

Zur Methodik der Lössdifferenzierung auf der Grundlage der Carbonatverteilung

Von FRIEDHELM HÄDRICH, Freiburg i. Br.

Mit 10 Abbildungen und 4 Tabellen

Zusammenfassung. Im ersten Teil dieser Arbeit wird über eine Methode der geochemischen Carbonatfraktionierung in Gesamtcarbonat, Dolomit und Calcit und deren Fortentwicklung für die Untersuchung von Lössproben berichtet. Analysen- und Berechnungsfehler dieser und anderer herkömmlicher Methoden der Carbonatbestimmung werden diskutiert und Wege ihrer Vermeidbarkeit aufgezeigt.

Sodann werden Ergebnisse der Untersuchung von mehr als 300 Lössproben aus dem südlichen Oberrheingebiet dargestellt und statistisch ausgewertet. Nach den Dolomitgehalten lassen sich drei Lössaltersgruppen unterscheiden und weitgehend statistisch gegeneinander sichern. Die Dolomitgehalte sind innerhalb der einzelnen Lösspakete einheitlich hoch und ändern sich sprunghaft beim Übergang von einem Löss in den anderen. Im Mittel liegt der Dolomitgehalt bei den Jüngeren Lössen bei 12,64 ‰, bei den Mittleren bei 10,91 ‰ und bei den Älteren bei 5,53 ‰.

Die Dolomitverteilung in den Lössprofilen wird durch präloßgenetische Dolomitanreicherung in den Feinsand- und Schlufffraktionen der glazigenen und glazifluvialen Ablagerungen des Alpenvorlandes, als dem Herkunftsgebiet der Lössen erklärt.

Summary. The first part of this paper is concerned with a method of geochemical fractionating of carbonates and its further development for the investigation of loess samples.

This method allows to determine the amounts of total carbonate, dolomite and calcite.

Methodical mistakes of analysis and calculation are discussed and it is shown how to avoid them.

Finally the results of investigation of more than 300 loess samples from the southern Upper Rhine Valley are described and evaluated statistically.

According to the amounts of dolomite three loess groups of different ages could be distinguished. This distinction could be proved by statistical comparisons. In every single loess group the contents of dolomite are of the same level but by passing from one loess group into the other they change by leaps and bounds.

The average amount of dolomite of the younger loesses is about 12,64 ‰, of the loesses of medium ages about 10,91 ‰ and of the older ones about 5,53 ‰.

The dolomite distribution within the loess profiles is explained by preloessgenetical enrichment of dolomite in the fine sand and silt fractions of the glacial and glacialfluvial deposits in the foreland of the Alps.

1. Einführung

Der Löss als pleistozänes äolisches Periglazialsediment ist in nahezu allen typischen Verbreitungsgebieten faziell deutlich gegliedert, so daß die Lössforscher zwar einerseits seinen Wert für eine chronostratigraphische Pleistozängliederung schon frühzeitig erkannten, andererseits diesen Wert oft weit überschätzten, falls nicht bestimmte Bedingungen (s. u.) vorlagen. So sind auch für das südliche Oberrheingebiet, das Gegenstand der vorliegenden Untersuchung ist, bis in die jüngste Vergangenheit hinein Arbeiten erschienen, die sich mit der stratigraphischen Gliederung, der Parallelisierung und der Datierung der Lössen und ihrer Paläoböden sowie mit deren geochemischen Eigenschaften beschäftigten (GUENTHER 1961, BRONGER 1966, 1969, BRONGER & HÄDRICH 1969, KHODARY-EISSA 1968, HÄDRICH 1970).

Eine gesicherte chronostratigraphische Gliederung der äolischen Pleistozänsedimente steht in Südwestdeutschland jedoch immer noch aus. Die Ursachen dafür müssen in erster Linie im Fehlen einer Reihe von „Fixpunkten“ und in ungünstigen stratigraphischen Bedingungen gesehen werden, die den eingangs angesprochenen Wert der oberrheinischen Löss für die Pleistozängliederung einschränken. Als Argumente können in diesem Zusammenhang angeführt werden:

1. Die Löss lagern im südlichen Oberrheingebiet nicht auf datierten oder datierbaren Pleistozänterrassen, sondern aus tektonischen Gründen auf allen möglichen hier vorkommenden älteren Gesteinskomplexen. Die Ausnahme bildet lediglich der in Abschn. 4.4. dargestellte Fall.
2. Der Löß wurde während aller seiner Bildungsphasen in relativ hügeligem Gelände abgelagert, so daß die Gesamtmächtigkeiten örtlich stark schwanken und daß wir heute mit Hiaten und postgenetischen Profilverkürzungen zu rechnen haben, die auch die eingelagerten Paläoböden betreffen.
3. Die Lößforscher müssen sich wegen der umfangreichen anthropogenen Eingriffe auf Torso-profile beschränken. Die Aufschlußverhältnisse werden zunehmend schlechter.
4. Die Löss selbst — so roh und scheinbar unverändert sie auch vorliegen — sind hier nicht so reich gegliedert wie etwa in Hessen (SCHÖNHALS, ROHDENBURG & SEMMEL 1964; SEMMEL 1969, SEMMEL et al. 1974) oder in Belgien (PAEPE 1969).
5. Es fehlen weitgehend Artefakte und Petrefakte, mit Hilfe derer Zeitmarken gesetzt werden könnten.
6. Für eine Radiocarbonatierung fehlen i. d. R. humose Straten, bzw. einwandfreie Reste tierischer oder pflanzlicher Natur.
7. Die in rheinischen und hessischen Lössen (BRUNNACKER 1971, BIBUS 1973) auftretenden Tuffe fallen hier offensichtlich aus.

Aus all diesen Gründen ist es nicht verwunderlich, daß sich die Lößforscher gerade in diesem Raum immer mehr von der früher dominierenden profilmorphologischen Betrachtungsweise — ohne diese zu vernachlässigen — abkehren und verstärkt laboranalytischen Methoden aus der Bodenkunde, Sedimentologie und Geochemie zuwenden und zwar stets auf der Suche nach neuen, methodisch geeigneteren Wegen (HÄDRICH 1970).

In nahezu allen Lößarbeiten der letzten Jahrzehnte finden sich Daten zum „Kalkgehalt“ von Lössen und Paläoböden, weil man schon frühzeitig seinen stratigraphischen Wert erkannte und in ihm einen wichtigen Gradmesser für postgenetische Materialveränderungen sah. Diese Arbeiten beschränken sich aber fast ausnahmslos auf die Beschreibung des Gesamtcarbonats nach der volumetrischen SCHEIBLER-Methode, deren Ergebnisse von so vielen Zufälligkeiten abhängen und die bei Anwesenheit von Dolomit schlicht als falsch bezeichnet werden müssen (vgl. Abschn. 2.3.1.).

Es hat aber in der Vergangenheit nicht an Versuchen gefehlt, neue, vorwiegend naßchemische Methoden zur Bestimmung von Gesamtcarbonat, vor allem aber seiner wichtigsten Fraktionen Calcit und Dolomit zu entwickeln, wobei man sich allerdings meist auf reine Kalk- und Dolomitgesteine beschränkte. Es sei hier beispielhaft nur auf die Arbeiten von PETERSEN & CHESTERS (1966) und NOMMIK (1974) hingewiesen.

Im folgenden soll über eine zumindest für Lößproben neue Methode der geochemischen Carbonatfraktionierung berichtet werden, die erstmalig 1968 bei Proben aus Lößaufschlüssen von Bötzingen am Kaiserstuhl stichprobenweise angewandt worden war. Vorläufige Ergebnisse dieser ersten Untersuchungen finden sich bei KHODARY-EISSA (1968). Das Ergebnis war so erfolgversprechend, daß das Verfahren in den vergangenen Jahren unter ständiger methodischer Verbesserung bei der Untersuchung aller Proben aus Bötzingen a. K. und weiterer Aufschlüsse konsequent angewandt wurde. Das methodische Prinzip und einige anwendungstechnische Probleme wurden von HÄDRICH bereits 1970 publiziert.

2. Darstellung und kritische Wertung der Methoden der Carbonatfraktionierung

2.1. Die Methode der komplexometrischen Titration

Es handelt sich um die Anwendung der von MÜLLER (1964) nur für tonarme, d. h. reine und feste Carbonatgesteine empfohlenen Methode der komplexometrischen Titration („Komplexometrie“) von Ca^{++} und Mg^{++} (im folgenden kurz Ca und Mg genannt) im salzsauren Extrakt auf Lößproben.

Nach ihm sollte diese Methode nur bei sehr reinen Carbonatgesteinen erlauben, den Dolomitgehalt zu berechnen und über den gleichzeitig ermittelten CaCO_3 - (Calcit-)Gehalt auch den Gesamtcarbonatgehalt zu bestimmen.

2.1.1. Methodisches Prinzip:

0,5 g der gemahlenden, bei 105°C getrockneten Probe werden unter 8-minütigem Erhitzen (100°C) zur Carbonatlösung mit 12,33%iger HCl versetzt. Nach Zusatz von NH_4Cl , damit Mg in Lösung bleibt, und NH_4OH zur Lösung werden die bei den nachfolgenden Titrations störenden Schwermetallionen gefällt. Danach wird die Lösung in 500 ml Meßkolben filtriert und aufgefüllt.

In je einem Aliquot des Filtrats wird mit dem bekannten, auf Ca und Mg spezifisch ansprechenden organischen Komplexbildner AeDTE in zwei getrennten Titrationsgängen (1. Ca + Mg, 2. Ca) unter Zusatz von Puffern und spezifischer Indikatoren durch Umrechnung über die jeweils verbrauchte AeDTE-Menge der Anteil von Ca und Mg an 100 g Probe bestimmt.

Wichtig ist, daß der erhaltene Mg-Anteil unter Heranziehung eines äquivalenten Ca-Anteiles auf Dolomit mit einem Molverhältnis für CaCO_3 zu MgCO_3 wie 1 : 1 umgerechnet wird und der dabei verbleibende Rest an Ca auf Calcit. Die auf diese Weise rechnerisch ermittelten Anteile an CaCO_3 und MgCO_3 ergeben zusammen das Gesamtcarbonat¹⁾.

2.1.2. Kritische Wertung der Methode der Komplexometrie

Die Komplexometrie eignet sich besonders für Laboratorien mit bescheidener apparativer Ausstattung. Außer einer gewissen Grundausrüstung mit Laborglaswaren und Chemikalien benötigt man lediglich einen Trockenschrank, einen Muffelofen (Zerstörung der organ. Substanz), eine Bürette (möglichst automatisch, aber nicht Bedingung) und ein heizbares Magnetührwerk. Es ist sehr genau auf die Einhaltung konstanter Arbeitsbedingungen zu achten. Trotzdem sind subjektive Abweichungen in den Bedingungen nicht ganz vermeidbar, die als zufällige Fehler in die Bestimmung eingehen, weswegen die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse nur als befriedigend bezeichnet werden kann. Gegenüber der im Abschn. 2.2. dargestellten Methode fallen die Werte für das Gesamtcarbonat um etwa 1,2—1,5 %, für den Dolomit um etwa 0,5 % niedriger aus.

2.2. Der HCl-Extrakt mit anschließender AAS-Messung

Nicht zuletzt aus den in Abschn. 2.1.2. dargestellten Gründen wurde in den letzten Jahren bei allen untersuchten Proben parallel zur Komplexometrie der apparativ aufwendigere, arbeitstechnisch aber einfachere Weg über die Messung von Ca und Mg im Atomabsorptionsspektrophotometer (AAS) beschritten.

2.2.1. Methodisches Prinzip

Die HCl/AAS-Methode folgt bis zum Auffüllen des Filtrats auf 500 ml genau dem Vorgehen wie bei der Komplexometrie (Abschn. 2.1.). Lediglich die Titrations wurden durch die schnellere AAS-Messung mit dem Gerät Perkin-Elmer 403 ersetzt. Für die Messung wurden Standard-Eichlösungen für Ca und Mg der Fa. MERCK verwandt. Zum Aus-

1) Weitere methodische Details können jederzeit beim Verf. erfragt werden.

schalten eines Störioneneinflusses bei der Ca-Messung wurde SrCl_2 zugesetzt. Die zur Messung kommenden Filtratmengen mußten 50fach verdünnt werden. Die Berechnungen von Gesamtcarbonat und Dolomit erfolgten wie im Abschn. 2.1.1. angedeutet.

2.2.2. Weitere methodische Änderungen

Da bei der AAS-Messung Schwermetallionen nicht in dem Maße stören, wie bei der Komplexometrie, kann man auf die Fällung der Schwermetalle verzichten. Mit anderen Worten, man kann die Lösung ohne vorherigen Zusatz von NH_4Cl und NH_4OH filtrieren und das auf 500 ml aufgefüllte Filtrat nach entsprechendem SrCl_2 -Zusatz und nach der Verdünnung zur Messung bringen.

Alle im Abschn. 4 dargestellten Daten entstammen noch aus der jahrelang geübten Behandlung und Messung nach Abschn. 2.2.1. Lediglich die HCl/AAS-Werte in Abb. 2 (Proben von Eichstetten) wurden ohne Schwermetallfällung nach Abschn. 2.2.2. gewonnen.

2.3. Die systematischen Fehler der Methoden

Es ist gleichgültig, welchen Weg der Carbonatfraktionierung — komplexometrische Titration oder HCl/AAS-Methode mit oder ohne vorherige Schwermetallfällung — man beschreitet, es müssen in jedem Falle zweierlei Unsicherheiten in Kauf genommen werden, die sich als systematische Fehler in den Ergebnissen niederschlagen:

1. Fehler durch Abweichungen in der stöchiometrischen Zusammensetzung von Dolomit und Calcit

Der in der Probe vorliegende Dolomit weist nicht unbedingt das exakte Molverhältnis von 1 : 1 auf, weil ein Teil des Mg durch Ca, Fe und Mn vertreten sein kann; es gibt aber auch Mg-haltige Calcite (MÜLLER 1964, 203 f.). Dieser Fehler läßt sich bei den hinsichtlich ihrer Mineralvergesellschaftung äußerst heterogen zusammengesetzten Lössen wohl auch durch den Einsatz röntgenographischer Methoden (MÜLLER 1964, 203 ff.) nicht exakt ermitteln und damit auch nicht vermeiden. Auf jeden Fall handelt es sich dabei um einen Fehler, der die Ergebnisse sowohl erhöhen als auch erniedrigen kann.

2. Fehler durch Einbeziehung silikatbürtiger Erdalkalien

Durch die 8minütige Einwirkung der heißen HCl wird ein zunächst unbekannter, nach Abschnitt 2.3.1. aber einzuschätzender Anteil von Ca und Mg aus silikatischer Bindung (Tonminerale und leicht verwitterbare Primärsilikate) freigesetzt und in die Bestimmung einbezogen, so daß die errechneten Gesamtcarbonat- und Dolomitwerte gegenüber den entsprechenden realen Gehalten immer zu hoch ausfallen müssen.

2.3.1. Fehlereinschätzung durch Vergleich mit der Methode der konduktometrischen Gesamtcarbonatbestimmung

Um wenigstens den zweiten, im vorhergehenden Abschnitt erwähnten Fehler einschätzen zu können, bedarf es des Vergleichs der Daten aus der Komplexometrie oder aus der HCl/AAS-Messung mit einer anderen, genaueren Methode der Gesamtcarbonatbestimmung.

Für diesen Vergleich erwies sich die konduktometrische Methode der Gesamtcarbonatbestimmung mittels heißer Ortho-Phosphorsäure und zugeschaltetem Gasanalysegerät der Fa. W ö s t h o f f / Bochum (SCHLICHTING & BLUME 1966, 108) als besonders geeignet, weil die Reaktion im Sinne einer vollständigen Carbonatlösung verläuft, da sich das schwerlösliche Ca-Phosphat bildet und weil störende Gase durch entsprechende vorgeschaltete Absorber eliminiert werden können.

Die „W ö s t h o f f - Methode“ liefert aber nur dann zuverlässige Gesamtcarbonatwerte, wenn die Proben ausschließlich CaCO_3 und keine anderen Carbonatformen enthalten. Ähnlich wie bei der gasvolumetrischen Gesamtcarbonatbestimmung nach SCHEIBLER werden auch bei der W ö s t h o f f - Methode die erhaltenen Meßwerte i. d. R. auf CaCO_3 umgerechnet und zwar unter Vernachlässigung der möglicherweise vorhandenen MgCO_3 -Anteile aus den dolomitischen Bestandteilen der Proben.

Bei Anwesenheit von Dolomit schleicht sich durch diese Berechnungsweise ein ausnahmslos positiver systematischer Fehler in die Daten ein, der mit dem Dolomitgehalt in seiner Größenordnung ansteigt und der nur beseitigt werden kann, wenn der Dolomitgehalt, z. B. aus der Bestimmung nach Abschn. 2.1. oder 2.2. bekannt ist.

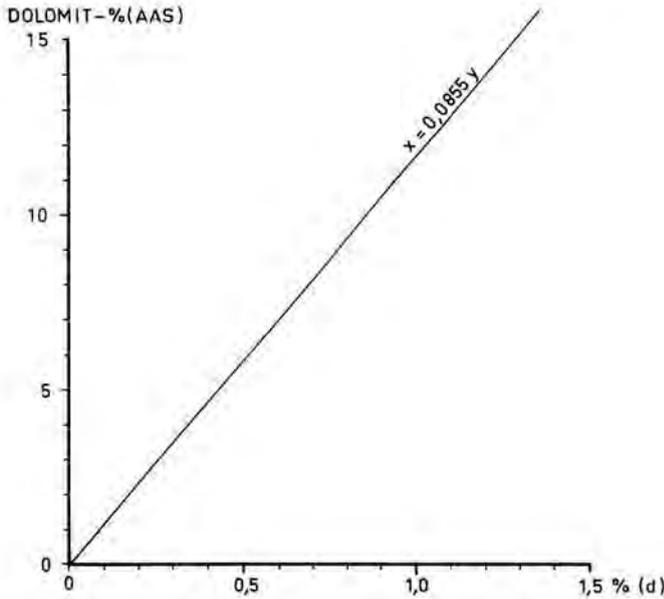


Abb. 1. Differenzwerte (d) zur Korrektur des Gesamtcarbonats (Wösthoff) als Funktion des Dolomitgehaltes ($d = \text{Dolomit-}\% \times 0,0855$)²⁾

Die Gesamtcarbonatwerte nach Wösthoff bedürfen daher eines negativen Korrekturfaktors (d), der sich, wie aus Abb. 1 zu entnehmen ist, bei den untersuchten Lössen zwischen 0,2 und 1,2 % bewegt und allgemein aus der linearen Beziehung $x = 0,0855 y$ ($x = d$) berechnet werden kann. Dieser Korrekturfaktor resultiert aus rein stöchiometrischen Überlegungen und ist daher unabhängig von der Art der Probe und kann auch für höhere Dolomitgehalte berechnet bzw. extrapoliert werden. Dieser Faktor ist in seiner Genauigkeit lediglich abhängig von der Genauigkeit der Dolomitbestimmung nach Abschn. 2.1. oder 2.2.

Das reale Gesamtcarbonat berechnet sich demnach wie folgt:

$$\text{Gesamtcarbonat} = \text{Gesamtcarbonat (Wösthoff)} - d$$

Zur Bestimmung der Dolomitgehalte und realer Gesamtcarbonatwerte bedarf es daher der kombinierten Anwendung der HCl/AAS-Methode (Abschn. 2.2.) und der Konduktometrie mit nachfolgender Korrektur.

Die Abb. 2 veranschaulicht beispielhaft die Beziehung zwischen den korrigierten Gesamtcarbonatwerten aus der Konduktometrie mit dem Wösthoff-Gerät und denen nach der HCl/AAS-Methode für 50 dolomitreiche Lößproben von Eichstetten a. K.

²⁾ Dolomit-% bedeutet Dolomitgehalt in %.

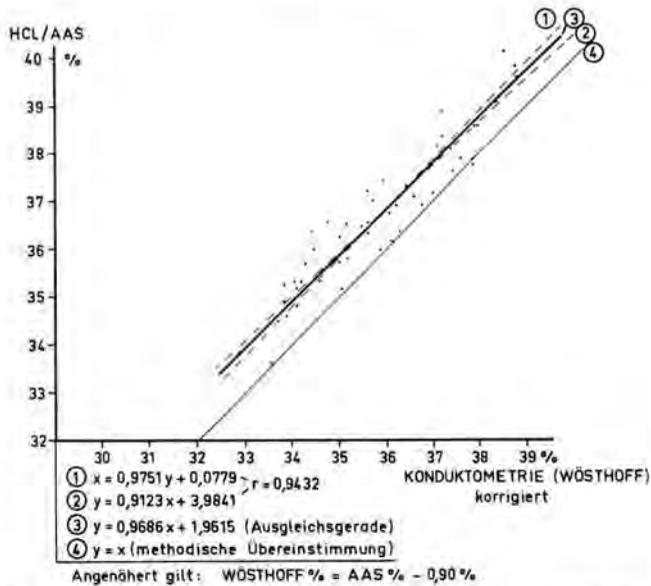


Abb. 2. Gesamtcarbonat im Methodenvergleich Eichstetten L1 + L2 (N = 50).

Wichtig für die Einschätzung beider Methoden ist der Abstand der Ausgleichsgeraden 3 von der Geraden 4 (angenommene methodische Übereinstimmung).

Die HCl/AAS-Werte liegen im Mittel um 0,90 % höher als die realen Wösthoff-Werte.

Es ist naheliegend, diesen Überschuß bei der HCl/AAS-Methode aus der Einbeziehung silikatbürtiger Erdalkalien zu interpretieren.

2.4. Methodischer Ausblick

Zu gesicherten Aussagen über die Carbonatverteilung und Carbonatfraktionierung in Lößproben gelangt man m. E. nur durch den Einsatz von mindestens zwei voneinander unabhängigen Methoden, deren Ergebnisse bzw. Aussagen sich wechselseitig zur Fehlerreduktion verwenden lassen. Die Gesamtcarbonatwerte nach Wösthoff lassen sich über die Dolomitgehalte aus der HCl/AAS-Methode präzisieren (Abb. 1) und durch Vergleich dieser korrigierten Wösthoff-Werte mit den Gesamtcarbonatgehalten aus der HCl/AAS-Methode läßt sich der Fehler abschätzen, der durch Einbeziehung von silikatbürtigen Erdalkalien in das HCl/AAS-Gesamtcarbonat eingeht (Abb. 2).

In der Abb. 3 ist zur besseren Verdeutlichung der Ausführungen der von mir gewählte Analysengang schematisch dargestellt.

Da der silikatbürtige „Gesamtcarbonatüberschuß“ bei der HCl/AAS-Methode mit 0,90 % im Mittel nur einem Dolomitüberschuß von 0,29 % entspricht und dieser Fehler bei allen Lößproben gleichsinnig auftreten dürfte, kann m. E. die Methode der Carbonatfraktionierung zur Charakterisierung und Differenzierung von Lössen gleicher oder ähnlicher Zusammensetzung herangezogen werden.

In Zukunft dürfte es völlig genügen, nach der HCl/AAS-Methode (Abschn. 2.2.) nur noch den Mg-Anteil zu bestimmen, daraus den Dolomitgehalt zu berechnen, parallel dazu den Gesamtcarbonatgehalt nach Wösthoff zu erfassen und diesen entsprechend dem Dolomitgehalt zu korrigieren.

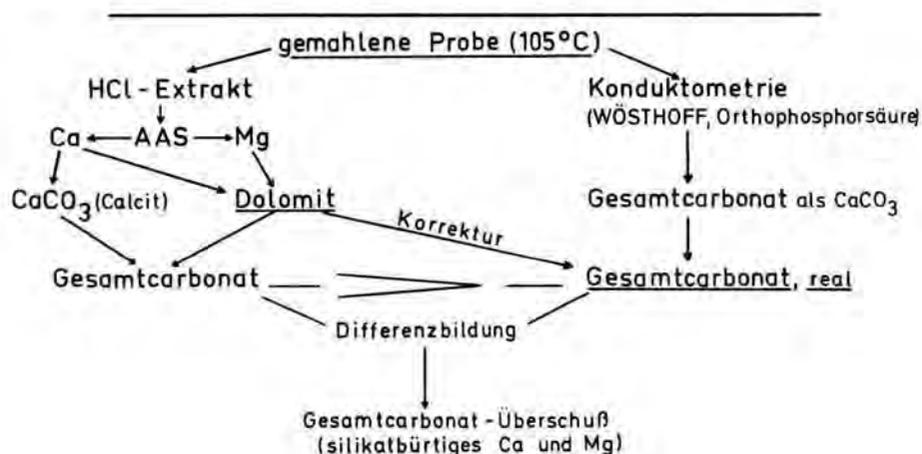


Abb. 3. Carbonatfraktionierung bei Lössen, Analysengang und Berechnungsschema.

Wenn auch gewisse Unsicherheiten im geschilderten Analysengang den Sedimentologen und Petrographen noch skeptisch stimmen, weil die Berechnung der Dolomitgehalte nach Abschn. 2.3. vielleicht als fragwürdig erscheinen mag, den Lößstratigraphen sollte dies wenig kümmern. Ihm kann es gleichgültig sein, ob eine bestimmte Lößschicht nur 12,3 % statt der bestimmten 12,5 % Dolomit enthält, wenn nur dieser Dolomitgehalt sich als relativ konstantes Merkmal über den gesamten als genetisch einheitlich angesehenen Lößkomplex erstreckt und sich deutlich vom nächsten über oder unter ihm abhebt. Damit wird der Dolomitgehalt zum Charakteristikum dieses Komplexes.

Wenn im folgenden von Gesamtcarbonat die Rede ist, dann handelt es sich ausschließlich um Daten aus der HCl/AAS-Methode nach Abschn. 2.2.1. Das gilt auch für die Proben aus Eichstetten. Die späteren Parallelbestimmungen nach Abschn. 2.2.2. und nach Wösthoff (vgl. Abb. 2) konnten nicht weiter ausgewertet werden. Es ist verständlich, daß für die lithostratigraphischen Aussagen, wie sie in Abschn. 4 getroffen werden, nur methodisch einheitlich behandelte Daten herangezogen werden konnten.

3. Die Untersuchungsobjekte

Seit 1968 wurden mehr als 300 Lößproben unterschiedlichen Alters aus insgesamt 7 Aufschlüssen des Kaiserstuhls und der Lahr-Emmendinger Vorbergzone des Schwarzwaldes (Abb. 4) auf Gesamtcarbonat- und Dolomitgehalt untersucht³⁾.

Unter ihnen befinden sich auch einige Stichproben aus C-Horizonten rezenter Löß-Parabraunerden aus der Emmendinger Vorbergzone (HÄDRICH 1966) und der Teningen Fläche in der nördlichen Freiburger Bucht (vgl. dazu Abschnitt 4.4).

Die bearbeiteten Lößprofile sind in Abb. 5 stark schematisiert dargestellt. Sie unterscheiden sich nach Anzahl und damit Alter sowie Mächtigkeit der Lössse sehr stark. Teilweise sind sie bereits aus der Literatur bekannt, so die von Bötzingen a. K. durch KHODARY-EISSA (1968) und die von Riegel a. K. — bis auf einige Abweichungen — durch GUENTHER (1961).

³⁾ Die Untersuchungen im Labor wurden ausgeführt von den techn. Assistentinnen L. HENNINGER, B. RIESER, B. RÖTTGES, K. v. RUEPPRECHT und H. SCHLENKER, denen ich an dieser Stelle herzlich danken möchte.

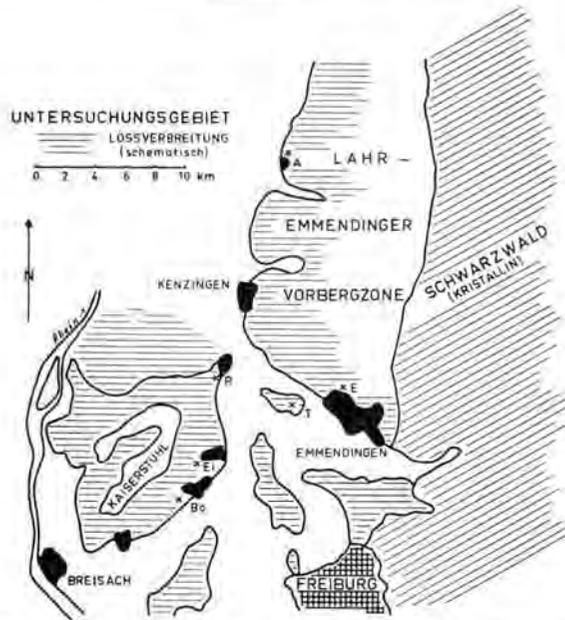


Abb. 4. Die Verbreitung des Lösses im Untersuchungsgebiet.

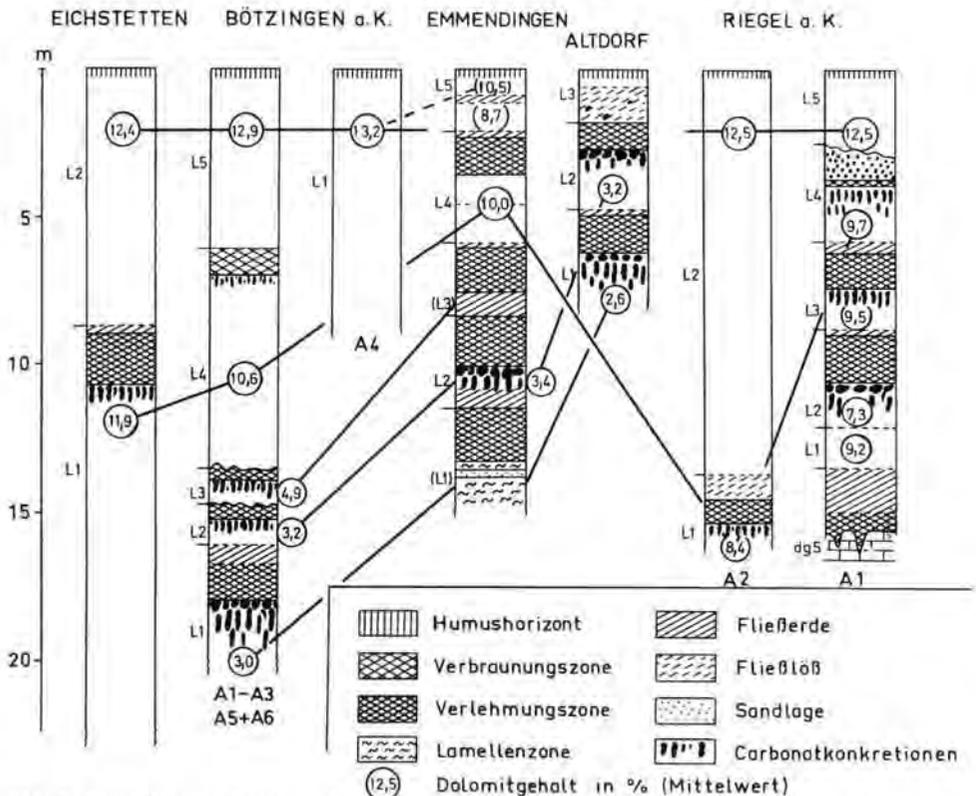


Abb. 5. Vergleichende Stratigraphie oberrheinischer Lößaufschlüsse in vereinfachter Darstellung.

Altdorf und Emmendingen wurden m. W. bisher noch nicht bearbeitet. Während in Bötzingen und Riegel die jüngeren Löss dominieren, sind Altdorf und Emmendingen durch das Vorherrschen der älteren Löss und der zwischengeschalteten mächtigen Paläoböden gekennzeichnet.

Bei Eichstetten a. K. handelte es sich um eine Bohrung, die von Mitarbeitern⁴⁾ des Lehrstuhls für Geographie und Hydrologie des Geographischen Instituts I der Universität Freiburg i. Br. im Sommer 1974 im Zusammenhang mit einem hydrologischen Projekt bis in eine Tiefe von fast 23 m niedergebracht wurde und an der ich mich beteiligen durfte.

Die Löss sind bis auf eine Ausnahme bei Bötzingen A 4 jeweils durch Paläobodenreste vom Typus der Parabraunerde mit stark entwickelten Carbonatkonkretions-Horizonten an ihrer Basis gegliedert bzw. unterlagert, sie selbst sind carbonatreich (20—40 ‰), tonarm (< 15 ‰) und extrem humusarm (i. d. R. < 0,6 ‰).

Stark durch pedogenes Material „verunreinigte“ Profilschnitte (Fließlöss oder Fließerden) wurden von der Untersuchung und Auswertung ausgenommen.

Da es — allein schon aus den in Abschn. 1 angeführten Gründen — nicht Sinn und Zweck dieser Arbeit ist, die Chronostratigraphie der oberrheinischen Löss an diesen teilweise recht komplizierten Profilen neu aufzurollen, müssen Ausführungen über stratigraphische Details entfallen.

Wenn an einer Lokalität mehrere Aufschlüsse bearbeitet wurden, dann wurden diese mit A 1 bis A n durchnummeriert. Die Proben wurden, mit Ausnahme der Bohrung Eichstetten, in Abständen von je 20 cm entnommen. Bei Eichstetten war es im Durchschnitt ein Abstand von 37 cm. Die Löss wurden in jedem Profil von unten nach oben (genetisches Prinzip) schematisch durchnummeriert und mit L 1 bis L n bezeichnet. Alle Bestimmungen wurden im Laufe der letzten Jahre bis zu viermal wiederholt. Doppelbestimmungen liegen bei allen Proben vor. Die nicht die Carbonatfraktionen betreffenden pedologischen Parameter von Lössen und Paläoböden können im Rahmen dieser Arbeit leider keine Berücksichtigung finden.

Im Rahmen eines von der UNESCO/Paris finanziell unterstützten Untersuchungsprogrammes zur Vereinheitlichung der Ansprache von pleistozänen und holozänen Sedimenten, das dankenswerterweise J. FINK/Wien initiiert und organisiert hat, sind in den letzten eineinhalb Jahren mehr als 100 Proben von Lössen und verwandten Sedimenten aus zahlreichen europäischen Ländern analysiert worden. Diese Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen; daher können die Ergebnisse der Carbonatfraktionierung an dieser Stelle noch nicht mitgeteilt werden.

4. Die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen

4.1. Das Gesamtcarbonat

Ergebnisse über Gesamtcarbonatbestimmungen — gleich, welcher methodische Weg auch beschritten wurde — liegen aus dem südlichen Ober rheingebiet in großer Zahl vor. Ich verweise hier nur auf die Arbeiten von BRONGER (1966, 1969), KHODARY-EISSA (1968) und HÄDRICH (1970). Aus allen diesen Untersuchungen geht hervor, daß ihr stratigraphischer Wert, bzw. ihre Bedeutung für eine relative Chronologie der Löss sehr gering ist (vgl. auch Abb. 10).

Die Gesamtcarbonatgehalte ergaben sich bei meinen Bestimmungen und Berechnungen zwangsläufig, und so sollen sie dem Leser nicht vorenthalten bleiben, zumal es nicht un-

⁴⁾ Den Herren G. LUFT und G. MORGENSCHWEIS möchte ich an dieser Stelle herzlich danken.

interessant ist, von den einzelnen Lössen den Anteil der Carbonatfraktionen am Gesamtcarbonat zu kennen (Tab. 2).

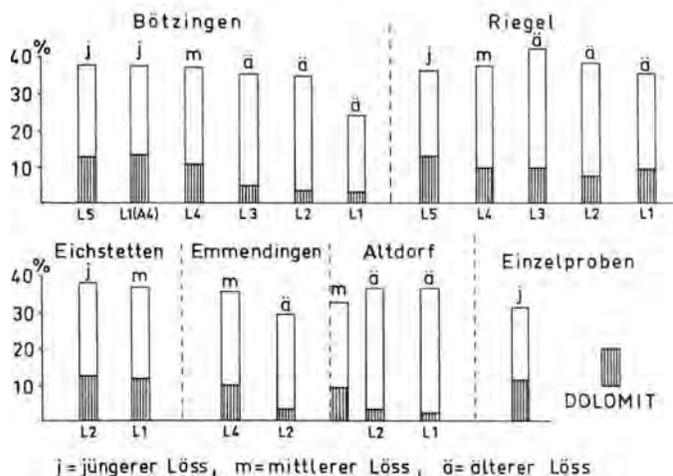


Abb. 6. Mittlere Gesamtcarbonat- und Dolomitgehalte der Lössе.

Die Abbildung 6 der mittleren Gesamtcarbonat- und Dolomitgehalte zeigt, daß das Gesamtcarbonat von Profil zu Profil und von Löss zu Löss innerhalb der Profile vergleichsweise nur geringen Schwankungen unterworfen ist. Im Mittel aller Proben liegt der Gesamtcarbonatgehalt bei den sogenannten Jüngeren Lössen bei 37,1 % (HCL/AAS), bzw. bei 36,2 % (korrigiert⁵), real) (n = 167), bei den Mittleren Lössen bei 36,9 % bzw. real bei 36,0 % (n = 83) und bei den Älteren Lössen bei 34,3 %, bzw. real bei 33,4 % (n = 51). Demnach ist eine schwache Tendenz der Abnahme des Gesamtcarbonats mit zunehmendem Alter des Lösses gegeben. Diese Tendenz wird vor allem durch die beiden Lössе L 1 von Bötzingen und L 2 von Emmendingen gesteuert. Nach dem Gesamtcarbonatgehalt ist keine Differenzierung und Parallelisierung der Aufschlüsse möglich, da sich die Unterschiede in den jeweiligen Mittelwerten nur selten statistisch sichern ließen. Ganz andere Aspekte eröffnen sich, wenn die Dolomitfraktion für eine Gliederung von Profilen herangezogen wird.

4.2. Die Dolomitfraktion

Die Dolomitgehalte zeigen über alle untersuchten Lössprofile hinweg einen charakteristischen Trend der Abnahme von oben nach unten, von jung nach alt. Diese Abnahme erfolgt nicht stetig innerhalb der Lössе, sondern sprunghaft an den Substratgrenzen, den Paläoböden. Darin wird die kausale Verknüpfung des Dolomitgehaltes mit dem Lössalter bzw. der Lössgenese deutlich (vgl. Abschn. 5.4.2.).

Zur Verdeutlichung der Homogenität der Lössе hinsichtlich ihres Dolomitgehaltes wurde in Tabelle 1 u. a. der Dolomitgehalt des Jüngeren Lösses L 2 des Aufschlusses A 2 von Riegel a. K. beispielhaft dargestellt.

⁵) Unter Zugrundelegung der durchschnittlichen Ergebnisse aus Abb. 2 (vgl. Abschn. 2.3.1.).

Tabelle 1

Dolomit- und Gesamtcarbonatgehalt beim Jüngerem Löß L 2 vom Aufschluß Riegel A 2

Tiefe cm	Gesamt- carbonat %	Dolomit %	Dolomit in % v. Ges.-Carb.	Tiefe cm	Gesamt- carbonat %	Dolomit %	Dolomit in % v. Ges.-Carb.
60— 80	34,88	12,10	34,69	800— 820	36,54	12,72	34,81
—100	36,17	12,31	34,02	— 840	36,00	11,83	32,86
—120	36,28	12,16	33,52	— 860	35,46	11,45	32,29
—140	37,00	12,21	33,00	— 880	35,29	11,47	32,50
—160	37,91	12,72	33,55	— 900	36,34	11,59	31,89
—180	38,57	11,99	31,09	— 920	36,01	11,57	32,13
—200	43,72	12,59	28,80	— 940	38,14	13,33	34,95
—220	43,34	12,97	29,93	— 960	37,27	12,25	32,87
—240	40,38	12,78	31,65	— 980	38,38	13,75	35,83
—260	40,49	13,45	33,22	—1000	39,14	13,88	35,46
—280	40,20	12,65	31,47	—1020	38,33	13,10	34,18
—300	37,99	12,61	33,19	—1040	37,75	13,73	36,37
—320	37,31	12,52	33,56	—1060	38,85	14,07	36,22
—340	37,78	13,26	35,10	—1080	37,86	13,43	35,47
—360	35,05	11,89	33,92	—1100	37,52	12,42	33,10
—380	34,94	11,42	32,68	—1120	34,88	11,83	33,92
—400	36,76	13,29	36,15	—1140	35,69	11,81	33,09
—420	37,88	13,46	35,53	—1160	34,03	11,61	34,12
—440	37,55	13,29	35,39	—1180	34,23	11,54	33,71
—460	38,71	14,85	38,36	—1200	33,31	11,58	34,76
—480	37,25	12,65	33,96	—1220	32,91	11,61	35,28
—500	37,03	13,10	35,38	—1240	33,14	11,57	34,91
—520	37,43	13,16	35,16	—1260	32,81	10,86	33,10
—540	35,72	11,95	33,45	—1280	34,36	12,71	36,99
—560	36,44	13,07	35,87	—1300	34,51	12,48	36,16
—580	35,25	12,00	34,04	—1320	36,58	13,46	36,80
—600	36,20	11,83	32,68	—1340	35,63	12,21	34,27
—620	37,20	13,46	36,18	—1360	36,05	13,56	37,61
—640	35,78	11,61	32,45	—1380	35,80	13,67	38,18
—660	35,71	12,40	34,72	—1400	35,93	13,77	38,32
—680	35,82	12,80	35,73	—1420	35,41	13,10	37,00
—700	35,24	12,13	43,42	—1440	35,72	12,42	34,77
—720	34,89	10,75	30,81	—1460	41,64	12,14	29,15
—740	34,53	10,34	29,95				
—760	35,41	10,79	30,47				
—780	36,06	12,59	34,91				
—800	36,41	11,74	32,24				

Alle Werte entstammen der AAS-Messung nach Abschnitt 2.2.1.

Besonders klar zeigt sich der o. g. Trend des sprunghaften Verhaltens von Löß zu Löß an den Aufschlüssen von Bötzingen a. K. Hier nimmt der Dolomitgehalt von ca. 13 % in den Jüngerem Lössen über 10,6 % bei den Mittleren auf 3,0 % bei den Älteren ab.

Dieses Verteilungsmuster findet sich in etwa bei allen Aufschlüssen wieder. Die Begriffe „Jünger“, „Mittel“ und „Älter“ sind nicht unbedingt identisch mit den Begriffen Jung-, Mittel- und Altpleistozän, sie orientieren sich neben der stratigraphischen Position vor allem an den Lößeigenschaften und hier besonders am Dolomitgehalt. Die Jüngerem Lössen sind in den vollständigen Aufschlüssen jeweils zuoberst gelegen und weisen den höchsten Dolomitgehalt auf. Es handelt sich immer nur um ein Lößpaket. Dieses ist durch den ersten markanten fossilen Boden vom Mittlerem Löß getrennt, der in seinen Eigenschaften noch sehr dem Jüngerem ähnelt, im Dolomitgehalt und in der stratigraphischen Position aber an zweiter Stelle steht. Darunter beginnt — wiederum durch einen kräftigen Paläoboden getrennt und in sich durch Paläoböden gegliedert — eine Folge von Älteren Lössen, die verhältnismäßig einheitlich sind, sich aber i. d. R. sehr deutlich — vor allem im Dolomitgehalt — vom hangenden Mittlerem Löß abheben.

Um eine verbindliche Aussage über die Homogenität der einzelnen Lößkomplexe bzw. deren Unterscheidbarkeit treffen zu können, muß die Statistik bemüht werden⁶⁾. Die zentrale Frage war: Sind die Unterschiede in den Mittelwerten zwischen den einzelnen Lößkomplexen statistisch zu sichern?

4.3. Statistische Berechnungen

4.3.1. Statistik der Dolomitfraktion

Anhand der Übersicht über die statistischen Maßzahlen (Tab. 2) sollen die einzelnen Lössen noch etwas näher vorgestellt werden. Die Lössen wurden hier nach ihrem Alter geordnet.

Tabelle 2
Übersicht über die statistischen Maßzahlen für die untersuchten Lössen.

	Ort	Aufschl.	Löß	n	Dolomit %			Dolomit in % vom Gesamtcarbonat		
					\bar{x}	Sx	v %	\bar{x}	Sx	v %
Jüngere Lössen (Wurm)	Bötzingen	A ₁	L5	26	12,90	±1,3990	10,78	33,88	±2,8800	8,50
	Bötzingen	A ₄	L1	35	13,08	±0,9934	7,59	34,88	±1,5293	4,38
	Eichstetten	--	L2	21	12,43	±1,5799	12,71	32,54	±2,7162	8,35
	Riegel	A ₁ A ₂	L5	79	12,48	±0,8500	6,81	34,14	±2,0300	5,95
	EVBZ *)	--	--	4	10,89	±1,5105	13,78	35,64	±6,3400	17,79
	Ten.Allmend	--	--	1	11,59	--	--	34,24	--	--
zusammen				166	12,64	±1,1228	8,36	34,18	±2,3491	6,87
Mittlere Lössen (Riss)	Bötzingen	A ₁	L4	34	10,73	±0,8819	8,21	28,85	±1,9004	6,59
	Eichstetten	--	L1	31	11,88	±0,9119	7,68	31,96	±2,1028	6,58
	Riegel	A ₁ A ₂	L4	13	9,74	±0,7700	7,91	26,49	±4,1200	15,55
	Altdorf	--	L3+4	3	9,24	±0,8656	9,37	28,47	±1,4543	5,11
	Emmendingen	--	L4	4	10,00	±0,7415	7,42	27,29	±2,5600	9,38
zusammen				85	10,91	±1,1981	10,98	29,54	±3,1282	10,59
Ältere Lössen	Bötzingen	A ₅	L3	1	4,97	--	--	14,09	--	--
	Bötzingen	A ₂ A ₅	L2	5	3,18	±0,3015	9,48	9,39	±2,2100	23,54
	Bötzingen	A ₃	L1	11	3,03	±0,4782	15,78	12,82	±2,9700	23,17
	Riegel	A ₁	L3	7	9,54	±0,7100	7,44	22,70	±2,0300	8,94
	Riegel	A ₁	L2	6	7,28	±0,9900	13,60	18,70	±1,9500	10,43
	Riegel	A ₁	L1	9	9,15	±1,0600	11,58	25,77	±2,9400	11,41
	Emmendingen	--	L2	2	3,44	--	--	11,55	--	--
	Altdorf	--	L2	4	3,21	±0,4400	13,71	8,75	±0,8900	10,17
	Altdorf	--	L1	6	2,61	±0,1700	6,51	7,28	±1,1000	15,11
zusammen				51	5,53	±2,9892	54,05	15,82	±7,6700	48,48

*) Einzelproben aus der Emmendinger Vorbergzone

Maßgebend für diese Gliederung waren der Dolomitgehalt und die stratigraphische Position in den einzelnen Aufschlüssen. Durch Vergleich der Daten über Mittelwert (\bar{x}), Streuung (Sx) und Variationskoeffizient (v%) innerhalb der senkrechten Spalten können Gemeinsamkeiten und Unterschiede auf einen Blick erfaßt werden.

Auffallend ist die besonders große Homogenität der Daten für die Jüngeren Lössen, die sich in der geringen Streuung und im niedrigen Variationskoeffizienten ausdrückt, was besonders für die statistische Zusammenfassung aller jüngeren Lössen gilt.

6) Für zahlreiche wertvolle Anregungen bei der statistischen Auswertung des Datenmaterials danke ich Herrn Dipl.-Forstwirt K. KEILEN.

Die Mittleren Lössе zeigen zwar im einzelnen sehr geringe Streuungsbeträge und Variationskoeffizienten. Diese Werte steigen aber bei statistischer Zusammenfassung beträchtlich. Dies gibt einen Hinweis auf die vergleichsweise größeren stofflichen Unterschiede innerhalb des Gesamtkollektivs der Mittleren Lössе.

Die relativ hohen Streuungswerte und Variationskoeffizienten der Älteren Lössе, insbesondere bei deren statistischer Zusammenfassung, wird hauptsächlich durch die Riegeler Lössе L1—L3 verursacht. Hierin zeigt sich deutlich die vorerst nicht zu klärende Sonderstellung dieser drei Lössе. Sie hätten nach den Ergebnissen der Carbonatfraktionierung eigentlich eher zu den Mittleren als zu den Älteren Lössen gestellt werden müssen. Dem stand allerdings ihre stratigraphische Position entgegen. Erst bei der Untersuchung eines noch größeren Stichprobenumfangs aus den Mittleren und Älteren Lössen wird man die Stellung der Riegeler Lössе L1—L3 vielleicht klären bzw. feststellen können, ob nicht die Älteren Lössе in sich noch weiter differenziert werden müssen. Das Verhalten dieser Älteren Riegeler Lössе zeigt sich auch in den Abbildungen 7—10. Abb. 7 bringt die Häufigkeitsverteilungen der Dolomitgehalte für die drei Lößaltersgruppen. Eindrucksvoll erscheint der Trend der Dolomitabnahme mit zunehmendem Lößalter.

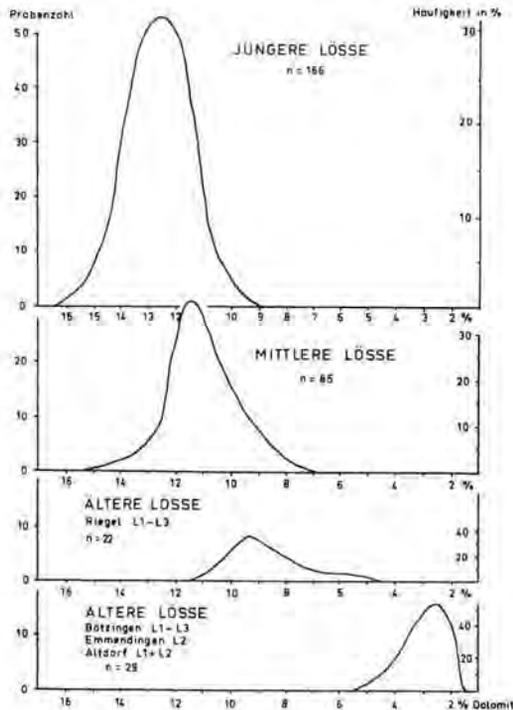


Abb. 7. Häufigkeitsverteilung des Dolomitgehaltes für die Lössе.

Um nun aber festzustellen, inwieweit sich die Lössе statistisch gegeneinander abgrenzen lassen, wurden die Unterschiede in den Mittelwerten zunächst für die Lössе innerhalb der Aufschlüsse einem t-Test unterzogen (Tab. 3). Wir erkennen, daß sich die Mittelwerte innerhalb der Aufschlüsse i.d.R. signifikant unterscheiden. Theoretisch sollte Nichtsignifikanz bei gleichaltrigen, Signifikanz bei verschiedenaltrigen Lössen herrschen. Aus Tab. 3 ist jedoch nicht so ohne weiteres zu entnehmen, ob die nichtsignifikanten Beziehungen in jedem Fall gleichaltrige Lössе betrifft.

Tabelle 3
Vergleich der Mittelwerte aller Lössе im Signifikanztest (gegliedert nach Aufschlüssen).

		DOLOMITGEHALTE											
		BÖTZINGEN				RIEGEL				EICH- STETTEN	EMMEN- DINGEN	ALT D O R F	
		A1 L4	A2/5 L2	A3 L1	A4 L1	A1/2 L4/1	A1 L3	A1 L2	A1 L1	L1	L2	L2	L1
BÖTZINGEN	L 5	2,26***	9,72***	9,87***	0,31 n.s.								
	L 4	-----	7,46***	7,61***	2,57***								
	L 2	-----	-----	0,15 n.s.	10,03**								
	L 1	-----	-----	-----	10,18**								
RIEGEL	L5/2					2,74***	2,94***	5,20***	3,33***				
	L4/1					-----	0,20 n.s.	2,46***	0,59*				
	L 3					-----	-----	2,26***	0,39 n.s.				
	L 2					-----	-----	-----	1,87***				
EICH- STETTEN	L 2									0,55 n.s.			
	L 4										6,56**		
EMMEN- DINGEN	L3/4											6,03***	6,63***
	L 2											-----	0,83 n.s.

n.s. = nicht signifikant; * = 5% , ** = 1% und *** = 0,1% Irrtumswahrscheinlichkeit

Um diesen Sachverhalt noch klarer zu demonstrieren, wurden die Lössе in Abb. 8 nicht mehr nach Aufschlüssen, sondern nach Altersgruppen geordnet. Schwarz ausgefüllte Kreise (Nichtsignifikanz) erkennen wir beim Vergleich aller jüngeren Lössе untereinander. Daraus wird ersichtlich, daß diese nicht nur gleichaltrig, sondern stofflich besonders homogen aufgebaut sind. Die jüngeren Lössе unterscheiden sich bis auf die Ausnahme bei Eichstetten L1/L2 von den Mittleren und Älteren Lössen signifikant; sie gehören zeitlich und stofflich nicht zusammen.

Beim Vergleich der Mittleren und Älteren Lössе untereinander findet man weniger häufig die theoretisch zu erwartende Nichtsignifikanz. M. E. liegt das nicht so sehr an der stärkeren stofflichen Differenzierung des untersuchten Materials. Der Streuraum innerhalb der Mittleren und Älteren Lössе ist einfach größer. Natürlich könnte das „Signifikanzbild“ noch geändert werden, wenn die Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner gewählt würde. Dies ist jedoch bei geowissenschaftlichen Untersuchungen nicht üblich. Störend in dem Bild (Abb. 8) wirken nicht so sehr die signifikanten Unterschiede zwischen gleichaltrigen Lössen (offene Sechsecke) als vielmehr die vier Fälle nichtsignifikanter Beziehungen unterschiedlich alter Lössе (Eichstetten L1/L2 und Riegel L1—L3). Wie bereits für Riegel erwähnt, kann dieses Verhalten noch nicht geklärt werden.

4.3.2. Beziehungen zwischen Dolomit- und Gesamtcarbonatgehalt

Aufgrund der unterschiedlichen Löslichkeit von Calcit und Dolomit war nicht zu erwarten, daß sich das ursprüngliche, d. h. genetisch vorgegebene Dolomit-Gesamtcarbonat-Verhältnis bis heute bewahrt hat. Syn- und postgenetische Carbonatlösungen und -Verlagerungen, z. T. im Zuge der Pedogenese der Paläoböden, mögen das ursprüngliche

		Jüngere Löss				DOLOMITGEHALTE Mittlere Löss					Ältere Löss							
		Bo A1 L3	Bo A4 L1	E1 L2	R A1A2 L5L2	Bo A1 L4	E1 L1	R A1A2 L4L1	A L3/4	Em L4	Bo A2A5 L2	Bo A3 L1	R A1 L3	R A1 L2	R A1 L1	A L2	A L1	Em L2
Jüngere Löss	Bo L5		●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Bo L1			●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	E1 L2				●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	R L5L2					○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Mittlere Löss	Bo L4						○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○
	E1 L1							○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	R L4L1								●	●	○	○	●	○	○	○	○	○
	A L3/4									●	○	○	●	○	○	○	○	○
	Em L4										○	○	●	○	○	○	○	○
Ältere Löss	Bo L2										●	○	○	○	○	○	●	●
	Bo L1											○	○	○	○	●	○	●
	R L3												○	●	○	○	○	○
	R L2													○	○	○	○	○
	R L1														○	○	○	○
	A L2															○	○	●
A L1																	●	

○ Differenz der Mittelwerte hochsignifikant (Irrtumswahrscheinlichkeit 5%) ● Differenz der Mittelwerte nicht signifikant

Abb. 8. Vergleich der Mittelwerte aller Löss im Signifikanztest (gegliedert nach Altersgruppen).

Verteilungsmuster verändert haben. Um festzustellen, ob die Dolomitabnahme mit zunehmendem Alter der Löss auch mit einer Abnahme der Gesamtcarbonatgehalte einhergeht oder nicht, wurde für jede einzelne Probe der Anteil von Dolomit in % vom Gesamtcarbonat berechnet. Diese „Relativ-Prozente“ wurden für jeden Löß gemittelt, die Streuung und die Variationskoeffizienten berechnet. Die entsprechenden Daten sind in Tab. 2 rechts dargestellt. Wir erkennen, daß diese Relativ-Prozente mit zunehmendem Alter der Löss von ca. 34, über 29 auf 15 % abnehmen und sich daher ähnlich wie die Dolomitgehalte verhalten. Dieser Trend kommt auch deutlich in der Häufigkeitsverteilung der Relativ-Prozente zum Ausdruck (Abb. 9).

Der diagnostische Wert dieser Daten für eine Differenzierung der Löss ist sicher nicht größer als der der Dolomitdaten in Tab. 2, weswegen nicht weiter damit argumentiert werden soll. Es ist jedoch nicht zu leugnen, daß diese Relativ-Prozente ein wichtiges Kriterium für das Ausmaß sekundärer Carbonatausscheidung in den Lössen ist; denn die Abnahme der Dolomitgehalte mit zunehmendem Lößalter machen die Gesamtcarbonatgehalte aufgrund der sekundären Calcitfällung ja bekanntlich nicht im selben Maße mit, so daß die Relativ-Prozente mit zunehmendem Lößalter deutlich sinken müssen (vgl. auch Abschnitt 5.).

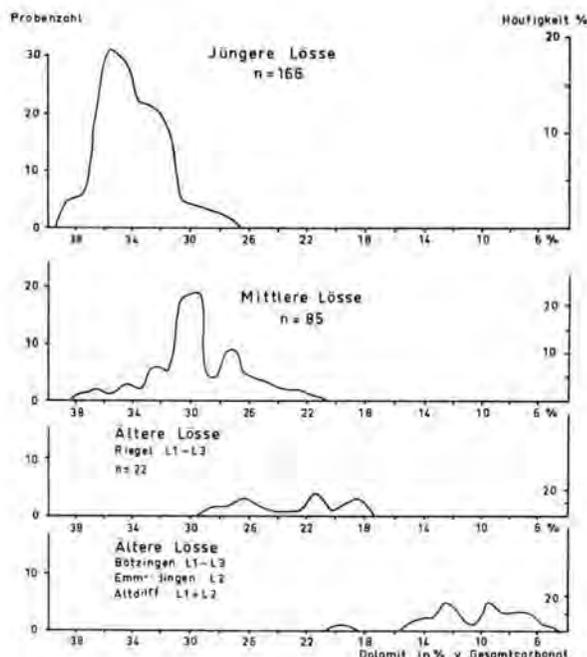


Abb. 9. Häufigkeitsverteilung, Dolomit in % vom Gesamtcarbonat, für die Löss.

4.4. Die Dolomitgehalte von Einzelproben

In Abbildung 6 und Tabelle 2 sind auch Ergebnisse von Einzelproben aufgeführt. Es handelt sich hierbei um Lößproben, die unmittelbar unterhalb der Verlehmungsfront rezenter Parabraunerden aus der Emmendinger Vorbergzone (HÄDRICH 1966) und der Teninger Fläche (FRESLE 1969) entnommen waren.

Die Dolomitgehalte der vier Einzelproben aus der Emmendinger Vorbergzone liegen im Mittel bei nur 10,9 %. Damit ist es unsicher, ob es sich hierbei um Jüngeren oder Mittleren Löß handelt. Berücksichtigt man aber die Relativ-Prozente (Tab. 2 rechts), dann wird ersichtlich, daß der Dolomitgehalt 35,6 % des Gesamtcarbonats ausmacht — ein Hinweis dafür, daß es sich doch um Jüngeren Löß handeln muß. Der Gesamtcarbonatgehalt ist unmittelbar unterhalb der Verlehmungsfront durch Lösungsverwitterung wohl z. T. schon vermindert, während der Dolomitgehalt noch relativ hoch geblieben ist.

Besonders interessant ist die Probe von der Teninger Fläche, einem um wenige Meter das holozäne Auenniveau der nördlichen Freiburger Bucht überragenden höheren und damit relativ früh trockengefallenen Rest der Niederterrasse. Hier lagert auf einer Fläche von 3,24 km² jüngster, spätglazialer Löß bis zu einer Mächtigkeit von 6,25 m (nach FRESLE 1969), von mehr als 7,0 m nach Aussagen eines ortsansässigen Landwirtes. Die einzige bisher von mir untersuchte Probe aus einer Position unmittelbar unterhalb der dort bis zu einer Tiefe von 90 cm entwickelten Parabraunerde erbrachte einen Dolomitgehalt von 11,6 % bei einem Gesamtcarbonatgehalt von 33,9 %. Das Relativ-Prozent liegt hier bei 34,2 %. Nicht nur die Höhe dieser Werte, sondern vor allem die topographische Position auf höherem Niederterrassenniveau sprechen eindeutig für würmzeitlichen und damit Jüngeren Löß. MÜNZING (1973) stuft diesen Löß ins Jungwürm ein, im

Sinne von WOLDSTEDT (1962). Solche Lössvorkommen auf Niederterrasse gibt es in der Freiburger Bucht und im Umkreis des Kaiserstuhls noch einige mehr (SCHREINER 1958). Bei allen diesen kleinen Lössvorkommen handelt es sich um den einzigen, mir bisher bekannten Fall, daß ein Löss aufgrund seiner Position auf einer Pleistozänterrasse im südlichen Oberrheingebiet überhaupt zeitlich fixiert werden kann.

4.5. Zur Anwendbarkeit der Methode der Carbonatfraktionierung bei der Lössparallelisierung

Das Hauptanliegen solcher Untersuchungen zur Carbonatfraktionierung ist, altersspezifische Kriterien zu finden, damit Löss, deren stratigraphische Position nicht zweifelsfrei ist, einander zugeordnet werden können. Wie wir im Falle der Einzelproben gesehen haben, konnten die betreffenden Löss über ihren charakteristischen Dolomitgehalt bzw. durch ihre Relativ-Prozente einwandfrei den jüngeren Lössen der untersuchten Aufschlüsse zeitlich zugeordnet werden.

Ich möchte hier ein weiteres Beispiel anführen, wie die Methode der Carbonatfraktionierung helfen kann, profilmorphologisch unabhängig erscheinende Straten als lithologisch und damit auch chronologisch zusammengehörig zu erkennen:

Im Aufschluß 1 von Riegel a. K. trägt der oberste Paläobodenrest vom Typ einer Parabraunerde nicht direkt jüngeren Löss, sondern es schaltet sich ein etwa 110 cm mächtiger Geröllhorizont ein. Dieser Geröllhorizont besteht aus aufgearbeiteten Lösskindeln, die etwa 60—70 % der Masse ausmachen und in Löss eingebettet sind (Abb. 10).

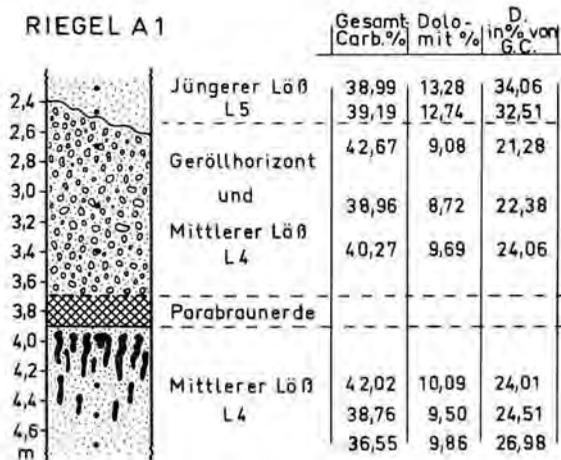


Abb. 10. Beispiel für die Zuordnung von Lössen mit Hilfe der Carbonatfraktionierung.

Profilmorphologisch war nicht sicher zu entscheiden, ob der zwischen die Gerölle eingelagerte Löss genetisch zum jüngeren Löss im Hangenden (L 5) oder zum Mittleren Löss im Liegenden (L 4) des Paläobodenrestes gehört. Die Dolomitgehaltsbestimmung und die Berechnung der Dolomitgehalte in Prozent vom Gesamtcarbonat konnten einwandfrei klären, daß der Löss zum Mittleren Löss (L 4) dieses Aufschlusses gehört. Löss und Kindelgerölle stammen aus höherer Hangposition, wo der offensichtlich rißwürmzeitliche Paläoboden völlig abgetragen zu sein scheint und sogar ein Teil des liegenden Kindelhorizontes mit weggeräumt wurde.

5. Die Deutung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Carbonatfraktionierung, wie sie in Abschn. 4 dargestellt wurden, bedürfen m. E. einer Erklärung. Es ist die Frage zu stellen, ob die charakteristische Tiefenfunktion der Dolomitgehalte lößgenetisch vorgegeben war oder postgenetischen Veränderungen im Carbonatregime zu verdanken ist.

Betrachten wir zunächst die Tiefenfunktion des Gesamtcarbonats und sehen diese im Lichte der morphologisch überall in den Profilen — besonders deutlich aber in den Mittleren und Älteren Lössen — zu erkennenden sekundären Calcitfällungen in Form von Pseudomycelien, Bieloglaski und Lößkindeln, dann muß das Gesamtcarbonat postgenetisch entsprechenden Veränderungen unterworfen gewesen sein, deren Richtung und Größenordnung heute allerdings kaum mehr feststellbar sind, weil sie in den Analysendaten kaum aufscheinen.

Diese Veränderungen bestanden beim Jüngeren Löß offensichtlich nur in einer lokal begrenzten Umlösung der Carbonate und einer Calcitfällung, nicht aber in starken Hydrogencarbonat-Infiltrationen aus den Hangendpartien. Dieses Bild steht mit der Tatsache in Einklang, daß die Jüngeren Lössen der untersuchten Profile ausnahmslos Pararendzinen mit noch relativ hohen Carbonatgehalten bis zur Oberfläche tragen.

Da nun im Jüngeren Löß Anzeichen stärkerer Carbonatfällungen zurücktreten — Lößkindel gibt es nur wenige, und diese sind meist von geringer Größe sowie vereinzelt ziemlich regellos im Jüngeren Löß verteilt — muß daraus gefolgert werden, daß die holozänen Böden nie den Entwicklungsgrad der warmzeitlichen Pleistozänböden erreichten (Entkalkung, Verwitterung, Tonbildung, Entwicklungstiefe), wenn sie sich auch unter ungestörten Verhältnissen über das Pararendzinastadium hinaus entwickelt haben mögen (HÄDRICH 1966, BRONGER 1969).

Die Mittleren und die Älteren Lössen haben in den Warmzeiten des Pleistozäns eine länger andauernde und intensivere Pedogenese über sich ergehen lassen müssen, während der sich jeweils mächtige, carbonatfreie Paläoböden entwickelten. Im Zuge dieser Pedogenese wurden die jeweils liegenden Lössen in starkem Maße mit Calcit angereichert.

Wie erklären sich aber nun die Tiefenfunktionen der Dolomitgehalte? Wir halten an dieser Stelle noch einmal fest: Die Dolomitgehalte zeigen innerhalb der Lößpakete keine tendenzmäßige Veränderung in der Tiefenfunktion; diese erfolgt vielmehr beim Übergang zum nächstälteren bzw. nächstjüngeren Löß sprunghaft, so daß ein Treppenprofil der Tiefenfunktion vorliegt.

Aus der Kenntnis der Dolomitgenese heraus dürfen wir wohl davon ausgehen, daß der in den obersten Lößabschnitten im Zuge der Pedogenese gelöste Dolomit abwärts nicht wieder als solcher ausgefällt wird. In tieferen Profilschnitten vorhandener Dolomit kann daher mengenmäßig entweder nur erhalten oder vermindert worden sein, entweder relativ, durch Zufuhr von Calcit oder absolut, durch bevorzugte Dolomitlösung.

5.1. Zur relativen Verminderung des Dolomitgehaltes

Das Argument der relativen Verminderung des Dolomitanteiles durch Calcitzufuhr aus dem Hangenden entfällt als alleinige Erklärung für die heutigen Verhältnisse, wenn man davon ausgeht, daß am Dolomit selbst seit der Lößablagerung keine Verwitterung stattgefunden hat, da die Calcitzufuhr niemals das Ausmaß erreichte, um die Tiefenfunktionen des Dolomitgehaltes zu erklären.

5.2. Zur absoluten Verminderung des Dolomitgehaltes

Im Falle einer absoluten Verminderung des Dolomitgehaltes müßte es zu einer postgenetischen bevorzugten Dolomitverwitterung gekommen sein. Es gibt sicher mehrere Argumente und Erkenntnisse dafür, daß eine postgenetische spezifische Dolomitverwitterung ausscheidet. Ich möchte im folgenden nur auf Ergebnisse von FEZER (1969) und auf einen eigenen Modellversuch zur Carbonatlösung eingehen.

5.2.1. Zur „Tiefenverwitterung“ des Lösses

FEZER (1969) hat in Schotterprofilen im Alpenvorland eine sog. Tiefenverwitterung festgestellt, die er vor allem an der Zermürbung der Dolomitgerölle zu „Dolomitasche“ erkannte und an der er u. a. auch die Dauer der pleistozänen Warmzeiten abzuschätzen versuchte. Die Zermürbung schritt deutlich der Lösungsfront aller Carbonate voraus.

Es könnte nun jemand auf den Gedanken kommen, im Löß seien postgenetisch ähnliche Vorgänge abgelaufen. M. E. ist aber ein Vergleich mit den Ergebnissen FEZERS für den Löß nicht zulässig. FEZER erklärt seine Dolomitverwitterung aus der besonderen Wasserbewegung im Schotter, aus der Porosität der Dolomitgerölle, bei denen er bis zu 14 % Gesamtporenvolumen feststellte und aus der selektiven Lösung geringer Mengen der CaCO_3 -Komponente in den Dolomitgeröllen, wonach die Dolomitstruktur rasch zusammenbräche. Darüber, was danach mit der Dolomitasche passiert, sagt FEZER m. W. nichts aus.

Im Löß haben wir es im Gegensatz zu Geröllen überwiegend mit Einzelmineralen zu tun, bei denen man von der Zermürbung der Struktur und von Porosität nicht mehr sprechen kann. Auch die Wasserbewegung im Löß ist eine völlig andere als im Schotter. Nach vorläufigen Ergebnissen aus noch unveröffentlichten hydrologischen Untersuchungen des Geographischen Instituts I der Universität Freiburg i. Br. 7) im Löß des Ostkaiserstuhls ist bei Löß eine mittlere Sickergeschwindigkeit von 1 m/Jahr anzunehmen. Bei solch geringer Geschwindigkeit muß sich die Bodenlösung schon beim Durchlaufen der obersten Dezimeter des Lösses im Wechselspiel eines sich dort ständig verändernden CO_2 -Partialdruckes bis zu einem Gleichgewicht mit Hydrogencarbonat sättigen, so daß in größeren Profiltiefen, die immerfeucht, gleichmäßig temperiert und ohne nennenswerte Durchwurzelung sind, aufgrund konstanten CO_2 -Partialdruckes keine weitere Lösungsaktivität mehr denkbar ist.

Eine selektive Dolomitlösung aufgrund leicht höherer Löslichkeit von Dolomit bei niedrigem CO_2 -Partialdruck gegenüber Calcit, wie sie FEZER für die Schotter annahm, dürfte im Löß kaum zu dieser Dolomitverteilung geführt haben, sonst hätte sich das analytisch aus der Tiefenfunktion des Dolomits ablesen lassen müssen.

Eine bevorzugte Dolomitverwitterung müßte in höheren Profiltteilen eingesetzt haben, so daß die Dolomitgehalte in einem Lößpaket heute von oben nach unten zunehmen müßten. Es ist aber nichts dergleichen festzustellen.

5.2.2. Modellversuch zur Carbonatlösung

Um zu klären, ob durch perkolierendes Sickerwasser im Löß eine spezifische Dolomitlösung im Sinne einer absoluten Dolomitverminderung erfolgt, habe ich in der Zeit vom 7. 3. bis zum 7. 5. 1975 im Labor einen Carbonatlösungsversuch durchgeführt.

Zu diesem Zwecke wurde dolomitreiches Lößmaterial aus der Tiefe 6,9–7,1 m des Aufschlusses A 4 von Bötzingen (Jüngerer Löß) in Säulen von 6 cm Innendurchmesser eingefüllt und durch leichtes Einstampfen auf ca. 40 cm Füllhöhe gebracht. Die Lößfüllung war jeweils oben und unten

7) Freundliche mündliche Mitteilung der Herren G. LUFT und G. MORGENSCHWEIS.

durch eine ca. 2 cm dicke Quarzsandschicht abgeschlossen. Die Säulen besaßen einen Boden aus Glasfrittenmaterial und wurden so auf Nutschen mit Saugflasche montiert, daß jederzeit ein geringer Unterdruck von etwa 300—500 cm WS angelegt werden konnte. Der Versuch wurde in einfacher Wiederholung durchgeführt.

Zunächst wurde der Löß über einen Zeitraum von ca. 24 Stunden völlig gesättigt, dann wurde ein Unterdruck von etwa 400 cm WS angelegt, um überschüssiges Wasser zu entfernen und um die Funktionsfähigkeit der Anlage zu prüfen. Danach wurden die beiden Säulen im Abstand von 1—25 Tagen — die Verweilzeit wurde absichtlich variiert — mit je 50 ml aqua dest. perkoliert, das zuvor bei + 5 bis + 6°C im Kühlschrank aufbewahrt und danach ca. 1 Stunde lang unter weiterer Kühlung mit CO₂ angereichert worden war. Das frisch aufgegebene Perkolationswasser besaß eine Temperatur von + 6 bis + 9°C. Nach etwa 3—4 Stunden war unter dem Einfluß des angelegten und halbstündlich kontrollierten Unterdruckes gewöhnlich die Perkolationswasser zum Stillstand gekommen. Das gewonnene Filtrat wurde mit 20 ml 10%iger HCl aufgenommen, in Polyäthylenflaschen überführt und bis zur Messung im Kühlschrank aufbewahrt. Im Labor herrschten zu keiner Zeit höhere Temperaturen als 15°C, so daß für eine Carbonatlösung relativ optimale Bedingungen vorlagen. Nach Abschluß des Versuches kamen die Proben zur Messung im AAS, wobei die Konzentration von Ca und Mg festgestellt wurde. Für jede Probe wurde das Konzentrationsverhältnis Ca zu Mg gebildet und die Verhältnisse gemittelt.

Das Ergebnis des Carbonatlösungsversuchs ist in Tabelle 4 dargestellt. Das Ca : Mg-Verhältnis belief sich im Mittel der 15 Perkolationen auf 8,3315.

Vergleichsweise betrug das Mittel (\bar{x}_5) der Verhältnisse für die beiden Kationen bei 5 untersuchten Proben aus der Tiefe 6,7—7,3 m des Aufschlusses A 4 von Bötzingen bei vollständiger Carbonatlösung (HCl/AAS-Methode) 7,2060, das entsprechende Mittel (\bar{x}_{162}) für alle untersuchten jüngeren Löss 7,5746.

Wenn also Calcit und Dolomit im Verhältnis ihrer Gehalte im Löß gelöst worden wären, hätte der Säulenversuch ein Verhältnis bringen müssen, das dem der HCl/AAS-Messung für den gleichen Löß entspräche, also 7.2. Wenn Dolomit bevorzugt gelöst worden wäre, dann hätte das Verhältnis noch kleiner sein müssen, also <7,0. Das gefundene Verhältnis von im Mittel 8,3315 bestätigte voll die Vermutung, daß im Löß eine bevorzugte Dolomidlösung nicht erfolgt. Wenn dies schon in den nur knapp 40 cm hohen Lößsäulen nicht der Fall ist, wo das Perkolationswasser aufgrund des hohen CO₂-Partialdruckes eine stark carbonatlösende Kraft besitzt, wieviel weniger kann das in Natur in größerer Lößtiefe passieren!

Tabelle 4

Ergebnisse eines Modellversuches zur Carbonatlösung unter Laborbedingungen

Datum	Säule	Ca γ/ml	Mg γ/ml	Ca/Mg
11. 3.	II	2,55	0,391	6,5217
18. 3.	II	1,27	0,214	5,9345
24. 3.	I	0,76	0,092	8,2609
	II	0,46	0,054	8,5185
18. 4.	I	1,60	0,170	9,4118
21. 4.	I	0,29	0,028	10,3571
	II	0,33	0,032	10,3125
22. 4.	I	0,65	0,071	9,1549
	II	0,39	0,043	9,0698
23. 4.	I	0,47	0,056	8,3929
	II	0,39	0,043	9,0698
6. 5.	I	1,89	0,250	7,5600
	II	1,63	0,214	7,6168
7. 5.	I	2,53	0,348	7,2701
	II	2,73	0,363	7,5207

\bar{x}_{15}	8,3315
\bar{x}_5	7,2060 (HCl/AAS-Methode)
\bar{x}_{162}	7,5746 (HCl/AAS-Methode)

5.3. Zur Möglichkeit der Kombination von absoluter Verminderung des Gesamtcarbonatgehaltes und nachfolgender relativer Verminderung des Dolomitgehaltes

Wie aus Abschnitt 5.2.2. ersichtlich, halte ich eine absolute Verminderung des Dolomitgehaltes durch selektive Dolomitlösung für unwahrscheinlich. Es wäre aber zumindest theoretisch denkbar, daß der Löss postgenetisch, noch während der Kaltzeit, in der er gebildet wurde, durch Carbonatlösung und Abfuhr in den Untergrund, ins Grundwasser im Sinne des von mir ermittelten Kationenverhältnisses von 8,33 doch einen Teil seines Gesamtcarbonats absolut eingebüßt hätte, womit auch der Dolomitanteil vermindert worden wäre. Der heute ermittelte hohe Gesamtcarbonatgehalt könnte dann der sekundären Calcitfällung aus der hangenden Pedosphäre während der nachfolgenden Warmzeiten zu verdanken sein.

Gegen diese Auffassung spricht folgende Überlegung: Die Gesamtcarbonatlösung hätte aufgrund der oben in einem Lösspaket höheren Lösungsbereitschaft des Sickerwassers stärker sein und abwärts allmählich aufhören müssen. Der Dolomit, da er nicht durch sekundäre Fällung aus höheren Profiltteilen hat ergänzt werden können, hätte oben weniger, weiter abwärts stärker erhalten bleiben müssen, während das mögliche Calcitdefizit durch sekundäre Fällung später hätte wieder ausgeglichen werden können.

Leider zeigt aber die Tiefenfunktion der Dolomitgehalte innerhalb eines Lösspaketes keine Zunahme von oben nach unten. Dies wäre nur dann durch die o. g. Theorie zu erklären, wenn eine Gesamtcarbonat- und Dolomitlösung so gleichmäßig über eine Tiefe von z. T. mehr als 10 m erfolgen könnte, und das halte ich für ausgeschlossen.

Die Gleichmäßigkeit der Dolomittiefenfunktion und die deutlichen Sprünge beim Übergang in ein anderes Lösspaket müssen daher anders zu erklären sein.

5.4. Über die Möglichkeit der Erhaltung des ursprünglichen Dolomitanteiles — Anlieferungshypothese

Wenn auch eine geringe relative Verminderung des Dolomitanteiles durch sekundäre Calcitzufuhr aus dem Hangenden der Lösspakete im Sinne von Abschn. 5.1. nicht ganz ausgeschlossen werden kann, kommt m. E. doch der Erhaltung der mit der Lössablagerung vorgegebenen Dolomitgehalte die größere Wahrscheinlichkeit zu. Wir müßten dann allerdings nach einem Mechanismus suchen, der den Zusammenhang mit der Lössgenese erhellt. Die sog. Anlieferungshypothese läßt zumindest theoretisch zwei Erklärungsmöglichkeiten zu:

5.4.1. Hypothese einer direkten Anlieferung

Diese Hypothese geht davon aus, daß während der verschiedenen Kaltzeiten des Pleistozäns im Hauptabtragungsgebiet, den Alpen, Gesteine mit zunehmendem Dolomitgehalt an der Oberfläche anstanden, so daß über die glazigenen und glazifluvialen Sedimente, sozusagen auf direktem Wege und ohne postgenetische Veränderungen, den jeweiligen Lössen ganz bestimmte Dolomit-Gesamtcarbonatverhältnisse aufgeprägt worden seien, so wie wir sie heute feststellen. Ich halte diese Möglichkeit für unwahrscheinlich, da sie durch nichts zu beweisen ist.

5.4.2. Hypothese der Anlieferung nach prägenetischer Dolomitanreicherung

Viel mehr Wahrscheinlichkeit besitzt die Hypothese der Dolomitanlieferung nach prägenetischer Anreicherung, wobei der Begriff „prägenetisch“ auf die Lössgenese zielt.

Diese Hypothese geht davon aus, daß in den glazialen und glazifluvialen Sedimenten aller Altersstufen zu allen Zeit im Alpenvorland im Sinne von FEZER (1969) eine Aufbereitung der Dolomitgerölle zu Dolomitsand und -schluff stattfand. Dies führte jeweils in den — bezogen auf eine sich anbahnende neue Vereisung und damit neue Lößbildung — vorausgegangenen Ablagerungen zur absoluten Anreicherung äolisch verwertbarer Dolomitpartikel. Die absolute Anreicherung bezieht sich auf den Ausgangsgehalt an feinen Dolomitpartikeln zum Zeitpunkt der zu betrachtenden Ablagerung. Beim jeweils folgenden Gletschervorstoß wurde das so angereicherte Material entweder direkt vom Gletschereis oder von seinen Schmelzwässern umgelagert und in die der neuen Vereisung zugehörigen Sedimente inkorporiert, wobei der Dolomitgehalt in der Sand- und Schlufffraktion gegenüber dem des direkt aus den Alpen herantransportierten Materialanteiles anstieg.

So mußten die Pleistozänsedimente im Alpenvorland aber auch in der Oberrheinebene, als dem Hauptausblasungsgebiet der oberrheinischen Lössе, ständig dolomitreicher werden, weil es bei jeder neuen Vereisung zum Ablauf des gleichen Mechanismus kam.

Auf diese Weise konnten die Lössе immer dolomitreicher werden, obwohl die jeweils im Hauptabtragungsgebiet bereitgestellten neuen Sedimente im Sinne von Abschn. 5.4.1. primär nicht dolomitreicher zu sein brauchten.

Diese Hypothese wird gestützt durch zwei Erkenntnisse bzw. Befunde:

1. Vom Älteren zum Mittleren Löß erfolgt der größte Dolomitsprung nach oben. Den Mittleren Löß stelle ich in die Rißeiszeit. So benötige ich für die Rißeiszeit⁸⁾ ein außergewöhnliches Maß an Aufarbeitung und Dolomitanreicherung in älterem Material, das vom Rißgletscher durch seinen weiten Vorstoß fast vollständig überfahren und damit weitgehend in die Rißsedimente aufgenommen wurde. Dieses ältere Material wurde im Rheingletscherbereich, dem der oberrheinische Löß wohl zum größten Teil entstammt, durch den am weitesten vorstoßenden Mindelgletscher im Sinne von GRAUL (1968) bereitgestellt, das während der relativ langdauernden Mindel/Riß-Warmzeit einer besonders tiefgreifenden Dolomitverwitterung im Sinne FEZERS und damit Dolomitanreicherung in den feinen Fraktionen unterlegen haben dürfte.

2. Aus den Ergebnissen der Untersuchungen von FEZER (1969) ist abzuleiten, daß im Mittel der Schluff von Würmschottern mit ca. 1 : 600 ein engeres Ca : Mg - Verhältnis aufweist als der von Günzschottern, das bei ca. 1 : 1200 liegt. Dieses Ergebnis muß nicht zwangsläufig eine bevorzugte Schluffverwitterung im Sinne von „je älter der Schluff, um so mehr an Dolomit verarmt“ bedeuten; sie kann auch im Sinne meiner Hypothese der Dolomitanlieferung nach prägenetischer Dolomitanreicherung gedeutet werden und lauten: „Je jünger das Sediment, um so mehr Dolomit durch Anreicherung im Schluff.“

Wenn letztere Erscheinung schon für unbedeckte Terrassenschotter gilt, wieviel mehr muß das dann für den Schluff in Lößprofilen zutreffen, wo aufgrund wiederholter Sedimentüberdeckungen im Vergleich zu unbedeckten Schotterkörpern keine über große Teile des Pleistozäns hin am gleichen Löß fortwirkende Tiefenverwitterung möglich erscheint?

Schriften

- BIBUS, E.: Ausbildung und Lagerungsverhältnisse quartärer Tuffvorkommen in der Wetterau. — Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch. **101**, 346—361, Wiesbaden 1973.
- BRONGER, A.: Lössе, ihre Verbraunungszonen und fossilen Böden. Ein Beitrag zur Stratigraphie des oberen Pleistozäns in Südbaden. — Schriftenr. Geogr. Inst. Univ. Kiel **14**, 2, 113 S., Kiel 1966.
- : Zur Klimageschichte des Quartärs von Südbaden auf bodengeographischer Grundlage. — Peterm. Geogr. Mitt., 113. Jg., 2, 112—124, Gotha 1969.

⁸⁾ Im Sinne von GRAUL (1968).

- BRONGER, A. & HÄDRICH, F.: Le Loess du Sud-Ouest de L'Allemagne. — Suppl. au Bull. de l'Ass. Franc. pour l'Etude du Quaternaire, VIIIe Congr. INQUA, 23—27, Paris 1969.
- BRUNNACKER, K.: Beiträge zur Stratigraphie des Quartärprofils von Kärlich am Mittelrhein. — Mz. Naturw. Arch., 10, 77—100, Mainz 1971.
- FEZER, F.: Tiefenverwitterung circumalpiner Pleistozänschotter. — Heidelb. Geogr. Arb., H. 24, 144 S., Heidelberg 1969.
- FRESLE, F.: Zur Genese der Lößinseln auf den wärmzeitlichen Schwemmfächern von Dreisam und Elz (nördliche Freiburger Bucht). — Unveröff. maschinenschr. Diss. Freiburg i. Br. 1969.
- GRAUL, H.: Führer zur zweitägigen Exkursion im nördlichen Rheingletschergebiet, August 1968, S. 31—75 in: Beiträge zu den Exkursionen anlässlich der DEUQUA-Tagung August 1968 in Biberach an der Riß. — Heidelb. Geogr. Arb., H. 20, 124 S., Heidelberg 1968.
- GUENTHER, E. W.: Sedimentpetrographische Untersuchung von Lössen. Teil I: Methodische Grundlagen mit Erläuterung an Profilen. — Fundamenta, Monographien zur Urgeschichte, Reihe B, 1, 91 S., Köln und Graz 1961.
- HÄDRICH, F.: Die Böden der Emmendinger Vorbergzone (Südliches Oberrheingebiet). — Ber. Naturf. Ges. Freiburg i. Br. 56, 23—76, Freiburg 1966.
- : Zur Anwendbarkeit einiger bodenkundlicher Untersuchungsmethoden in der paläopedologischen und quartär-geologischen Forschung unter besonderer Berücksichtigung der Untersuchung von Proben aus Lößaufschlüssen. — Ber. Naturf. Ges. Freiburg i. Br. 60, 103—137, Freiburg 1970.
- KHODARY-EISSA, O.: Feinstratigraphische und pedologische Untersuchungen an Lößaufschlüssen im Kaiserstuhl (Südbaden). — Freibg. Bodenkundl. Abh. 2, 149 S., Freiburg 1968.
- MÜLLER, G.: Methoden der Sedimentuntersuchung; Sedimentpetrologie, Teil I, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 1964.
- MÜNZING, K.: Beiträge zur quartären Molluskenfauna Baden-Württembergs. — Jh. geol. Landesamt Bad.-Württ 15, 161—185, Freiburg i. Br. 1973.
- NOMMIK, H.: An examination of procedures for determining carbonates in soils and related materials. — Comm. in Soils Sci. and Plant Anal., Vol. 5, 4, 319—330, 1974.
- PAEPE, R.: Les unites litho-stratigraphiques du pleistocene superieur de la Belgique. — Suppl. au Bull. de l'Ass. Franc. pour l'Etude du Quaternaire. VIIIe Congr. INQUA, 45—51. Paris 1969.
- PETERSEN, G. W. & CHESTERS, G.: Quantitative determination of calcite and dolomite in pure carbonates and limestones. — Soil Sci. 17, 2, 317—327, 1966.
- SCHÖNHALS, E., RHODENBURG, H. & SEMMEL, A.: Ergebnisse neuerer Untersuchungen zur Würmlößgliederung in Hessen. — Eiszeitalter u. Gegenwart 15, 199—206, Öhringen 1964.
- SCHLICHTING, E. & BLUME, H. P.: Bodenkundliches Praktikum, 209 S., Parey Hamburg/Berlin 1966.
- SCHREINER, A.: Niederterrasse, Flugsand und Löß am Kaiserstuhl (Südbaden). — Mitt. Bad. Landesver. Naturkde. u. Natursch., N. F. 7, 2, 113—125, Freiburg i. Br. 1958.
- SEMMEL, A.: Stratigraphie du loess dans les Hesses meridionales et Rhenanes. — Suppl. au Bull. de l'Ass. Franc. pour l'Etude du Quaternaire. VIIIe Congr. INQUA, 81—83, Paris 1969.
- SEMMEL, A. et al.: Das Eiszeitalter im Rhein-Main-Gebiet. — Rhein-Mainische Forsch. 78, 215 S., Frankfurt a. M. 1974.
- WOLDSTEDT, P.: Über die Gliederung des Quartärs und Pleistozäns. — Eiszeitalter u. Gegenwart 13, 115—124, Öhringen 1962.

Manuskript eingeg. 9. 7. 75.

Anschrift des Verf.: Dr. F. Hädrich, Inst. f. Bodenkunde u. Waldernährungslehre d. Univ. Freiburg, 78 Freiburg i. Br., Bertoldstraße 17.