einiger anderer Faktoren verschieden sein kann. Man wird die fossilen Bildungen also mit den verschiedenen Böden vergleichen, außerdem können die jetzigen Ablagerungsprodukte sowohl der Tiefsee wie diejenigen im Flachmeer den früheren sedimentären Ablagerungen gegenübergestellt werden. Man wird dabei die Untersuchungen auf alle Sedimente ausdehnen müssen, auch auf solche, in denen der Feinmineralgehalt nur einen kleinen Bruchteil in der Mineralführung ausmacht.

So können wir im Bayerischen Wald und in der Oberpfalz die tiefgründige tertiäre Verwitterung, die hier die granitischen Gesteine verändert hat, genauestens studieren. Es läßt z. B. schon das Erscheinungsbild in einem gut aufgeschlossenen Steinbruch bei Tirschenreuth/Opf. sofort erkennen, daß hier ursprünglich ein Granit vorgelegen hat. Äußerlich liegen die primären Minerale noch an Ort und Stelle, doch sind sie, vom Quarz abgesehen, in Kaolinit umgewandelt. Dieses Material wird für die Bayerische Porzellanindustrie abgebaut, ähnlich wie die Vorkommen von Amberg und Schnaittenbach. Hier handelt es sich allerdings um ursprünglich sehr stark feldspatführende Sande, deren Feldspatkomponente in Kaolinit überführt wurde, entweder

schon bei der Verwitterung des Granites oder erst im abgelagerten Sediment.

Durch eine eingehende mikroskopische Untersuchung lassen sich etwa beim Glimmer alle Stadien der Umbildung in die Tonminerale genauestens verfolgen und die erhaltenen Erkenntnisse dann auf andere Vorkommen ausdehnen. Bei diesen Vorkommen wird also der Kaolinit sicher nicht durch heiße wässrige Lösungen gebildet.

Man wird natürlich fragen, ob granitische Gesteine immer zu Kaolinit verwittern. Die Bodenkunde beantwortet die Frage so, daß überwiegend nur bei feuchtem Klima, sowohl kühlem wie warmem, kaolinitische Verwitterung eintritt, dagegen entstehen bei trockenem ariden Klima in Wüsten, Halbwüsten und Steppen vor allen Dingen montmorillonit- und illitreiche Bodentypen (der Illit ist dabei ein glimmerähnliches Tonmineral). Allerdings kann man umgekehrt nicht eindeutig vom Mineralbestand auf das Klima und das Milieu schließen, da es neben den klimabedingten Böden auch gesteinsbedingte Bodentypen gibt. So ergeben Kalksteine mit geringem Tongehalt auch bei humidem Klima Montmorillonit und Minerale der Glimmergruppe, weiterhin finden wir montmorillonitreiche Tone auch bei der Verwitterung vulkanischer Gesteine und Tuffe, auf die ich bereits vorher hingewiesen habe. Es sind dies die Bentonite und Bleicherden, die vielfach technisch verwertet werden. Durch die Untersuchungen der heutigen Meeresablagerungen können u. U. andere sehr wichtige Fragen geklärt werden. So ist man z. B. daran interessiert, zu wissen, ob in das Meerwasser eingeschwemmte Tonminerale sich in dem neuen Milieu umbilden. Hier gehen die Meinungen sehr auseinander. Einmal kann z. B. aus den Ablagerungen im Mississippi-Delta gezeigt werden, daß zu gleicher Zeit die westlich geschütteten Ablagerungen montmorillonitreicher, im östlichen mehr illitreicher sind in Anwesenheit von Kaolinit, Chlorit und Wechsellagerungsstrukturen. Die verschiedene Zusammensetzung dieser Ablagerung ergibt sich aus dem verschiedenen Charakter der verwitterten Gesteine, die durch Ströme des Mississippis herangebracht wurden. Andererseits aber ist auffallend, daß in den ältesten Sedimenten der Kaolinit und Montmorillonit deutlich weniger auftritt als in den jüngeren

Sedimenten. Man hat daraus gefolgert, daß diese Minerale im Laufe der Zeit sich aus anderen Tonmineralen gebildet haben. Eine Entscheidung über diese Frage ist bislang noch nicht gefällt.

Außer diesen Befunden aus den natürlichen Vorkommen können weiterhin auch die Ergebnisse der Laboratoriumsarbeit verwendet werden. Allerdings sind die Bedingungen, unter denen im Experiment die Tonminerale entstehen, nicht ganz mit der Natur vergleichbar, weil sie meistens bei erhöhter Temperatur vorgenommen wurden und erst ganz wenige Synthesen über die Bildungen von Tonmineralen bei normaler Temperatur vorliegen. Doch ergibt sich in allen Fällen, daß der Kaolinit bei neutraler bis schwach saurer Reaktion gebildet wird, der Montmorillonit dagegen im schwach basischen Milieu.

Sehr viel Vorarbeit mußte auf den verschiedenen Gebieten geleistet werden, wovon die hier gebrachten Beispiele natürlich nur kleine Streiflichter darstellen. Erst auf Grund dieser Erkenntnisse ist es möglich, nun aus dem festgestellten Mineralbestand weitergehende Schlüsse über die Entstehung und die Milieubedingungen für ein bestimmtes Sediment zu ziehen.

Zunächst ist es also notwendig, aus einem geologischen Horizont möglichst viele Proben zu untersuchen, um einen Überblick darüber zu gewinnen, ob sich dieser Feinbestand einer Sedimentschicht in seiner Zusammensetzung konstant hält oder sich ändert, wobei wiederum mit einer oberflächlichen Veränderung dieser Sedimente gerechnet werden mußte. Nur durch eine Vielzahl von Einzeluntersuchungen können diese Fragen überhaupt gelöst werden.

Solche modernen Untersuchungen sind in Deutschland erst an wenigen Stellen durchgeführt. Ihre Bearbeitung erscheint nur dann sinnvoll, wenn als Vorarbeit die geologische Erfassung des Geländes überhaupt vorliegt.

Es kann hier auf die grundlegenden Untersuchungen der Göttinger Schule von C. W. Correns verwiesen werden; einige andere Untersuchungen sind von der Bundesanstalt für Bodenforschung in Hannover durchgeführt, außerdem sind jetzt auf dem Gebiet der Sedimentpetrographie noch einige mineralogische Institute beteiligt.

Der süddeutsche Raum, speziell die Sedimente Bayerns, erscheint aus verschiedenen Gründen für diese Untersuchungen besonders geeignet.

Auch vom Erlanger Mineralogischen Institut sind einige dieser Einzelfragen bearbeitet. Dadurch können einige vorher angeschnittene Fragen für den Teilbereich beantwortet werden. Als ein Beispiel solcher Detailuntersuchungen darf ich hier eine Arbeit meines Schülers Hans-Hermann Schmitz¹ anführen, die ein Sonderproblem vom Ende der Trias behandelt, nämlich des Mittleren Keupers oder Gips-Keupers. Hier waren die Voraussetzungen gegeben: Von Herrn v. Freyberg lag eine genaue stratigraphische Gliederung vor, vor allem konnten an einem frischen Bohrkern einer Tiefbohrung bei Kulmbach, der „Irex“-Bohrung, die einzelnen Horizonte dieses Gipskeupers sehr genau erfaßt werden; allerdings wurden von dieser 245 m langen Gesteinssäule der Bohrung vor allem die mehr tonigen Lagen untersucht, im gesamten 24 Proben der unteren 100 m der Bohrung. Diese Lagen werden als Letten bezeichnet, außerdem kommen mergelige Schichten vor mit stärkerem Kalk- bzw. Dolomitgehalt, alle durchsetzt von Gipslagen oder mit feinem Gipsgehalt untermischt.

Für jede der 24 Proben mußte zunächst eine Korngrößentrennung durchgeführt werden. Selbst zur Bestimmung einer mittleren Zusammensetzung ist diese Unterteilung notwendig, weil vor allem der Quarz in den gröberen Fraktionen die Bestimmung der Feinanteile sehr erschwert oder ganz verhindert.

Ein Bild sei hier herausgegriffen: (Abb. 6). Rein anschaulich ergibt sich die verschiedenartige Zusammensetzung der einzelnen Korngrößeklassen. Neben den Mineralen des Ausgangsgesteins, dem Quarz, den Feldspäten und Glimmern, die sich vornehmlich im gröberen Material finden, lassen die Feinanteile hier weder Kaolinit noch Montmorillonit noch deren Verwandte erkennen. In diesem Beispiel fanden sich die sog. Illite, ferner Chlorite und außerdem Corrensit – für den Außenstehenden Worte ohne Begriff, doch sei gesagt, daß sie alle eine Be-

¹ Geol. Jb. 77, 1959, 59–94.

ziehung zu den Glimmern aufweisen, doch unterscheiden sie sich durch die Eigenschaften. Die Frage bleibt aber offen, ob es sich um Neubildungen oder um Verwitterungsreste aus dem Ausgangsmaterial handelt. An rezenten Ablagerungen, wie sie z. B.

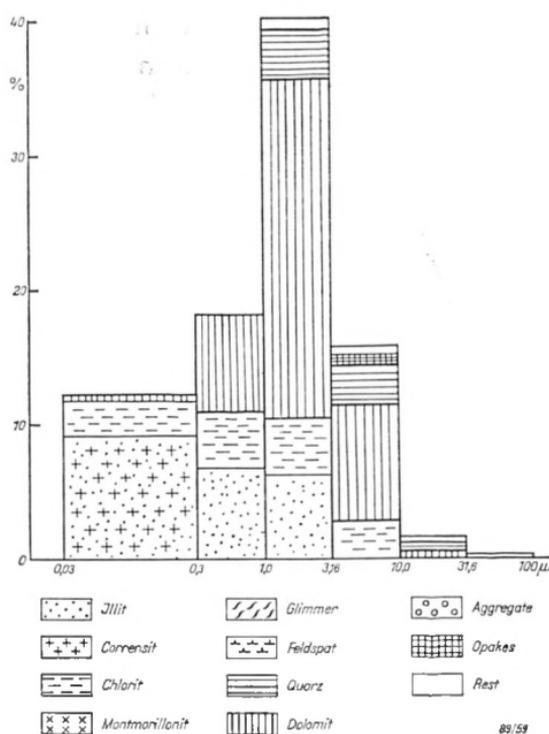


Abb. 6. Kornverteilung und Mineralgehalt einer Tonprobe aus dem Gipskeuper. („Irex“-Bohrung bei Kulmbach in 145–148 m Tiefe nach H. H. Schmitz, Geol. Jahrb. 77, 1959, 88).

von Eckhardt¹ untersucht wurden, ließ sich Illit neben kaolinitischen Material erkennen. Es muß daher die Möglichkeit geben, daß beides primär abgelagert werden kann. Andererseits sei noch einmal daran erinnert, daß sich nach Grim mit der Länge der geologischen Zeiten durch Umbildungsvorgänge immer mehr das Verhältnis des kaolinitischen und montmorillonitischen Materials gegenüber den Illiten sehr zugunsten des Illites verschiebt, so daß zuletzt die eigentlichen aluminiumhaltigen Tonminerale ganz verschwinden. Ähnliches gilt wohl

¹ Geol. Jb. 75, 1958, 437–474.

auch für die Chlorite, die in rezenten Sedimenten auch nur untergeordnet gefunden werden.

Diese Beispiele lassen also erkennen, daß man für alle Betrachtungen auch an die Möglichkeit einer Umbildung im fertigen Sediment denken muß; das bedeutet einen neuen Schleier, der die wahren Ursachen der Entstehung verbirgt, die uns natürlich besonders interessieren, also die Milieubedingungen, die aus dem festgestellten Mineralbestand abgelesen werden sollen.

Ein Blick auf die zusammengestellten Ergebnisse der verschiedenen Horizonte möge zeigen, daß trotz äußerer großer Ähnlichkeit der Schichten beträchtliche Unterschiede vorkommen. Größere Zusammenhänge lassen sich aus solcher Kleinarbeit aber erst ablesen, wenn sehr viel mehr solcher Spezialarbeiten vorliegen.

Auf ein besonderes Mineral, den Corrensit, sei hier noch kurz hingewiesen, der mit dem Chlorit und den Glimmern näher verwandt ist, aber im Gegensatz zu diesen eine Quellbarkeit zeigt und der zwischen dem Chlorit – einem Umbildungsprodukt der Glimmer – und dem Montmorillonit steht. Unsere Zusammenstellung (Abb. 7) läßt erkennen, daß zunächst der Chlorit gegenüber dem Corrensit überwiegt, dann wird dessen Anteil größer, um aber bei noch größeren Tiefen wieder ganz zu verschwinden. Hier in den größeren Tiefen handelt es sich allerdings um Lettenlagen aus Sandsteinhorizonten, die eine stärkere Zirkulation von Störungen zulassen. Hier sind also selbst in diesen Detailuntersuchungen noch viele offene Fragen.

In einer noch unveröffentlichten Doktorarbeit von Herrn H. H. Krumm¹ über das Thema: „Mineralführung und Genese fränkischer Keuper- und Lias-Tone“, deren experimenteller Teil im Erlanger Mineralogischen Institut durchgeführt ist (Herr Krumm selbst ist Mitarbeiter von Herrn Schmidt-Thomé), werden diese Untersuchungen sehr großräumig durchgeführt und durch die schon seit 150 Jahren vorliegenden Beobachtungen über die Stratigraphie, über die Fazies- und Klimaverhältnisse sowie über die Abtragungsgebiete und die Herkunftsgesteine der Sedimente sehr erleichtert. Diesem bekannten geologischen Rahmen

¹ Diss. T.H. München 1961.

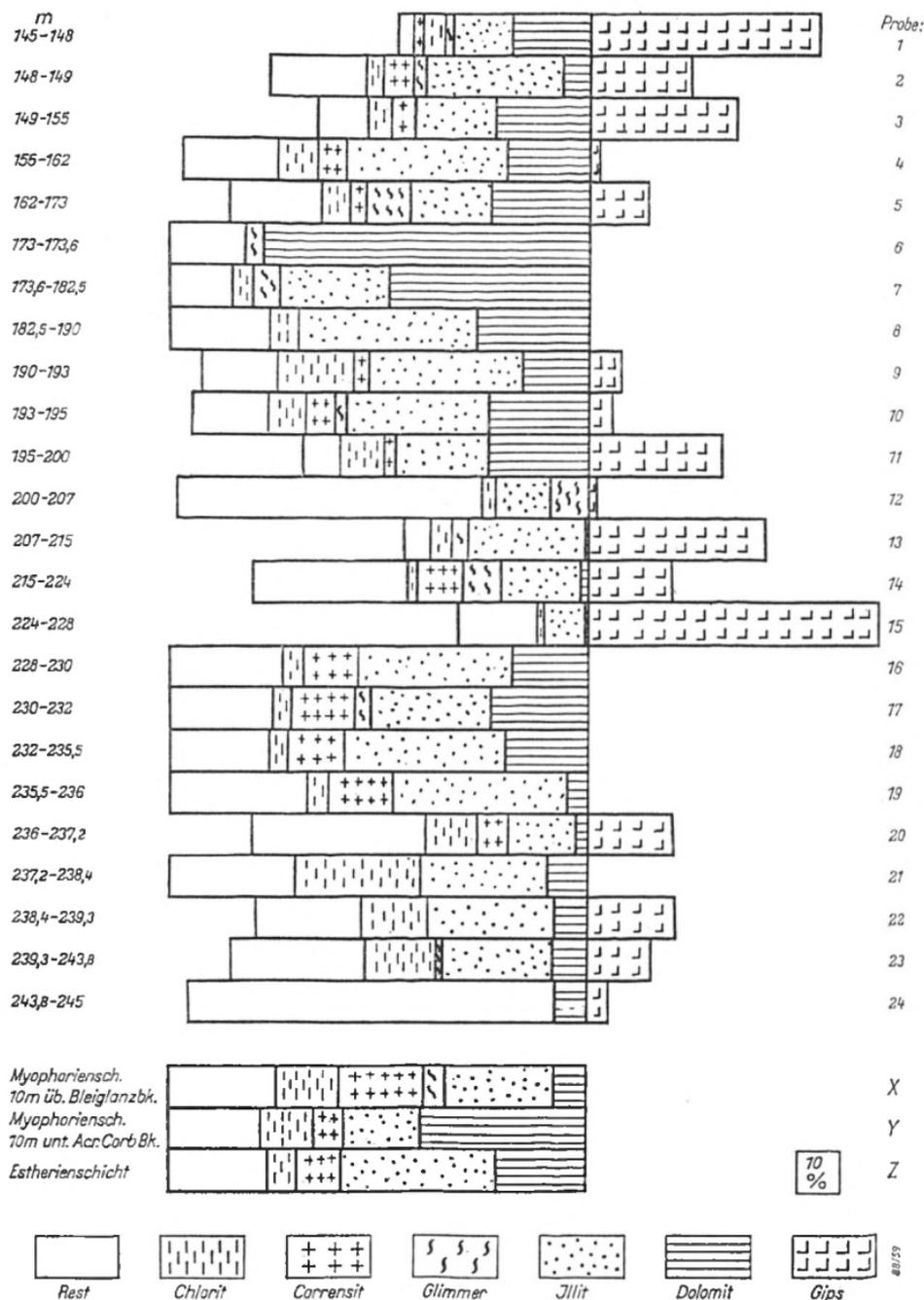


Abb. 7. Die mittlere Verteilung der Minerale in den Proben des Gipskeupers der „Irex“-Bohrung von 145-245 m Tiefe nach H. H. Schmitz

sind nun die mineralogischen Ergebnisse gegenübergestellt. Es handelt sich ebenfalls um Sedimente der ausgehenden Triaszeit und des Lias, des schwarzen Juras und z. T. auch des braunen Juras, des Doggers. Für diese Zeit stellt das Gebiet zwischen Coburg, dem Ries, Schwandorf und Bayreuth den Randbereich des Sedimentationsraumes gegen die böhmische Masse im Osten und eine wahrscheinlich vorhandene Masse im Süden dar. Diese hier skizzierten Schichten treten im Vorland der fränkischen Alb zutage, etwa in der Linie vom Ries über Hilpoltstein–Nürnberg–Erlangen–Bamberg, und diese Ausstrichlinie verläuft etwa parallel der alten Küstenlinie. Um die faziellen Änderungen, bedingt durch die Änderung der Korngröße mit näherer oder weiterer Entfernung von der Küste, festzustellen, wurden nach Möglichkeit auch Proben senkrecht zu dieser Linie untersucht, soweit man solche durch künstliche Aufschlüsse bekommen konnte.

Im ganzen wurden an über 200 Einzelproben die verschiedenen Untersuchungen durchgeführt. Hier in diesem Zusammenhang interessieren die allgemeinen Fragen, die sich aus diesen Einzeluntersuchungen ergeben.

Für die Fragestellung nach der Entstehung dieses zwar horizontbeständigen, im Laufe der geologischen Zeit sich aber ändernden Mineralbestands neuer Schichten ist hier besonders bedeutsam, daß wir dabei einen Wechsel terrestrischer Ablagerungen und mariner haben. Allerdings mußte gesichert werden, daß dabei keine Verschleierung durch nachträgliche Verwitterung der Sedimente eintrat. Solche rezente wie fossile Verwitterungen ließen sich aber erkennen – sie sind in ihrer Wirkung gleich –, und diese Wirkung läßt sich für die entsprechenden Horizonte eliminieren.

Auch die sog. diagenetischen Veränderungen, die das abgelagerte Sediment evtl. später verändert haben könnten, lagen nur unwesentlich vor. Weiterhin kann auf Grund der Geröllführung und des Fundes schwerer, widerstandsfähiger Minerale der verschiedenen Sedimente wahrscheinlich gemacht werden, daß als Lieferant im wesentlichen gleiche Ausgangsgesteine, nämlich granitische oder gneisartige Gesteine der böhmischen Masse in Frage kamen. Während der hier betrachteten Zeiten änderte sich das Klima von semiarid mit terrestrischen Bildungen

über warm-humid, ebenfalls noch mit terrestrischen Bildungen, die dann von marinen Sedimenten abgelöst wurden.

Der Mineralbestand während dieser Formationen läßt ebenfalls eine Dreiteilung erkennen: während der ersten Bildungsperiode am Ende der Keuperzeit, dem oberen Burgsandstein und den Feuerletten, erhält man Illit-Tone mit quellfähigen Bestandteilen, entweder mit Montmorillonit oder mit Illit-Montmorillonit-Wechselagerungen.

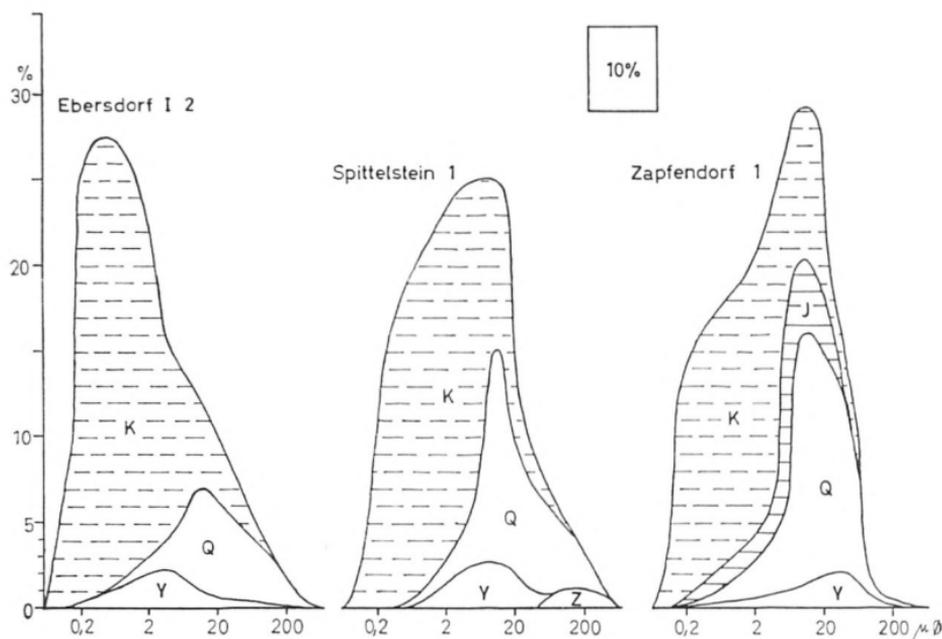


Abb. 8. Kornaufbau und Mineralbestand repräsentativer Proben aus den Rät-Lias-Übergangsschichten Frankens nach H. H. Krumm. K = Kaolin-Gruppe, I = Glimmerartige Minerale; Q = Quarz, Y = Rest (Gips, seltene Feldspatreste, Schwerminerale, Fossilreste, organische Substanzen und opake Minerale).

Den warm-humiden terrestrischen Bildungen der 2. Periode entsprechen Kaolinit-Tone mit wenig Illit ohne Karbonatgehalt; formationsmäßig handelt es sich um die Übergangsschichten Rät-Lias von der Trias zur Jurazeit (Abb. 8). Die dann folgenden Bildungen, Almatheen-Tone und Opalinus-Ton, sind marin gebildet, das Klima dürfte sich wenig geändert haben (Abb. 9). Sedimente sind hier Illit-Tone mit wenig Kaolinit, aber mit Karbonat.

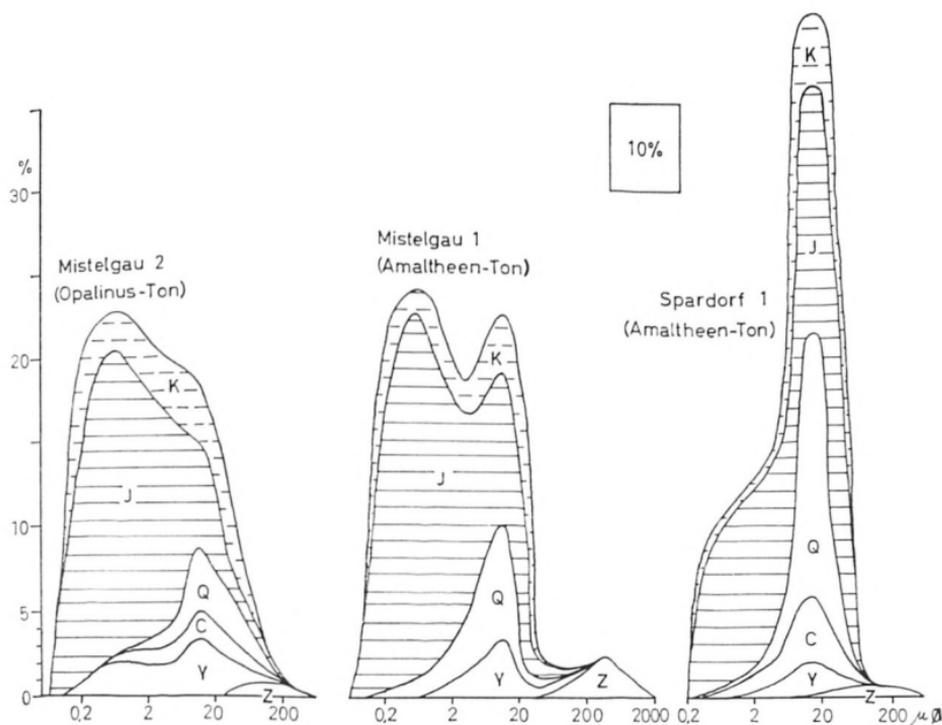


Abb. 9. Kornaufbau und Mineralbestand repräsentativer Proben aus dem Opalinuston und Amaltheen-Ton Frankens nach H. H. Krumm.

C = Karbonate, Bezeichnung im übrigen wie in Abb. 12.

Die Verhältnisse können aus der Übersichtstabelle entnommen werden (Abb. 10).

Nach den geologischen und paläontologischen Befunden hat man bei diesem oberen Burgsandstein mit Sicherheit auf ein warmes trockenes Klima geschlossen. Das Material dieses verhältnismäßig groben Gesteins wurde durch flutartige Transportvorgänge verlagert; bei den nachfolgenden Feuerletten sind zwar die Minerale die gleichen, doch hier von geringer Korngröße, so daß man nur schwache Abschwemmungen annehmen darf, evtl. ist sogar der Wind beteiligt. Die Ablagerungen erfolgten in flachen Becken mit kleinen Seen und offenbar mit geringem Pflanzenwuchs. In der heutigen Zeit würden sich nach den Forschungen der Bodenkunde hier bei den skizzierten Klimabedingungen Verwitterungsböden finden, die den gleichen Mineralbestand zeigen, wie wir es hier im fossilen Fall feststellen, nämlich Illit-Montmorillonit.

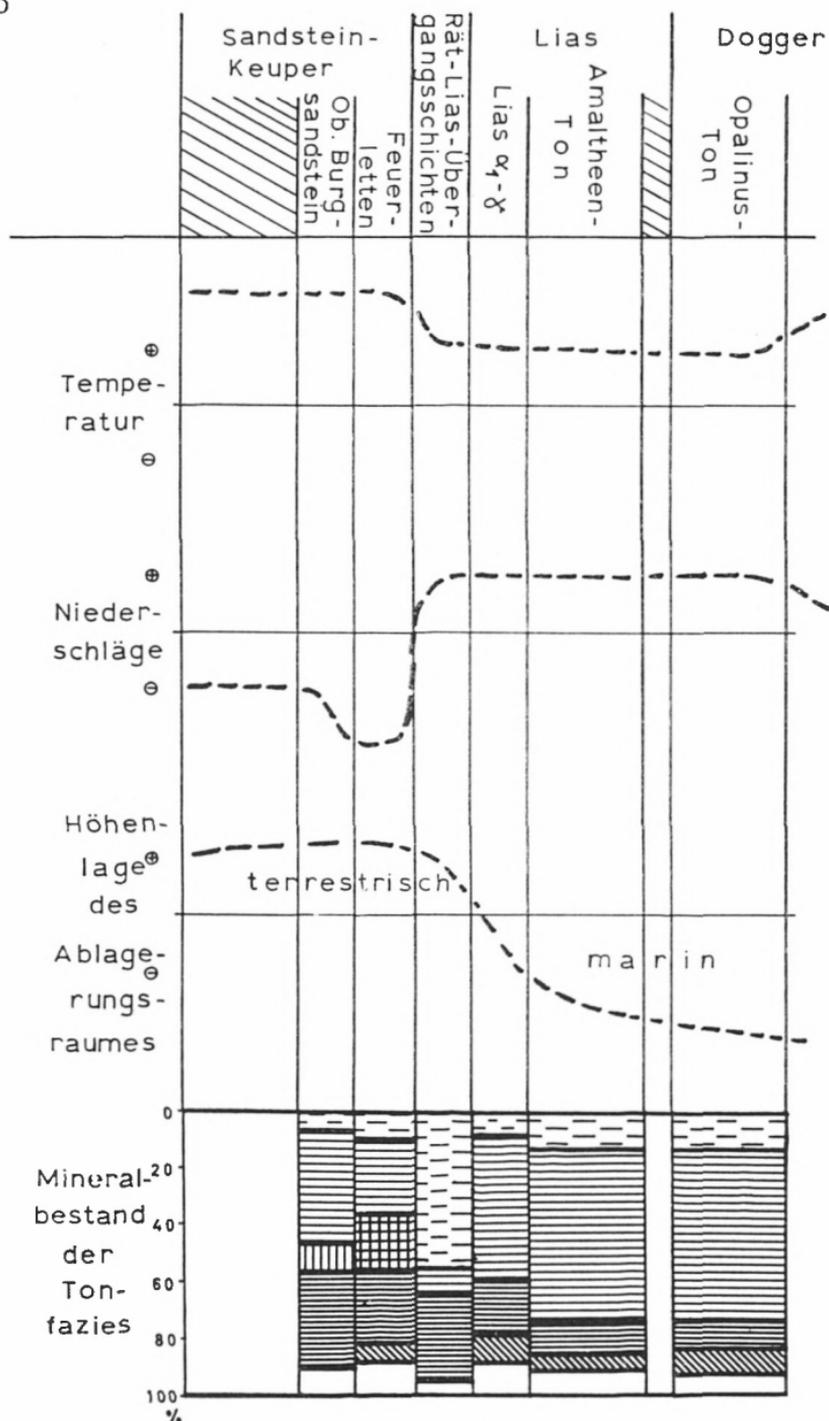


Abb. 10. Gemeinsame Darstellung über die Beziehungen von Klima, Ablagerungsraum und Mineralbestand in den untersuchten Schichten vom Sandsteinkeuper bis zum Opalinuston in Franken nach H. H. Krumm. Horizontal gestrichelt: Kaolingruppe; weit schraffiert: Glimmerartige Minerale; eng schraffiert: Quarz, vertikal schraffiert: Montmoriningruppe; quadriert: Illit-Montmorillonit; schräg schraffiert: Karbonate; weiß: Rest.

Das Klima wird nun in der folgenden Zeit, dem Übergang von der Trias zum Jura, feucht-humid. Bei den rezenten Bildungen beobachtet man dann in den Böden Kaolinit und Quarz als Verwitterung solcher granitischer Gesteine. Auch hier stimmt der fossile Vergleichsfall.

Diese schon längst bekannte Klimaabhängigkeit der Oberflächen-Kaolinisierung kann im vorliegenden Fall durch eine sehr große Zahl von Proben belegt werden, außerdem können hier Beispiele z. B. von der Insel Schonen beigebracht werden, die zeigen, daß das damals zutage stehende Grundgebirge eine Kaolinisierung zeigt, während die darüber lagernden Schichten des Lias diese Veränderung nicht zeigen. Hier für Franken müssen wir die gleichen Bildungsbedingungen annehmen. Die Abschwemmung des kaolinisierten Gebirges fand dann in flachen Süßwasserbecken statt, wie man dies auch paläontologisch belegen kann: eine Änderung des Mineralbestandes trat dabei nicht auf.

Und endlich kann aus den Schwermineraluntersuchungen der marinen Lias-Tone einschließlich des Opalinus-Tones geschlossen werden, daß die Zusammensetzung des Herkunftsgebietes wahrscheinlich die gleiche gewesen sein muß wie vorher. Auch jetzt ist das Klima noch feucht-humid, die Annahme ist daher wohl berechtigt, daß die kaolinitische Verwitterung auf dem Festland weiterbestanden haben muß.

Im Gegensatz zu diesem bei der Verwitterung entstandenen Kaolinitmaterial beobachtet man in den marinen Sedimenten jetzt aber eine Illit-Vormacht mit nur wenig Kaolinit.

So führt diese Arbeit in eine Streitfrage der Sedimentpetrographie: Handelt es sich hier um Umbildungen des Kaolinites durch das Meerwasser oder muß evtl. doch damit gerechnet werden, daß ein anderes Herkunftsgebiet ein anderes Material geliefert hat, das wesentlich aus Illit und seinen Verwandten bestand? Krumm hält die Umbildung für wahrscheinlicher als ein weites Heranbringen fremden Materials in ein solches ausgedehntes Flachmeer. Außerdem weisen alle bisherigen Untersuchungen darauf hin, daß im marinen Milieu überwiegend solche illitischen Tonminerale vorkommen, auch in den rezenten Bildungen.

Ferner können hierfür die Ergebnisse der Experimentaluntersuchungen herangezogen werden. Das Meerwasser reagiert schwach basisch mit einem pH von etwa 8. Bei Synthesen der Tonminerale, allerdings bei höherer Temperatur, entsteht bei solchen entsprechenden Verhältnissen ebenfalls der Montmorillonit. Außerdem kann nach neuesten Arbeiten von Carroll und Starkey (1958),¹ die den Einfluß des Seewassers auf die Tonminerale verfolgt, gezeigt werden, daß der Kaolinit sehr rasch, dagegen Montmorillonit und Illit nur langsam den Ionenbestand des Meerwassers aufnehmen. Nach diesen Autoren bedeutet dieser Ionenaustausch den ersten Schritt zu einer Tonmineraländerung.

Diese Beispiele mögen genügen, um etwa die Richtung anzuzeigen, in der sich die jetzigen Untersuchungen auf diesem Gebiet bewegen. Arbeiten dieser Breite sind allerdings bislang noch sehr spärlich. Es ist natürlich das Bestreben, hier möglichst bald die Lücken zu schließen, um durch solche Untersuchungen den geologischen Befund zu stützen und zu vertiefen.

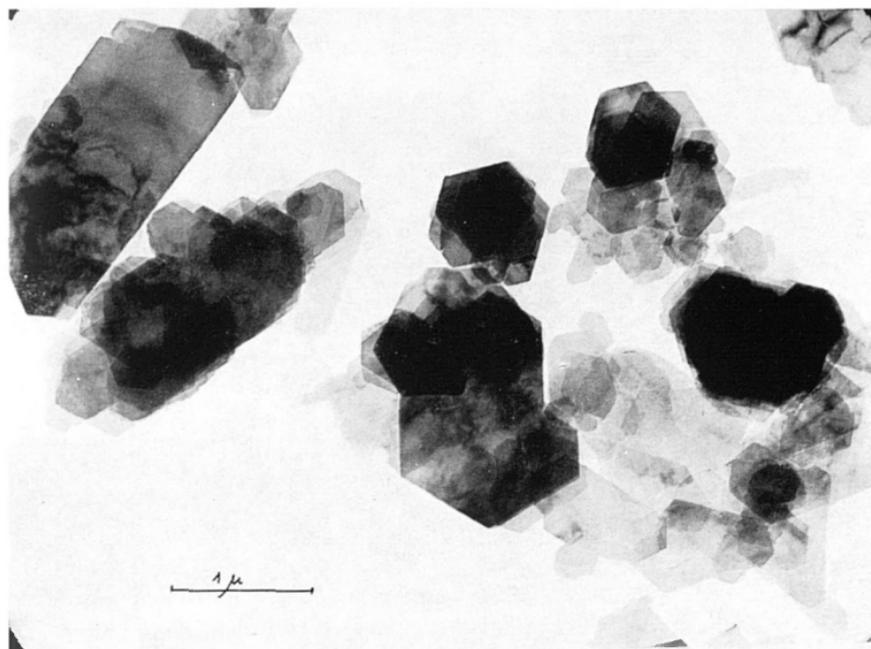
Wie in jeder Wissenschaft ergeben sich in einem solchen Neuland immer mehr neue Fragen, die allerdings durch viele Einzeluntersuchungen mühsam geklärt werden müssen. Auch hier sind die Linien der Forschungsrichtung angedeutet: So kann durch eingehende kristallstrukturelle Arbeit ein weiterer Beitrag – etwa bei den Glimmern oder bei den Illiten – über die genaueren Bildungstemperaturen erbracht werden; geochemische Untersuchungen über die Verteilung von Spurenelementen werden ebenfalls Hinweise über die Bildung und das Bildungsmilieu zulassen. Die Ansätze zur Mineralsynthese bei normalen Temperaturen sind im Gange, so daß zu hoffen ist, daß auch von dieser Seite aus offene Fragen geklärt werden können. Wie sehr diese Untersuchungen im Fluß sind, kann auch aus dem in den letzten Jahren sehr ausgedehnten Schrifttum entnommen werden.

Bewußt habe ich hier die petrographisch-geologische Seite in den Vordergrund gestellt und nur in einigen Streiflichtern auf die keramisch-technische Seite hingewiesen. Aber auch von

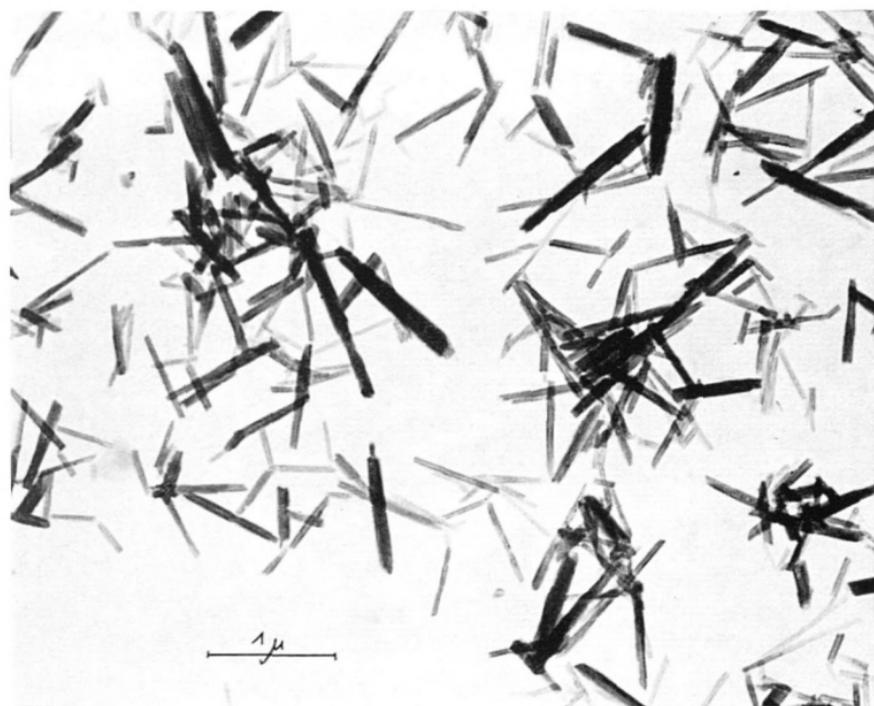
¹ Clays and Clay Minerals 7, 1958, 80–101.

hier gehen sehr viele neue Impulse aus, um die Zusammensetzung zu klären, weil die technischen Anforderungen ebenfalls eine genauere Kenntnis des Rohstoffes erfordern.

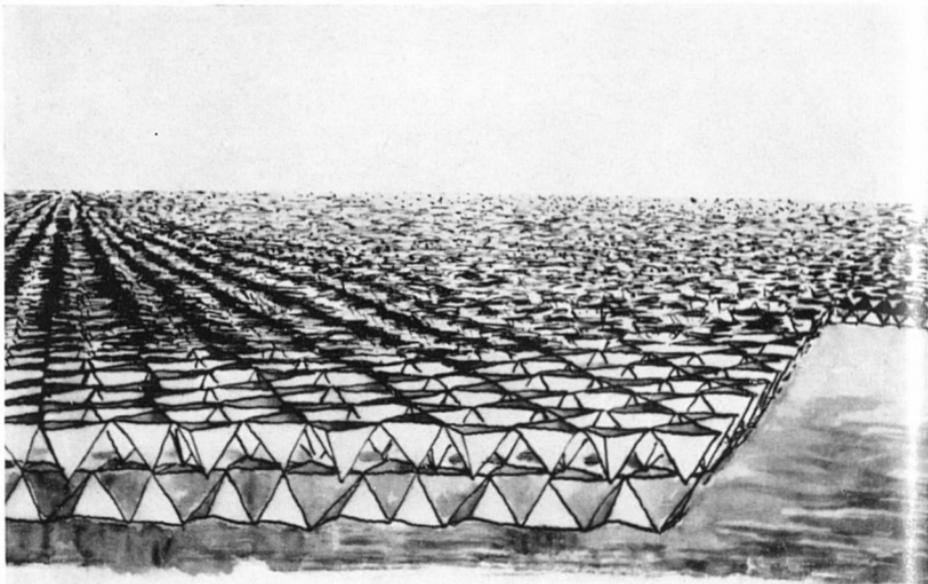
So ist diese Mineralwelt des feinkörnigen Materials voller Probleme, und nur durch das Zusammenwirken vieler spezieller Forschungsrichtungen kann diese Wissenschaft ihr Ziel erreichen: Immer genauer im Buch der Erdgeschichte lesen zu können und den Nachbarwissenschaften die Unterlagen zu liefern, die sie für ihr Gebiet benötigen. Gegenüber der Feststellung schwerer widerstandsfähiger Minerale, die für das Herkunftsgestein charakteristisch sind, kann aus dem Tonmineralgehalt auf das Milieu während der Verwitterung und der Bildung des Sedimentes geschlossen werden. Es ist zu hoffen, daß bei einer Vertiefung durch neue Arten wir immer mehr in der Lage sind, die einzelnen Faktoren, die die Verwitterung und Ablagerung beeinflussen, aus dem Sediment ablesen zu können.



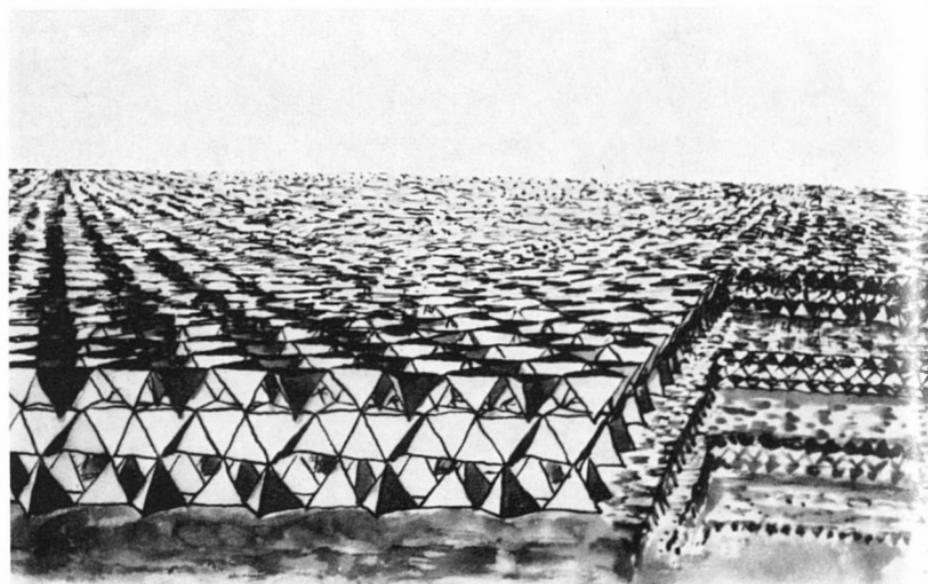
1. Elektronenmikroskopisches Bild eines technisch verwerteten Kaolins, das die (pseudo-hexagonalen) Blättchen des Kaolinites zeigt.



2. Elektronenmikroskopisches Bild eines Tones mit Halloysit von Djebel Debar mit Röllchen-Textur der einzelnen Kristalle.



1. Übersichtsbild der Kristallstruktur des Kaolinites nach einer Zeichnung von W. Forkel. Dargestellt ist ein Schichtpaket mit einer „Tetraederschicht“ (oben) und einer „Oktaederschicht“ (unten). Im Inneren eines Tetraeders ist ein Silizium-Atom zu denken, an den Ecken der Tetraeder sitzen Sauerstoff-Atome; in jedem Oktaeder wird ein Aluminium-Atom von Sauerstoff-Atomen und Hydroxyl-(=OH)-Gruppen oktaedrisch umgeben.



2. Übersichtsbild der Kristallstruktur des Montmorillonites nach einer Zeichnung von W. Forkel. Dargestellt ist eine Folge von Schichten; jedes Schichtpaket besteht aus einer Oktaederschicht, die beiderseitig von Tetraederschichten umgeben ist. Der Aufbau der Tetraeder und Oktaeder entspricht weitgehend demjenigen des Kaolinites.