

fa



BAUGRUNDINSTITUT
STUTTGART

MITTEILUNG 3

VOLKER FEESER

1975

DIE
BEDEUTUNG
DES
KALZIUMKARBONATS
FÜR DIE BODEN-
PHYSIKALISCHEN
EIGENSCHAFTEN
VON LÖSS

fer.

Das Baugrundinstitut ist unter der Bezeichnung
" INSTITUT FÜR GRUNDBAU UND BODENMECHANIK "
eine Einrichtung der Universität Stuttgart

BAUGRUNDINSTITUT STUTTGART

PROF. DR.-ING. U. SMOLTczyk

MITTEILUNG 3

Die Bedeutung des Kalziumkarbonats
für die bodenphysikalischen
Eigenschaften von Löß

dargestellt anhand einer Untersuchung eines
Lößbodens aus der Heilbronner Mulde

von

Dipl.-Ing. Volker Feeser

Stuttgart 1975

INHALT

Vorwort	VI
<u>1. Einleitung</u>	1
1.1 Problemgeschichte	1
1.2 Ziel der Arbeit	2
1.3 Aufbau und Gliederung der Arbeit	3
<u>Teil I - Grundlagen</u>	
<u>2. Definition des Begriffs LÖß</u>	4
<u>3. Sedimentologische Grundlagen</u>	5
3.1 Entstehungstheorien	5
3.2 Bildungsphasen der periglazialen Lößfazies	7
.1 Übersicht	7
.2 Ursprung der Lößpartikel	8
.3 Transport	10
.4 Ablagerung	15
.5 Bodenbildung	19
3.3 Gliederung und Altersstellung	20
3.4 Vorbelastung	23
<u>4. Sedimentpetrologische Grundlagen</u>	23
4.1 Petrogenese	23
.1 Diagenese	23
.2 Postdiagenetische Veränderungen- Verwitterung	28
4.2 Petrographie	29
.1 Chemische Zusammensetzung	30
.2 Mineralogische Zusammensetzung	30
.3 Gefüge	33
.3.1 Textur	33
.3.2 Struktur	33
.4 Vorkommen und Verbreitung	35

Gegen Vervielfältigung und Übersetzung bestehen keine
Einwände, es wird lediglich um Quellenangabe gebeten.

Herausgegeben 1975 im Eigenverlag des Baugrundinstituts

Druck: W. Schröpfer, Reprographische Arbeiten,
Stuttgart

Umschlagentwurf: Studio Fink oHG, Altdorf

5. Einfluß der genetischen Prozesse auf die Bodeneigenschaften	37
5.1 Korngrößenaufbau	37
5.2 Vorschlag zur Bildung von "Lößregionen"	37
5.3 Mineralchemischer Aufbau und Gefüge	39
5.4 Physikalische Anisotropie	40
5.5 Entwurf eines Strukturmodells	41
6. Phasensystem des Lösses	42
6.1 Feste Phase	43
6.2 Flüssige Phase	43
6.3 Gasförmige Phase	45
6.4 Variable Phase - Karbonatphase	45
7. Mechanische Probleme bei der Erfassung von Bodeneigenschaften	47
7.1 Das Problem der Spannungsverteilung in mehrphasigen Böden	47
7.2 Scherfestigkeit	48
<u>Teil II - Untersuchungsprogramm</u>	
8. Auswahl der Versuche	50
9. Felduntersuchungen	51
9.1 Versuchsgelände	51
9.2 Plattendruckversuche	53
.1 Geräte	53
.2 Versuchstechnik	53
10. Bodenproben	54
11. Laboruntersuchungen	55
11.1 Normaluntersuchungen	55
.1 Versuche zur Zustandsbeschreibung	55
.2 Versuche mit Belastungsänderung	56
11.2 Besondere Untersuchungen	58
.1 Kornverteilung mit verschiedenartiger vorheriger Probenaufbereitung	58
.2 Untersuchungen zur Interpretation des Kollapsmechanismus	58

Teil III - Auswertung

12. Probleme bei der Entnahme und Bearbeitung "ungestörter" Lößproben	60
13. Versuchsergebnisse und ihr Vergleich mit Angaben aus der Literatur	61
13.1 Feldversuche	61
.1 Ergebnisse	61
.2 Bestimmung des Bettungsmoduls	64
.3 Bestimmung des Steifemoduls des Baugrundes	65
13.2 Laborversuche	67
.1 Zustandsbeschreibung des Bodens	67
.2 Kompressionsversuche	69
.3 Zylinderdruckversuche	70
.4 Dreiaxiale Druckversuche	71
14. Ergebnisse der besonderen Untersuchungen	72
14.1 Kornverteilung	72
14.2 Kompressionsversuche mit anschließender Kornverteilungsbestimmung	74
15. Die Bedeutung des Kalziumkarbonats	74
15.1 Die Bedeutung für einige bodenmechanische Kennwerte	74
.1 Kornwichte, Trockenwichte	74
.2 Kornverteilung	75
.3 Zustandsgrenzen	77
15.2 Die Bedeutung des Kalziumkarbonats für das mechanische Verhalten	78
.1 Das Verhalten der Karbonatphase im Kompressionsversuch	78
.2 Interpretation der dreiaxialen Druckversuche	80
.3 Lastplattenversuch	81
16. Vorschläge für weitere Untersuchungen	81
17. Vergleich Feldversuche - Laborversuche	82
17.1 Vergleich der Setzungen	82
17.2 Vergleich der Steifemoduln bei unbeh.Seitendehnung	83
17.3 Folgerung	83
18. Zusammenfassung	84
Schrifttumsnachweis	86

Teil IV - Anhang

Geowissenschaftliches Fachwortglossar	90
Diagramme und Abbildungen	92

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

- 2-1 Charakteristische Lössmorphologie. Erosionserscheinungen im Löss von West-Honan, China
- 3-1 Verschiedene Hypothesen der Lößentstehung
- 3-2 Schematische Darstellung der Lößentstehung
- 3-3 Klimazonen Europas während der Würmeiszeit
- 3-4 Transporthöhe der Partikel in Abhängigkeit der Korngrösse
- 3-5 Schematische Darstellung der Vorgänge beim Transport und bei der Akkumulation von Staub
- 3-6 Abhängigkeit der Transportentfernung vom Korndurchmesser
- 3-7 Beziehung zwischen dem mittleren Korndurchmesser des Lösses und der Entfernung vom Auswehungsgebiet für das Mississippigebiet
- 3-8 Anpassung von Steppenpflanzen an treibenden Sand
- 3-9 Veränderung der Durchflussrate eines Quarzsandes beim Durchfliessen einer 3 mm grossen Öffnung in Abhängigkeit vom Korndurchmesser
- 3-10 Siebsummenlinien von Primärlössen östlich und westlich des Neckars im Bereich der Heilbronner Mulde
- 3-11 Lößprofil Heilbronn-Böckingen
- 3-12 Stratigraphische Tabelle des Jungpleistozän und Holozän
- 4-1 Karbonat-Gleichgewichte mit Ca in Abhängigkeit von pH-Wert
- 4-2 Klassifizierung der Lösses aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung
- 4-3 Mineralbestand der einzelnen Fraktionen zweier Lösses aus Heilbronn-Böckingen

- 4-4 Richtungslose Textur des porösen Primärlösses
- 4-5 Makrostruktur des Lösses
- 4-6 Verbreitung von Löss auf der Erde
- 4-7 Lössablagerungen in Mitteleuropa während der letzten Eiszeit
- 4-8 Lössregion württembergisches Unterland
- 5-1 Spezifische Merkmale sackungsgefährdeter und strukturstabiler Lockergesteine
- 5-2 Strukturmodell eines Primärlösses
- 5-3 Stereoskopisches Strukturmodell eines Primärlösses
- 6-1 Beziehung zwischen Porenwasserdruck und Wassergehalt bei nordamerikanischen Lössen
- 6-2 Sättigungsgrad in Abhängigkeit des Porenwasserdrucks bei nordamerikanischen Lössen
- 6-3 Einfluss des Kalziumkarbonatgehalts im Porenwasser auf die Festigkeit des Korngerüsts
- 6-4 Wirkung der Oberflächenspannung zwischen zwei Kugeln
- 9-1 Versuchsfeld für Plattendruckversuche und Bodenprofil unter der Lastangriffsfläche
- 9-2 Standort des Versuchsgeländes und Entnahmestellen der Bodenproben
- 13-1 Druck-Setzungs-Diagramm aus Lastplattenversuchen mit verschiedenen Wassergehalten, Plattendurchmesser 35,7 cm
- 13-2 Beziehung zwischen natürlichem Wassergehalt w und dem Steifemodul des Baugrunds im Proportionalitätsbereich 3
- 13-3 Bettungsmoduln als Funktion des Durchmessers der Belastungsplatte
- 13-4 Plastizitätsdiagramm
- 13-5 Streubereich der Kornverteilungen verschiedener Lösses
- 13-6 Last-Setzungs-Diagramm von Löss und rheinischem Schluff
- 15-1 Veränderlichkeit der zweiten Karbonatphase bei Belastung im Oedometer

VORWORT

Der Bauingenieur, dem das Denken und Rechnen mit Zahlen und Formeln eigen ist, versucht diese Denkweise auch auf den Baugrund zu übertragen, da bei ihm das Festigkeitsverhalten im Vordergrund steht. Aber gerade die Festigkeitseigenschaften werden ganz entscheidend vom geologischen Werdegang der Gesteine bestimmt. Das Betrachten in geologischen Zeitmaßstäben führt vielfach zu Vorstellungen, die dem Ingenieur vielleicht fremd sein werden, der Wirklichkeit aber oft näher kommen. Die Problematik wird dadurch gekennzeichnet, dass nicht durch einseitige handwerksmässige Untersuchungen das tiefere Verständnis für das Verhalten des Baugrundes aus Lockergesteinen erschöpfend geklärt werden kann. Es wäre daher falsch, sich diesen Tatsachen zu entziehen. Eine Baugrundwissenschaft kann daher nur dann umfassend sein und ihren Aufgaben voll gerecht werden, wenn die verschiedenen festigkeitsbeeinflussenden Faktoren, sowohl geologischer als auch mineralchemischer Art, abgeklärt werden.

In letzter Zeit mehrten sich die Stimmen für eine Synthese von Geologie und Bauwesen, wobei sich Ingenieure (KEIL 1955 und KOENIG 1962) und Geologen (KARRENBURG 1962 und KELLER 1962) für eine engere gegenseitige Zusammenarbeit aussprechen.

Mein Studium an der Universität Stuttgart galt dem Versuch, beide Wissenschaftszweige sinnvoll miteinander zu verknüpfen, wobei dies jedoch nicht immer einfach, zumal es auf einer Ausnahmeregelung beruhte, zu verwirklichen war. Die vorliegende Diplomarbeit soll als Abschluss dieses geotechnischen Studiums verstanden werden, wobei die eingangs erwähnte Problematik als übergeordnete Aufgabenstellung zu betrachten ist.

Dass ich die relativ kurze, zur Bearbeitung einer Diplomarbeit zur Verfügung stehende Zeit überzogen habe, mag in erster Linie

an den zum Teil einen erheblichen Arbeitsaufwand erfordernden Versuchen, die lediglich durch grosszügige Unterstützung einiger Heilbronner Unternehmen möglich waren, und an der Vielschichtigkeit des angesprochenen Problemkreises liegen, die allein anhand der bearbeiteten Literatur erahnt werden kann.

Allen, die mich bei der Vorbereitung und Durchführung meiner Versuche unterstützt haben, sei an dieser Stelle Dank gesagt.

Heilbronn, im Oktober 1974.

Volker Feeser

1. EINLEITUNG

1.1 Problemgeschichte

Beim Löß kann eine bodenmechanische Klassifikation ohne Berücksichtigung der erdstoffphysikalischen Unterschiede, allein basierend auf der Kornverteilung und den Atterberg-Grenzen und den daraus abgeleiteten Kennwerten nicht der ihr zugewiesenen Bedeutung und Aussagekraft erfüllen. Zweifellos besitzt der Löß, bedingt durch seine Gleichartigkeit im Kornaufbau, mit der er an vielen Stellen der Erde auftritt und deren Ursache wiederum in seiner Entstehung zu suchen ist, bestimmte Eigenschaften und Merkmale, die global betrachtet eine rein bodenmechanische Klassifikation erlauben würden.

Das Problem der Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften der Lockergesteine ganz allgemein und im besonderen des Lösses von der geologischen Geschichte ist seit einiger Zeit stärker in den Vordergrund getreten. So wird der "Rheinische Schluff" am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Hochschule Aachen seit einigen Jahren in verschiedener Richtung durch Forschungsarbeiten näher untersucht (SCHULTZE 1972), ähnliche Untersuchungen liegen aus den USA (RAHMAN 1973, KANE 1973, TERZAGHI 1955) und der Sowjetunion (REUTER 1965) vor.

Nach umfangreichem Literaturstudium zeigte sich, dass der Einfluss des Kalziumkarbonats auf bodenmechanische Kennwerte nur sehr pauschal abgehandelt wurde, was darauf zurückzuführen ist, dass der Kalkgehalt genetisch bedingt in den jeweils untersuchten Böden prozentual nur eine untergeordnete Rolle spielte. Es lag daher nahe, diese offensichtliche Lücke zu schließen, zumal im nördlichen Württemberg und vor allem in der Heilbronner Umgebung weite Teile mit einem kalkhaltigen Löß in beträchtlicher Mächtigkeit bedeckt sind.

1.2 Ziel der Arbeit

Es galt nun, in der relativ kurzen zur Verfügung stehenden Zeit geeignete Versuche durchzuführen, die ohne allzugrosse versuchstechnische Aufwendungen Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen dem Kalziumkarbonat und den bodenphysikalischen Eigenschaften aufzuzeigen vermochten.

Anfänglich unterlag auch ich, wie schon andere, z.B. KAHL (1972), dem Trugschluss, man könne experimentell kurzfristig das nachholen, wozu die Natur Tausende von Jahren gebraucht hatte. So musste ich mein Vorhaben aufgeben, Lössproben künstlich mit Kalziumbikarbonat anzureichern, um Rückschlüsse auf Abhängigkeiten von der Höhe des Kalkgehaltes zu erhalten. Probenmaterial mit annähernd gleichem Gefüge, Mineralaufbau und Ablagerungsbedingungen - jedoch mit verschiedenem Kalkgehalt - konnte aus zeitlichen Gründen nicht beschafft werden.

Wegen dieser Einschränkungen soll diese Arbeit deshalb nur qualitativ den Einfluss des Kalziumkarbonats auf die bodenphysikalischen Eigenschaften des Primärlösses abstecken und durch Feld- und Laborversuche die Bedeutung dieser Problematik, die bisher in der Literatur nur pauschal Eingang gefunden hat, auf die ingenieurmässige Beurteilung und Klassifikation des Lösses herausstellen. Ich bin mir voll auf der Tatsache bewusst, dass die gewonnenen Erkenntnisse rein hypothetischen Charakter besitzen und dass es zu ihrer Untermauerung noch zahlreicher statistischer Materialien als auch zusätzlicher bodenphysikalischer und bodenchemischer Untersuchungen bedarf, die den Rahmen dieser Arbeit bei weitem gesprengt hätten (vgl. Abschn. 16).

Einleitend sollte noch betont werden, daß sich dieser Beitrag ausschließlich auf die Kategorie der Primärlösses beschränkt (Unterschied zwischen Primär- und Sekundärlöss s. Abschnitte 2, 3.2.1, 3.2.5 und 4.1.2).

1.3 Aufbau und Gliederung der Arbeit

Es bot sich zweckmässigerweise eine Gliederung in vier Teilen an.

In Teil I habe ich, obwohl SCHEIDIG (1934) in seinem Standardwerk über Löss eine ausführliche Beschreibung der geologischen, petrologischen und geotechnischen Grundlagen gibt, diese Gesichtspunkte nach dem neuesten Stand berichtigt und die in der Zwischenzeit neu hinzugekommenen Erkenntnisse aufgenommen, so dass eine geschlossene Darstellung der Lössforschung für die Primärlösser unter besonderer Berücksichtigung des nordwürttembergischen Raumes vorliegt.

Die Ausführlichkeit dieses ersten Teils ist für das uneingeschränkte Verständnis der Teile II und III erforderlich. Ausserdem wird gezeigt, dass die geologische Vorgeschichte massgeblichen Einfluss auf die Zusammensetzung des Bodens hat und für sein bautechnisches Verhalten von nicht zu unterschätzender Bedeutung ist.

Teil II befasst sich mit den im Rahmen dieser Arbeit ausgeführten Versuchen. Es werden die für den gewünschten Zweck geeigneten Versuchsverfahren sowie die verschiedenen Versuchsarten definiert.

Teil III beinhaltet die Auswertung der durchgeführten Versuche. Nach einer Zusammenstellung der Versuchsergebnisse werden diese untereinander und mit den Ergebnissen anderer Arbeiten verglichen und das Ergebnis der Arbeit zusammengefasst. Ausserdem werden Vorschläge für spätere Untersuchungen gemacht, die zu einer weiteren Klärung beitragen dürften.

Teil IV beinhaltet ein geowissenschaftliches Fachwortglossar, um dem Ingenieur, der mit dem Umgang der geologischen Fachsprache nicht vertraut ist, beim Lesen des Teiles I behilflich zu sein. Weiter sind Diagramme und Abbildungen der einzelnen Versuche angefügt.

TEIL I GRUNDLAGEN

2. DEFINITION DES BEGRIFFES "LÖSS"

LÖSS ist offenbar die hochdeutsche Schreibweise für "Loesch", ein Wort alemannischer Herkunft, wobei im Schweizerischen "lösch" dasselbe wie "locker" bedeutet (MURAWSKI 1972).

Grundsätzlich ist zwischen Primär- und Sekundärlöss zu unterscheiden. Im folgenden soll unter dem Begriff Löss der "echte Löss" oder Primärlöss verstanden werden, auf den sich diese Arbeit ausschliesslich beschränkt. Sekundärlössen werden durch Umlagerung und Umbildung von (Primär-)Lössen gebildet (vgl. Abschn. 3.2.1, 3.2.5, und 4.1.2).



Abb.2-1. Charakteristische Lössmorphologie. Erosionserscheinungen im Löss von West-Honan, China (aus FÜCHTBAUER/MÜLLER 1970)

Löss ist ein gelbbraunes bis gelbgraues, poröses, sehr feinkörniges, klastisches Sediment äolischen Ursprungs, und wird fälschlicherweise vielfach als "Lehm" bezeichnet. Bedingt durch seine krümelige Mikrostruktur, begleitet von einer lössspezifischen Makrostruktur, sowie durch den Mangel an bindigen Tonfraktionen ist er mürbe, und unter Wasser mühelos, ohne plastisch zu werden, zwischen den Fingern zerreibbar. Das Maximum der Kornverteilung liegt zwischen 0,01 und 0,05 mm, so dass Löss in der bodenmechanischen Klassifikation als schwach toniger, schwach feinsandiger Schluff anzusprechen ist. Als Sediment besitzt Löss ein überaus homogenes Gefüge, ist ungeschichtet, hat aber die Neigung zu vertikaler Klüftung, die im Zusammenhang mit der schon erwähnten Makrostruktur und einer wiederum lössspezifischen Kalkkittung zu sehen ist, und bildet demzufolge trotz geringer allgemeiner Strukturfestigkeit senkrechte Wände und wandartige steile Böschungen, die das charakteristische Kennzeichen einer Lösslandschaft sind (Abb. 2-1).

3. SEDIMENTOLOGISCHE GRUNDLAGEN

3.1 Entstehungstheorien

Die Frage nach der Entstehung des Lösses war lange Zeit ein umstrittener Gegenstand der Geologen aller Länder (vgl. Abb. 3-1). Dies mag in erster Linie eine Folge des Umstandes gewesen sein, dass häufig Beobachtungen in örtlich begrenzten Gebieten verallgemeinert wurden.

Durch seine umfangreichen Untersuchungen in chinesischen Lössgebieten rückte V. RICHTHOFEN (1878) die bereits früher vorgebrachte Theorie der äolischen Entstehung stark in den Vordergrund. Sie dürfte heute die wohl am meisten anerkannte und am besten fundierte Entstehungstheorie sein (TERZAGHI 1955).

Diese Theorie unterteilt den Löss in zwei Hauptentstehungsgruppen

Marin	Fluviatil	Lakustrisch	Durch Rinnsale (Rinnsal-Theorie)	in situ
v. Bennigsen-Förder 1845 1857 Mercey 1863 Hébert 1867 Fallou 1867 Kingsmill 1895 Arentz 1910 Murchison ?	Steiniger 1821 v. Leonhard 1823 v. Oeynhausens 1825 Collomb 1849 v. Richt-hofen 1859 Fournet 1859 Sueß 1866 Sandberger 1870-1880 Rutot 1912 v. Werveke 1924	Hibbert Ware 1832 Lyell 1834 Gümbel 1855 Briart 1891	Girard 1855 Volgler 1865 Mohr 1875 de Lapparent 1890 Lohest-Fraipont 1912 v. Stahl 1922 Klein 1923 Armaschewski, Pawlow u. a. russische Geologen	Peters 1859 O. v. Lin-stow 1910 Berg v. Rum-melen 1923
Äolisch	Frost-Tau-Wirkung	Glazial	Kosmisch	Vulkanisch
(Ehrlich 1848) Virlet 1857 d'Aoust v. Richt-hofen 1870 Stur 1872 E. Tietze 1877 Nehring 1890 v. Baren 1908 Free 1911 Schmitt-henner 1927	Kerr 1881 Wood 1882	Mercey ?	Keilhack 1921	v. Dietrich 1830 Howorth 1882 Besonders als Geiser-wirkung: d'Omalius-d'Halloy 1871 Diagenetisch veränderte vulkanische Form: S. Roth 1888
Fluvio-glazial	Äolo-glazial	Äolo-fluviatil	Fluviatil-Rinnsale	Äolisch-Rinnsale
Leverett 1896 Salisbury 1896 Free 1911 Grahmann 1932	Jentsch 1884 Steinmann 1916	v. Richt-hofen 1877 Stelzner 1885 Russel 1889 Chamberlin 1897 Willis 1907	Fournet 1859 Credner 1876	Commont 1912 Clozier 1925
Verwitterung in situ-Rinnsale	Metamorphose	Lakustrisch-Rinnsale	Organismen	Schneedrift
v. Rum-melen 1927	S. Roth 1888	Steiniger 1853	Wright 1889	Davison 1894 Tesch 1908, 1923

Abb.3-1. Verschiedene Hypothesen der Lößentstehung (aus SCHEIDIG 1934)

pen (WOLDSTEDT 1954, GRAHAM 1932):

- den kontinentalen Typ, bei dessen Entstehung und Ablage- rung das Klima eine unmittelbare Rolle spielt, wie z.B. in China;
- den glazialen Typ, bei dem das Klima nur eine mittelbare Rolle spielt, wie es in Mitteleuropa der Fall ist.

3.2 Bildungsphasen der periglazialen Lößfazies

3.2.1 Übersicht

Die in unserem Raum anstehenden Lössen werden aufgrund ihrer ge- netischen Natur dem periglazialen Faziesbereich, also dem zwei- ten Typ der WOLDSTEDT'schen Gliederung, zugeordnet.

In Abb. 3-2 wurde versucht, eine sehr vereinfachte Übersicht über die Bildungsphasen dieses glazialen Typs zu geben. In dieser Abbildung ist auch die unterschiedliche Entstehungsge- schichte des Primär- und Sekundärlösses dargestellt, die unab- hängig von der Globalentstehung zu betrachten ist.

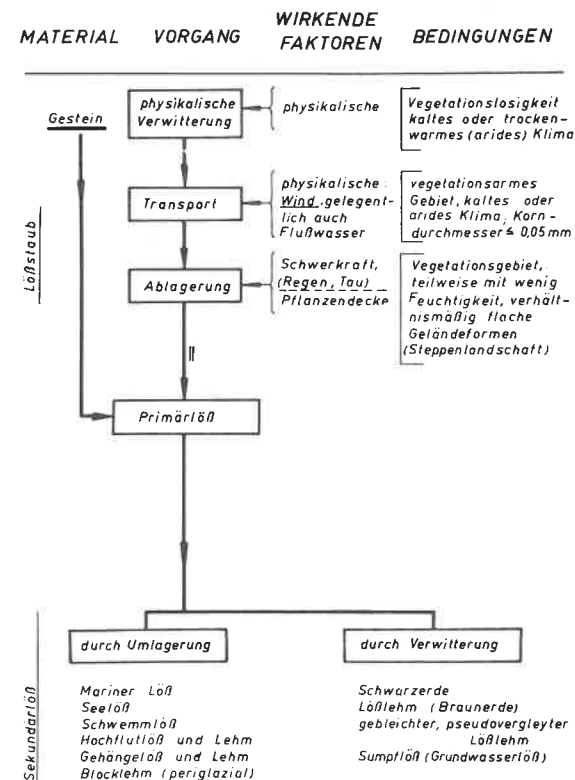
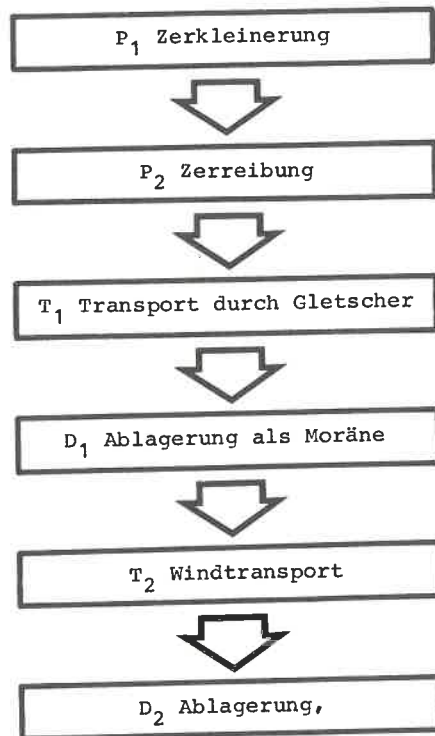


Abb.3-2. Schematische Darstellung der Lößentstehung (aus KOTZIAS 1963)

Eine präzisere Gliederung der Entstehung nimmt SMALLEY (1966) vor:



wobei die Buchstaben P, T und D Provenance, Transport und Deposition bedeuten.

Zusammenfassend kann die Lößentstehung in drei Bildungsphasen gegliedert werden:

1. Bildungsphase: Enthält sämtliche Faktoren der Gliederung nach SMALLEY.
2. Bildungsphase: Diagenese
3. Bildungsphase: Bodenbildung

3.2.2 Ursprung der Lößpartikel

In Anbetracht ausgedehnter feinstratigraphischer Untersuchungen von Lössen und deren Mineralassoziation (GUENTHER 1953, DÜRR

1953) kann heute sowohl von einem allochthonen als auch parautochthonen Ursprung des Ausgangsmaterials, wobei die Grenzen fließend sind, gesprochen werden.

Frühere Ansichten, die einen autochthonen bzw. parautochthonen Ursprung ausschlossen, wie sie noch WAGNER (1960) vertritt, wurden durch Vergleich der Schwermineralkonzentration im Löss und in den hier anstehenden Keupergesteinen widerlegt. Nahe dem Keuperstufenrand vorhandene nordwürttembergische Lössen entsprechen in ihrer Mineralvergesellschaftung den Keupersandsteinen, während die weiter abliegenden eine "Verwandtschaft" zu Keupermergeln erkennen lassen, was durch einen höheren Anteil an Epidot ausgedrückt wird (DÜRR 1953). Bei Mächtigkeiten ab acht Meter und grösserer Flächenbedeckung nimmt dieser lokale Staubanteil ab.¹⁾

Während der parautochthone Ursprung eines partikulären Lössausgangsmaterials in der Literatur noch nicht allgemein Eingang gefunden hat, wird der allochthone Ursprung von allen Forschern vertreten. Die Zusammenhänge, sowohl zwischen Gebieten mit ehemaliger Gletscherbedeckung und den jetzigen Lössvorkommen (in Mitteleuropa liegen Lössvorkommen zwischen den Grenzen der alpinen und skandinavischen Würmvereisung, vgl. Abb. 4-7) als auch zwischen der Mineralogie der Lössen und den Glazialablagerungen bzw. deren Ausgangsmaterialien, sind in vielen Fällen so klar, dass an einer glazialen Entstehung des grössten Teils der Lößpartikel kein Zweifel mehr bestehen dürfte (WAGNER 1960, GEYER/GWINNER 1968).

Demzufolge besteht das allochthone Ausgangsmaterial des nordwürttembergischen Lösses aus Auswehungen der fluvioglazialen Terrassenschotter des Rheins und der nordalpinen periglazialen Schwemmfächer.

Die Aufbereitung der unvorstellbar grossen Mengen des Ursprungsmaterials kann folgendermassen gedeutet werden (GUENTHER 1955, SMALLEY 1966):

¹⁾ Diesen Hinweis verdanke ich Herrn Dr. Alaily (Universität Hohenheim)

Zerkleinerung der Gesteinsbruchstücke durch Gletscher. Die zertrümmerten Gesteine bestehen aus Detritus verschiedener Härte und verschiedener Löslichkeit. Quarzkörner, aus Einkristallen bestehend, bleiben erhalten.



Zerreißung der Quarzpartikel, Bildung von sehr feinkörnigem Material, während ein beträchtlicher Teil der Körner unzerstört bleibt.



Das gemischte, zum Teil gefrorene, grob- u. feinkörnige Material wird durch den Gletscher transportiert.



Ablagerung des Geschiebematerials als Moräne, wobei dieses Material durch entsprechende Korngrößenverteilung für Solifluktion prädestiniert ist.



Solifluktion und weitere Zerkleinerung.



Abtransport des Geschiebematerials durch Schmelzwasser und Sedimentation in den fluvioglazialen Schotterfluren des Rheins.

Zur Untermauerung dieses Aufbereitungsvorganges konnte WEIDENBACH (1952) nachweisen, dass durch die Abreibungseffekte in fluvioglazialen Schottern grosse Mengen von Gesteinstaub entstehen und fand durch eine Mengenbilanz eine Erklärung für die grossen Lößmächtigkeiten. Diese Lößmächtigkeiten hatten anderen Forschern grosse Schwierigkeiten bereitet (KEILRACK 1921).

3.2.3 Transport

Bedingt durch klimatische Veränderungen, auf die im Anschluss kurz eingegangen wird, fallen die im Abschnitt 3.2.2 erwähnten periglazialen Frostschuttzonen und fluvioglazialen Schotterfluren trocken, so dass dort besonders Deflation in Erscheinung tritt, da eine schützende Pflanzendecke fehlt und deshalb der Wind unmittelbar auf den Boden selbst einwirken kann.

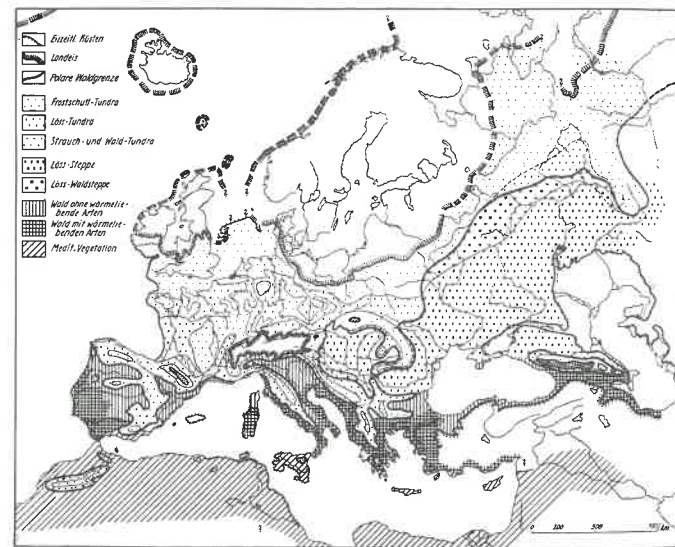


Abb.3-3. Klimazonen Europas während der Würmeiszeit (aus WAGNER 1960)

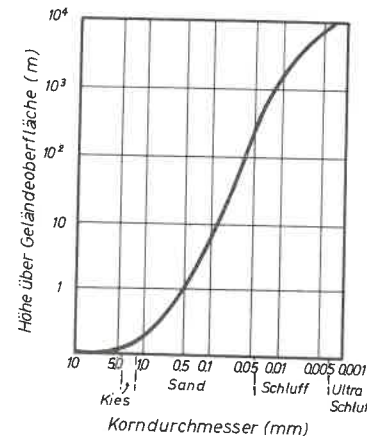


Abb.3-4. Transporthöhe der Partikel in Abhängigkeit der Korngröße (nach DAPPLES 1959)

Im Verlauf einer Glazialperiode stellten sich Klimaveränderungen ein, die sowohl für den Transport des Löß-Ausgangsmaterials als auch für die Bodenbildung, hier in der geologisch-bodenkundlichen Auslegung, (vgl. Abschn. 3.2.5) von ausschlaggebender Bedeutung waren. Durch eine Verschiebung der Klimabereiche zum Äquator gelangte der mitteleuropäische Raum in einen kalten und semiariden Bereich, dessen Witterungseinflüsse nur eine kümmerliche, tundrenartige Vegetation zuließen. (Abb. 3-3). Über den Kappen des alpinen Inlandeises herrschte in den Kaltzeiten hoher Luftdruck. Kalte und trockene Winde wehten daher in die nicht vereisten Tundrengebiete mit niedrigem Luftdruck (s.a. Abschn. 4.2.4). Durch die Erddrehung erfolgte, ähnlich wie bei den heutigen Passaten, eine Ablenkung der Winde im Uhrzeigersinn, so dass diese Winde im süddeutschen Raum hauptsächlich in westlicher und südwestlicher Richtung in Erscheinung traten (ERLÄUTERUNGEN I (1959)). Beim Passieren der brachliegenden periglazialen und vor allem fluvioglazialen Schotterterrassen des Rheins wurde der nur mechanisch verwitterte und damit an löslichen Substanzen reiche freiliegende, feinkörnige Detritus von diesen passatähnlichen Fallwinden zunächst getrocknet und anschliessend ausgeblasen, wobei die Umlagerung der Körner bei den feineren Fraktionen teils schwebend, teils in kleinen Sprüngen, bei den grösseren Fraktionen nur noch rollend erfolgte (Abb. 3-4 und 3-5).

Bei der Deflation dieses Detritus spielen Kohäsionskräfte und die Neigung zur Aggregation eine wichtige Rolle. Sie sind bei einheitlichem Mineralbestand um so grösser, je kleiner die Mineralpartikel sind, und am grössten bei Durchmessern kleiner 0,002 mm (SMALLEY (1966), vgl. Abschn. 3.2.4.). Deshalb bildet Ton in der Regel keine selbständigen Partikel sondern Aggregate. Infolgedessen erfordern sowohl gröbere als auch feinere Mineralkörner (Tonminerale) im Gegensatz zu den mittleren eine höhere Windgeschwindigkeit zur Abhebung von der Bodenoberfläche. Diesen Umstand konnte BAGNOLD (1941) experimentell nachweisen. Bereits bei niedrigster Windgeschwindigkeit von ca. 15 cm/s wurden Partikel von 0,08 mm Durchmesser angehoben und ein Wind mit 30 cm/s vermochte Körner zwischen 0,01 und 0,4 mm anzuheben und in Windrichtung zu transportieren.

Der Transport von grösseren Partikeln in der Luftsuspension ist mehr oder weniger auf lokale Bereiche begrenzt. Je länger die Transportstrecke ist, desto häufiger findet ein Zerschlagungsprozess (Tonaggregate werden auf Schluffgrösse zerkleinert) statt (Abb. 3-5) und um so besser werden diese Grobpartikel nach Härte, Spaltbarkeit oder Festigkeit selektiert und homogenisiert.

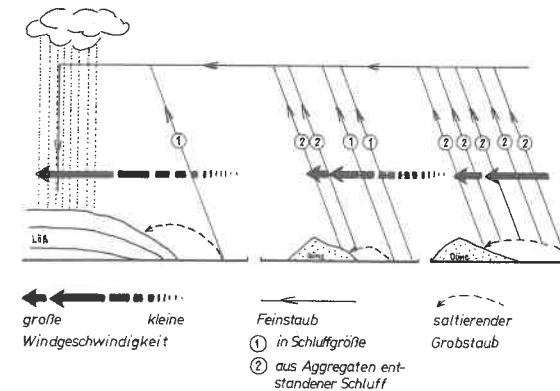


Abb.3-5. Schematische Darstellung der Vorgänge beim Transport und bei der Akkumulation von Staub

Somit bestimmen zwei Faktoren die Windtransportfähigkeit eines Materials: Der "Anhebefaktor" und der "Tragefaktor". Partikel von 0,08 mm Durchmesser werden am leichtesten angehoben, kleinere Partikel bleiben jedoch länger in der Schwebelage, daher erfolgt schon bei der Ausblasung des "Embryonalsandes" eine erste Seigerung, die im entscheidenden Masse die Gleichkörnigkeit des Lösses bewirkt.

Bei Transportweiten der ausgeblasenen Partikel von einigen Metern bis zu mehreren hundert Kilometern (Abb. 3-6) spielt die Windintensität als Tragfaktor neben der Korngrösse eine bedeutende Rolle. Aus Gesetzmässigkeiten im Feinaufbau von Talrandlössen konnte SCHÖNHALS (1953) durch Auftragung des prozentualen

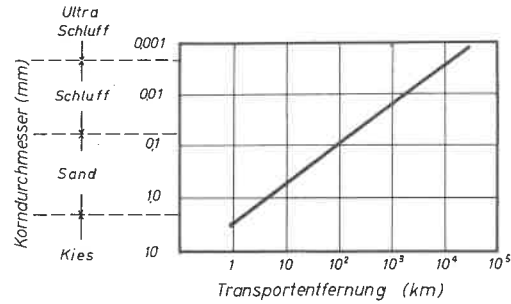


Abb.3-6. Abhängigkeit der Transportentfernung vom Korndurchmesser (nach DAPPLES 1959)

Anteils der Gesamtmächtigkeiten von Sandbändern in Löss und durch feinstratigraphische Untersuchungen die Windrichtung und die Entfernung vom Auswehungsgebiet aufzeigen. Ähnliche Untersuchungen liegen vom Mississippi vor, wo SMITH (1942) eine Abnahme des mittleren Korndurchmessers d_{50} von 0,033 mm auf 0,015 mm auf eine Entfernung von 100 km vom Auswehungsgebiet (Abb. 3-7) so-

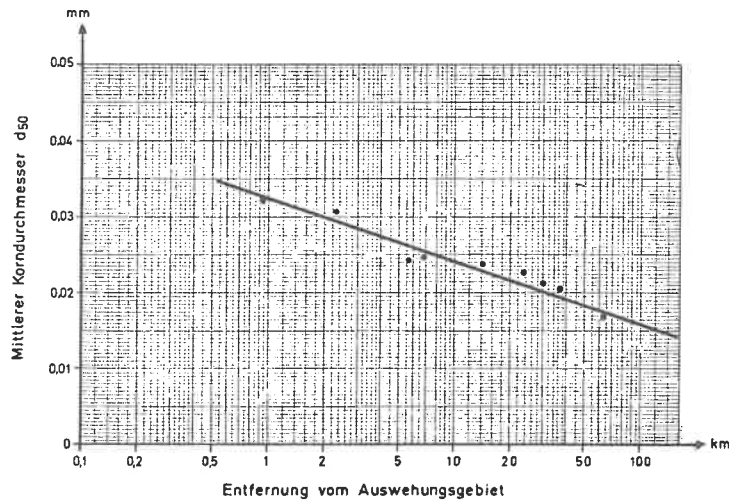


Abb.3-7. Beziehung zwischen dem mittleren Korndurchmesser d_{50} des Lösses und der Entfernung vom Auswehungsgebiet für das Mississippigebiet (nach SMITH 1942)

wie eine Abnahme der Lössmächtigkeit fand. Folglich unterstreicht die Feinkörnigkeit des Lösses der Heilbronner Mulde im Gegensatz zum grobkörnigen Löss des Rheintalgrabens (WILD 1968) die These der Herkunft des Ausgangsmaterials von den fluvioglazialen Schotterterrassen des Rheins.

Bemerkungen zur Transportwindrichtung siehe am Schluss von Abschn. 3.2.4.

3.2.4 Ablagerung

Nachdem der Wind den Lössstaub fortgetragen hat, müssen neue Bedingungen eintreten, die den Staub zur Abscheidung bringen, denn während Teilchen der Feinsandgröße eine rasche Sinkgeschwindigkeit besitzen, bleiben die Teilchen der Staub- und Tongrößen praktisch in der Schwebe (WAGNER 1960). Dadurch findet bei der Ablagerung nach der Ausblasung (vgl. Abschn. 3.2.3)

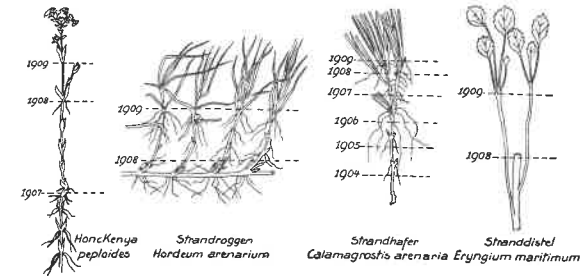


Abb.3-8. Anpassung von Steppenpflanzen an treibenden Sand, zugleich dem Festhalten des Sandes dienend (aus WAGNER 1960)

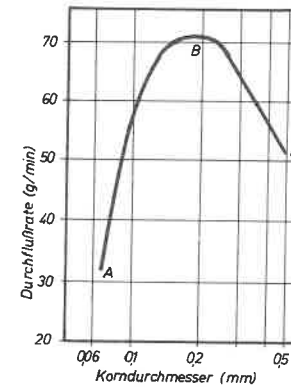
eine zweite Seigerung statt. Die Abscheidungsbedingungen sind zunächst meteorologischer Art. Die Windintensität nimmt ab bzw. das Frachtmaterial gerät in einen Windschatten, so dass sich der Staub im Zustand der Schwebe befindet und, wie oben angesprochen, sehr langsam absinkt oder, was bei rezenten Bildungen häufig beobachtet wurde und ohne weiteres auf fossile Bildungen übertragen werden kann (SCHEIDIG 1934), Kondensations-

zentren bildet und infolgedessen durch Tau oder Regen akkumuliert wird.

Weiter erlaubt die Steppenvegetation eine fortgesetzte Anhäufung, da zwischen den Halmen der Gräser der Staub sowohl festgehalten wird als auch in Ruhe, ohne Beeinträchtigung durch bodennahe Luftzirkulation absinken kann und weil die Gräser, mit der wachsenden Anhäufung schritthaltend, nach oben wachsen (Abb. 3-8). Die absterbenden feinen Wurzeln verursachen die für den LÖB charakteristische Durchsetzung mit feinsten, etwa senkrechten Rhizosolenien. Bei schnellerer Sedimentation bilden sich weniger Rhizosolenien aus, denn dadurch wird die an sich spärliche Vegetation begraben bzw. deren flacher Wurzelraum schneller höher gelegt.

Zwei Faktoren tragen dazu bei, dass der frisch abgelagerte Staub nicht sofort wieder durch Deflation resedimentiert wird, sondern eine relativ stabile Lagerung aufweist. Hierbei sind als erster die schützende Lage zwischen den Halmen der Gräser und als zweiter Faktor auftretende Kohäsionskräfte zwischen den kleinen Partikeln zu nennen, wobei sich die Kohäsionskräfte aus einem scheinbaren und einem wahren Kohäsionsanteil zusammensetzen. Der erste Anteil rührt von der Benetzung des Staubes bei der Ablagerung mit Wasser her, während der zweite Anteil auf van-der-Waals-Kräfte zwischen den einzelnen Partikeln zurückzuführen ist. Dies konnte SMALLEY (1966) durch Untersuchungen des Fliessverhaltens von Quarzkörnern zeigen. Beim Abfließen von Quarzkörnern aus einem Behälter mit 3 mm grosser Öffnung wiesen Körner mit 0,2 mm Durchmesser die grösste Durchflussrate auf, während bei abnehmender Korngrösse die Durchflussrate rasch abnahm und bei 0,06 mm auf Grund der rasch anwachsenden Kohäsion völlig zum Erliegen kam (Abb. 3-9).

Diese Versuche können als Bestätigung des mechanischen Verhaltens der fossilen Staubablagerungen in der primären Phase der LÖBbildung angesehen werden. Ferner geben sie Aufschluss über die Eigenart seines Vertikalgefüges (vgl. Abschn. 6.4). Die anschliessende sekundäre Phase enthält die Umbildung der Staubablagerung zum Lockergestein und ist eine petrologische Frage-



- A Durchfluß wird durch die größer werdenden Kohäsionskräfte gestoppt
- B maximale Durchflußrate
- C Durchfluß wird durch Blockierung der Öffnung gestoppt

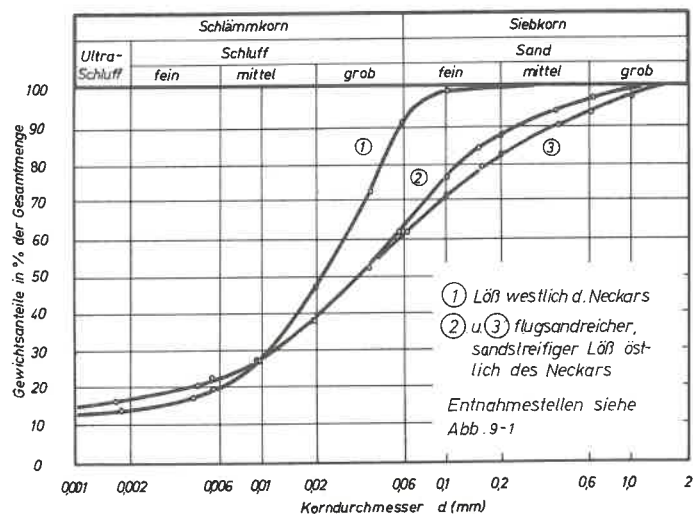
Abb.3-9. Veränderung der Durchflußrate eines Quarzsandes beim Durchfließen einer 3 mm großen Öffnung in Abhängigkeit vom Korndurchmesser (nach SMALLEY 1966)

stellung, weshalb an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen wird (vgl. Abschn. 4.1.1).

Abschliessend möchte ich noch den nach meiner Ansicht vermeintlichen Zusammenhang zwischen den heutigen Expositionsunterschieden der LÖBmächtigkeiten und den pleistozänen Transportwindrichtungen ansprechen. In den hügligen LÖBgebieten Nordwürttembergs ist an den nach Osten bis Nordosten exponierten Hängen die LÖBmächtigkeit häufig besonders gross, an den westexponierten gering oder gar fehlend. Aufgrund dieser Gegebenheit schliessen viele Autoren auf die pleistozäne Windrichtung, wobei sie von der Annahme einer vorherrschenden, leeseitigen Ablagerung ausgehen (BACHMANN/GWINNER 1971, WILD 1968, WAGNER 1960). Dabei wird aber die Tatsache übersehen, dass sich die mächtigsten und geschlossensten LÖBdecken auf den Muschelkalk- und Lettenkeuperhochflächen befinden und demzufolge die auslösenden Hauptabscheidungsbedingungen in einem Nachlassen der Windintensität zu suchen sind und somit ein gleichmässiges Absinken des antransportierten Staubes, wie anfangs ausführlich dargestellt, die Folge ist. In diesem Zusammenhang möchte ich feststellen, dass eine Ableitung der pleistozänen Antransportwindrichtung von den heutigen Expositionsunterschieden der LÖB-

mächtigkeiten nicht tragbar ist, sondern dass diese Unterschiede auf Abschwemmungen des Lösses von den stärker berechneten Luvhängen in der Folgezeit herrühren. Zudem wird meine Behauptung von Ergebnissen einer Laborversuchsreihe mit Kaiserstuhl-Löß untermauert, die ergeben hat, dass bei kleinen Windgeschwindigkeiten Luvseitablagerungen, bei grösseren aber Lee-seitablagerung eintritt (LOUIS 1968), was insofern mit meiner Auffassung übereinstimmt, dass sich gleichzeitige Leeseitablagerungen (ohne Luvseitablagerungen) und Ablagerungen in der Ebene ausschliessen.

Hinsichtlich dieses Tatbestandes wäre sowohl für sedimentologische als auch für petrogenetische Forschungen eine Untersuchung der pleistozänen Windrichtung im nordwürttembergischen Raum wünschenswert, da bisher nur Angaben vorliegen, die auf



Anmerkung:
Bezüglich des Begriffs "Ultraschluff" siehe Abschnitt 15.1.2

Abb.3-10. Siebsummenlinien von Primärlössen östlich und westlich des Neckars im Bereich der Heilbronner Mulde

dem vermeintlichen Zusammenhang des Expositionsunterschiedes der Lößmächtigkeiten beruhen.

Für den begrenzten Bereich der Heilbronner Mulde habe ich in Anlehnung an die Arbeit von SCHÖNHALS (1953), zunächst durch Korngrößenanalysen, den Versuch unternommen, die pleistozäne Windrichtung zu bestimmen. Dabei hat sich, was nicht anders zu erwarten war, die westliche Richtung bestätigt, was sich durch Erhöhung der Sandfraktion der Bodenproben östlich des Neckars, gegenüber denen der westlichen Seite, ausdrückte (Abb. 3-10).

Dieser Umstand ist auf das Ausblasen größerer Kornfraktionen aus dem Schotterbett des Neckars zurückzuführen. Ich bin mir darüber im klaren, dass die Aussagekraft dieser Untersuchung zu gering ist, um auf detaillierte Fragestellungen eine Antwort zu geben, aber immerhin zeigt sie Tendenzen auf, die durch weiterräumige, statistische Untersuchungen untermauert werden müssten.

3.2.5 Bodenbildung

Mit der Ablagerung des Lösses als subaërisches Gebilde, das heisst als Primärlöss, ist die geologische Geschichte dieses Lockergesteins nicht beendet. Im Laufe der Interglazialen und Postglazialen unterlag der Löß weiteren zahlreichen Veränderungen.

Jeder durch nachträgliche Veränderung des Gefüges und, bzw. oder, der mineralogischen Zusammensetzung nach Abschluss der zweiten Bildungsphase entstandene Lößboden wird als Sekundärlöss oder Lößlehm bezeichnet. Die Vorgänge seiner Entstehung ordnet man der dritten Bildungsphase, das heisst der Bodenbildung (vgl. Abschn. 3.2.1 und 4.1.2) zu, wobei unter Bodenbildung im geologisch bodenkundlichen Sprachgebrauch die klimabedingte petro- und biogene Umwandlung der festen Erdkruste verstanden wird (MURAWSKI 1972).

Ferner ist zwischen fossilen und rezenten Sekundärlössbildungen zu unterscheiden. Bei der ersteren entstehen sowohl Eluvialbö-

den, das heisst Sekundärlösse auf primärer Lagerstätte, als auch parautochthoner Sekundärlöß (wie die Zerfurchung von Lößgebieten zeigt (vgl. Abb. 2-1), findet Umlagerung durch fließendes Wasser statt → Schwemmlöß), bei der rezenten Bodenbildung jedoch meist nur Eluvialböden. Zur Unterscheidung der beiden Bodentypen kann die Absonderung in senkrechte, scharfkantige, prismatische Bodenkörper des an Ort und Stelle gebildeten Eluvialbodens gegenüber dem ausgesprochen "körnigen" Gefüge des verflochtenen Sekundärlösses herangezogen werden (FREISING 1951). Die Agrobodenkunde unterteilt die Gruppe der Eluvialböden weiter in Schwarzerden, Braunerden, Podsolböden, Humuskarbonatböden, Gleyböden und Moore.

Da die Bodenbildung bei Löß klimabedingt im Normalfall von oben nach unten vonstatten geht, haben sich bestimmte Bodenhorizonte ausgebildet. Diese Horizonte werden nach der internationalen Nomenklatur folgendermassen bezeichnet (NEUMANN 1964):

- A - Horizont (Mutterboden, Auslaugungshorizont)
- B - Horizont (Unterboden, Anreicherungshorizont)
- C - Horizont (Muttergestein)

Wie schon eingangs angeführt, beschränkt sich diese Untersuchung, wenn nicht ausdrücklich erwähnt, auf den Bereich des C-Horizontes.

3.3 Gliederung und Altersstellung

Im nördlichen Württemberg lassen sich, zum Teil nur an wenigen Stellen, drei durch zwei mächtige fossile Eluvialböden unterteilte Lössbeobachten. Noch ältere Lössbeobachten sind aber der Abtragung zum Opfer gefallen (FREISING 1951).

Während der Löß zu seiner Entstehung ein niederschlagarmes, ausgesprochen kaltes Klima voraussetzt, deuten die Eluvialböden

auf Warmzeiten hin. Sie müssen als das Ergebnis einer lange Zeit herrschenden, sich über weite Räume erstreckende Klimaverbesserung gewertet werden.

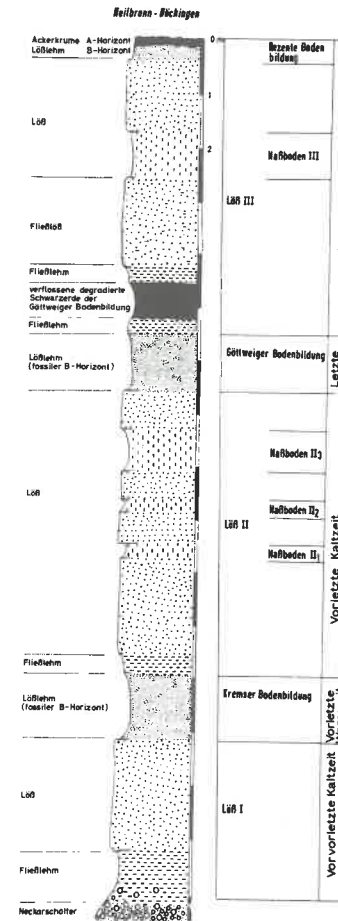


Abb.3-11. Lößprofil Heilbronn-Böckingen (nach FREISING 1949)

Ebenfalls auf eine durchgreifende Klimaveränderung ist die Entstehung der Nassböden zurückzuführen. Wird das kalte, aride Kli-

ma der Lössbildungsperiode von einem kühlen, niederschlagsreichen abgelöst, so setzt einmal die Lössanwehung aus und zum zweiten dringt das Niederschlagswasser in die Auftauzone ein, wird aber durch den darunterliegenden Dauerfrostboden aufgestaut. Durch diese Umstände bildet sich besagter Nassboden aus, der sich nur durch hellgraue, ausgewaschene Flecken und zahlreiche ockergelbe, fleckige oder streifige Verfärbungen vom Primärlöss unterscheidet.

System	Epoche	Stufe	Alter x10 ³				
QUARTÄR	HOLOZÄN		+2				
			-10				
	PLEISTOZÄN	JUNG-PLEISTOZÄN	Wülm - Eiszeit Allgemeine Gliederung	SPÄT-WÜRM	FREISING Gliederung nach	WÜRM II	-30
				MITTEL-WÜRM		WARMZEIT	
				FRÜH-WÜRM		WÜRM I	
			Riß/Wülm- Interglazial		-100		
			Riß- Eiszeit		-130		
					-230		

Abb.3-12. Stratigraphische Tabelle des Jungpleistozän und Holozän nach FREISING'scher Gliederung für den nordwürttembergischen Raum

Eine genaue Gliederung des nordwürttembergischen Lösses wurde von FREISING (1949) vorgenommen (Abb. 3-11). Was nun die zeitliche Stellung der einzelnen Lösses betrifft, so werden von verschiedenen Forschern bei der Zuordnung zu den einzelnen Eiszeiten unterschiedliche Meinungen vertreten. Auf jeden Fall prägt sich in der Schichtenfolge der klimatische Ablauf des letzten Abschnitts des Eiszeitalters klar und deutlich aus.

Um eine relevante Meinung wiederzugeben, sei hier auf FREISING (1951) verwiesen. Danach gehören die Lösses II und III der Wülm I- bzw. Wülm II-Kaltzeit an. Die Kremser und Göttweiger Bodenbildungen zeigen, wie schon erwähnt, Warmzeiten an, wobei die erstere dem Riß-Wülm-Interglazial angehört, die letztere dem Wülm I- Wülm II-Interstadial, das nach FREISING'scher Ansicht als Wülm I- Wülm II-Warmzeit bezeichnet werden muss (Abb. 3-12).

3.4 Vorbelastung

In den vorgehenden Erläuterungen konnte die Entstehungszeit des Lösses im Jung-Pleistozän nachgewiesen werden. In der nachfolgenden Epoche des Holozän sedimentierten keine weiteren Deckschichten mehr, ebenfalls muss eine Gletscherbedeckung ausgeschlossen werden. Daher wurde der Löss niemals geologisch vorbelastet. Ganz allgemein kann gesagt werden, dass er einen normal verdichteten Boden im Sinne der Bodenmechanik darstellt.

4. SEDIMENTPETROLOGISCHE GRUNDLAGEN

4.1 Petrogenese

4.1.1 Diagenese

In diesem Abschnitt sollen diejenigen Vorgänge angesprochen werden, die nach der Klassifikation des Abschnitts 3.2.1 in die zweite Bildungsphase des Lössbodens einzureihen sind.

An Abschnitt 3.2.4 anknüpfend, wo die primäre Bildungsphase beschrieben wurde, muss hier vom sedimentierten Staub ausgegangen werden, der in der Regel aufgrund seiner Genese nur mechanisch verwittert und daher noch reich an löslichen Substanzen ist. Insbesondere ist in diesem Zusammenhang der Kalzit zu erwähnen, dessen Herkunft auch heute noch von vielen Autoren verschieden

gedeutet wird. In letzter Zeit hat sich jedoch eine Ansicht herauskristallisiert, die im grossen und ganzen schon von SCHEIDIG (1935) vertreten wurde. Dabei handelt es sich um zwei Möglichkeiten der Kalkherkunft: Erstens der Kalk war schon primär, d.h. im Ausgangsmaterial vorhanden und kam so mit dem übrigen Lössstaub zur Ablagerung, zweitens eine Bildung von Kalzit im kalkfreien Muttergestein wird durch Verwitterung von Plagioklasen unter ariden Bedingungen ermöglicht, wobei in der Folge jedoch der Kalkgehalt wohl kaum 8 - 10 % überschreitet. Der Kalkgehalt des nordwürttembergischen Lösses ist sicher auf die erstere Ursache zurückzuführen.

BRUNNACKER (1957) hat zudem eine Abhängigkeit von der Sedimentationsgeschwindigkeit festgestellt. Demnach wird ein Löss mit etwas langsamerem Aufwuchs seiner Oberfläche bereits während der Ablagerung teilweise seines Kalkgehalts beraubt. So sind zusammenfassend für den Kalkgehalt des Lösses, der wiederum eine ausschlaggebende Bedeutung für die Diagenese und daraus resultierend für das heutige mechanische Verhalten dieses Bodens hat, folgende Faktoren massgebend:

- a) Zusammensetzung des Ausblasungsgesteins;
- b) Regionalklimatische und standörtliche Gegebenheiten;
- c) Sedimentationsgeschwindigkeit;
- d) Körnung.

Anhand dieser Gegebenheiten können die unterschiedlichen, auf eng begrenztem Raum auftretenden, strukturellen und die nach sich ziehenden mechanischen Eigenschaften ermessen werden. Es bleibt jedoch festzustellen, dass im Löss diagenetische Prozesse in geringerem Masse vom prozentualen Gehalt an Kalzit der Ablagerungsmasse abhängen, d.h., schon bei niedrigem Kalkgehalt treten diese Bildungsprozesse auf, was natürlich einen ausgedehnteren Vorgang bei gleichen Entstehungsbedingungen aber höheren Kalkgehalt nicht ausschliesst.

Wichtigste Grundlage für das Verständnis der Diagenese sind die Lösungsgleichgewichte des Kalzits. Die Lösungskonzentrationen stellen sich nach der Möglichkeit des CO₂-Zutritts durch die Luft ein, wobei neben dem CO₂-Partialdruck Aktivi-

täten beteiligt sind, die bei dieser Betrachtung wegen ihrer niedrigen Ionenstärken durch ihre entsprechenden Konzentrationen ausgedrückt werden (WEDEPOHL 1967).

Es gelten folgende Dissoziationskonstanten (Bedingung: 25°C, 1 atm):

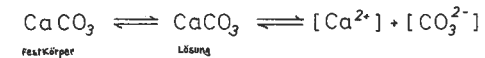
$$[Ca^{2+}][CO_3^{2-}] = K_{CaCO_3} = 10^{-8,3}$$

$$\frac{[H^+][HCO_3^-]}{[H_2CO_3^*]} = K_{H_2CO_3} = 10^{-6,4}$$

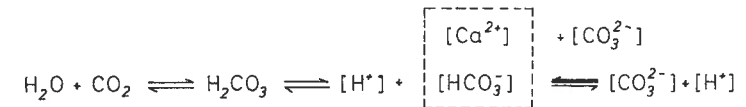
$$\frac{[H^+][CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} = K_{HCO_3^-} = 10^{-10,3}$$

$$[H^+][OH^-] = K_{H_2O} = 10^{-14}$$

Das Porenwasser im Löss sättigt sich, auch ohne Luftzutritt, an Ca²⁺ - und CO₃²⁻-Ionen (DAPPLES 1959):



Mit dem CO₂-Gehalt der Luft steht im Regenwasser eine temperaturabhängige Kohlensäurekonzentration im Gleichgewicht. Die Dissoziation der H₂CO₃ liefert zu gleichen Mengen HCO₃⁻ (Bikarbonationen) und H⁺ und sehr wenig CO₃²⁻ (Karbonat-Ionen):



Durch die Bildung von Wasserstoffionen sinkt der pH-Wert und damit entsprechend dem Löslichkeitsprodukt die Karbonationen-Konzentration. Dies hat wiederum zur Folge, dass der Ca²⁺ - Gehalt ansteigen muss. Nach den Dissoziationskonstanten und

der Gleichgewichtskonstante für das Verhältnis $\frac{H_2CO_3}{H_2O + CO_2}$ ergeben sich in Abhängigkeit vom pH-Wert folgende Bikarbonat-, Karbonat- und Kalzium-Ionenkonzentrationen:

$$[HCO_3^-] = \frac{10^{-11,4}}{[H^+]}$$

$$[CO_3^{2-}] = \frac{10^{-21,7}}{[H^+]^2}$$

$$[Ca^{2+}] = 10^{13,4} [H^+]^2$$

Diese Funktionen sind in Abb. 4-1 dargestellt, aus der auch sehr anschaulich die Erhöhung der Löslichkeit von $CaCO_3$ durch den äusseren CO_2 -Partialdruck gegenüber der Löslichkeit unter Luftabschluss hervorgeht. Eine Vergrösserung des CO_2 -Partialdrucks und damit der $[H_2CO_3]$ -Konzentration ist örtlich durch Oxydation organischer Substanzen möglich.

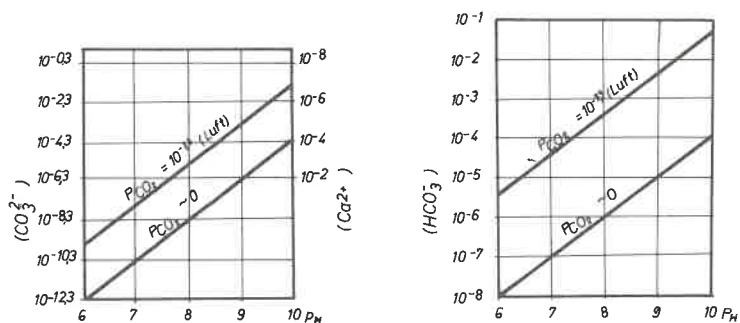
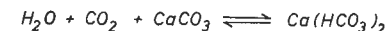


Abb.4-1. Karbonat-Gleichgewichte mit Ca in Abhängigkeit vom pH-Wert (aus WEDEPOHL 1967)

Die geologischen Vorgänge der Kalkauflösung und -ausscheidung stehen damit in Abhängigkeit von folgenden Faktoren:

	Kalkausscheidung	Kalklösung
Temperatur (Kohlendioxidlösung in Wasser)	Erhöhung	Erniedrigung
Druck (Porenraum - Kluftraum)	Erniedrigung	Erhöhung
CO_2 - Partialdruck (Oxydation organischer Substanzen)	Erniedrigung	Erhöhung

Daraus lässt sich der diagenetische Bildungsprozess bei LÖB folgendermassen ableiten. Unter kälteren klimatischen Bedingungen dringt CO_2 -haltiges Niederschlagswasser rasch in den porenraumreichen LÖB ein, wobei gleichzeitig der CO_2 -Partialdruck durch Verwesungsvorgänge im A-Horizont erhöht wird. Schwammartig wird das Wasser über den ganzen Horizont festgehalten, so dass sich die oben erläuterten Umbildungsprozesse abspielen können. Der schwerlösliche in detritischer Verteilung vorliegende Kalzit wird in das wasserlösliche Kalziumbikarbonat übergeführt:



Die Auflösung vollzieht sich, da sie nicht augenblicklich erfolgt, durch die ganze Masse des Gesteins hindurch ziemlich gleichmässig. Findet nun durch sommerlichen Temperaturanstieg ein Wasserentzug oder durch Saugwirkung des Windes eine Erniedrigung des CO_2 -Partialdruckes statt, so wird $CaCO_3$ wieder ausgefällt und zwar bevorzugt dort, wo Minimaldrücke herrschen, also vor allem in den verhältnismässig grösseren Hohlräumen mit gesteigerter Verdunstung. Dies sind in erster Linie vertikale Rhizosolenien. Sind grössere Hohlräume vorhanden, bilden sich charakteristische Konkretionen, die "LÖBmännchen" oder "LÖBkindel", aus. Der sommerliche Wasserentzug geht so weit, dass auch die kapillar festgehaltenen Wassermensken verdunsten und somit an den Berührungsstellen und an der Oberfläche der Körner Kalzit abgesetzt wird. Diese Erscheinung der Umhüllung der Ein-

zelkörner mit Kalzit wurde durch eine Untersuchung von SCHÖNHALS (1952) bestätigt, in der er eine Abhängigkeit des Kalkgehaltes von der Korngrösse bzw. der Kornoberfläche feststellte.

Gleichzeitig mit der Umlagerung des Kalzits oxydieren durch Anwesenheit des CO₂ zweiwertige Eisenverbindungen zu Eisenhydroxyden und kommen mit dem Kalk zur Ablagerung, so dass die Farbe des Lösses auf dem Durchscheinen des Quarzkornes durch das von hellbraunem Eisenhydroxyd durchsetzte Kalkhäutchen beruht (SCHÖNHALS 1952).

4.1.2 Postdiagenetische Veränderungen - Verwitterung

In den Perioden der Bodenbildung (s. Abschn. 3.2.5) erfolgt analog den Vorgängen in Abschnitt 4.1.1 eine verstärkte Wegführung des Kalkes. Die Folge ist eine Korngrößenverschiebung nach der feinkörnigen Seite hin aufgrund der Entfernung der die einzelnen Körnchen umhüllenden Kalkhäutchen. Auch die verkitteten Rhizosolenien werden zerstört. Erst wenn der Kalk vollständig weggeführt ist, setzt eine starke hydrolytische Verwitterung der Feldspäte und Glimmer ein, wobei sich sekundäre, stabile Tonminerale bilden (SCHÖNHALS 1952). Der Löss wird toniger, es bildet sich der schon angesprochene Sekundärlöss, der sich gegenüber dem Löss neben fehlendem Kalzit und reichlichem Anteil der Tonfraktion durch eine geringe Porosität und sein plastisches Verhalten auszeichnet. Die Verlehmung ist stets von einer Verbraunung begleitet, welche auf der Umbildung von Eisenhydroxyd beruht. Dieser Farbumschlag hat im allgemeinen keine fühlbare Änderung der physikalischen Eigenschaften des Bodens zur Folge.

HARRASOWITZ gibt neben SCHÖNHALS (1952) ein Kriterium an, demzufolge der echte Löss vom verwitterten Lösslehm durch Feststellung des Verwitterungsgrades unterschieden werden kann (SCHEIDIG 1934). Dabei geht er von der Überlegung aus, dass sich bei der Lössumbildung, ähnlich wie bei der Verwitterung der typischen Verwitterungsgesteine der

Kieselsäurefaktor $k_i = \frac{SiO_2}{Al_2O_3}$

und der Basenfaktor $b_a = \frac{CaO + Na_2O + K_2O}{Al_2O_3}$

ändert. Durch Auftragung dieser Quotienten in einem entsprechenden Koordinatensystem kann leicht eine Klassifizierung vorgenommen werden, da sich die Sekundärlösse deutlich durch einen Basenfaktor < 1 abtrennen (Abb. 4-2).

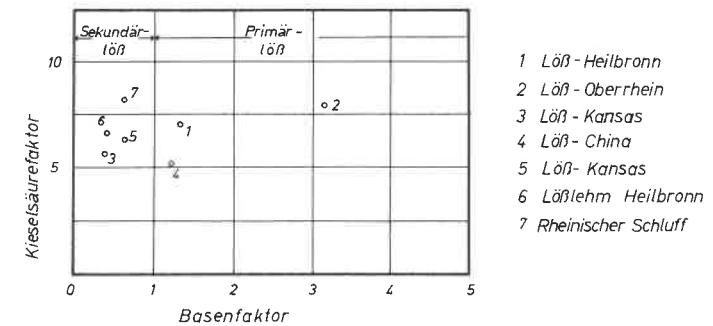


Abb.4-2. Klassifizierung der Lössse aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung (nach HARROSSOWITZ 1931)

4.2 Petrographie

In den Abschnitten 3.2 und 4.1.1 wurde schon deutlich, dass trotz einiger einheitlicher Merkmale grosse Unterschiede im Aufbau und in der Zusammensetzung der Lössse vorhanden sind, die sich wie schon betont, mehr oder weniger auf das bodenphysikalische Verhalten auswirken. In den beiden folgenden Abschnitten sollen durch Vergleich der Zusammensetzung von Lössen aus verschiedenen Regionen diese Unterschiede deutlich gemacht werden.

4.2.1 Chemische Zusammensetzung

Die Kenntnis der chemischen Zusammensetzung der verschiedenen Lockergesteine hat für den Baugrundingenieur im allgemeinen im Gegensatz zu der mineralogischen Zusammensetzung wenig Bedeutung. Beim Löss jedoch spielen sie eine wichtige Rolle, da Verwitterungsprozesse einen erheblichen Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften dieses Bodens haben (vgl. Abb. 4.2).

Bodenart	Löss	Löss	Löss	Löss	Lösslehm	Löss	Rheinischer Schluff
Herkunft	Heilbronn	Oberrhein Wasenweiler	Cherokee Kansas	Honan China	Heilbronn	Kansas	Niederrhein
Quelle	WILD 1968	Erläut. 2 1959	SCHIEDIG 1934	SCHIEDIG 1934	WILD 1968	DAPPLES 1959	CAQUOT/KÉRISEL 1967
SiO ₂	61,30	49,92	69,66	64,22	74,69	74,1	77,40
TiO ₂		0,52	1,72			13,04	
Al ₂ O ₃	8,73	6,41	12,71	18,1	11,25		9,40
Fe ₂ O ₃	3,57	3,43	4,89		5,53	3,25	3,70
MgO	3,38	3,23	1,28	2,09	1,44	1,68	1,00
CaO	8,28	17,48	1,09	6,31	0,82	3,05	1,50
Na ₂ O	3,04	1,01	1,17	0,22	3,95	1,60	1,24
K ₂ O		1,58	2,42	0,99		2,78	2,60
CO ₂	9,90	15,64		4,01			
P ₂ O ₅			0,15				
H ₂ O	1,10	1,38			2,30	0,51	1,40
N			0,11				

4.2.2 Mineralogische Zusammensetzung

Die nordamerikanischen Löss unterscheiden sich wesentlich von den mitteleuropäischen durch das Auftreten von Bruchstücken vulkanischer Gläser, sowie durch das Vorherrschen von Montmorillonit in der Tonfraktion. Bei den Lössen Mitteleuropas, mit Ausnahme der niederrheinischen Bucht, tritt Montmorillonit

höchstens untergeordnet auf, hier bildet stets Illit das wichtigste Tonmineral.

Bodenart	rhein. Schluff	Löss			
		USA	Israel	Südbayern	Heilbronn
Herkunft	Niederrhein Alsdorf				
Quelle	KAHL 1972	KOTZIAS 1963	KOTZIAS 1963	KALLENBACH 1965	ALAILY 1972 WILD 1968
Quarz	48	37	45	33-60	60-80
Feldspat	12-15	22	8	6-20	10-20
Glimmer	sehr wenig	2	3	9-38	
Karbonate		5	(25)	0-30	25
Montmorillonit	15	15	5	1-2	2
Kaolinit	10			1-2	sehr wenig
Illit				10-12	5

Aufgeschlüsselte Untersuchungen über Karbonatgehalt, Schwermineral-Assoziation und im Löss enthaltene Gesteinsbruchstücke führen zur regionalen Unterscheidung einzelner Lössgebiete voneinander und häufig zur Aufklärung der Frage nach der Herkunft des Ausgangsmaterials (vgl. Abschn. 3.2.2 und 5.2) (KALLENBACH 1965).

Für den Bereich der Heilbronner Mulde liegen von ALAILY (1972) detailliertere mineralogische Untersuchungsergebnisse vor, die in Abb. 4-3 dargestellt sind. Im Gegensatz zur bodenmechanischen Praxis wurden die Bodenproben für die Korngrößenbestimmung zur Elimination der Karbonate mit Salzsäure und zur Zerstörung von Aggregaten mit Ultraschall behandelt, so dass die Fraktionierung ein wahres Bild der Kornverteilung liefert (vgl. Teil IV A 17).

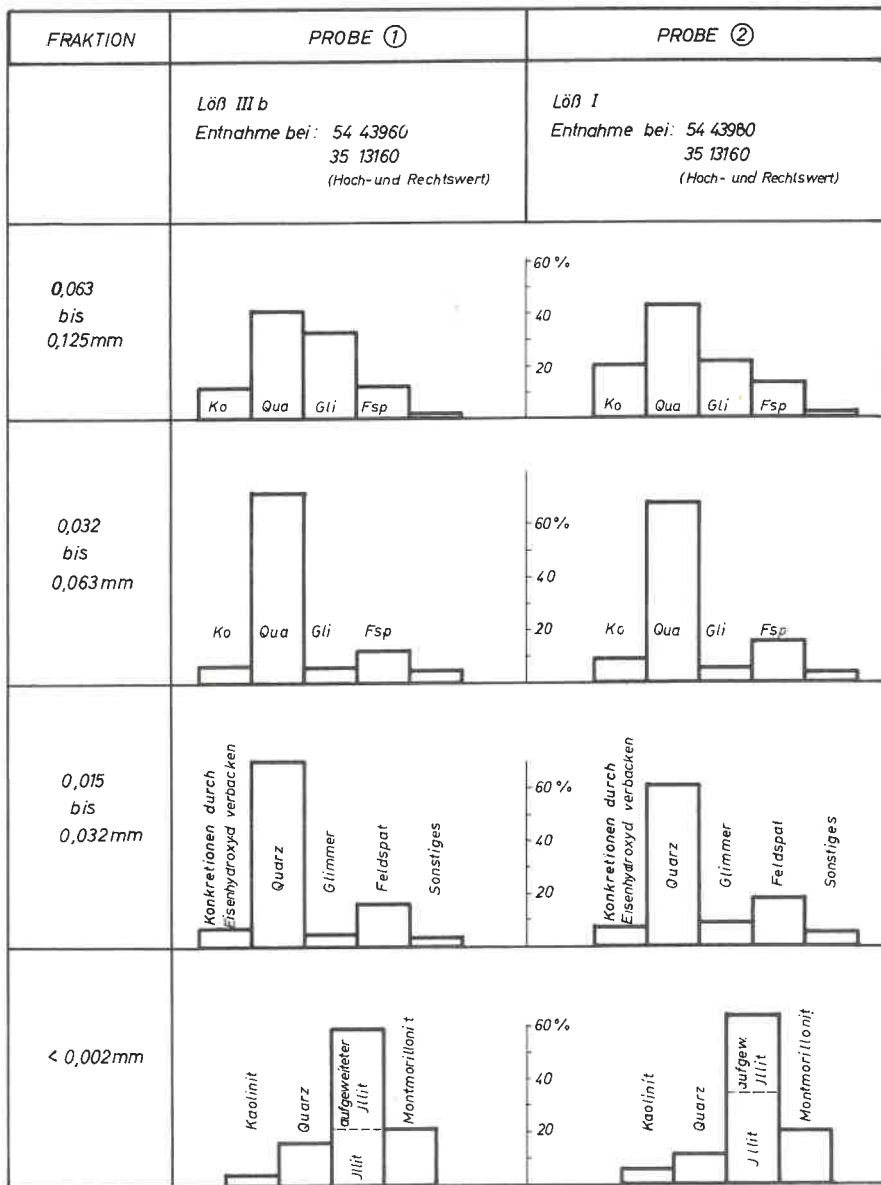


Abb.4-3. Mineralbestand (Gew.-%) der einzelnen Fraktionen zweier Lösses aus Heilbronn-Böckingen (aus ALAILY 1972)

4.2.3 Gefüge

Die Raumdaten im Inneren eines betrachteten Gesteinsbereiches beschreiben nach SANDER (1948) dessen Gefüge.

SCHEIDIG (1934) weist schon auf das eigenartige Gefüge des Lösses hin, benützt aber die Begriffe Textur und Struktur nicht im ursächlichen Zusammenhang (vgl. Fachwortglossar).

4.2.3.1 Textur

Die den Primärlöss aufbauenden Mineralaggregate, in der Hauptsache Quarz, zeigen keine bevorzugte Anordnung, das gleiche kann von ihrer räumlichen Verteilung behauptet werden, so dass zusammenfassend die Textur als richtungslos bezeichnet werden kann (Abb. 4-4).

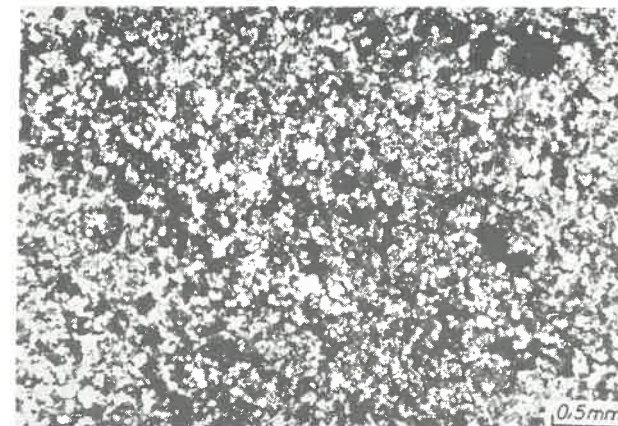


Abb.4-4. Richtungslose Textur des porösen Primärlösses (aus FÜCHTBAUER/MÜLLER 1970)

4.2.3.2 Struktur

Die einzelnen Staubpartikel sind im Löss nicht unter möglicher Ausnutzung des Porenraumes aufeinander gelagert, sondern berüh-

ren sich nur locker, was auf Vorgänge während der Staubablagerung (Abschn. 3.2.4) und der Diagenese (Abschn. 4.1.1) zurückzuführen ist. Die so erzeugte krümelige, körnige Struktur wird als Mikrostruktur des Lösses bezeichnet.



Abb.4-5. Makrostruktur des Lösses, hier gekennzeichnet durch Rhizosolenien

Megaskopisch besitzt der Löss die bereits erwähnte Makrostruktur. Kennzeichnend hierfür sind einerseits die Rhizosolenien und andererseits Ablösungsflächen senkrecht zur Ablagerungsfläche. Häufig, insbesondere unmittelbar ober- oder unterhalb von Verwitterungsböden, scheidet sich Kalzit in Spaltrissen und saigeren Schlotten ab, so dass zuweilen Erscheinungen ähnlich den geologischen Orgeln in Kalk- und Gipsgesteinen auftreten. Diese Besonderheit war im Profil Heilbronn-Böckingen des öfteren unterhalb des B-Horizonts zu beobachten. Derartige sekundäre, weisse Karbonatanreicherungen werden als "Biolosklaska" (russisch = Weissäuglein) bezeichnet (FUCHTBAUER/MÜLLER 1970).

4.2.4 Vorkommen und Verbreitung

Die Hauptverbreitung des Lösses liegt auf der nördlichen Halbkugel (Abb. 4-6). Deutliche Zusammenhänge zwischen Gebieten mit ehemaliger Gletscherbedeckung und den jetzigen Lössvorkommen sind offensichtlich. In Mitteleuropa liegen die Lössvorkommen zwischen den Grenzen der alpinen und skandinavischen Würmvereisung (Abb. 4-7).

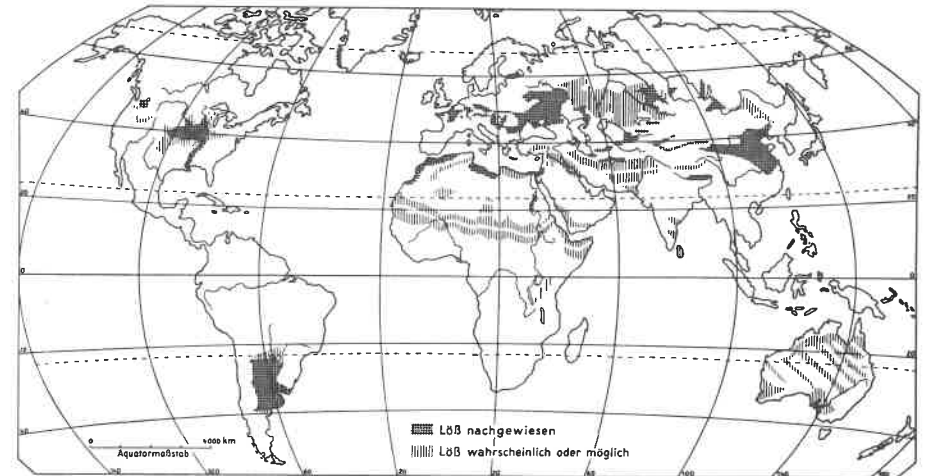


Abb.4-6. Verbreitung von Löss auf der Erde (aus LOUIS 1968)

Westlich von Heilbronn haben mächtige Lössablagerungen auf der Muschelkalk-Lettenkeuper-Hochfläche eine weite Verbreitung (Abb. 4-8), während auf den höhergelegenen Keuperbergen westlich von Heilbronn kein Löss sedimentierte, da das glaziale Klima die Ausbildung einer dichten Steppenvegetation nicht zuließ (FREISING 1949).

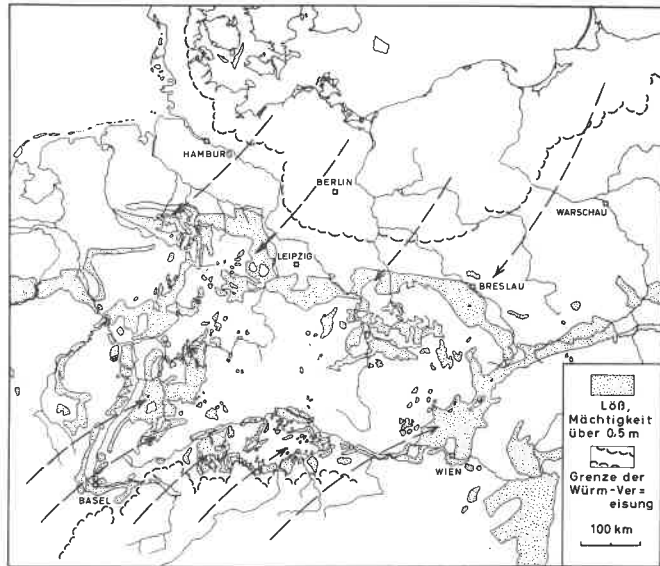


Abb.4-7. Lössablagerungen in Mitteleuropa während der letzten Eiszeit. Die Pfeile geben die Richtung der kalten Fallwinde an, die von den Eiskappen ausstrahlten (nach FÜCHTBAUER/MÜLLER 1970)

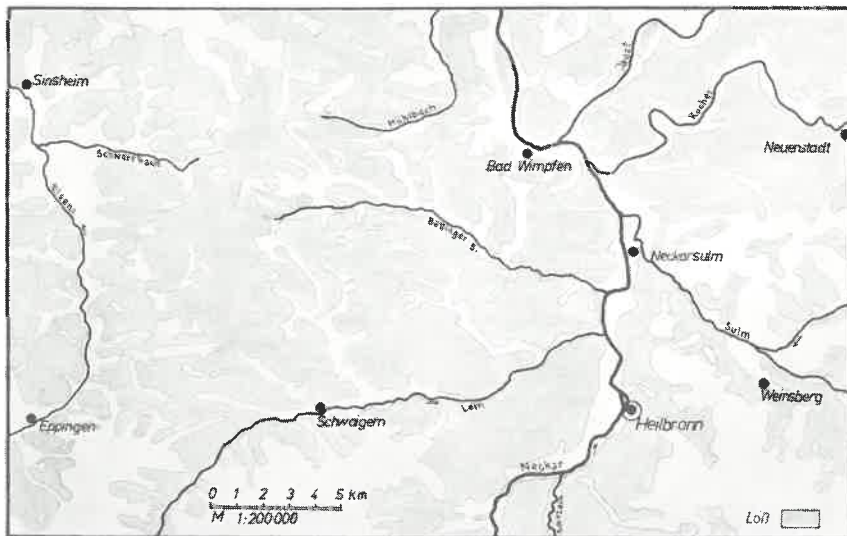


Abb.4-8. "Lößregion württembergisches Unterland" (vgl. Abschn. 5.2) (nach GEOLOGISCHER ÜBERSICHTSKARTE 1962)

5. EINFLUSS DER GENETISCHEN PROZESSE AUF DIE BODENEIGENSCHAFTEN

Die vorangegangenen Ausführungen über Genese und Diagenese des Lösses liessen zum Teil schon Beziehungen zwischen der Geologie und der Bodenmechanik erkennen. In diesem Abschnitt soll nun versucht werden, die Bedeutung dieser Vorgänge für die Belange der Bodenmechanik allgemeiner herauszustellen.

5.1 Korngrössenaufbau

Bedingt durch die zweimalige Seigerung während ihrer Verfrachtung zeichnen sich sämtliche Lösses durch eine einheitliche Korngrössenverteilung aus. Dieses Charakteristikum ist die Grundlage für weitere gemeinsame bodenmechanische Kenngrössen, wie die Plastizität, das Porenvolumen und die Wasseraufnahme. Aufgrund des durch die Korngrösse bedingten hohen Porenvolumens, das durch seine Makrostruktur (Rhizosolenien, vgl. Abschn. 3.2.4) zusätzlich eine Vergrösserung erfährt, und anderer Merkmale, auf die anschliessend eingegangen werden soll, neigen Lösses und lössartige Gesteine zu Setzungen und Senkungen. In Abb. 5-1 sind typische Kennzeichen für sackungsgefährdete und strukturstabile Lockergesteine zusammengefasst.

5.2 Vorschlag zur Bildung von "Lößregionen"

Wenn sich im Abschnitt 5.1 noch globale Gemeinsamkeiten aufzeigen liessen, so müssen bei den weiteren durch Genese oder Diagenese bedingte Eigentümlichkeiten beträchtliche Unterschiede festgestellt werden. Hinsichtlich dieses Umstandes, welcher sich schon in den Abschnitten 4.1.1 und 4.2.2 abzeichnete, wäre für die systematische Erfassung aller bodenmechanischen Kenngrössen eine Aufteilung der einzelnen Lößgebiete in Regionen unerlässlich. Die gewonnenen spezifischen Eigenschaften und Korrelationen müssten katalogisiert und im Begleittext zur "Regionenkarte", einer Art Baugrunderkarte, zusammengefasst werden. In

Merkmale sackungsgefährdeter Lockergesteine	Merkmale strukturstabiler Lockergesteine
<p>Helle Färbung in trockenem Zustand</p> <p>Echter Staubcharakter Qualitatives oder quantitatives Fehlen des kolloiden Anteils</p> <p>Quarz-kaolinische Zusammensetzung, kalkig, Versalzung über 0,3 %</p> <p>Montmorillonitische Zusammensetzung des Tonanteils, Versalzung unter 0,3 %</p> <p>Natürliches Porenvolumen über 45 %, gut ausgeprägte Makroporigkeit</p> <p>Natürlicher Wassergehalt unterhalb der Ausrollgrenze oder der maximalen molekularen Wasseraufnahmefähigkeit</p> <p>Plastizität I_p 14 %</p> <p>Negativer Kennwert für die Verdichtung K_d (kleiner als Null)</p>	<p>Rotbraune, braune oder rote Färbung in trockenem Zustand</p> <p>Anteil der Tonfraktion über 15 bis 20 %</p> <p>Natürliches Porenvolumen unter 40 % keine Makroporigkeit</p> <p>Natürlicher Wassergehalt erheblich über der Ausrollgrenze oder der maximalen molekularen Wasseraufnahmefähigkeit</p> <p>Plastizität I_p 14 %</p> <p>Positiver Kennwert der Verdichtung K_d (gewöhnlich über + 0,25)</p>

Abb.5-1. Spezifische Merkmale sackungsgefährdeter und strukturstabiler Lockergesteine (nach PRIKLONSKI 1952 aus REUTER 1965)

diesem Sinne kann der Bereich der "Heilbronner Mulde" einschliesslich des "Württembergischen Unterlandes" als "Lößregion" aufgefasst werden. Bei der praktischen Bearbeitung eines bestimmten Falles wäre so eine entsprechende Einschränkung der Untersuchungen möglich.

Ingenieurgeologische Erkundungen grossflächiger Lößgebiete wurden bisher nur in den USA (KAHL 1972), Ungarn (JESENAK 1965)

und im Rheinland (KAHL 1972) unternommen, doch wurden die Untersuchungsgebiete nicht nach genetischen Gesichtspunkten in der von mir vertretenen Art gewählt, so dass nicht unbeträchtliche Schwankungen der einzelnen Korrelationskoeffizienten die Folge waren. HEITFELD führt in KAHL (1972) diese unbefriedigenden Ergebnisse auf mangelnde vertikale Gliederung zurück; dies mag zum Teil zutreffen, doch müssen nach den bisherigen Ausführungen die Gründe in der fragmentarischen horizontalen Gliederung zu suchen sein, zumal KAHL (1972) für meine Begriffe eine ausreichende Vertikalgliederung getroffen hatte.

5.3 Mineralchemischer Aufbau und Gefüge

Bei Lössen treten zwei Mineralkomponenten, die auf ihre bodenphysikalische Eigenschaften erheblichen Einfluss haben, in Erscheinung.

In erster Linie seien hier die Karbonate genannt. Durch post-sedimentäre Veränderungen (vgl. Abschn. 4.1.1) innerhalb der Staubablagerung erfährt der Löss durch Auskleidung der Rhizosolenien und Ummantelung hauptsächlich der kleineren Kornfraktionen eine erhebliche Verfestigung, die eine Abhängigkeit von der Höhe des Kalkgehaltes zeigt. Folgerichtig bezeichnet SCHEIDIG (1934) Löss als ein Vierphasensystem (Feststoff + Wasser + Luft + Kittmasse), dem ich - allerdings mit einer Ergänzung - voll zustimmen kann. Wie jedoch alle Autoren, so misst auch SCHEIDIG den kalkverkitteten Rhizosolenien keinerlei mechanische Bedeutung bei. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird sich aber herausstellen, dass die vierte Phase richtiger als Karbonatphase, und zwar mit den beiden Komponenten "Kittmasse" und "kalkverkittete Rhizosolenien", zu bezeichnen ist (vgl. Abschn. 6.4 und 15). Im folgenden soll nur noch der Begriff "Rhizosolenie" für die zweite Karbonatphase gebraucht werden, da beim Primärlöss eine Verkittung vorausgesetzt wird.

Nicht unerwähnt sollte hier auch die vermeintliche Analogie zwischen der Stabilität des Lösses aufgrund seiner Karbonatphase und der Stabilität von Schluffen nach Kalkhydroxydzugabe bleiben, wie sie von ODENDAHL (1969) und anderen Bodenmechanikern vertre-

ten wird. Im Gegensatz zum Löss spielen bei der Strukturumwandlung und Verfestigung von Schluffen mit Kalziumhydroxyd Kalziumkarbonatneubildungen keine oder nur eine sehr untergeordnete Rolle (BRAND 1962). Vielmehr wird durch einen Ionenaustausch eine strukturelle Wasserumlagerung in den Tonmineralien erzielt. Dies hat zur Folge, dass die Tonmineralien, in der Hauptsache Montmorillonite, einen Teil des vorher gebundenen Wassers abgeben, was einer inneren Austrocknung und damit einer Stabilitätsverbesserung entspricht. In diesem Zusammenhang kann natürlich nicht ausgeschlossen werden, dass im Primärlöss Süddeutschlands ebenfalls ein Ionenaustausch gleicher Art stattgefunden hat, doch wäre eine dadurch bedingte Stabilitätsverbesserung wegen des minimalen Montmorillonitanteils (vgl. Abschn. 4.2.2) für seine bodenmechanischen Kenngrößen ohne Bedeutung.

Andere Verhältnisse in bezug auf die Verkittung der Lösspartikel liegen bei den nordamerikanischen Lössen vor, die durch Anwesenheit von grösseren Anteilen an Montmorillonit gekennzeichnet sind (vgl. Abschn. 4.2.2), so dass eine Kornverbackung fast ausschliesslich durch den hohen Tonanteil bedingt ist. Dieser Montmorillonit-Gehalt wird auf vulkanische Gläser zurückgeführt, die im Löss verwittert und in Tonminerale umgesetzt worden sind (SWINEFORD/FRYE 1955). Durch Vergleich der chemischen Zusammensetzung lässt sich im Kieselsäure-Basenfaktor-Diagramm diese fortgeschrittenere Verwitterung im Gegensatz zu unseren Lössen erkennen (vgl. Abb. 4-2).

5.4 Physikalische Anisotropie

Ausgehend von der Kornverteilung und der Textur könnte man geneigt sein anzunehmen, Löss sei annähernd als isotropes Lockergestein zu betrachten. Wie in den Abschnitten 3.2.4 und 4.1.1 ausgeführt, ist dem aber nicht so. Löss muss im physikalischen Sinne als ausgesprochen anisotrop bezeichnet werden, was unter anderem durch seinen horizontalen ($K = 4,5 \cdot 10^{-4}$ cm/s) und vertikalen Druchlässigkeitsbeiwert ($K = 1,2 \cdot 10^{-3}$ cm/s) ausgedrückt wird. In diesem Zusammenhang sollte nicht unerwähnt bleiben, dass beim Löss aus der Porenzahl nicht auf die Durchlässigkeit geschlossen werden kann.

Weiter tritt die Anisotropie durch Ablösungsflächen senkrecht zur Ablagerungsfläche in Erscheinung, die ein Merkmal darstellen und massgeblich durch zwei Faktoren bestimmt werden. Erstens verringern sich zwangsläufig durch die Auflast des Hangenden die Porenräume von oben nach unten mehr als in seitlicher Richtung, so dass im Korngerüst ein Überwiegen der Zementation in vertikaler Richtung die Folge ist. Als zweiter Faktor muss das System der Rhizosolenien genannt werden, das durch Trennung des Mineralbestandes eine weitere Abnahme der Bindekräfte in horizontaler Richtung verursacht.

5.5 Entwurf eines Strukturmodells

Für die weiteren Betrachtungen kann mit Bezug auf die bisherigen Ausführungen von dem in den Abb. 5-2 und 5-3 gezeichneten Strukturmodell ausgegangen werden. Dabei kann der Anteil der Aggregate je nach Kalkgehalt bis zu 30 % des Gesamtvolumens erreichen (REUTER 1965).

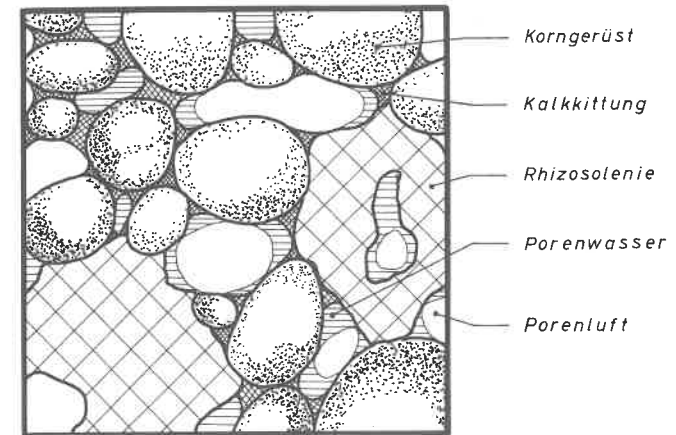


Abb.5-2. Strukturmodell eines Primärlösses

In der stereoskopischen Darstellung kommt deutlich zum Ausdruck, wie der Löss von Rhizosolenien dübelartig durchzogen wird.

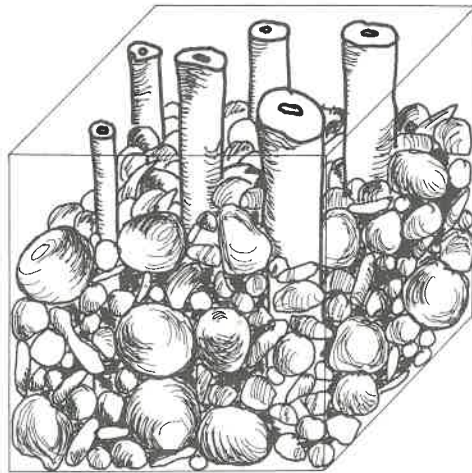
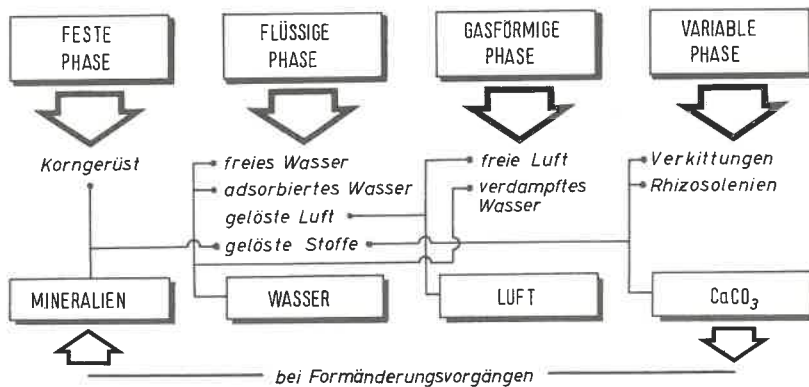


Abb.5-3. Stereoskopisches Strukturmodell eines Primärlösses

6. PHASENSYSTEM DES LÖSSES

Infolge seines spezifischen Aufbaus kann Löss nicht als bindiger Erdstoff im Sinne der Definition eines Dreiphasensystems betrachtet werden. Er nimmt vielmehr eine Ausnahmestellung ein



(vgl. Abschn. 5.3) und setzt sich aus einer festen, einer flüssigen, einer gasförmigen und einer variablen (Karbonat-) Phase zusammen.

6.1 Feste Phase

Die feste Phase wird vom Korngerüst gebildet. Es setzt sich aus einzelnen, sich meist gegenseitig abstützenden Bodenkörnern zusammen, die aus Mineralien kristalliner Struktur bestehen.

Im Inneren der kristallinen Bodenkörner sind die einzelnen Atome infolge des gitterartigen Aufbaus der Moleküle gegenseitig gebunden. An der Oberfläche ist dieses Gleichgewicht gestört, da die Bindungskräfte der äusseren Atomschicht nach aussen noch frei sind. Je grösser die spezifische Oberfläche wird, d.h. je mehr sich der Korndurchmesser verringert, desto grösser werden bei annähernd gleichem Mineralbestand die nach aussen gerichteten Bindekräfte (SMALLEY 1966, vgl. Absch. 3.2.4).

6.2 Flüssige Phase

Die flüssige Phase wird durch das Porenwasser dargestellt. Da bei Löss Fraktionen mit ausgeprägtem Adsorptionsvermögen nur in verschwindend geringem Prozentsatz vorhanden sind, tritt Wasser hauptsächlich nur als "freies Wasser" auf. Dieses Porenwasser hält sich zumeist in den kleineren Kapillaren auf, da der Dampfdruck in grossen Kapillaren höher als in kleinen ist, so dass Wasserdampf aus grossen Kapillaren in kleinere kondensiert (ODENDAHL 1969). In einem idealisierten Modellboden stellt sich daher ein Gleichgewichtszustand ein, bei dem die kleinen Kapillaren mit Porenwasser, die grossen mit Wasser und Luft gefüllt sind. Die Krümmung der Oberfläche dieses Porenwassers setzt sich mit dem Dampfdruck des Porenwassers ins Gleichgewicht, so dass der Löss nach aussen trocken erscheint (BERNATZIK 1947). Durch die infolge der Oberflächenspannung konkav gekrümmten Menisken entstehen im Porenwasser Zugspannungen, die im Korngerüst entsprechend grosse, gleichgewichtshaltende Druckkräfte hervorrufen, die man nach TERZAGHI (1925) als Kapillardrücke bezeichnet.

Tritt nun eine Austrocknung des Bodenkörpers ein, so vergrössert sich infolge des sinkenden Dampfdruckes die Krümmung der Menisken, d.h. diese werden kleiner. Ist die Austrocknung so weit fortgeschritten, dass nur noch wenige Moleküle den Meniskus bilden, dann kann in diesem Stadium das Wasser als völlig fester Körper angesehen werden, der die Kugeln, wie ein Zement, miteinander verkittet (BERNATZIK 1947). Wenn in einem früheren Stadium die Kugeln noch gegeneinander verschoben werden konnten, ohne dass ihr Zusammenhalt verloren ging, so ist das jetzt nicht mehr der Fall. Das Wasser bricht wie ein fester Körper, um aber augenblicklich zu verdampfen, da die Meniskuskrümmung beim Bruch verschwindet.

Die Frage nach der Grösse des Kapillardruckes ist noch nicht restlos geklärt. Experimentelle Untersuchungen (KANE 1973) haben im Kapillarwasser von Löss Zugspannungen in der Grössenordnung von 0 bei Wassersättigung und 21 kp/cm bei nahezu ausgetrockneten Lössböden ergeben (Abb. 6-1).

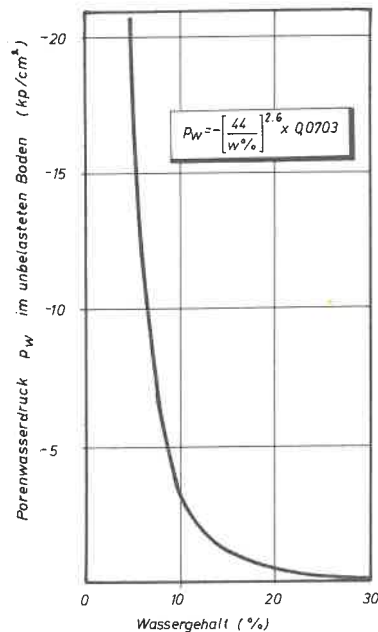


Abb.6-1. Beziehung zwischen Porenwasserdruck und Wassergehalt bei nordamerikanischen Lössen (aus KANE 1973)

Weiter stellte sich heraus, dass während der Zusammendrückung keine Schwankung des Porenwasserdruckes vor sich geht, ausser wenn der Sättigungsgrad 80 bis 90 % überschreitet. Dies kommt einer Unabhängigkeit der Kapillarspannungen vom Sättigungsgrad gleich (Abb. 6-2).

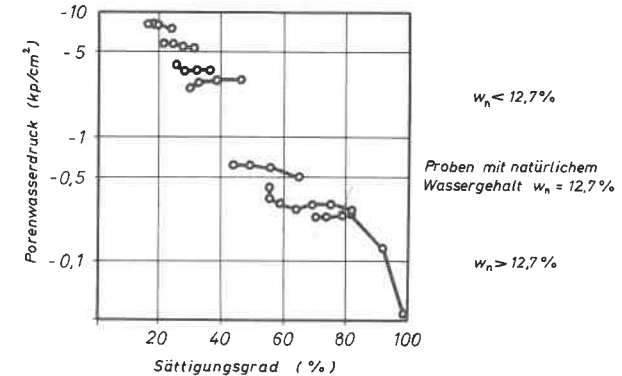


Abb.6-2. Sättigungsgrad in Abhängigkeit des Porenwasserdruckes bei nordamerikanischen Lössen (aus KANE 1973)

6.3 Gasförmige Phase

Zur gasförmigen Phase gehören die Porenluft und das verdampfte Porenwasser. Wie in Abschnitt 6.2 bereits erläutert, stellt sich ein Gleichgewichtszustand zwischen der Krümmung der Menisken (Oberflächenspannung) und dem Dampfdruck des Porenwassers ein, wobei aber ein Druckunterschied in beiden Phasen besteht. Dieser Druckunterschied erschwert die Bestimmung der Porendruckspannungen in nicht wassergesättigten Böden, da eine getrennte Messung erforderlich ist.

6.4 Variable Phase - Karbonatphase

Die Bezeichnung "variable Phase" wurde im Hinblick auf ihre wechselnde Bedeutung bei Formänderungsvorgängen gewählt. Nach mineralogischen Gesichtspunkten musste diese Phase der festen

Phase untergeordnet werden, doch unterscheidet sich ihr mechanisches Verhalten grundlegend von dieser, so dass eine Trennung als gerechtfertigt angesehen werden kann.

Zur variablen Phase, die auch als Karbonatphase bezeichnet wird, gehören ausser der Kalkkittmasse die Rhizosolenien an (vgl. Abschn. 5.3).

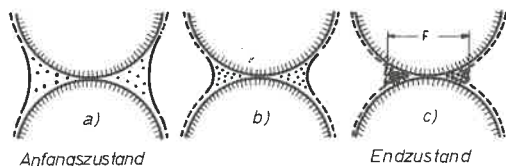


Abb.6-3. Einfluß des Kalziumkarbonatgehalts im Porenwasser auf die Festigkeit des Korngerüsts (nach BERNATZIK 1947)

Zur Entstehung der Kalkkittung sollte als Ergänzung des Abschnittes 4.1.1 noch folgendes bemerkt werden. Mit einer Erniedrigung des CO₂-Partialdrucks bei der Kalziumkarbonatabscheidung geht eine Verringerung des Dampfdrucks der Porenatmosphäre einher, so dass die durch Brown'sche Bewegung in Schwebe gehaltenen CaCO₃-Moleküle auf einen immer kleineren Raum zusammengedrängt werden (Abb. 6-3 b). Das Vorhandensein der Karbonatab-

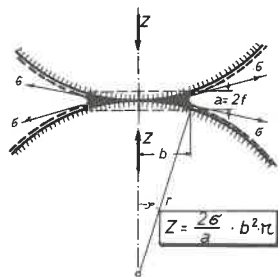


Abb.6-4. Wirkung der Oberflächenspannung zwischen zwei Kugeln (nach SCHIEL 1943)

scheidungen hindert in der Folge eine weitere Verkleinerung der Menisken um die Berührungspunkte der grossen Kugeln und der steigende Unterdruck im Wasser wirkt sich auf die ungefähr gleichbleibende Fläche F aus. Dadurch steigt die Kapillarkraft Z (Abb. 6-4) sehr stark an, woraus eine Vorspannung des Korngerüsts, die später als echte Kohäsion in Erscheinung tritt, resultiert. Je mehr Kalziumkarbonat in Lösung war und sich bei diesen Vorgängen abscheidet, um so grösser wird F und daher auch die erhaltene Festigkeit.

7. MECHANISCHE PROBLEME BEI DER ERFASSUNG VON BODENEIGENSCHAFTEN

7.1 Das Problem der Spannungsverteilung in mehrphasigen Böden

Die Erforschung des Verhaltens ungesättigter Böden hat gerade erst begonnen. Nachdem sich TERZAGHI's Prinzip der effektiven Spannungen bei gesättigten Böden als gültig erwiesen hatte, versuchte man folgerichtig, es auf Mehrphasen-Böden (Dreiphasen-Böden) auszudehnen. Dabei entstand aber hinsichtlich des Druckunterschiedes zwischen der flüssigen und gasförmigen Phase (vgl. Abschn. 6.3) die Schwierigkeit einer geschlossenen Formulierung. Eine Gleichung für effektive Spannungen in allgemeiner Form stellte BISHOP (1960), gegründet auf zahlreiche Untersuchungen anderer Autoren, auf:

$$\sigma' = \sigma - p_l + \alpha (p_l - p_w)$$

Hierin bedeuten:

- σ' = effektive Spannung
- σ = totale Spannung
- p_w = Porenwasserdruck
- p_l = Porenluftdruck
- α = Parameter, in der Grösse zwischen 0 und 1, abhängig vom Sättigungsgrad und Bodenart

Die Eigenschaft des Lösses, sein Volumen bei Belastung plötzlich zu verringern (vgl. Abschn. 15.2), deutet darauf hin, dass die von BISHOP für einen Dreiphasen-Boden gefundene Beziehung nicht ohne weiteres auf sein Vierphasensystem übertragen werden kann.

7.2 Scherfestigkeit

Die Trennung der Scherfestigkeit in einen proportionalen Reibungsanteil und einen von der Normalspannung unabhängigen Kohäsionsanteil wird seit einigen Jahren in zunehmendem Masse kritisiert. Dabei richtet sich die Kritik gegen die im Mohrschen Spannungsdiagramm auf der τ -Ordinate erscheinende Kohäsion, die im Gegensatz zum physikalischen Begriff "Kohäsion" die Scherfestigkeit eines normalspannungslosen Bodens bezeichnet.

Ebenso wie BOROWOCKA (1962) sind auch andere Forscher der Ansicht, dass die Scherfestigkeit eines Bodens allein auf "Reibung" zurückzuführen sei. Hiernach wird zwischen nichtbindigen und bindigen Böden kein Unterschied gemacht; in beiden Fällen wird die Scherfestigkeit nur als Funktion wirksamer Spannungen dargestellt. Die auftretenden Kohäsionskräfte werden im Sinne der Fest-Körperphysik als innerer Unterdruck - zu vergleichen mit den Kapillarspannungen - gedeutet, die entsprechende wirksame Druckspannungen im Korngerüst hervorrufen. Die Grösse dieser Druckspannungen wird nach LAMBE (s. ODENDAHL 1969) von folgenden Faktoren beeinflusst:

- Salzbildung, d.h. Zusammenkleben der Mineralien durch die van-der-Waalschen Kräfte beim Vorhandensein von Elektrolyten;
- Elektrostatische Anziehung zwischen unterschiedlich geladenen Bodenteilchen;
- Kristallbildung;
- Zementierung.

Für die Scherfestigkeit eines Bodens wurde daher folgende Gleichung vorgeschlagen (BOROWICKA 1962):

$$\tau = (\sigma'_B + \sigma'_n) \tan \phi'$$

Hierin bedeuten;

- σ'_B - wirksame hydrostatische Druckspannungen infolge Kohäsion;
- σ'_n - wirksame Normalspannung in der Scherfuge infolge Belastung;
- ϕ' - wirksamer Winkel der inneren Reibung.

Diese Theorie der Existenz der durch innere Anziehungskräfte ausgelösten Druckspannungen steht, wenn man sie auf Primärlöss anwendet, im Einklang mit der Vorstellung, wonach der Kollapsmechanismus dieser Bodenart ein Scherphänomen ist (vgl. Abschn. 11.2.2.1), und die Bindekräfte auf die Kalziumkarbonat-Zementation zurückzuführen sind (vgl. Abschn. 6.4).

Weitere Untersuchungen haben ferner die allgemeine Gültigkeit des Coulombschen Reibungsgesetzes in Frage gestellt.

Trotz der vorangegangenen Ausführungen wurde bei der Versuchsauswertung in Teil III die Trennung der Scherfestigkeit in Reibung und Haftfestigkeit beibehalten, um Angaben für die zur Zeit gängigen Rechenverfahren liefern zu können.

TEIL II

UNTERSUCHUNGS- PROGRAMM

8. AUSWAHL DER VERSUCHE

Da eine Entnahme ungestörter Bodenproben mit anschliessendem Transport ins Labor ohne eine Teilstörung des Gefüges fraglich erschien und ausserdem aufgrund der in Teil I aufgezeigten Umstände ein anderes Formänderungsverhalten des Lösses im Verband als im Versuchskörper zu erwarten war, bot sich ein kombiniertes Insitu-Labor-Untersuchungsprogramm an. Löss stellt im natürlichen Zustand keinen wassergesättigten Boden dar und da eine künstliche Wassersättigung mit Sicherheit eine Gefügeveränderung hervorgerufen hätte, war dieses Untersuchungsprogramm von vornherein in bezug auf die Spannungsermittlung in der flüssigen Phase gewissen Einschränkungen unterworfen, dadurch bedingt, dass keine entsprechenden Messeinrichtungen zur Verfügung standen.

Als Feldversuche kamen im Rahmen dieser Untersuchung Probebelastungen und grossmaßstäbliche Scherversuche in Frage, wobei auf letztere, die wesentlich zur Beantwortung der Fragestellung beigetragen hätten, aus zeitlichen Gründen verzichtet werden musste. Zur Ausführung kamen lediglich Plattendruckversuche mit Lastplattendurchmessern von 35,7 und 60 cm.

Die Durchführung der Plattendruckversuche geschah ca. einen Meter über der Grenze Nassboden III - Löss IIIb (vgl. Abschn. 3.3), so dass ein Einfluss des Nassbodens auf die Ergebnisse der Probebelastung nicht auszuschliessen war. Aus diesem Grund wurde dieser Boden bei den anschliessend im Labor durchgeführten Normalversuchen zusätzlich zum Löss IIIb in das Untersuchungsprogramm mit aufgenommen.

Dabei beschränkte sich der Umfang der Normalversuche für den Nassboden III auf die Zustandsbeschreibung und Oedometerversuche, da im Verlauf der Untersuchung kein Unterschied der Eigenschaften sowohl im Ruhezustand als auch unter Belastung mit behinderter Seitendehnung festgestellt werden konnte, während für den Löss IIIb das Programm auf Zylinderdruckversuche und dreiaxiale Druckversuche, mit der grössten Hauptspannung senkrecht und parallel zur Sedimentationsebene, erweitert wurde.

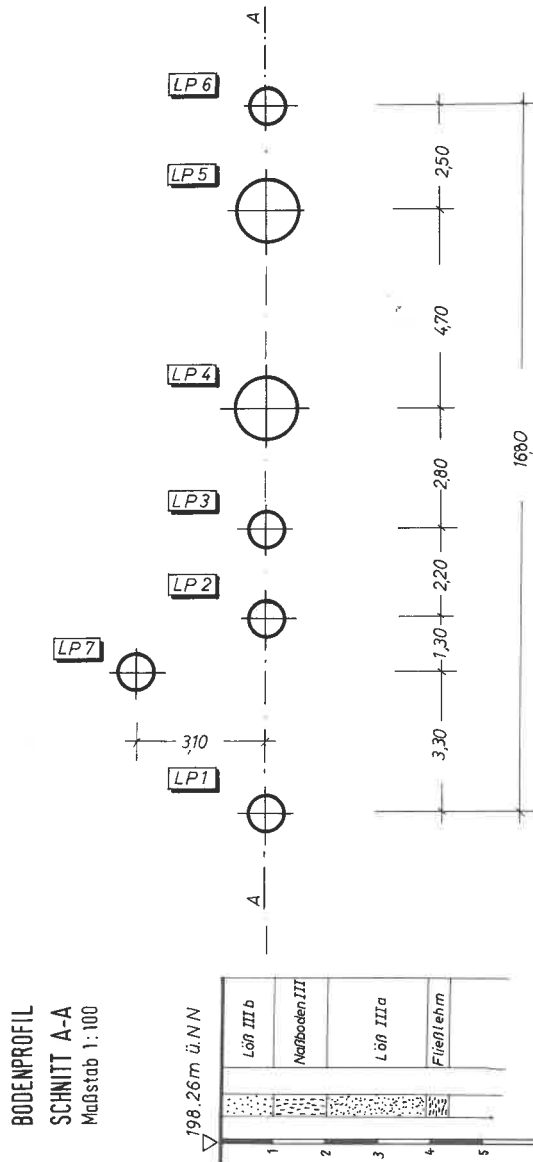
Den Schwerpunkt der Untersuchungen bildeten Oedometerversuche mit wechselnden Belastungsendstufen und anschliessender Kornverteilungsbestimmung mit spezieller Bodenaufbereitung, um den bei den Normalversuchen eindeutig festgestellten Setzungskollaps zu konkretisieren (vgl. Abschn. 10.2.2.1). Abschliessend folgte eine Korngrössenbestimmung mit verschiedener, vorheriger Probenaufbereitung, die den Einfluss der vierten Bodenphase auf die Kornverteilung veranschaulichen sollte.

9. FELDUNTERSUCHUNGEN

9.1 Versuchsgelände

Anfänglich bestanden grosse Schwierigkeiten, ein geeignetes Gelände mit anstehendem Primärlöss ausfindig zu machen. Nachdem Schürfungen grösseren Ausmasses (Stelle 2, Abb. 9-2) nicht zum gewünschten Erfolg führten, da nur sandstreifiger Löss angetroffen wurde, bestand doch noch dank des Entgegenkommens der Ziegelei Heilbronn-Böckingen eine Möglichkeit, die geplanten Lastplattendruckversuche auszuführen. Auf ihrem Abbaugelände (Stelle 1, Abb. 9-2) wurde ein vom A- und B-Horizont befreites Versuchsfeld zur Verfügung gestellt.

Die Anordnung der Versuchsstellen, sowie die Untergrundverhältnisse sind aus Abb. 9-1 zu entnehmen.



Die Achse der Versuchspunkte wurde in bezug auf die Himmelsrichtung so gewählt, daß die Versuchspunkte bei mit-täglicher Sonneneinstrahlung im Schatten des Belastungs-wagens lagen.

GRUNDRIS
VERSUCHSFELD
Maßstab 1:125

Abb.9-1. Versuchsfeld für Plattendruckversuche und Bodenprofil unter der Lastangriffsfläche

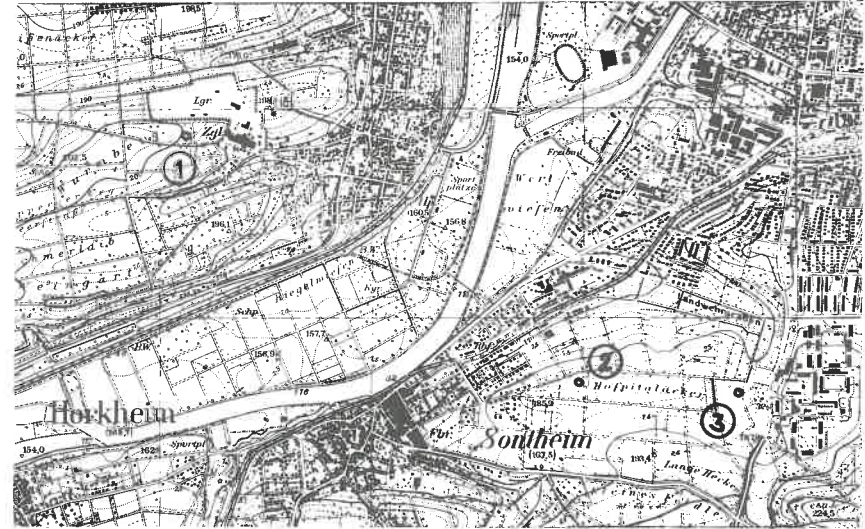


Abb.9-2. Standort des Versuchsgeländes und Entnahmestellen der Bodenproben für die Kornverteilungslinie in Abb.3-10. Ausschnitt aus Top. Karte 1:25 000 - 6821 Heilbronn

9.2 Plattendruckversuche

9.2.1 Geräte

Als Lastplatten wurden kreisrunde Stahlplatten mit 35,7 und 60 cm Durchmesser gewählt, die ihrer Größe entsprechend aus-gesteift waren, so dass sie als starre Platten betrachtet wer-den konnten.

Zur Belastung diente eine 20t-Pressen, welche sich gegen einen 16t Gewichtsanhänger abstützte, der freundlicherweise von einer hiesigen Bauunternehmung zur Verfügung gestellt wurde.

9.2.2 Versuchstechnik

Die Lastplatten wurden, ohne in den Untergrund einzubinden, auf einem Gipsbett allseitig gut aufsitzen in Stufen von ca. 0,5 kp/cm² belastet. Bei jeder Laststufe wurde unter konstant gehaltenem Druck erst das Ende der Setzungen abgewartet, bevor die nächste Laststufe aufgebracht wurde. Der Zeitpunkt für das Ende der Setzungen galt als erreicht, sobald die Setzungszunah-

me auf keiner Messuhr mehr als 0,02 mm/min betrug (HENKE 1971). Beim grössten Teil der Versuche wurden Ent- und Wiederbelastungen eingeschaltet.

Zur Ermittlung der Setzungen dienten drei Messuhren, die an einem Messgestänge der Lastplatten befestigt waren und sich auf einem Messträger abstützten, der so aufgestellt war, dass er durch eventuelle Hebungen oder Senkungen des Geländes nicht beeinflusst werden konnte. Ausserdem wurden entsprechend der Empfehlung von SCHULTZE/MUHS (1967) Meßstative aufgestellt, um Bewegungen der Geländeoberfläche beobachten zu können.

Während der Versuchsdurchführung wurden die Ablesungen der Messuhren und die Zeitpunkte der Belastungen notiert.

Abbildungen zum Geräteaufbau siehe Teil IV.

10. BODENPROBEN

Die Entnahme der "ungestörten" Bodenproben für die im Anschluss an die Feldversuche durchgeführten Laboruntersuchungen geschah mit dünnwandigen Zylindern (10 cm Durchmesser), die - durch einen Führungsrahmen am Verkanten gehindert - in den Boden getrieben wurden. Nach dem Ausgraben wurden die Proben an der Ober- und Unterkante geebnet und so verschlossen, dass sie gegen Austrocknen geschützt waren.

Auf diese Weise wurden vom Nassboden III fünf und vom LÖB IIIb sieben Proben entnommen. Ausserdem wurde vom LÖB IIIb, um die unumgänglichen Störeffekte bei der oben besprochenen Probenentnahme (vgl. Abschn. 12) zu umgehen, in einer Schürfgrube ein Bodenblock mit dem Spachtel herausgearbeitet und anschliessend, sorgfältig mit einer enganliegenden Kunststoffhülle ummantelt, in eine massive Holzkiste mit Hartschaumauskleidung eingepasst. Die Probe hatte eine Abmessung von ca. 60 x 30 x 30 cm.

Abbildungen zur Probenentnahme siehe Teil IV.

Zusätzlich wurden von jedem Boden drei gestörte Proben entnommen.

11. LABORUNTERSUCHUNGEN

11.1 Normaluntersuchungen

11.1.1 Versuche zur Zustandsbeschreibung

11.1.1.1 Kornwichte, Trockenwichte und Porenanteil

Die Bestimmung der Kornwichte γ_s wurde nicht vom Verfasser, sondern von der Amtlichen Forschungs- und Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen in Stuttgart vorgenommen.

Die Trockenwichte γ_d wurde entsprechend DIN 18125, Blatt 1, durch Tauchwägung bestimmt.

Danach erfolgte die Ermittlung des Porenanteils n und der Porenzahl e als Kennwerte für die Porosität.

11.1.1.2 Kornverteilung

Entsprechend DIN 18125 wurden Schlämmanalysen durchgeführt. Als Antikoagulationsmittel diente Natriumphosphat in einer Konzentration von 0,5 g je 1000 cm Schlämmsuspension.

11.1.1.3 Kalkgehalt

Zur quantitativen Untersuchung des Kalkgehalts diente der Apparat von Scheibler (vgl. SCHULTZE/MUHS 1967). Der Kalkgehalt stellt den Anteil von Kalzium- und Magnesiumkarbonat an der Gesamtbodenmenge, bezogen auf die Trockenwichte dar.

Die erforderlichen Luftdruckangaben stammten von der Eichstelle der Akademischen Fliegergruppe Stuttgart e.V.

11.1.1.4 Wassergehalt und Zustandsgrenzen

Der natürliche Wassergehalt w_n wurde durch Ofentrocknung gemäss

DIN 18121, Blatt 1, ermittelt.

Die Fliessgrenzenbestimmung w_L erfolgte mit dem Gerät von Casagrande nach DIN 18122, Blatt 1; die Ausrollgrenze w_p wurde ebenfalls gemäss DIN 18122, Blatt 1, ermittelt.

Aus diesen Werten konnten folgende bodenmechanischen Kenngrößen errechnet werden:

- Plastizitätszahl $I_P = w_L - w_p$
- Konsistenzzahl $I_C = (w_L - w_n) : I_P$
- Sättigungszahl $S_r = (w_n \cdot \gamma_s) : e$
- Aktivität $I_A = I_P : \text{Gew. Anteil der Ultraschluffraktion}$

11.1.2 Versuche mit Belastungsänderungen

11.1.2.1 Kompressionsversuch

Die Zusammendrückbarkeit wurde im Oedometer mit feststehendem Ring untersucht. Die Bodenproben hatten einen Durchmesser von 7,0 cm in eine Einbauhöhe von 1,4 cm. Nach der ersten Laststufe von 0,05 kp/cm² wurde jeweils die Belastung verdoppelt, so dass die Lastschritte 0,125; 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0 und zum Teil 8,0 kp/cm² betragen. Die Laststeigerungen wurden nach jeder Stunde vorgenommen, was von KOTZIAS (1963) für Schluffe als ausreichend angegeben wurde.

Da sich im Löss in den seltensten Fällen ein Grundwasserspiegel ausgebildet und demzufolge eine vollständige Wassersättigung ausgeschlossen werden kann, wurden die Proben mit natürlichem Wassergehalt eingebaut und belastet. Nun bestand aber die Möglichkeit, dass bei gesättigten Filtersteinen die Probe unter Umständen Wasser aufsaugen konnte, was zu einer zusätzlichen Zusammendrückung geführt hätte. Andererseits bestand bei trockenen Filtersteinen die Gefahr eines Wasserentzugs der Probe. Die Saugkraft der Bodenprobe ist jedoch im allgemeinen grösser als die der Filtersteine. Aus diesen Gründen war es angezeigt, mit feuchten Filtersteinen zu arbeiten, deren Wassergehalt bei ca. 10 % und damit unter dem der Bodenprobe lag. Eine Erzielung

dieses Zustandes konnte durch mehrtägige Lagerung in einem Behälter mit hoher Luftfeuchtigkeit erreicht werden.

Um die getroffenen Annahmen zu überprüfen, wurden folgende Vergleichsuntersuchungen durchgeführt:

- Zur Untermauerung der Belastungszeit nach KOTZIAS wurden Versuche mit 24-stündigem Wechsel der Belastung ausgeführt. Proben mit natürlichem Wassergehalt wurden zum Teil unter einem "Klimazelt" belastet, um ein Austrocknen zu verhindern.
- Um ein möglichst genaues Bild vom Verlauf der Last-Setzungslinie zu erhalten, kamen mehrere Versuche mit kleineren Lastintervallen zur Ausführung.
- Da drei Kompressionsapparate verschiedener Bauart zur Verfügung standen, wurde in jedem Gerät ein Versuch unter jeweils den gleichen Bedingungen durchgeführt.

Zusätzlich zu den Proben mit natürlichem Wassergehalt wurden Proben verschiedenen Sättigungsgrades in das Untersuchungsprogramm aufgenommen.

11.1.2.2 Zylinderdruckversuch

Die Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit geschah entsprechend DIN 18136. Da der Bruch der Probe schon nach wenigen Minuten erfolgte, wurde bei zwei Proben ausserdem eine Erniedrigung der Abschergeschwindigkeit vorgenommen.

11.1.2.3 Dreiaxialer Druckversuch

In Anlehnung an die Ausführungen von SCHULTZE/MUHS (1967) wurden konsolidierte, entwässerte Scherversuche (CD-Versuche) mit konstanter Abschergeschwindigkeit ($v = 0,01$ mm/min) ausgeführt, da der vorhandene Sättigungsgrad des Probenmaterials bei vorheriger Sättigung (back pressure) einen Gegendruck von ca. 30 kp/cm² (entsprechend LOWE/JOHNSON in ODENDAHL 1969) erfordert hätte und dadurch unweigerlich eine Störung des Gefüges verursacht hätte. Um eine Aussage über das anisotrope Scherverhalten machen zu können, wurden Proben mit der grösseren Hauptspannungsrichtung sowohl senkrecht als auch parallel zu Sedimentationsebene untersucht.

11.2 Besondere Untersuchungen

11.2.1 Kornverteilung mit verschiedenartiger vorheriger Probenaufbereitung

Um einen Aufschluss über den Einfluss der Kalkkittung auf die Korngrößenverteilung zu erhalten, wurden verschiedene Aufbereitungsmethoden gewählt. Als Antikoagulationsmittel diente wiederum Natriumpyrophosphat.

Probenvorbehandlung:

1. Die Proben wurden nicht aufbereitet, lediglich die Rhizosolenien wurden ausgesiebt.
2. Das Bodenmaterial wurde mit einem Pistill zerrieben und in einem Rührapparat eine Stunde aufgerührt.
3. Derselbe Vorgang wie unter 2, nur wurde die Probe vor dem Rühren zwei Stunden in destilliertem Wasser gekocht.
4. Um die Kalkhäutchen und eventuelle Kalkkonkretionen zu entfernen, wurde die Lössprobe mit einer 2-normalen Salzsäure (7 %) unter ständigem Rühren entkalkt. Bei dieser Verdünnung durften die Silikate kaum angegriffen werden. Der in der verdünnten Salzsäure verbliebene unlösliche Rückstand wurde so lange mit destilliertem Wasser ausgewaschen, bis er vollkommen elektrolytfrei war.

11.2.2 Untersuchung zur Interpretation des Kollapsmechanismus

11.2.2.1 Aufgabenstellung

Das Phänomen des Kollapses von Lössen bei Durchfeuchtung ist nicht neu (WILD 1968, KEZDI 1969, NEUMANN 1964). Amerikanische und sowjetische Wissenschaftler haben sich ausführlich mit dieser Erscheinung befasst (KEZDI 1969).

Den neuesten Stand der Forschung stellt KANE (1973) folgendermaßen dar: Der Zusammenbruch des Lösses ereignet sich, wenn die Spannung zwischen den Partikeln die Haftkraft überschreitet, die durch einen Tonüberzug bewirkt wird. Dies kann durch Anwachsen wachsen der Spannungen, die von der Lastaufbringung herrühren, oder vom Quellen und Plastizieren des Tonbindemittels nach dem Wässern verursacht werden. Wenn der volle Scherwiderstand an den Teilchenkontaktflächen geweckt ist, verursacht ein weiterer Spannungszuwachs ein Gleiten der Partikel, bis sie eine stabile Lage eingenommen haben. Demzufolge wird

der Kollapsmechanismus als Scherphänomen gedeutet, d.h. die Kollapsspannung ist durch die Scherfestigkeit, ausgedrückt als eine Funktion der effektiven Spannungen, bestimmt.

Es lag nun nahe, dieses Verhaltensschema auf Lössen unserer Umgebung zu übertragen, wobei die Verschiedenartigkeit des mineralogischen Aufbaus besonderer Berücksichtigung bedurfte. Wie an anderer Stelle schon ausgeführt, verhält sich der Ton- und Kalkgehalt des nordamerikanischen Lösses umgekehrt proportional zu dem des süddeutschen. Insbesondere treten bei diesem in der vierten Phase Rhizosolenien mit ca. 10 % des Gesamtgewichts stark in den Vordergrund. Demzufolge musste bei einer konsequenten Erfassung des Setzungskollapses dieser Bodenbestandteil mit einbezogen werden.

Es galt nun im Rahmen des Möglichen, d.h. der vorhandenen versuchstechnischen Ausrüstung, eine Untersuchung durchzuführen, die eine Interpretation des angesprochenen Problemkreises ermöglichte.

Ein Zutreffen des von KANE aufgezeigten Verhaltensschemas auf den Heilbronner Löss konnte nur andeutungsweise mit Hilfe der unter Abschnitt 11.1.2 durchgeführten Versuche erfolgen, zumal eine Porenluftdruckmessung und K_0 -Bestimmung nicht möglich war.

Infolgedessen erstreckte sich der Schwerpunkt dieser Untersuchung auf das Verhalten der Rhizosolenien unter Belastung.

11.2.2.2 Versuchstechnik

Aufgrund der vorausgegangenen Oedometerversuche zeigte sich ein Setzungskollaps zwischen einer Belastung von 1,0 und 2,0 kp/cm². Zur Ausführung kamen deshalb Kompressionsversuche unter den gleichen Bedingungen, wie in Abschnitt 11.1.2.1 beschrieben, jedoch mit Belastungsendstufen von 0,25, 0,5, 1,0, 2,0 und 8,0 kp/cm². Nach Abschluss des Versuchs wurde die Kornverteilung entsprechend Abschnitt 11.2.1 - Punkt 1, festgestellt.

TEIL III

AUSWERTUNG

12. PROBLEME BEI DER ENTNAHME UND BEARBEITUNG "UNGESTÖRTER" LÖSSPROBEN

Eine ungestörte Bodenprobe im eigentlichen Sinne des Wortes gibt es nicht. Das Eintreiben des Entnahmezylinders, wie unter Abschnitt 10 beschrieben, verursacht eine Störung des Gefüges, da der Boden durch den Zylindermantel verdrängt wird und ausserdem durch Reibung zwischen Büchsenwandung und Bodenprobe Spannungen entstehen, die konvexe Verformungen im Randbereich zur Folge haben (KÉZDI 1973).

Beim Herauslösen der Probe aus dem Entnahmezylinder konnte die Randstörung bei allen zwölf entnommenen Proben beobachtet werden. Es liess sich jeweils nur der Kern der Probe entfernen, so dass der Randbereich im Entnahmezylinder zurückblieb. Das Gefüge von sechs Proben wurde schon beim Anspresen derart gestört, dass sie für Belastungsversuche nicht mehr in Frage kamen. Vier weitere gingen bei der Bearbeitung, zum Teil bedingt durch Kalzitkonkretionen, zu Bruch, so dass lediglich eine Ausbeute von 17 % möglich war. Dieses restliche Probenmaterial wurde vorsichtshalber jedoch nur für die Belastung parallel zur Sedimentationsebene benutzt, da eine etwaige Störung in diesem Fall nicht von ausschlaggebender Bedeutung sein konnte.

Alle anderen Proben wurden aus der Kistenprobe entnommen. Obwohl bei der Entnahme und dem Transport (auf Schaumgummi) mit grösster Sorgfalt vorgegangen wurde, konnte nicht verhindert werden, dass sie auf mehreren Ebenen in sich abscherete.

Anhand dieser Erfahrungen kann ermassen werden, wie schwierig sich die anschliessende Probenbearbeitung für die einzelnen Zwecke gestaltete. So waren teilweise für eine Dreiaxialprobe vier Stunden Arbeitszeit vonnöten, um die gewünschten Abmessungen zu erhalten. In diesem Zusammenhang sind die Kalzitkonkretionen besonders zu erwähnen, da ein unvorsichtiges Herauslösen ganze Teile der Probe absprengte.

Ausser diesen mechanischen Störungen kann eine Lössprobe noch folgende Änderungen erleiden:

- Änderung des Spannungszustandes,
- Temperaturänderung (Änderungen der Kapillarspannungen),
- Änderung des Wassergehalts,

auf die hier jedoch nicht eingegangen werden soll.

Danach kann gesagt werden, dass eine "gefügetreue" ungestörte Entnahme von Löss mit dem herkömmlichen unter Abschnitt 10 beschriebenen Verfahren nur in seltenen Fällen möglich ist.

13. VERSUCHSERGEBNISSE UND IHR VERGLEICH MIT ANGABEN AUS DER LITERATUR

13.1 Feldversuche

13.1.1 Ergebnisse

Erstaunlicherweise streuten die gewonnenen Ergebnisse mehr, als es nach der bei der Versuchsausführung erreichten hohen Messgenauigkeit zu erwarten war (Abb. 13-1). Da alle Versuche unter den gleichen Voraussetzungen durchgeführt wurden, muss die Ursache dieser Schwankungen auf die Witterung zurückzuführen sein. Tatsächlich war während der gesamten Versuchsdauer fast täglich Niederschlag zu verzeichnen.

Anschliessend an jeden Versuch wurden Bodenproben entnommen und mit Stearin versiegelt, doch war auf die Dauer diese Ummante-

lung zu spröde und platzte, so dass ein unkontrolliertes Austrocknen nicht zu verhindern war. Um trotzdem über die Wassergehaltsschwankungen eine qualitative Aussage machen zu können, wurden vom Kern der jeweiligen Proben die Wassergehalte unter der Annahme bestimmt, dass alle Proben, die durchweg etwa die gleichen Abmessungen besaßen, um dasselbe Mass austrockneten.

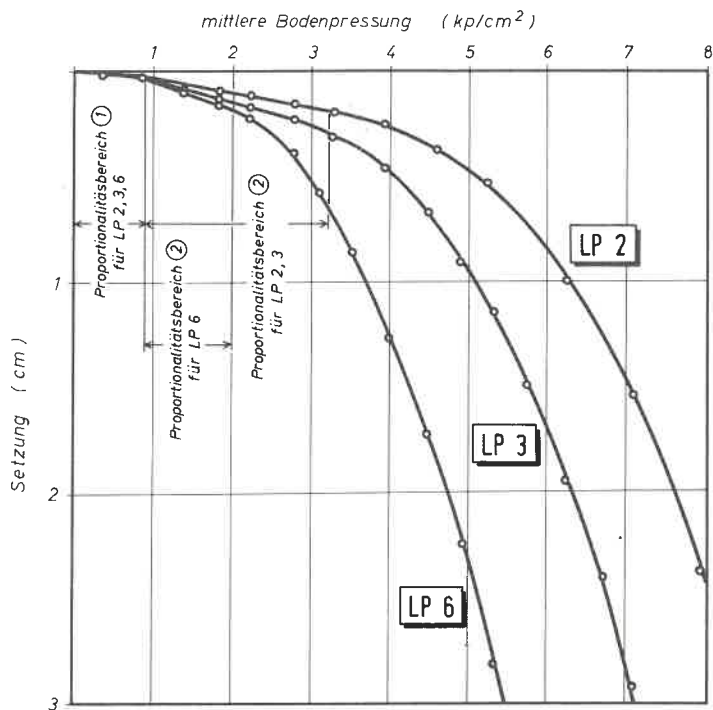


Abb.13-1. Druck-Setzungsdiagramm aus Lastplattenversuchen mit verschiedenen Wassergehalten, Plattendurchmesser: 35,7cm

Erwartungsgemäss nahmen diese mit der Niederschlagsmenge zu. Es sollte noch bemerkt werden, dass jede Versuchsstelle sowohl während des Versuchs (vgl. Bildteil) als auch 10 Stunden vor Belastungsbeginn vor Niederschlagszutritt geschützt wurde, so dass sich der Wassergehalt in den von der Lastplatte erfassten Bodenschichten ausgeglichen haben dürfte und als konstant angenommen werden kann.

Wie aus Abb. 13-2 hervorgeht, liess sich zwischen den errechneten "Steifemoduln des Baugrundes" und den während des Versuches vorhandenen Wassergehalten eine korrelative Beziehung finden.

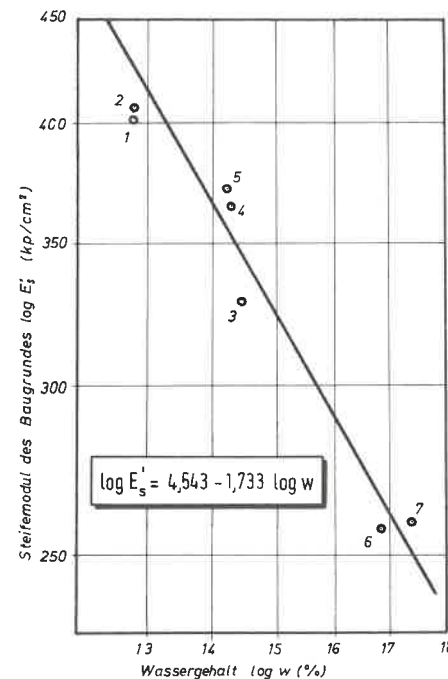


Abb.13-2. Beziehung zwischen natürlichem Wassergehalt w und dem "Steifemodul des Baugrundes E_s' " im Proportionalitätsbereich 2

Auffallend bei allen Versuchen ist die qualitative Übereinstimmung des Proportionalitätsbereichs im Drucksetzungsdiagramm. Nach anfänglicher totaler Übereinstimmung bis etwa $0,8 \text{ kp/cm}^2$ mittlerer Bodenpressung erhält die Drucksetzungs-Linie einen Knick, der je nach Wassergehalt mehr oder weniger stark ausgeprägt ist.

Die während des Versuchsablaufs durchgeführte Messung der Geländeoberflächenbewegung brachte kein Ergebnis. Es zeigten sich lediglich vereinzelte nur schwer erkennbare radial ange-

ordnete Zugrisse, die aber auf Reibungserscheinungen zwischen Druckplattenrand und Boden zurückzuführen sind (vgl. Teil IV). Daraus kann geschlossen werden, dass zumindest im Bereich der aufgetragenen Belastungen hauptsächlich eine Zusammendrückung infolge des hohen Porenanteils und kaum ein seitliches Ausweichen des Bodens erfolgte. Dieser Umstand spiegelt sich auch in der niedrigen, von KANE (1973) ermittelten, Querdehnzahl von $\nu = 0,19$ wieder.

Ausführliche und ergänzende Diagramme zu den ausgeführten Lastplattenversuchen siehe Teil IV, A1 bis A6.

13.1.2 Bestimmung des Bettungsmoduls

Der Bettungsmodul ist als Quotient aus der mittleren Bodenpressung und der zugehörigen Setzung definiert:

$$k_s = p_s / s \quad \text{für } p \leq p_p \quad [\text{kp/cm}^3]$$

Bei Betrachtung des Bodens als elastisch-isotroper und homogener Halbraum, wie es im folgenden beibehalten werden soll (Begründung vgl. Abschn. 17.3), ist der Bettungsmodul eine Funktion der Plattengröße und der Zusammendrückbarkeit des Bodens. Der Einfluss des Plattendurchmessers wurde von STRATTON (in: KÉZDI 1970) näher untersucht, indem er theoretische Ergebnisse mit jenen aus Feldversuchen verglich. Es zeigte sich, dass mit zunehmendem Plattendurchmesser bei gleicher Last der Bettungsmodul abnahm, vorausgesetzt die Setzung blieb im elastischen Verformungsbereich des Bodens.

Bei kleineren Platten war die Abweichung von der theoretischen Kurve gering. Bei grösseren Platten mit mehr als 60 bis 80 cm Durchmesser nahm der Bettungsmodul wegen der plastischen Verformungen, die in vielen Fällen bereits nach 1 mm Setzung auftraten, nicht mehr ab (STRATTON). Aus diesem Grund schlägt er vor, bei Probelastungen Druckplatten mit 75 cm Durchmesser zu benutzen und bei Verwendung kleinerer Platten die gewonnenen Bettungsmoduln zu reduzieren.

In der Literatur sind viele Bestimmungsverfahren für den Bet-

tungsmodul angegeben. Im folgenden sollen drei kurz erläutert werden:

1. Nach SCHULTZE/MUHS (1967) wird die Steigung der Sekante von $p = 0$ bis zur halben Bruchlast als Bettungsmodul bezeichnet.
2. Aus der Last-Setzungs-Kurve wird die Spannung bei der Einsenkung $s = 1,3$ mm abgelesen und der Bettungsmodul aus $k_s = p/0,13$ (kp/cm^3) berechnet (KÉZDI 1970).
3. Nach zwei oder drei Lastzyklen ergibt sich im Last-Setzungs-Diagramm für die Wiederbelastung annähernd eine gerade Linie. Der Bettungsmodul ist durch die Steigung dieser Geraden gegeben (CAOUOT/KERISEL 1967)

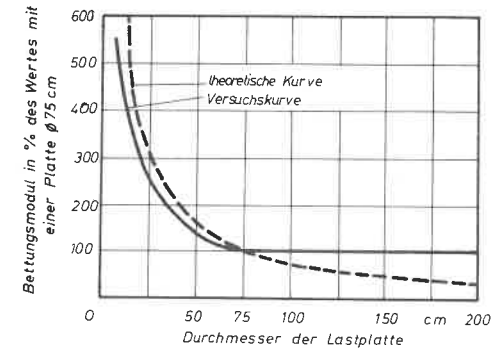


Abb.13-3. Bettungsmoduln als Funktion des Durchmessers der Belastungsplatte (aus KÉZDI 1970)

Für die Bestimmung der Bettungsmoduln aus den hier durchgeführten Versuchen wurde auf keines der angeführten Verfahren zurückgegriffen, sondern - um das lösspezifische Verformungsverhalten mit einzubeziehen - wurden die Bettungsmoduln durch die Steigung im Proportionalitätsbereich 2, reduziert entsprechend dem Vorschlag von STRATTON, festgelegt. Die Ergebnisse sind im Abschnitt 13.1.3 wiedergegeben.

13.1.3 Bestimmung des "Steifemoduls des Baugrundes" E'_s

Mit Hilfe des aus Versuchen gewonnenen Bettungsmoduls kann nach SCHLEICHER auf den "Steifemodul des Baugrundes" geschlossen werden (SCHULTZE/MUHS 1967):

$$E'_s = \omega \cdot k_s \cdot \sqrt{F} \quad [\text{kp/cm}^2]$$

ω = Beiwert nach SCHLEICHER

F = Lastplattengrundfläche

Diese Grösse E'_s ist keine Bodenkonstante, sondern ebenso wie der Steifemodul E_s vom Druck abhängig. Die Veränderlichkeit des Wertes E'_s nach Überschreitung der Proportionalitätsgrenze ist nicht allein auf die Druckabhängigkeit zurückzuführen, sondern darauf, dass mit zunehmenden Bodenspannungen durch Scherbeanspruchungen die seitlichen Ausweichbewegungen des Bodens immer mehr anwachsen. Probelastungen auf begrenzten Flächen sind deshalb meist wertlos, wenn die Proportionalitätsgrenze überschritten wird.

In der folgenden Tabelle wurden die Steifemoduln des Baugrunds für die durchgeführten Lastplattenversuche zusammengestellt. Ein Vergleich mit älteren Probelastungen auf LÖß musste auf einen Fall beschränkt werden, da sämtliche zur Verfügung stehenden Ergebnisse nicht mit der nötigen genauen Beschreibung der Versuchsbedingungen versehen waren.

Versuch Nr.	Plattenfläche	Bettungsmodul	Steifemodul d. Baugrunds	Wassergehalt
	cm ²	kp/cm ³	kp/cm ²	%
1	1000	14,24	399,1	12,8
2	1000	14,81	406,1	12,7
3	1000	11,76	329,7	14,1
4	2827	8,00	364,7	14,2
5	2827	8,33	370,9	14,3
6	1000	9,52	255,3	16,7
7	1000	9,28	260,1	17,2
nach SCHEIDIG (1934)	2500	8,7	385,5	

13.2 Laborversuche

13.2.1 Zustandbeschreibung des Bodens

Bodenart	LÖß IIIb		Naßboden III		Rhein. Schluff	LÖß Oakdale	LÖß Iowa		
	eigene Versuche				KAHL 1972	KANE 1973	DAPHES 1959		
Quelle	Formelzeichen	Dimension	Anzahl d. Versuche		Anzahl d. Versuche				
Kornwichte	γ_s	g/cm ³	22	2,70	2	2,70	2,68	2,72	
Trockenwichte	γ_d	g/cm ³	9	1,49	8	1,53	1,60	1,47	
Porenanteil	n	1		0,45		0,43	0,40	0,46	
Porenzahl	e	1		0,81		0,76	0,67	0,86	
Kalkgehalt	V_{Ca}	1	26	0,29	17	0,26	0,09		
Wassergehalt	w	1	40	0,12	15	0,14	0,20	0,22	
Sättigungszahl	S_r	1		0,41		0,49	0,78	0,70	
Fließgrenze	w_L	1	10	0,27	8	0,27	0,29	0,27	0,38
Ausrollgrenze	w_P	1	7	0,18	7	0,18	0,20	0,23	0,24
Plastizitätszahl	I_P	1		0,09		0,09	0,10	0,04 ^{*)}	0,14
Konsistenzzahl	I_C	1		1,67		1,44	0,97	1,25	
Aktivitätszahl	I_A	1		0,6		0,6	1,2	0,2 ^{*)}	
Ungleichförmigkeitszahl	U	1					11		
Ultraschluffgehalt	-	%	2	14	2	15	8	17	
Schluffgehalt	-	%	2	78	2	75	73		
Sandgehalt	-	%	2	8	2	10	20		

Kornverteilungslinien siehe Teil IV A 7

^{*)} Die von KANE angegebene Plastizitätszahl und somit auch die daraus abgeleitete Aktivitätszahl können als nicht repräsentativ für nordamerikanische Löss angesehen werden (vgl. Abb. 13-4).

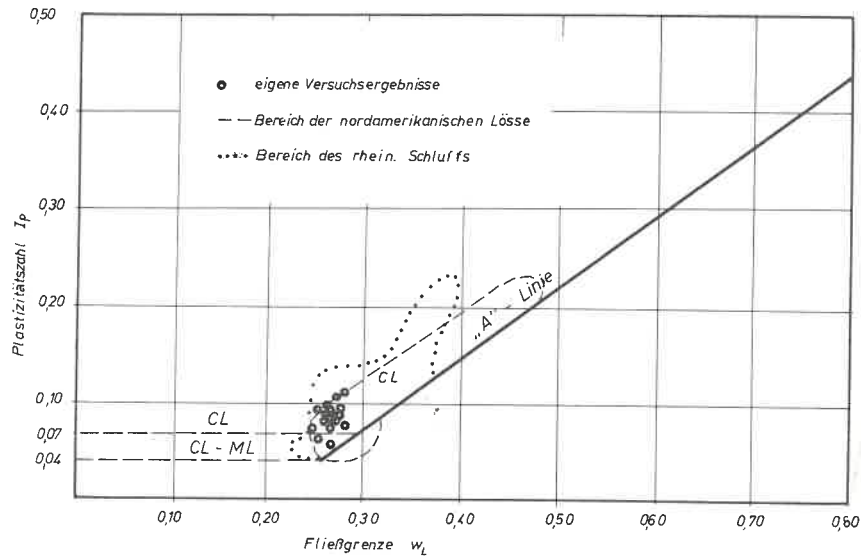


Abb.13-4. Plastizitätsdiagramm nach A.CASAGRANDE

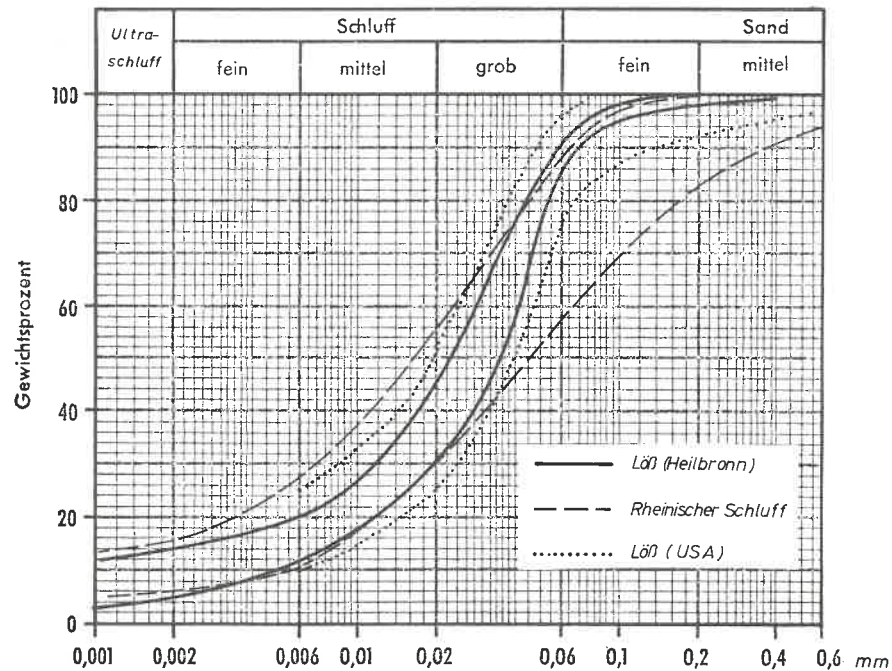


Abb.13-5. Staubereich der Kornverteilungen verschiedener Lösses nach KOTZIAS (1963), HENKE (1971), WILD (1968) und eigenen Untersuchungen

Die Kornverteilungen und der Plastizitätsgrad des untersuchten Lösses im Vergleich zu anderen gehen aus Abb. 13-4 und 13-5 hervor. Kennzeichnend ist die enge Schwankung der Kornverteilungslinien, sowie dass sowohl die Kornverteilungslinien als auch der Bereich des Plastizitätsgrades des untersuchten Lösses innerhalb des Schwankungsbereichs der nordamerikanischen liegen. Weiter fällt der vergleichsweise niedrige natürliche Wassergehalt und der damit verbundene Sättigungsgrad des hiesigen Lösses auf, obwohl vor Probenentnahme eine Wetterlage mit reichlichem Niederschlag unseren Raum beherrschte.

13.2.2 Kompressionsversuche

Bei der Auswertung dieser Versuche zeigte sich, dass bei Auftragung der Last-Setzungslinie im halblogarithmischen Maßstab der Setzungskollaps nicht so deutlich zum Ausdruck kam wie im natürlichen Maßstab, so dass der letztere zur Darstellung der Ergebnisse gewählt wurde.

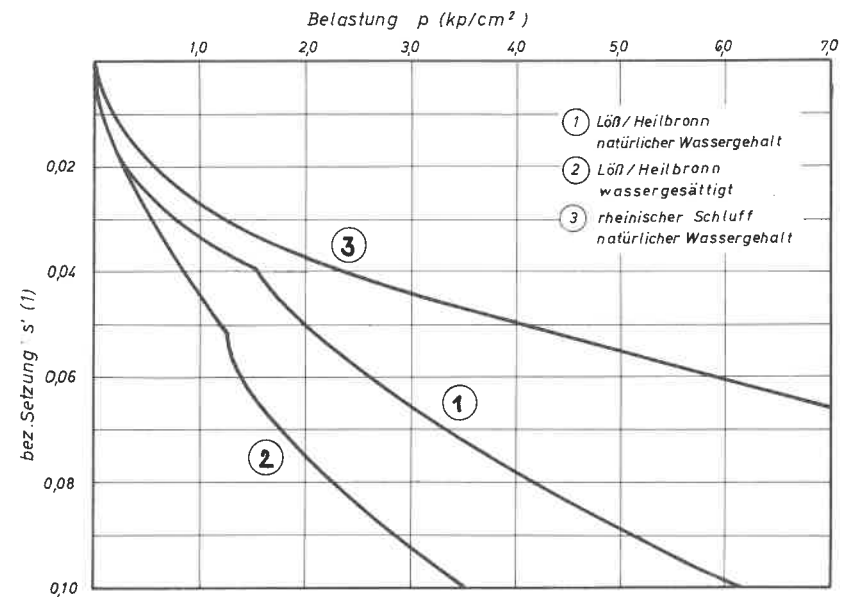


Abb.13-6. Last-Setzungsdiagramm von Löß und rheinischem Schluff

Die unter Abschnitt 11.1.2.1 erwähnten Vorversuche zur Bestätigung der Annahmen ergaben folgendes Resultat:

Eine Laststufendauer von einer Stunde (KOTZIAS 1963) kann als ausreichend angesehen werden. Der Vergleich Langzeit-Kurzzeitbelastung bestätigt diese Annahme (vgl. Teil IV A 8 und A 9).

Last-Setzungslinien mit kleinen Lastintervallen sind deckungsgleich mit denen der üblich gewählten. Der Verlauf der Last-Setzungslinie im Bereich zwischen 1,0 und 2,0 kp/cm² wurde bestätigt (vgl. Teil IV A 10).

Ein Vergleich der Ergebnisse aus Kompressionsapparaten verschiedener Bauart ist denkbar, doch kann nur eine Versuchsreihe nicht die gewünschte Bestätigung liefern.

In Abb. 13-6 wurden die Last-Setzungslinien für drei verschiedene Wassergehalte und zum Vergleich eine Last-Setzungslinie des rheinischen Schluffs dargestellt.

Zusätzliche Versuchsergebnisse siehe Teil IV A 11 und A 12.

13.2.3 Zylinderdruckversuche

Die Ergebnisse sind in Teil IV A 13 dargestellt. Da der Wassergehalt zweier Proben stark differierte, konnten die aus diesen Versuchen gewonnenen Ergebnisse mit denen der beiden restlichen nicht verglichen werden und wurden aus diesem Grund nicht aufgeführt.

Beim Bruch zeigten sich keine ausgeprägten Scherflächen; es wurden fast ausschliesslich Zugrisse in Längsachse beobachtet.

Nach KĚZDI (1973) kann die einaxiale Druckfestigkeit ein Mass für die Konsistenz des Bodens darstellen. Demzufolge wäre der Löss als "mittelmässig steif" zu bezeichnen, was in etwa mit der durch die Atterbergschen Grenzen gefundenen "halbfesten" Konsistenz übereinstimmt.

Vergleichswerte ähnlicher Böden konnten nicht ausfindig gemacht werden.

13.2.4 Dreiaxiale Druckversuche

Gerätebedingt konnte die Volumenveränderung während des Schervorgangs nur bei jeweils zwei Versuchen bestimmt werden. Ihre Werte blieben aber unterhalb der Grenze, von der ab sie auf die Scherspannungen einen nennenswerten Einfluss ausüben.

Zur Ausführung kamen jeweils drei Versuche mit der grössten Hauptspannungsrichtung senkrecht und parallel zur Sedimentationsebene, wobei die Seitendrucke zu 0,5, 1,0 und 1,5 kp/cm² gewählt wurden.

Die Ergebnisse gehen aus den Abbildungen A 14 bis A 16 im Teil IV hervor. Ihre Interpretation wird im Zusammenhang mit dem Kollapsmechanismus gegeben (vgl. Abschn. 15.2).

Aus den Angaben der Tabelle S.72 geht zum einen abermals der typische, durch genetische Prozesse (Andersartigkeit des Ausgangsmaterials und Verwitterung) bedingte Unterschied zwischen süddeutschen und nordamerikanischen Lössen hervor, und zum anderen die weit auf der sicheren Seite liegenden und damit zu unwirtschaftlichen Scherparameter der in der Bundesrepublik vorliegenden Empfehlungen.

Aus drainierten Versuchen gewonnene Scherfestigkeitsparameter können als effektive bezeichnet werden, obwohl während des Versuchsablaufes die reibungserzeugenden Normalspannungen an den Teilchenkontaktflächen durch Kapillardrucke erhöht werden. Die Begründung liegt in der Tatsache, dass die Menisken beim Bruch des Korngefüges, bedingt durch Wegfall der Oberflächenspannung augenblicklich verdampfen (vgl. Absch. 6.2).

Der Nachteil drainierter Scherversuche bei ungesättigten Böden ist die Unkenntnis der totalen Spannungen. Da für praktische Aufgaben des Grundbaus aber die Kenntnis der effektiven Spannungen vorrangig ist, wiegt der Vorteil des einfachen Versuchsaufbaus beim D-Versuch diese Nachteile auf, zumal die auftretenden Porenwasserspannungen niemals die Grösse erreichen, um einen Scherbruch innerhalb der festen Phase zu erzeugen (vgl. Abb. 5-3).

Vergleich der ermittelten Scherparameter mit denen anderer Arbeiten:

Quelle	Bodenart	Zustand	ϕ'	c'
			Grad	kp/cm ²
eigene Versuche	Löß	ungesättigt ungestört	Lastrichtung vertikal	
			31,8	0,22
			Lastrichtung horizontal	
			32,4	0,09
HORN (1964)	rhein. Schluff	gesättigt gestört	36,0 - 36,6	0
ODENDAHL (1969)	rhein. Schluff	ungesättigt ungestört	32	0,12
BUREAU OF RECLAMATION (aus Odendahl)	Löß USA	ungesättigt	26,6 - 35,0	0,56 - 1,25
CLEVINGER (aus Odendahl)	Löß USA	ungesättigt	31,0 - 33,0	0,70 - 1,40
Empfehlungen				
DIN 1055 Blatt 2 (1963)	22,5			
Vornorm (1972)	22,5 - 27,5			
EAU 9 (1971)	27,5			

14. ERGEBNISSE DER BESONDEREN UNTERSUCHUNGEN

14.1 Kornverteilungslinien

Sieht man von den üblichen Fehlerquellen der schlämanalytischen Ergebnisse hinsichtlich der Unterschiede im spezifischen Gewicht der Mineralkörner und vom Einfluss der Kornform ab (NEUMANN 1959), da diese bei den einheitlich durchgeführten

Versuchen nur von sekundärer Bedeutung sind und ausserhalb der Fragestellung stehen, so lässt sich feststellen, dass die unterschiedliche Probenaufbereitung sich deutlich in der Kornverteilung niederschlägt (vgl. Teil IV A 17).

Der im Verhältnis zu den allgemeinen Ergebnissen hohe Sandgehalt der Kornverteilung nach der ersten Aufbereitungsmethode, der "Soft-Schlämme" (um ein Schlagwort zu prägen), rührt daher, dass die Rhizosolenien nicht zerstört, sondern als Fraktion mit berücksichtigt wurden, so wie sie im natürlichen Zustand im Löß vorhanden sind. Diese "sanfte" Aufbereitung ist beim Löß im Gegensatz z.B. zu den verwitterten Mergeln vertretbar. SCHLENKER (1971) stellte fest, dass sich je nach Tonmineralgehalt bei mergeligen Gesteinen eine Kornverfeinerung vom grobkörnigen Aggregat bis zur Tongrösse abspielt und rechtfertigt damit den Vorschlag, diese meist in Sandgrösse vorliegenden Lockergesteine für die Korngrössenbestimmung über das Mass der Vorschriften hinaus aufzubereiten. Damit nimmt er einen Umbildungs- bzw. Verwitterungsprozess, der sich früher oder später in der Natur abspielen würde, vorweg.

Beim Löß liegen jedoch andere Verhältnisse vor. Er unterliegt in den heutigen, im Gegensatz zu geologischen Zeitmaßstäben verschwindend kleinen Zeiträumen, keiner Verwitterung. Eine Kornverteilungsänderung spielt sich im Boden daher erst dann ab, wenn durch äussere Einwirkungen Formänderungen hervorgerufen werden (vgl. Abschn. 15.2). Aus diesem Grund ist die "Soft-Schlämme", bei der die Fraktionen der Bodenprobe über den Sieben mit Lochweiten unter 2 mm durch vorsichtiges Ausschlämmen getrennt werden, der Aufbereitung nach DIN 18123 vorzuziehen, zumal aus der Kornverteilung weitere Kenndaten abgeleitet werden können.

Wie aus der Abbildung A 17 ersichtlich ist, entfernt sich die Kornverteilungslinie mit zunehmender Aufbereitungsintensität von den wirklichen Verhältnissen. Diese Vorgänge sind auf Aggregat- und nicht auf Kornzerstörungen zurückzuführen (vgl. Abschn. 15.1.2).

14.2 Kompressionsversuche mit anschliessender Kornverteilungsbestimmung

Sieht man von der Bestätigung der Ergebnisse in Abschnitt 13.2.1.2 ab, so hatten die hier durchgeführten Oedometerversuche nur den Zweck, Probenmaterial für die anschliessenden Kornverteilungsbestimmungen zu liefern.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Teil IV A 18 dargestellt. Deutlich lässt sich bei zunehmender Belastung eine Verschiebung der Kornverteilungslinie feststellen, auf deren Abhängigkeit im Abschnitt 15.2 näher eingegangen wird.

15. DIE BEDEUTUNG DES KALZIUMKARBONATS

In den obigen Ausführungen konnte eine Beziehung zwischen den bodenphysikalischen Eigenschaften des Lösses und seiner Entstehung aufgezeigt werden. In erster Linie tritt in diesem Zusammenhang das Kalziumkarbonat in Erscheinung, das hier als eigenständige Bodenphase auftritt und für die Prägung der wichtigsten bodenmechanischen Kennziffern verantwortlich ist. Für weitere Betrachtungen ist es unbedingt erforderlich, diese Karbonatphase in ihren Komponenten zu sehen (vgl. Abschn. 5.3).

15.1 Die Bedeutung für einige bodenmechanische Kennwerte

15.1.1 Kornwichte, Trockenwichte

Kalziumkarbonat zeichnet sich im Gegensatz zum Hauptbildner Quarz durch seine höhere Kornwichte aus. Demzufolge haben kalkhaltige Lösses in der Regel eine höhere Kornwichte, was sich beim Vergleich mit den in der Literatur angegebenen Werten bestätigt. Zur besseren Übersicht seien hier die Kornwichten der den Hauptanteil stellenden Mineralien angeführt:

Quarz	2,65 g/cm ³
Feldspat	2,56
Kalziumkarbonat	2,72
Glimmer	2,78 - 3,2

Vergleicht man die Volumenanteile der Karbonate und den Porenanteil, so lässt sich keine feste Beziehung finden, doch ist ein Zuwachs von Kalzit meist von einer Porenanteilvergrößerung und damit einer Verminderung der Wichte begleitet (vgl. GUENTHER 1953).

Quantitative Angaben sind in diesem Zusammenhang nicht möglich und auch nicht vorgesehen (vgl. Abschn. 1.2), da die untersuchten Bodenproben aus einem zu eng begrenzten Bereich stammen.

15.1.2 Kornverteilung

An dieser Stelle sollte auf den Begriff Ton, der neben der allgemeinen geologischen Bezeichnung auch zur Kennzeichnung eines Korngrößenbereichs verwendet wird, eingegangen werden. Nach den meisten Vorschriften, so auch nach DIN 4022, wird unter Ton ein Boden verstanden, dessen Einzelteilchen einen äquivalenten Korndurchmesser $d \leq 0,002$ mm aufweisen. Eine grosse Zahl der vorkommenden natürlichen Tone, im Sinne der geologischen Bezeichnung, fallen unter Zugrundelegung der DIN 4022 korngrossenmässig in den Schluffbereich, andererseits bestehen nicht alle Partikel $\leq 0,002$ mm aus Tonmineralien (VEES 1970, NEUMANN 1964). Um eine oft unumgängliche Verwechslung auszuschliessen, hat KEIL für die Kornfraktion $< 0,002$ mm den zweckmässigen Begriff "Ultraschluff", der hier benutzt werden soll, vorgeschlagen.

Da den süddeutschen Primärlössen die für eine Krümelstruktur erforderlichen kolloidalen Tonteilchen nahezu fehlen, erfolgt die Verkittung der Mineralkörner durch das Kalziumkarbonat.

Wird nun die Bodenprobe durch die "Soft-Schlämme" aufbereitet, so bleibt der natürliche Kornaufbau erhalten (vgl. Abschnitt 14.2.2.1), der sich durch einen geringen Ultraschluff- und einen hohen Sandgehalt auszeichnet.

Dagegen werden bei der Aufbereitung der Probe entsprechend DIN 18123 die Rhizosolenien und ein Teil der im Grobschluffbereich vorhandenen Aggregate zum grössten Teil zerstört. Während sich die Aggregate hauptsächlich in kleinere verwandeln, wird das

die Rhizosolenien bildende Kalziumkarbonat auf Ultraschluffgrösse gebracht und täuscht so einen erheblichen "Tonanteil" vor (vgl. Teil IV A 17). Spätestens an dieser Stelle muss eingesehen werden, dass die Bezeichnung Ton als Kornfraktion im allgemeinen und im besonderen bei Löss ein vollkommen falsches Bild zeichnet.

Bei einer weiteren Bearbeitung der Proben nach der unter Punkt 2 und 3 im Abschnitt 11.2.1 erwähnten Methoden, liess sich nur eine geringe Kornverfeinerung im Grobschluffbereich feststellen, die auf weitere Aggregatzerstörung zurückzuführen ist.

Erst nach Entfernung des Kalziumkarbonats (Methode 4) trat eine abermalige Kornverfeinerung hauptsächlich im Feinsandbereich ein. Diese Verfeinerung der Körnung kann eigentlich nur an der Unzulänglichkeit des Schlämverfahrens liegen. Wie aus Abb. 4-3 hervorgeht, treten im Feinsandbereich die Glimmeranteile neben denen des Quarzes in den Vordergrund. Während diese Glimmerplättchen vor der Entkalkung noch mit einem Kalzitmantel umgeben waren und so ihrer wahren Korngrösse entsprechend absinken konnten, bleiben sie aufgrund ihrer Natur nach der Entkalkung länger in der Schwebe und täuschen mit einem höheren Feinkornanteil vor.

ALAILY (1972) erreichte durch Ultrabeschallung der Proben nach Salzsäurebehandlung eine weitere Trennung der noch durch Eisenverbindungen verbackenen Partikel.

Mit den durchgeführten Versuchen sollte gezeigt werden, wie leicht sich die Kornverteilung des Lösses manipulieren lässt. Dies ist in ausreichendem Umfang gelungen. Deutlich kam zum Ausdruck, dass sowohl die erste Komponente (Kittmasse), als auch die zweite (Rhizosolenien) wechselweise die ermittelten Gewichtsanteile beeinflussen.

Da für den Bauingenieur die im Baugrund herrschenden und nicht irgendwelche aufgrund einschlägiger Bestimmungen simulierten Verhältnisse massgebend sind, ist bei Primärlössböden die "Soft-Schlämme" (Abschn. 11.2.1) zur Bestimmung der Kornverteilung

heranzuziehen, da sie ein wirklichkeitsnahes Bild liefert.

15.1.3 Zustandsgrenzen

Für die Bestimmung der Zustandsgrenzen gilt sinngemäss dieselbe Einschränkung wie am Schluss des letzten Abschnitts, denn auch hier muss eine Störung des Gefüges zur Versuchsdurchführung vorgenommen werden.

Obwohl auch für andere Böden gilt, dass sie in gewachsenem Zustand nicht allein durch einen Wassergehalt im Bereich der Fließsgrenze weich werden, sondern vorher einer Störung bedürfen, hat für Löss bei der Zustandsgrenzenbestimmung die Zerstörung seiner Struktur und der zweiten Komponente der Karbonatphase eine weiterreichende Folge.

KAHL (1972) hat für rheinische Schluffe einen Einfluss des Ultraschluffgehalts auf die Fließsgrenze festgestellt. Diese Erkenntnis dürfte auch auf andere Böden, z.B. den Löss, übertragen werden. Wie aber aus dem vorhergehenden Abschnitt bekannt ist, steht der Ultraschluffgehalt bei normgerechter Aufbereitung in Abhängigkeit vom Kalkgehalt, so dass bei gleicher Zusammensetzung, aber verschiedenen Kalkgehalten sich eine unterschiedliche Fließsgrenze ergibt.

Dadurch erklärt sich vermutlich die im Gegensatz zu den tonreichen Lössböden des Niederrheins und der USA zu hoch ausgefallene Plastizität des untersuchten Lösses.

Für kalkhaltige Lösses ist aus diesem Grund eine Bestimmung der Zustandsgrenzen mit den herkömmlichen Verfahren mehr als fraglich. Zudem muss angezweifelt werden, ob sich die für bindige Böden entwickelte Klassifikation ohne weiteres auf Löss, der, wie es in den obigen Kapiteln aufgezeigt werden konnte, eine Stellung zwischen rolligen, bindigen und festen Gesteinen einnimmt, übertragen lässt. In diesem Zusammenhang müssten neue Untersuchungsmethoden entwickelt werden, um aussagekräftigere Ergebnisse zu erhalten (vgl. Abschn. 16).

15.2 Die Bedeutung des Kalziumkarbonats für das mechanische Verhalten

15.2.1 Das Verhalten der Karbonatphase im Kompressionsversuch
Für die anschließende Betrachtung sind zwei bisher gewonnene Erkenntnisse von Bedeutung:

- der Löss als verkitteter Krümelboden, durchzogen von senkrechten Rhizosolenien (Strukturmodell Abschn. 5.5);
- diese Rhizosolenien bilden den Mittel- und Grobsandanteil des Lösses bei Aufbereitung nach der "sanften Methode" (vgl. Abschn. 15.1.2).

Wird nun eine Lössprobe im Oedometer belastet, so ist bis zu einer Spannung von $0,25 \text{ kp/cm}^2$ keine Veränderung der Kornverteilungslinie im Ultraschluff- bis Mittelschluffbereich zu beobachten. Lediglich der Grobschluff- und Feinsandbereich erfährt eine Erhöhung, die von der Abnahme des Grobsandanteils herrührt (vgl. Teil IV. A 18).

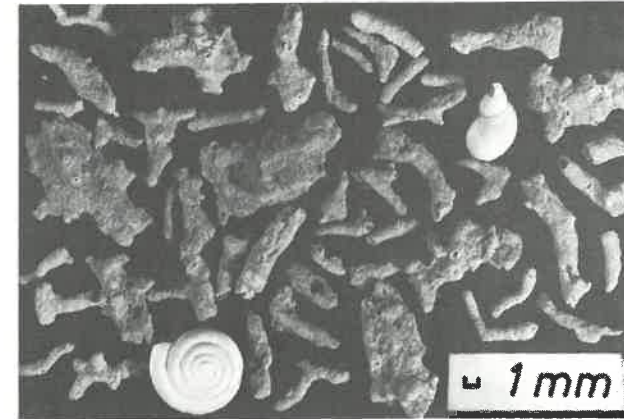
Bei einer weiteren Spannungssteigerung auf $0,5 \text{ kp/cm}^2$ setzt sich dieser Trend fort. Weiterhin bleibt die Feinkornfraktion konstant, während sich der Grobschluffanteil jetzt auf Kosten des Feinsandgehalts erhöht. In diesem Stadium hat sich der Grobsandanteil bis auf ein Minimum reduziert, d.h. die Zerstörung der Rhizosolenien ist annähernd erfolgt.

Hat die Spannung $1,0 \text{ kp/cm}^2$ erreicht, so zeigt sich ein Anwachsen des Mittelschluffanteils, bedingt durch Beginn von Zerstörungen der Aggregate im Grobschluffbereich. Die Verringerung des Feinsandanteils und die Erhöhung des Grobschluffanteils setzt sich auch hier fort.

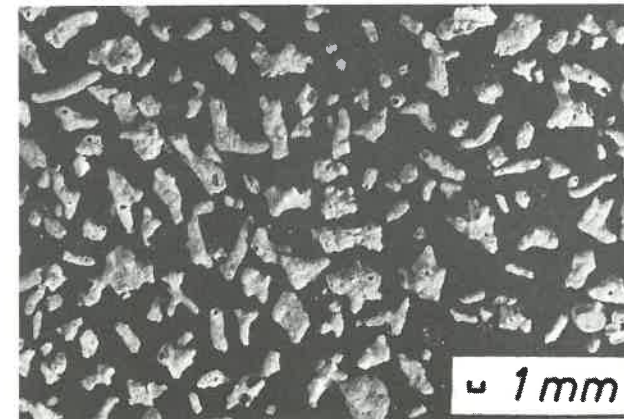
Bei einer Betrachtung der Kornverteilungslinie nach einer Belastung von $2,0 \text{ kp/cm}^2$ zeigt sich plötzlich ein anderes Bild. Zum ersten Mal hat sich eine Verschiebung im Ultraschluffbe-

Abb.15-1. (Seite 79) Veränderlichkeit der zweiten Karbonatphase (Rhizosolenien) bei Belastung im Oedometer

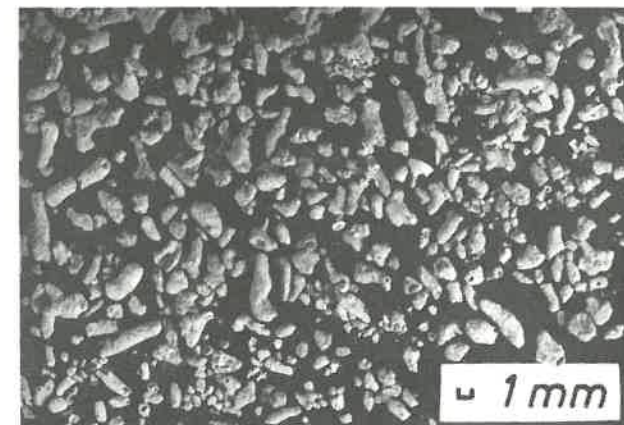
- a) vor Belastung mit fossilen Lössschnecken
- b) nach Belastung mit $0,125 \text{ kp/cm}^2$
- c) nach Belastung mit $0,25 \text{ kp/cm}^2$



a



b



c

reich ergeben, während die im vorhergehenden Lastabschnitt sich anbahnende Verringerung im feinen Grobschluffbereich (0,02 - 0,032 mm) sprunghaft angestiegen ist. Ausserdem hat sich der Anteil des Mittelsandbereiches verringert. Wenn die Spannung auf 8,0 kp/cm² erhöht wird, nimmt der Feinkornanteil weiter zu.

Diese Ergebnisse stehen in vollem Einklang mit dem Verlauf der ermittelten Drucksetzungslinie. Die Mechanismen beim Kompressionsversuch können daher folgendermassen interpretiert werden: Bis zu einer Spannung von 0,25 kp/cm² wird die aufgebrachte Last hauptsächlich von den Rhizosolenien getragen, die anfänglich durch das umliegende Korngerüst am Ausknicken und Abscheren behindert werden. Diese Behauptung wird zusätzlich durch den Verlauf der Drucksetzungslinien in diesem Spannungsbereich bestätigt, da sich sowohl bei natürlichem Wassergehalt als auch bei voller Sättigung der Probe gleiche Setzungen ergeben (vgl. Teil IV A 11). Mit dem Überschreiten der 0,25 kp/cm² - Grenze werden die Spannungen in zunehmendem Masse vom Korngerüst übernommen, da die Tragwirkung der Rhizosolenien, bedingt durch den Bruch der Röhren, rasch nachlässt (Abb. 15-1). Es findet also ein "Tragwechsel" innerhalb der Karbonatphase statt, der gleichzeitig eine Verringerung der Setzungen mit sich bringt. Steigen nun die Spannungen zwischen den kalkverkiteten Partikeln bis nahe an die Bruchgrenze, dann bedarf es nur in einem Bereich einer Spannungsüberschreitung mit Bruch der Kittungen, um das Krümelgefüge, ähnlich einem Zusammenklappen eines Kartenhauses, zum Einsturz zu bringen. Der Kollaps ist abgeschlossen, wenn die Teilchen sich in einer neuen stabilen Lage befinden.

15.2.2 Interpretation der Dreiaxialen Druckversuche

Eine ähnlich genaue Aussage wie im Falle des Kompressionsversuches ist bei der Interpretation dieser Versuche wegen der wenigen Versuchsergebnisse nicht möglich.

Trotzdem lässt sich bei allen Versuchen, jeweils bei annähernd gleichen Hauptspannungsverhältnissen, ein Kollaps beobachten, den ich dem Zusammenbruch der Kittungen zuschreiben möchte.

Inwieweit sich die Tragkraft der Rhizosolenien auswirkt, kann nicht abgeschätzt werden. Jedoch möchte ich die erhöhte "Kohäsion" beim Versuch mit der grössten Hauptspannungsrichtung parallel den Rhizosolenien, im Gegensatz zum Versuch mit der grössten Hauptspannungsrichtung senkrecht zu diesen, auf die Wirkung dieser stabilisierenden Wurzelröhren zurückführen (vgl. Abschn. 13.2.1.4).

Der Scherwinkel bei beiden Versuchen kann als identisch bezeichnet werden. Ob diese Tatsache auch auf die Verhältnisse im Grossverband übertragen werden kann, bleibe dahingestellt.

15.2.3 Lastplattendruckversuch

In den Lastsetzungsdiagrammen (Teil IV A1 - A6) dieser Versuche ist ebenfalls, wie in den oben geschilderten Fällen, eine Unstetigkeit zu beobachten, die nicht etwaigen Vorbelastungen zugeschrieben werden kann. Dieser Knick der Lastsetzungskurve steht nach meiner Auffassung im Zusammenhang mit einem erfolgten Versagen der Karbonatphase. Um diese Umstände genauer formulieren zu können, bedarf es ausgedehnterer Untersuchungen.

16. VORSCHLÄGE FÜR WEITERE UNTERSUCHUNGEN

Es liesse sich eine fast unbegrenzte Liste von noch nicht hinreichend geklärten Sachverhalten aufstellen. Hier möchte ich mich auf wenige Hinweise beschränken.

Um den Einfluss des Kalziumkarbonats auf das mechanische Verhalten von Löss exakt darstellen zu können, bedarf es mikroskopischer Untersuchungen, die einen besseren Aufschluss über die Veränderlichkeit der Karbonatphase geben können, als es in dieser Arbeit geschehen ist.

Ein Vergleich der Umstände beim Gefügebruch in Feld- und Laborversuchen setzt die Kenntnis der Querdehnung voraus. Nach

SCHULTZE/MUHS (1967) sind die plastischen Querdehnungen am genauesten durch K_o -Versuche zu erhalten. KANE (1973) stellte bei nordamerikanischen Lössen im Verlauf der Belastung wechselnde Querdehnungen fest. Ähnliche Ergebnisse dürfen auch von kalkverkitteten Lössen zu erwarten sein.

Zur Klärung der Scherfestigkeit im Gesamtverband sind grossmaßstäbliche in situ-Versuche erforderlich.

Um eine Beziehung zwischen Kohäsion und Kalkgehalt herstellen zu können, müsste es gelingen, Lößproben einen Teil ihres Kalkgehaltes ohne Störung des Gefüges zu entziehen, z.B. durch dosiertes Einleiten von Salzsäuregas.

Ferner wäre eine Nachrechnung der Feldversuche mit besonderen Berechnungsmodellen von Interesse.

17. VERGLEICH FELDVERSUCHE-LABORVERSUCHE

Die Problematik der Übertragung von Ergebnissen aus dem Labor auf die wirklichen Verhältnisse ist so vielseitig, dass hier im einzelnen nicht darauf eingegangen werden kann. Der Vergleich beschränkt sich hier auf lediglich zwei Beispiele, in denen deutlich zum Ausdruck kommt, dass ohne ausführliche und ergänzende Versuchsreihen eine stichhaltige Erklärung der Widersprüchlichkeiten nicht möglich ist.

17.1 Vergleich der Setzungen

Mit Hilfe der aus dem Druck-Setzungs-Diagramm (Teil IV A8) ermittelten Steifemoduln E_s bei einer Belastung von $2,0 \text{ kp/cm}^2$ wurden die Setzungen der Lastplatten nach der Theorie des elastisch-isotropen-inhomogen Halbraums entsprechend DIN 4019 - Blatt 1 berechnet und den gemessenen Setzungen bei einer Belastung von $2,0 \text{ kp/cm}^2$ gegenübergestellt:

Druckplatten-durchmesser	gemessene Setzung	errechnete Setzung
35,7 cm	0,14 cm	0,80 cm
60,0 cm	0,20 cm	1,65 cm

17.2 Vergleich der Steifemoduln bei unbehinderter Seitendehnung

Aus den im Plattendruckversuch gemessenen Setzungen kann nach dem Ansatz von SCHLEICHER (Abschn. 13.1.3) auf den "Steifemodul des Baugrundes E'_s " geschlossen werden. Aus diesem soll wiederum der Steifemodul bei unbehinderter Seitendehnung E , der nach der Theorie mit dem Elastizitätsmodul des Bodens identisch ist, nach folgender Gleichung bestimmt werden können:

$$E = (1 - \nu^2) E'_s \quad [\text{kp/cm}^2]$$

Für die Beziehung zwischen E und E_s gilt:

$$E = \frac{1 - \nu - 2\nu^2}{1 - \nu} E_s \quad [\text{kp/cm}^2]$$

Dem folgenden Vergleich wurden die Ergebnisse von Versuchen mit einem natürlichen Wassergehalt des Bodens von $w_n = 13 \%$ und einer Belastung von $p = 1,0 \text{ kp/cm}^2$, sowie einer Querdehnzahl $\nu = 0,19$ (vgl. Abschn. 13.1.1) zugrunde gelegt.

Steifemodul bei unbehinderter Seitendehnung (kp/cm^2) ermittelt aus	
Zylinderdruckversuch	83,1
Kompressionsversuch	82,1
Lastplattenversuch	384,7

17.3 Folgerung

Während die gemessenen und berechneten Setzungen im ersten Vergleich auf eine ähnliche Diskrepanz zwischen den aus Labor-

und in Feldversuchen ermittelten Steifemoduln E schliessen lassen, ist die relativ gute Übereinstimmung der im Labor ermittelten Werte auffallend. Aufgrund dieser Tatsache muss der Festigkeitsverlust in erster Linie auf Gefügestörungen bei der Entnahme, der Bearbeitung und dem Einbau der Bodenprobe zurückzuführen sein.

An einer Fehleinschätzung von Setzungen trägt deshalb nicht die Spannungsberechnung die hauptsächliche Schuld, sondern diese ist bei der Bestimmung eines wirklichkeitsnahen Steifemoduls im Labor zu suchen. SHERIF (1973) kam zum gleichen Schluss und hat aus diesem Grund vorgeschlagen, der Einfachheit halber eine Berechnung der Bodenspannungen nach der Theorie des elastisch-isotropen Halbraums einer anderen vorzuziehen.

18. ZUSAMMENFASSUNG

Im Grundlagenteil dieser Arbeit konnte die Bedeutung der Genese auf das Gefüge des Primärlösses herausgestellt werden. In erster Linie trat in diesem Zusammenhang die Verkarbonatisierung des Korngerüstes in den Vordergrund.

Im weiteren Verlauf konnte die Tragweite dieses genetischen Prozesses für bodenmechanische Belange abgesteckt werden. Es zeigte sich, dass der LÖß infolge seines spezifischen Aufbaus nicht als bindiger Erdstoff im Sinne der Definition eines Dreiphasensystems betrachtet werden kann, sondern vielmehr eine Ausnahmestellung einnimmt. Er setzt sich demnach aus einer festen, flüssigen, gasförmigen und einer "variablen" Phase zusammen.

Die Bezeichnung "variable" Phase wurde im Hinblick auf ihre wechselnde Bedeutung bei Formänderungsvorgängen gewählt, wo sie im Anfangsstadium der Belastung noch eine selbständige, tragende Funktion ausübt, um sich bei weiterer Laststeigerung

der festen Phase unterzuordnen. In diesem Zusammenhang konnte die mechanische Bedeutung der Rhizosolenien, wie sie im Grundlagenteil hypothetisch unterstellt wurde, durch Versuche bestätigt werden. Dieser Einfluss wurde in der Literatur bisher noch nicht erwähnt.

Durch Ermittlung der Kornverteilung nach verschieden hoher Belastung im Oedometer gelang es, den Kollapsmechanismus zu quantifizieren. Wie zu erwarten war, bestätigte sich die Aussage von KANE (1973), wonach dieser Kollapsmechanismus sowohl im Dreiaxialversuch als auch im Kompressionsversuch als Scherphänomen gedeutet wird. Demzufolge ist das mechanische Verhalten des Lösses durch seine Scherfestigkeit, ausgedrückt als eine Funktion der effektiven Spannungen, bestimmt.

Im weiteren Verlauf konnte die Auffassung widerlegt werden, dass die Übertragung von bodenmechanischen Kennwerten ähnlicher Böden auf ein anderes Gebiet, wie es häufig vorgeschlagen wird (u.a. ZWECK 1957), aus genetischen Gründen nicht möglich ist. Im Hinblick darauf wurde die Schaffung von "Lößregionen" vorgeschlagen.

Um eine aussagekräftige Klassifizierung vornehmen zu können, reichen die Bestimmungsverfahren nach den einschlägigen Vorschriften nicht aus. Es wurden Vorschläge für effektivere Verfahren unterbreitet.

SCHRIFTTUMSNACHWEIS

- Alaily, F.A. (1972), *Entstehung von Decklehmen auf Liasschichtflächen in Südwestdeutschland und die Veränderung durch Bodenbildung*
Diss. Universität Hohenheim
- Bachmann, G.H./Gwinner, M.P. (1971), *Nordwürttemberg*
Sammlung geologischer Führer, Bd. 54, Verlag Gebr. Borntraeger Berlin - Stuttgart
- Bagnold, R.A. (1941), *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*
ed. Methuen and Co. London
- Bernatzik, W. (1947), *Baugrund und Physik*,
Schweizer Druck- und Verlagshaus Zürich
- Bishop, A.W. (1960), *The Principle of Effective Stress*
Norwegian Geotechn. Inst. Publication no. 32, Oslo
- Borowicka, H. (1962), *Bodenmechanik - Felsmechanik*
Österr. Ingenieur-Zeitschrift, Heft 6, 192
- Brand, W. (1962), *Der Einfluß von Kalziumhydroxyd auf die Eigenschaften schluffiger Böden im Straßenbau*
Diss. Technische Hochschule Aachen
- Brunnacker, K. (1957), *Bemerkungen zur Feinstgliederung und zum Kalkgehalt des Lösses*,
Eiszeitalter und Gegenwart 8, 107
Verlag der Hohenloh'schen Buchhandlung F. Rau, Öhringen
- Caquot, A./Kérisel, J. (1967), *Grundlagen der Bodenmechanik*
Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York
- Dapples, E.C. (1959), *Basic Geology for Science and Engineering*
ed. John Wiley & Sons, New York
- Fachnormenausschuß Bauwesen (1969), *Baugrund - Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung des Wassergehalts durch Ofentrocknung*
DIN 18121 Blatt 1
- Fachnormenausschuß Bauwesen (1969), *Baugrund - Untersuchung von Bodenproben, Zustandsgrenzen, Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze*
DIN 18122 Blatt 1 (Vornorm)
- Fachnormenausschuß Bauwesen (1971), *Baugrund - Untersuchung von Bodenproben, Korngrößenverteilung*
DIN 18123 (Vornorm)
- Fachnormenausschuß Bauwesen (1970), *Baugrund - Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Rohdichte, Labormethoden*
DIN 18125 Blatt 1 (Vornorm)
- Fachnormenausschuß Bauwesen (1970), *Baugrund - Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der einaxialen Druckfestigkeit*
DIN 18136 (Entwurf)
- Fachnormenausschuß Bauwesen (1970), *Erdbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke und Methoden zum Erkennen von Bodengruppen*
DIN 18196

- Dürr, F. (1953), *Feinstratigraphische Studien III*
N. Jahrbuch f. Geologie u. Paläontologie, 37
E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart
- Freising, H. (1949), *Löbe, Fließerden und Wanderschutt im nördlichen Württemberg*,
Diss. Technische Hochschule Stuttgart
- Freising, H. (1951), *Neuere Ergebnisse der Lößforschung im nördlichen Württemberg*,
Jahrbuch geol. Abt. Württ. Statist. Landesamt, 1, 54, Stuttgart
- Frisch, H./Simon, A.B. (1974), *Beitrag zur Ermittlung der vertikalen und horizontalen Bettungsziffer*,
Die Bautechnik 8, 259-262
- Füchtbauer, H./Müller, G. (1970), *Sediment-Petrologie, Teil II: Sedimente und Sedimentgesteine*
E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart
- Geologisches Landesamt Baden-Württemberg (1959), *Erläuterungen zur Geologischen Karte von Stuttgart und Umgebung M. 1:50.000, Teil 1*
Eigenverlag Geol. Landesamt, Freiburg i. Breisgau
- Geologisches Landesamt Baden-Württemberg (1959), *Erläuterungen zur geologischen Exkursionskarte des Kaiserstuhls M. 1:25.000*
Eigenverlag Geol. Landesamt, Freiburg i. Breisgau
- Geologisches Landesamt Baden-Württemberg (1962), *Geologische Übersichtskarte von Baden-Württemberg M. 1:200.000*
Eigenverlag Geol. Landesamt, Stuttgart
- Geyer, O.F./Gwinner, M.P. (1968), *Einführung in die Geologie von Baden-Württemberg*
E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart
- Grahmann, R. (1932), *Der Löß in Europa*
Mitt. Gesellschaft f. Erdkunde 51, 5, Leipzig
- Guenther, E.W. (1953), *Feinstratigraphische Studien III*
N. Jahrbuch f. Geologie u. Paläontologie, 37
E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart
- Guenther, E.W. (1953), *Feinstratigraphische Studien IV*
N. Jahrbuch f. Geologie u. Paläontologie, 369
E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart
- Harrassowitz, H. (1931), *Die chemische Zusammensetzung der Lösses*
Zeitschrift Deutsch. Geol. Gesellsch. 83, 658
- Henke, K.F. (1971), *Bautechnische Bodenkunde und Bodenmechanisches Praktikum*
Vorlesungsumdruck, Universität Stuttgart
- Hohl, R. (1959), *Zur Ausbildung der Geologieingenieure*
Zeitschrift f. angewandte Geologie, Heft 2, 84
- Horn, A. (1964), *Die Scherfestigkeit von Schluff*
Forschungsberichte d. Landes Nordrhein.-Westfalen, Nr. 1346
Westdeutscher Verlag Köln und Opladen
- Jesenák, J. (1965), *Baugrundmechanische Probleme bei der ingenieurgeologischen Erkundung großflächiger Gebiete*
Zeitschrift f. angewandte Geologie 11, 325
- Kahl, R.W. (1972), *Geologie und Bodenmechanik des Rheinischen Schluffs*
Diss. Techn. Hochschule Aachen
- Kallenbach, H. (1965), *Mineralbestand und Genese südbayerischer Lösses*
Geolog. Rundschau 55, 582

- Kane, H. (1973), *Confined compression of loess*
Proceedings 8. ICSMFE Moskau, vol. 2.2, 115-122
- Karrenberg, H. (1962), *Die Ingenieurgeologie heute*
Zeitschrift Deutsch. Geolog. Gesellsch. 114, 135
- Keil, K. (1953), *Die Geotechnik in ihrer Beziehung zur Geologie,
Bautechnik und Geophysik*, Geologie u. Bauwesen 20, 177
- Keilhack, K. (1921), *Das Rätsel der Lössbildung*
Zeitschrift Deutsch. Geolog. Gesellsch., Monatsber. 6/7, 146
- Keller, G. (1962), *Ingenieurgeologie und Bauwesen*
Zeitschrift Deutsch. Geolog. Gesellsch. 114, 139
- Kézdi, A. (1969, 1970, 1973), *Handbuch der Bodenmechanik Bd. 1, 2 und 3*
VEB Verlag für Bauwesen Berlin
- Koenig, H.W./Heitfeld, K.H. (1962), *Die Notwendigkeit und Ausmaß geologischer
Untersuchungen im Talsperrenbau*
Geologie und Bauwesen 28, 63
- Kotzias, P. (1963), *Die Zusammendrückbarkeit von Schluff*
Mitt. Inst. Verkehrswasserbau, Grundbau u. Bodenmechanik
Nr. 28, Eigenverlag, Techn. Hochschule Aachen
- Louis, H. (1968), *Allgemeine Geomorphologie*
Verlag Walter de Gruyter & Co, Berlin
- Murawski, H. (1972), *Geologisches Wörterbuch*
Enke-Verlag Stuttgart
- Neumann, R. (1964), *Geologie für Bauingenieure*
Verlag W. Ernst und Sohn Berlin - München
- Neumann, R. (1959), *Kritische Betrachtung der Ergebnisse und Verwendung von
Sedimentations-Analysen, Tonindustrie-Zeitung und
Keramische Rundschau* 83, 446
- Neumann, R. (1959), *Zum Einfluß des Kalkgehaltes auf die Korngrößenanalysen
mitteldeutscher Lösses*, Zeitsch. angewandte Geologie,
Heft 11, 544
- Odendahl, R. (1969), *Die Scherfestigkeit des ungestörten rheinischen Schluffs*
Forschungsberichte d. Landes Nordrhein.-Westfalen Nr. 2039
Westdeutscher Verlag Köln und Opladen
- Rahmann, A. (1973), *The behaviour of loess in confined compression*
Doctor Thesis, University of Iowa
- v. Richthofen, F. (1878), *Bemerkungen zur Lössbildung*, Verhandlungen der k.k. Geolo-
gischen Reichsanstalt Wien, Nr. 13, 289
- Reuter, F. (1965), *Die ingenieurgeologischen Eigenschaften von Löss und löß-
artigen Gesteinen im Spiegel der neueren sowjetischen
Literatur*, Zeitsch. angewandte Geologie 11, 33
- Sander, B. (1948), *Einführung in die Gefügekunde geologischer Körper*
Springer-Verlag Wien - Innsbruck
- Scheidig, A. (1934), *Der Löss und seine geotechnischen Eigenschaften*
Verlag Steinkopff Dresden und Leipzig
- Schiel, F. (1943), *Der durch Kapillarwirkung bedingte Zusammenhalt zweier
Körper*, ZAMM 23, 200
- Schlenker, B. (1971), *Petrographische Untersuchungen am Gipskeuper und Letten-
keuper von Stuttgart*,
Diss. Universität Tübingen

- Schönhals, E. (1952), *Gesetzmäßige Beziehungen zwischen Körnung und Kalkgehalt
des Lösses*, Geolog. Jahrbuch 66, 291
- Schönhals, E. (1953), *Gesetzmäßigkeiten im Feinaufbau von Talrandlössen mit
Bemerkungen über die Entstehung des Lösses,
Eiszeitalter und Gegenwart* 3, 19, Verlag der Hohenloh'-
schen Buchhandlung F. Rau, Öhringen
- Schultze, E. (1972), *Bodenmechanische Probleme bei Schluff*
Mitt. Inst. Verkehrswasserbau, Grundbau u. Bodenmechanik
Nr. 55, Eigenverlag Techn. Hochschule Aachen
- Schultze, E./Muhs, H. (1967), *Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten*
Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York
- Sherif, G. (1973), *Setzungsmessungen an Industrie- und Hochbauten und ihre
Auswertung*, Mitt. Inst. Verkehrswasserbau, Grundbau und
Bodenmechanik Nr. 57, Eigenverlag Techn. Hochschule Aachen
- Smalley, I. J. (1966), *The properties of glacial loess and the formation of
loess deposits*, Journ. Sedimentary and Petrology 36, 669
- Smith, G. D. (1942), *Illinois loess, variation in its properties and distrib-
ution, a pedologic interpretation*
University of Illinois Agricult. Experiment Station
Bulletin 490, 139
- Terzaghi, K. (1925), *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*
Verlag Deuticke Leipzig - Wien
- Terzaghi, K. (1955), *Influence of geological factors on the engineering
properties of sediments*,
Harvard Soil Mechanics Series no. 50
- Vees, E. (1970), *Die Gesetzmäßigkeiten der Ionenbeläge und ihre Heran-
ziehung zur Deutung des Verhaltens bodenmechanischer
Kenngrößen*, Diss. Universität Stuttgart
- Wagner, G. (1960), *Einführung in die Erd- und Landschaftsgeschichte mit
besonderer Berücksichtigung Süddeutschlands*
Verlag der Hohenloh'schen Buchhandlung F. Rau, Öhringen
- Wedepohl, K. H. (1967), *Geochemie*
Sammlung Göschen Bd. 1224, 1224a, 1224b, Verlag Walter
de Gruyter & Co, Berlin
- Weidenbach, F. (1952), *Gedanken zur Lößfrage*
Eiszeitalter und Gegenwart 2, 25, Verlag der Hohenloh'
schen Buchhandlung F. Rau, Öhringen
- Wild, H. (1968), *Erläuterungen zu Blatt 6821 Heilbronn der Geologischen
Karte M. 1:25.000*
Eigenverlag Geol. Landesamt Baden-W., Freiburg i. Breisgau
- Woldstedt, P. (1954), *Das Eiszeitalter - Grundlinien einer Geologie des
Quartärs*,
Enke-Verlag Stuttgart
- Yong, R. N./Warkentin, B. P. (1966), *Introduction to Soil Behavior*
ed. Macmilland Company New York - London
- Zürl, K. (1957), *Verbreitung, Gliederung und Alter der Lösses und Lehme auf
den Fildern bei Stuttgart*, Diss. Techn. Hochschule Stuttgart
- Zweck, H. (1957), *Löss als Baugrund*,
Der Bauingenieur 32, 319

TEIL IV ANLAGEN

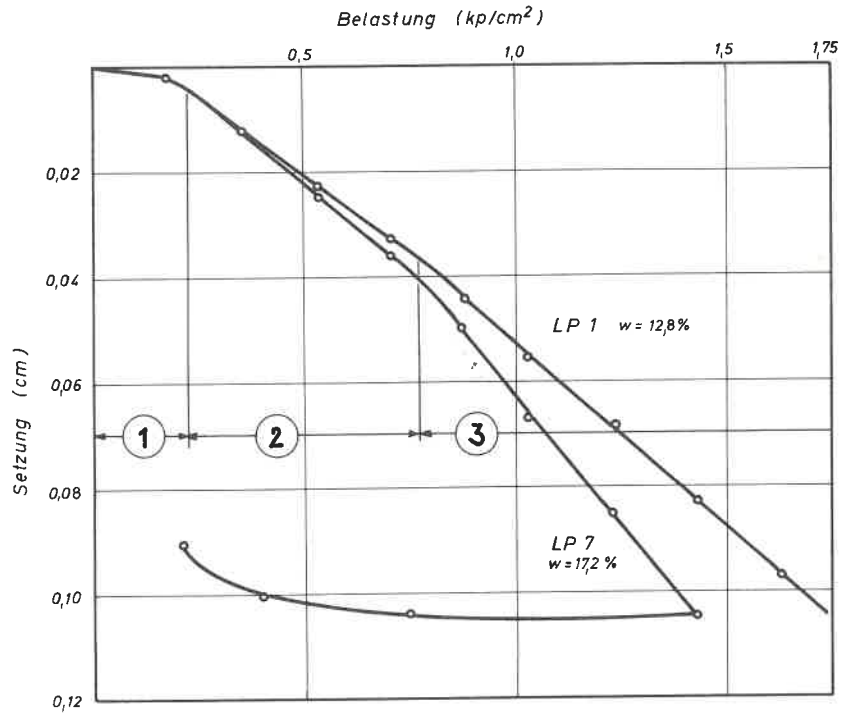
GEOWISSENSCHAFTLICHES FACHWORTGLOSSAR

allochthon	Bezeichnung für Gesteinsbildungen aus ortsfremdem Material
Akkumulation	Anhäufung, Sedimentation
äolisch	durch die Wirkung des Windes zustande gekommen
arid	Klimabereich, in dem die Verdunstung größer als der Niederschlag ist
autochthon	Bezeichnung für Gesteinsmaterial, das sich noch am Ort seiner Bildung befindet
Deflation	abtragende, verfrachtende Wirkung des Windes
Detritus	Gesteinsschutt und Zerreibsel
Diagenese	Verfestigung von Sedimenten
Eluvialboden	Verwitterungsboden, der sich unmittelbar aus dem darunter noch anstehenden Gestein entwickelt hat
Fazies	Bezeichnung der Erscheinungsform, die ein Sediment bei seiner Entstehung erhalten kann
fluvioglazial	durch Gletscherschmelzwässer entstanden
fossil	in geologischer Vergangenheit gebildet
Gefüge	rein beschreibende Darstellung des inneren Aufbaus eines Gesteins; umfaßt dessen Struktur und Textur
Hangendes	das eine Bezugsschicht überlagernde Gestein
Interglazial	Zwischeneiszeit
Interstadial	verhältnismäßig kurze Temperaturschwankung zwischen zwei kälteren Perioden einer Eiszeit
Kalzit	Kalziumkarbonat oder Kalkspat (CaCO ₃)
klastisch	Bezeichnung für Sedimente, deren Material aus der mechanischen Zerstörung anderer Gesteine stammt
Mineralassoziation	gemeinsames Vorkommen verschiedener Mineralindividuen
parautochthon	Bezeichnung für Gesteinsbildungen aus Material der unmittelbaren Umgebung
Petrogenese	Lehre von der Entstehung der Gesteine
Petrologie	Gesteinskunde, umfaßt Petrogenese und Petrographie

Petrographie	Lehre von der Zusammensetzung und Beschreibung der Gesteine
periglazial	Bezeichnung für Räume am Rand von Permafrostgebieten
Plagioklas	Feldspatgruppe; isomorphe Mischkristallreihe von Kalk- und Natronfeldspäten
Postglazial	Nacheiszeit
rezent	in der geologischen Gegenwart entstanden
Rhizosolenie	Wurzelröhrchen im Löß
saiger	Bezeichnung für die annähernd senkrechte Stellung von Flächen oder Körpern
Seigerung	Trennung nach Korngrößen
semiarid	arider Klimabereich, aber mit Niederschlägen im deutlich jahreszeitlichen Wechsel
Solifluktion	Boden- bzw. Erdfließen in periglazialen Gebieten
stratigraphisch	nach der zeitlichen Entstehungsfolge geordnet
Struktur	Korngefüge; qualitative Bezeichnung für die Gesteinsausbildung in bezug auf Form und gegenseitige Abgrenzung der Gemengeteile
subaerisch	an freier Luft gebildet
Textur	Richtungs- und Verteilungsgefüge, Räumliche Anordnung und Verteilung der Gemengeteile in einem Gestein

- S.92:

DIAGRAMME UND ABBILDUNGEN



Um den Verlauf der Druck-Setzungslinien innerhalb des Proportionalitätsbereiches besser erfassen zu können, wurden zwei Lastplattendruckversuche mit kleinen Laststufen ($p = 0,18 \text{ kp/cm}^2$) durchgeführt. Die Ergebnisse bestätigen vollauf den Verlauf der Druck-Setzungslinien aus Versuchen mit größeren Laststufen.

Generell konnten drei Bereiche festgestellt werden, die folgendermaßen interpretiert werden sollen:

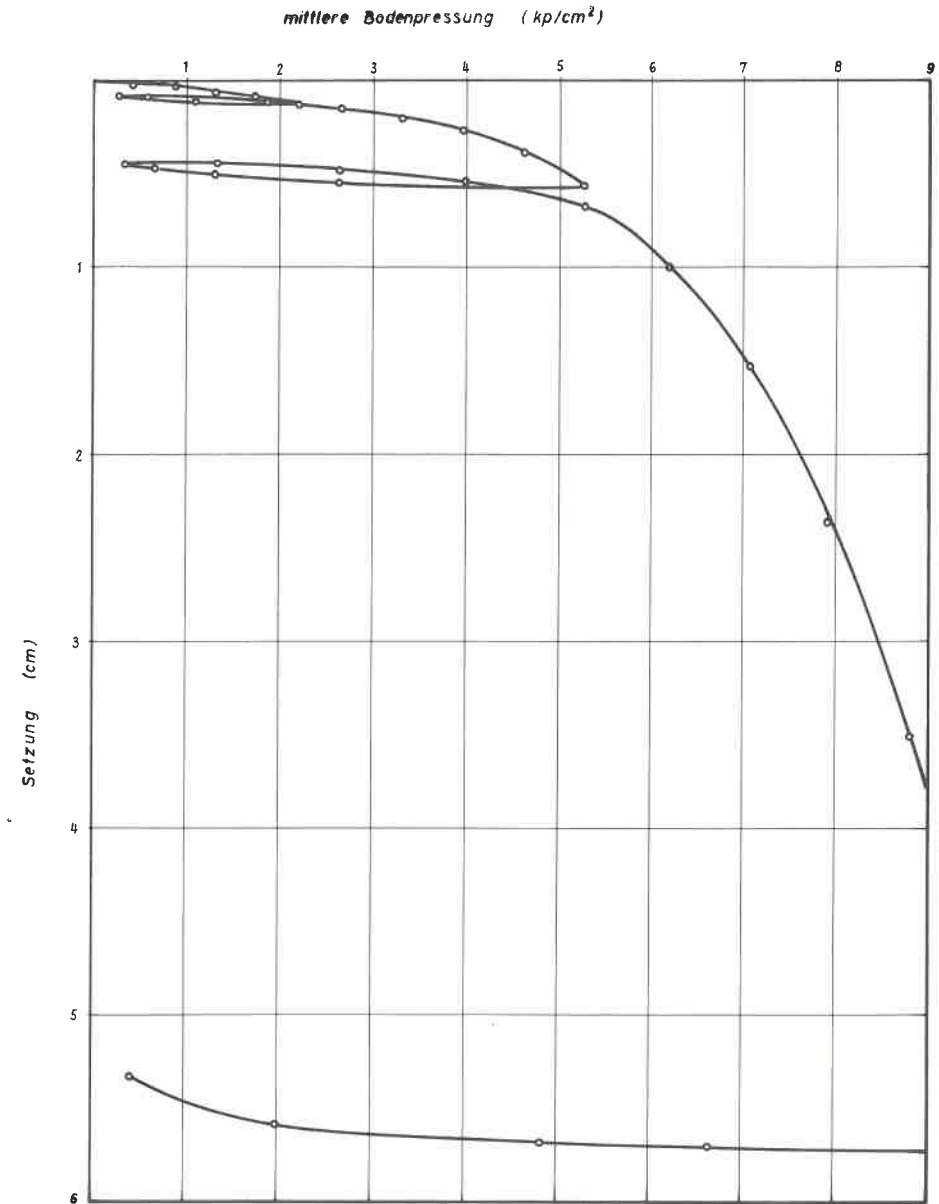
Bereich 1 : Anpassung der Platte an das Gipsbett

Bereich 2 : Proportionalitätsbereich 1, etwa bei $0,75-0,80 \text{ kp/cm}^2$ Bodenpressung erfolgt Gefügezusammenbruch (Knick in der Druck-Setzungsl.). Knick infolge Vorbelastung kann ausgeschlossen werden, da $1,5 \text{ m}$ Boden überlagerte

Bereich 3 : Proportionalitätsbereich 2

Druck - Setzungsdiagramm aus Lastplattendruckversuch
Lastplattendurchmesser: 35,7 cm

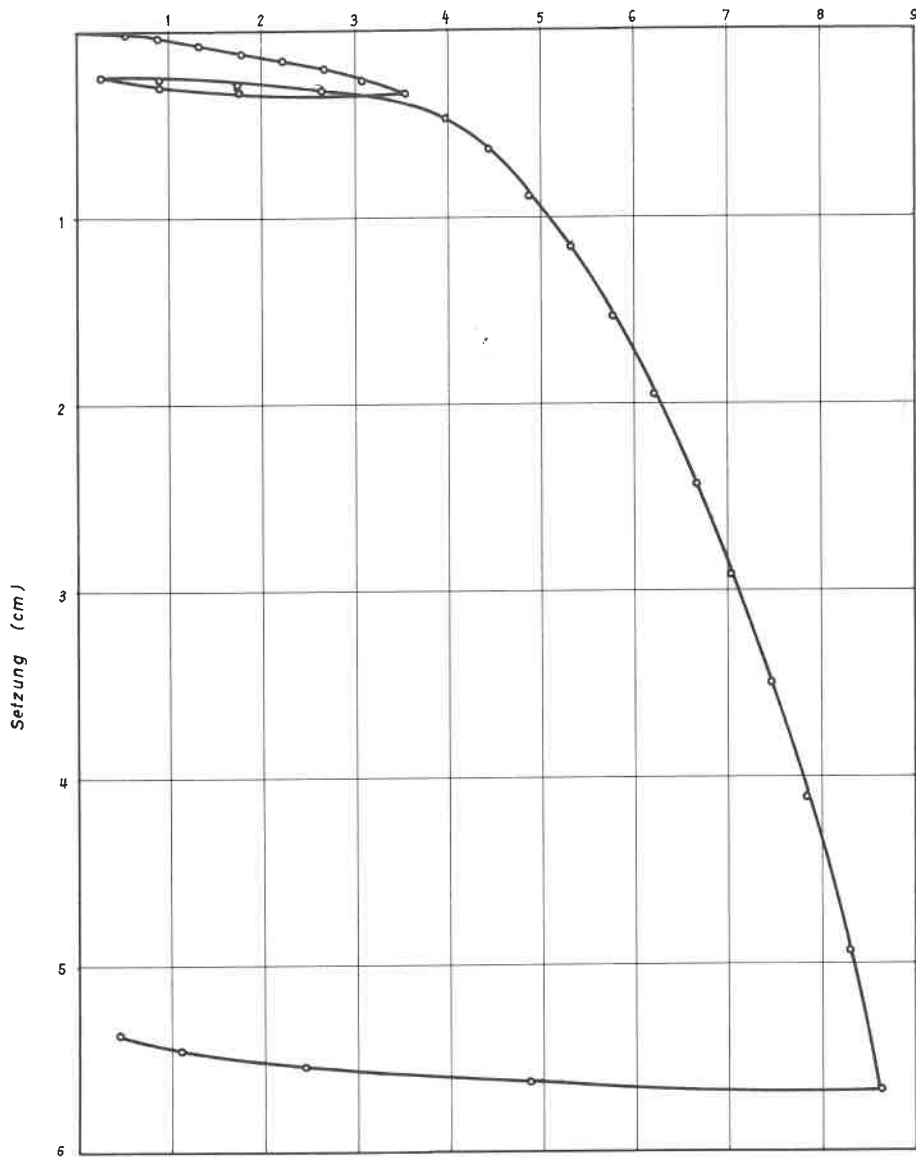
A1



Druck - Setzungsdiagramm aus Lastplattendruckversuch LP 2
Lastplattendurchmesser: 35,7 cm
natürlicher Wassergehalt $w = 12,7\%$

A2

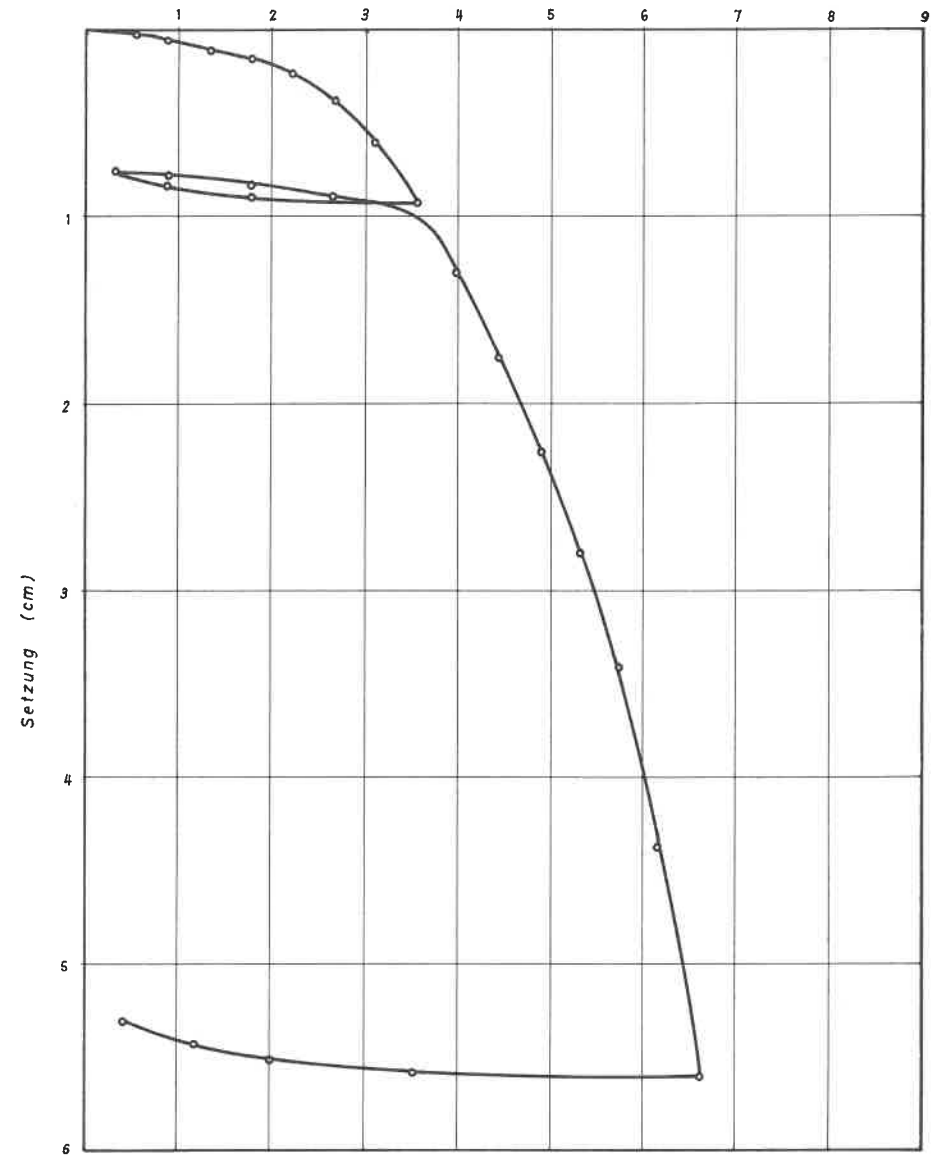
mittlere Bodenpressung (kp/cm²)



Druck - Setzungsdiagramm aus Lastplattendruckversuch LP 3
 Lastplattendurchmesser: 35,7 cm
 natürlicher Wassergehalt $w_n = 14,1\%$

A 3

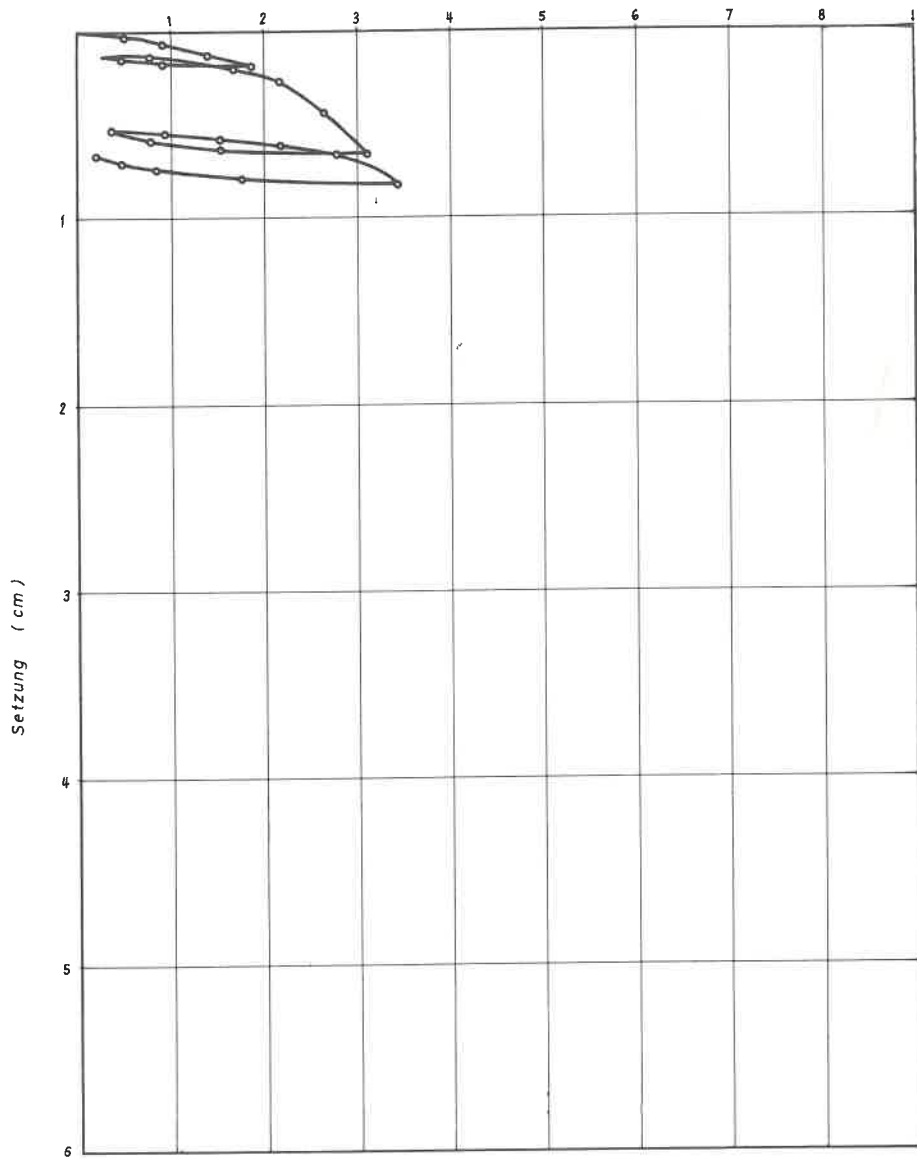
mittlere Bodenpressung (kp/cm²)



Druck - Setzungsdiagramm aus Lastplattendruckversuch LP 6
 Lastplattendurchmesser: 35,7 cm
 natürlicher Wassergehalt $w_n = 16,7\%$

A 4

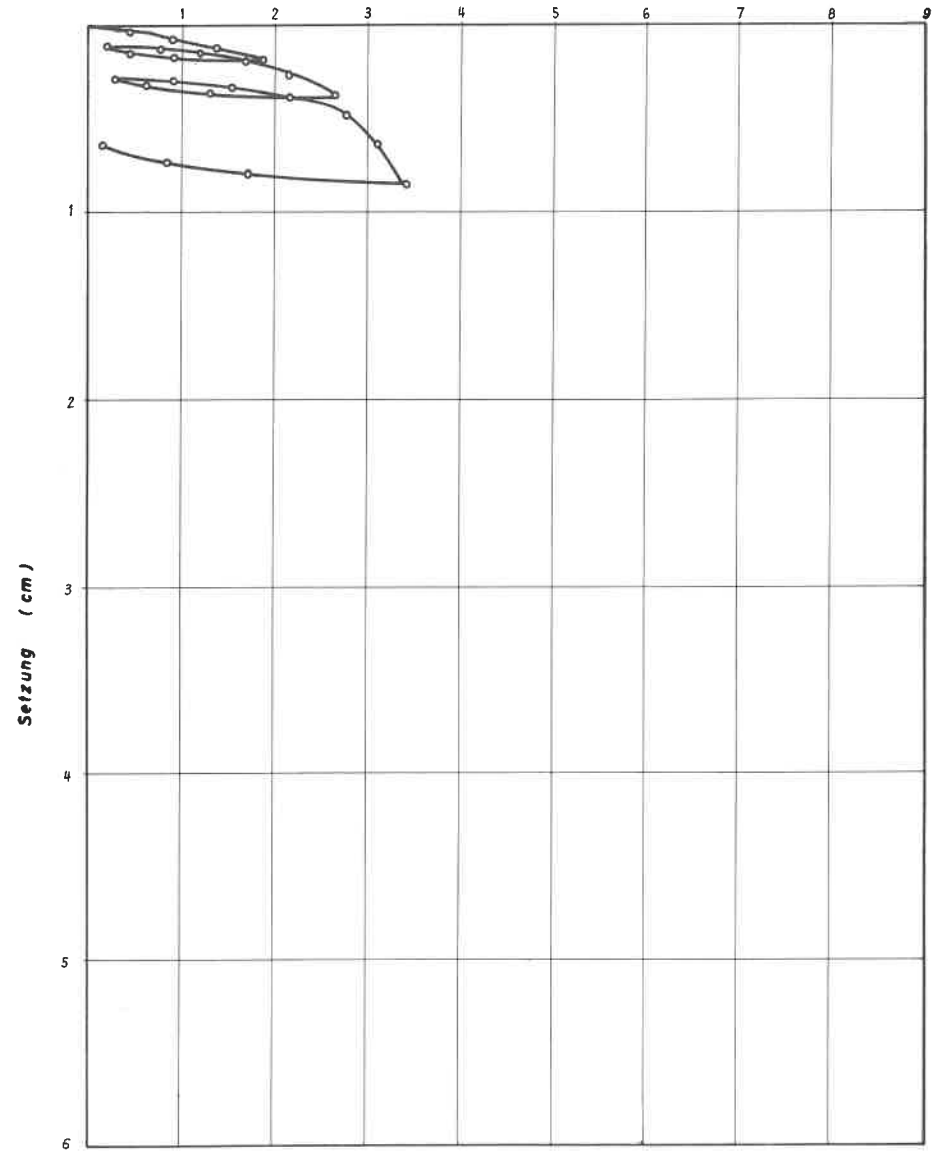
mittlere Bodenpressung (kp/cm²)



Druck - Setzungsdiagramm aus Lastplattendruckversuch LP 4
 Lastplattendurchmesser: 60 cm
 natürlicher Wassergehalt $w_n = 14,2\%$

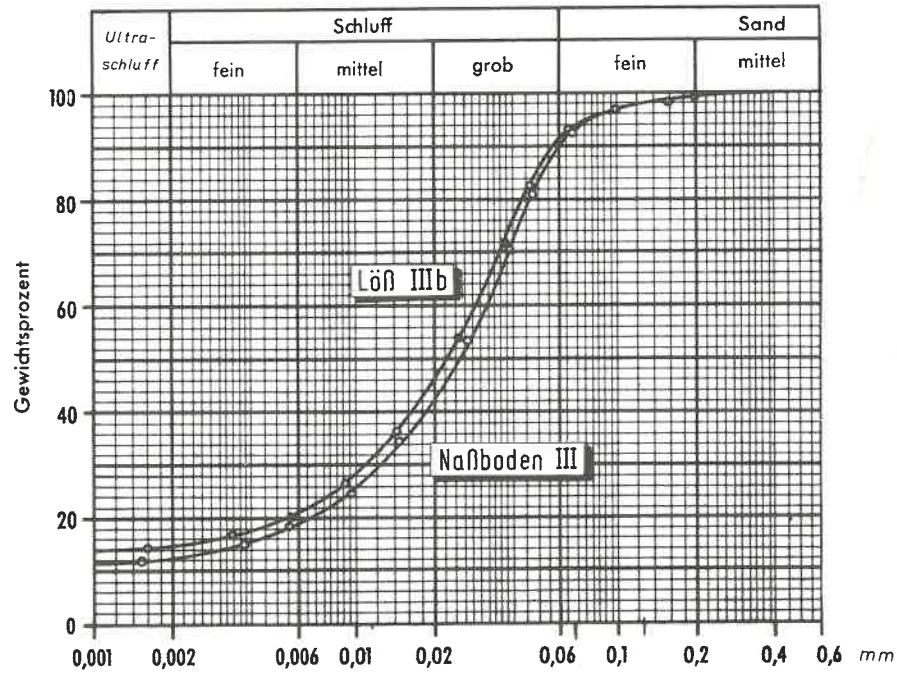
A 5

mittlere Bodenpressung (kp/cm²)



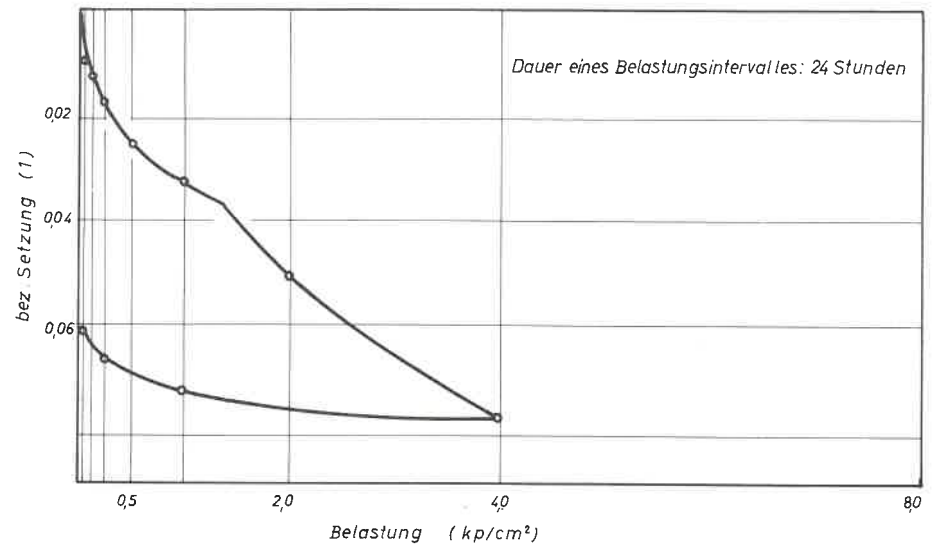
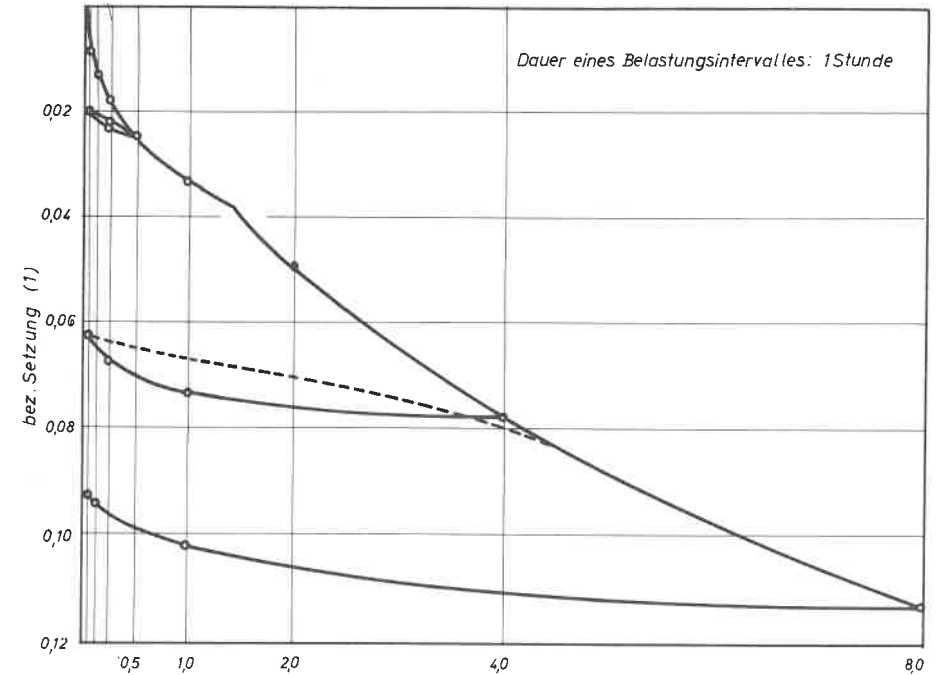
Druck - Setzungsdiagramm aus Lastplattendruckversuch LP 5
 Lastplattendurchmesser: 60 cm
 natürlicher Wassergehalt $w_n = 14,3\%$

A 6



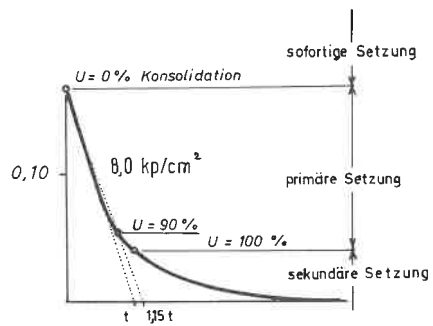
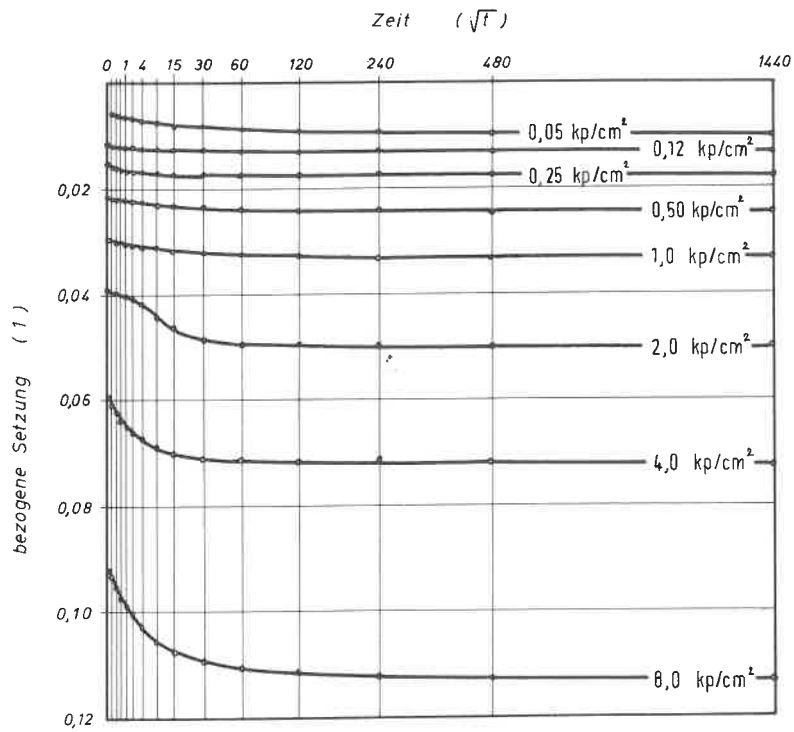
Kornverteilungslinien für Löss IIIb und Naßboden III
aus Heilbronn-Böckingen
Versuchsdurchführung nach DIN 18123
Mittel aus zwei Versuchen

A 7



Druck - Setzungsdiagramm von Löss IIIb
Vergleichsuntersuchung - Belastungszeit

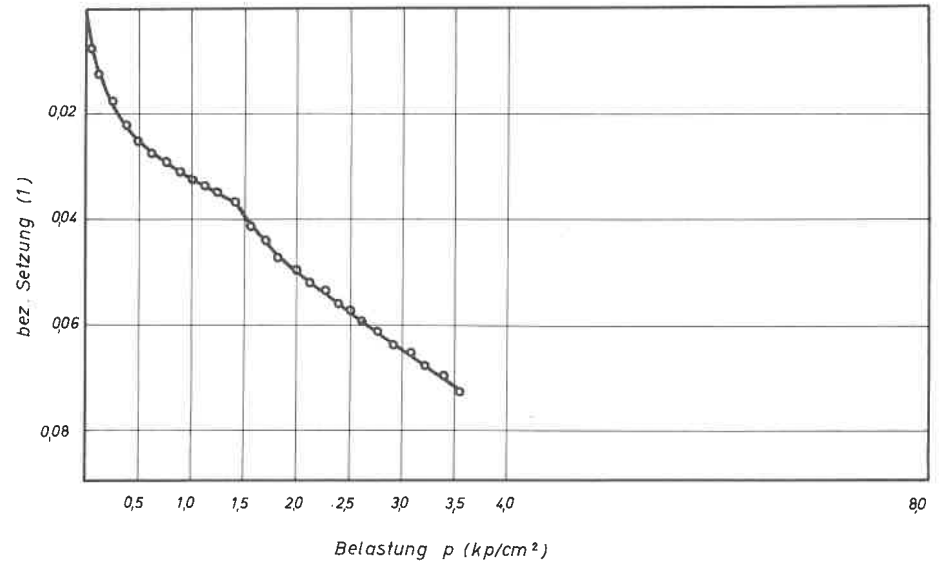
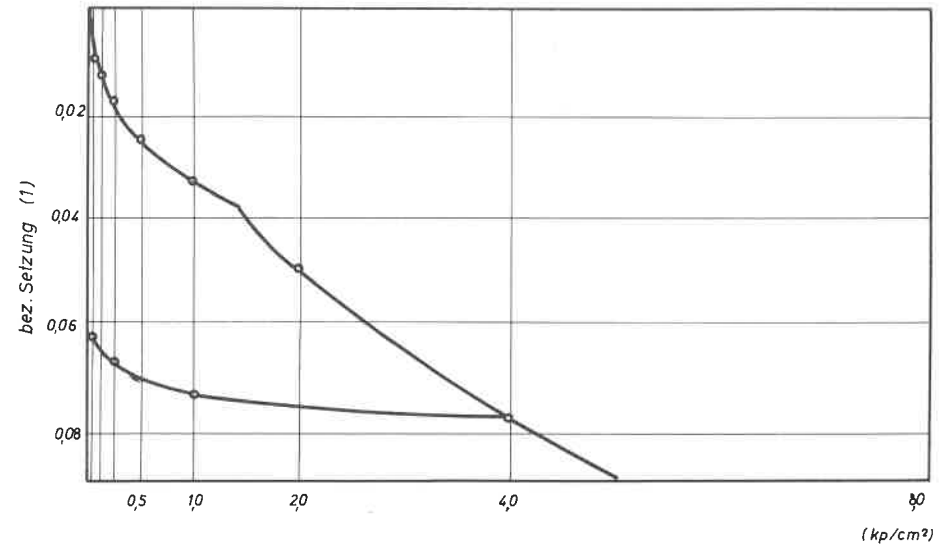
A 8



Auswertung der Zeit-Setzungslinie für Laststufe 8,0 kp/cm²

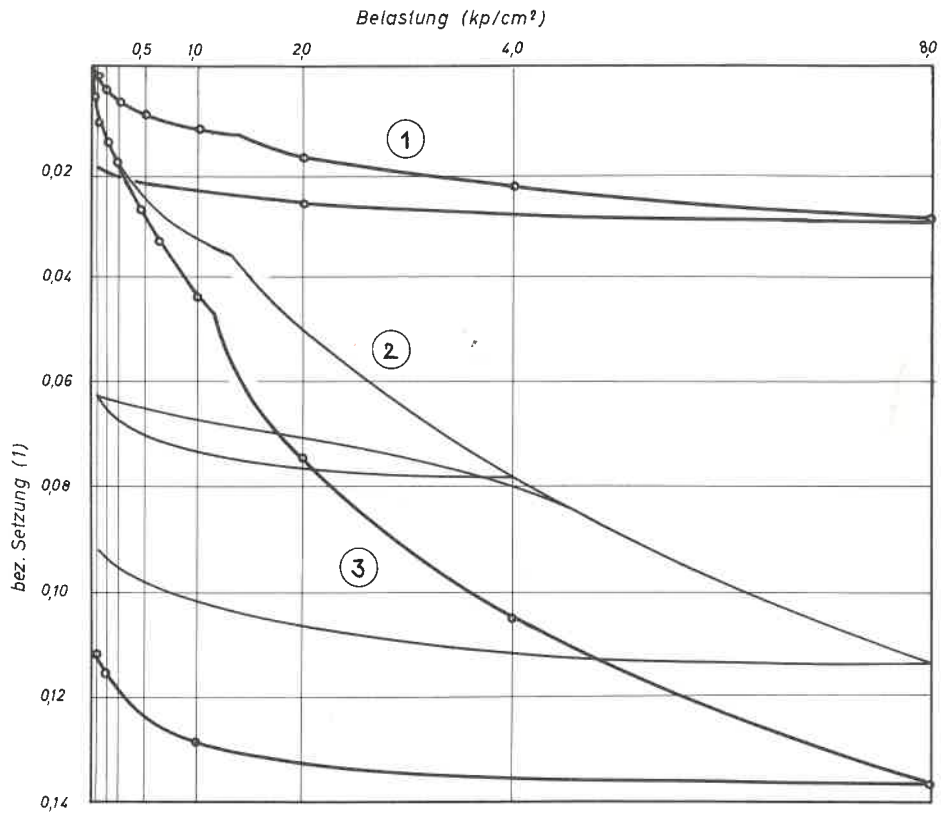
Zeit - Setzungsdiagramm für Löß IIIb
Auswertung einer Zeitsetzungslinie

A 9



Druck - Setzungsdiagramm von Löß IIIb
Vergleichsuntersuchung - Belastungsintervalle

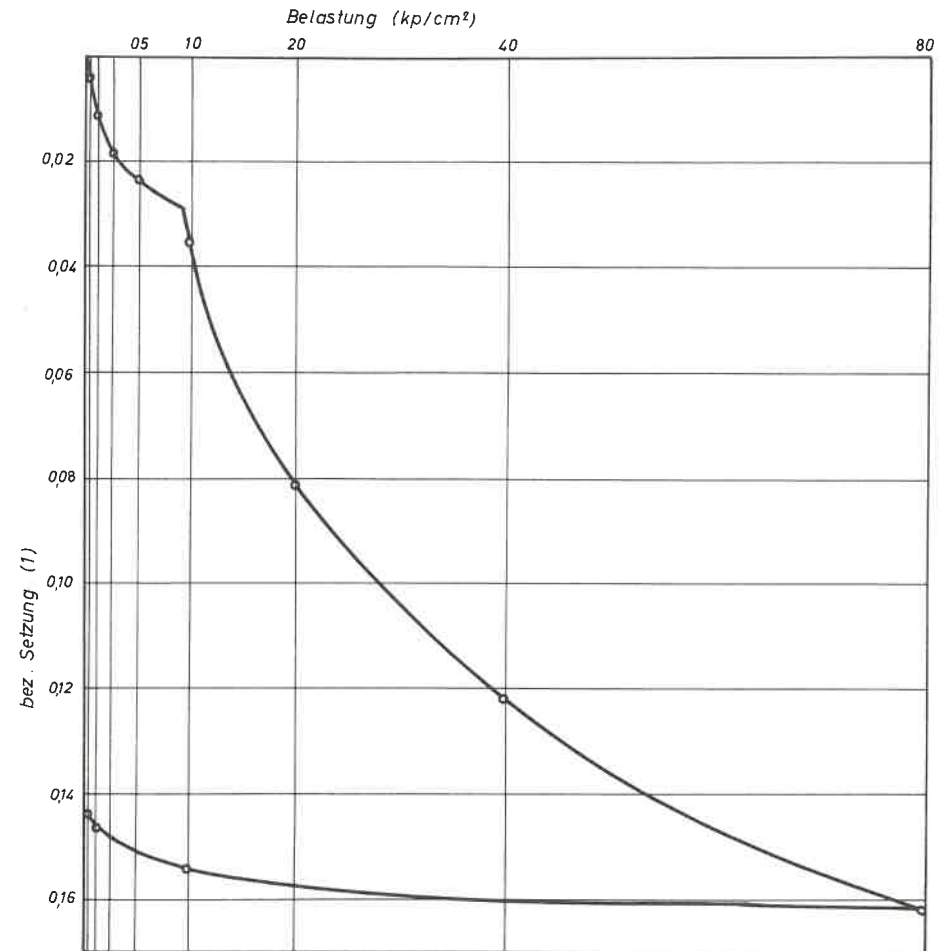
A 10



- 1 Löss III b Wassergehalt $w = 0\%$
- 2 Löss III b $w = 12,4\%$
- 3 Löss III b $w = 100\%$

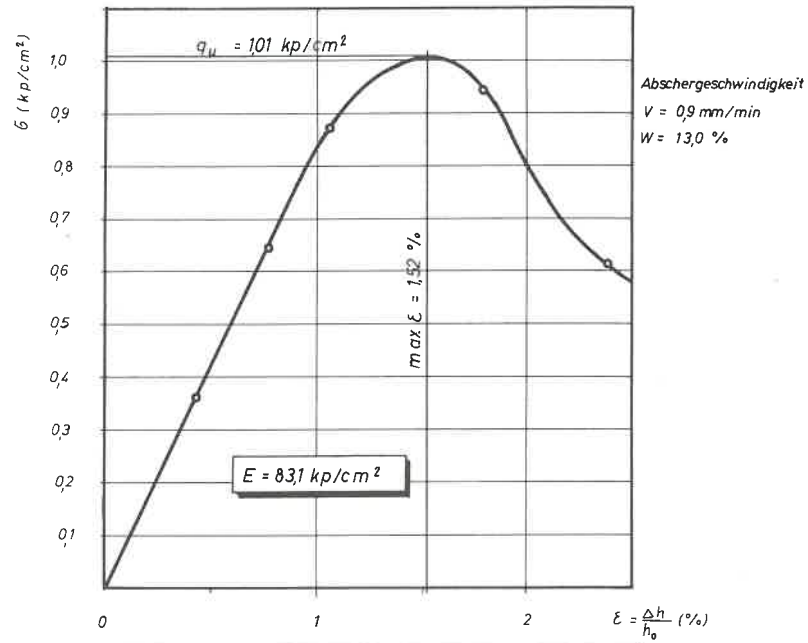
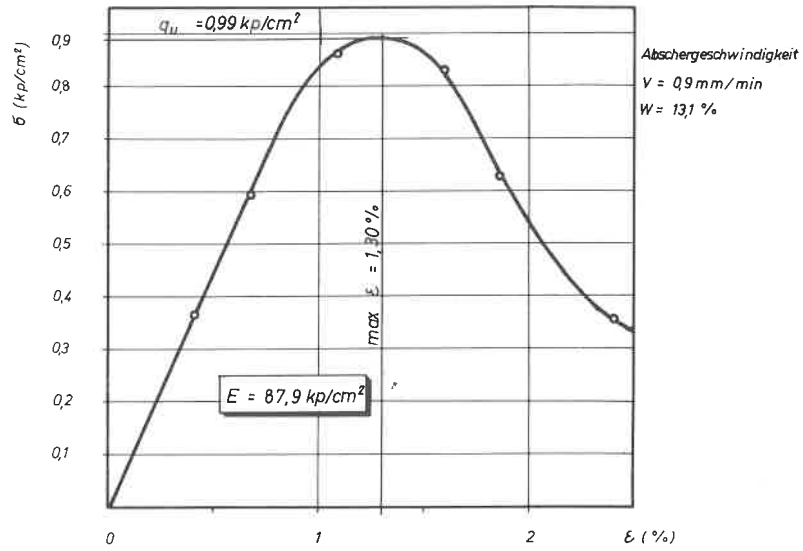
Druck - Setzungsdiagramm von Löss III b
für verschiedene Sättigungsgrade
Belastungsrichtung senkrecht Sedimentationsebene

A 11



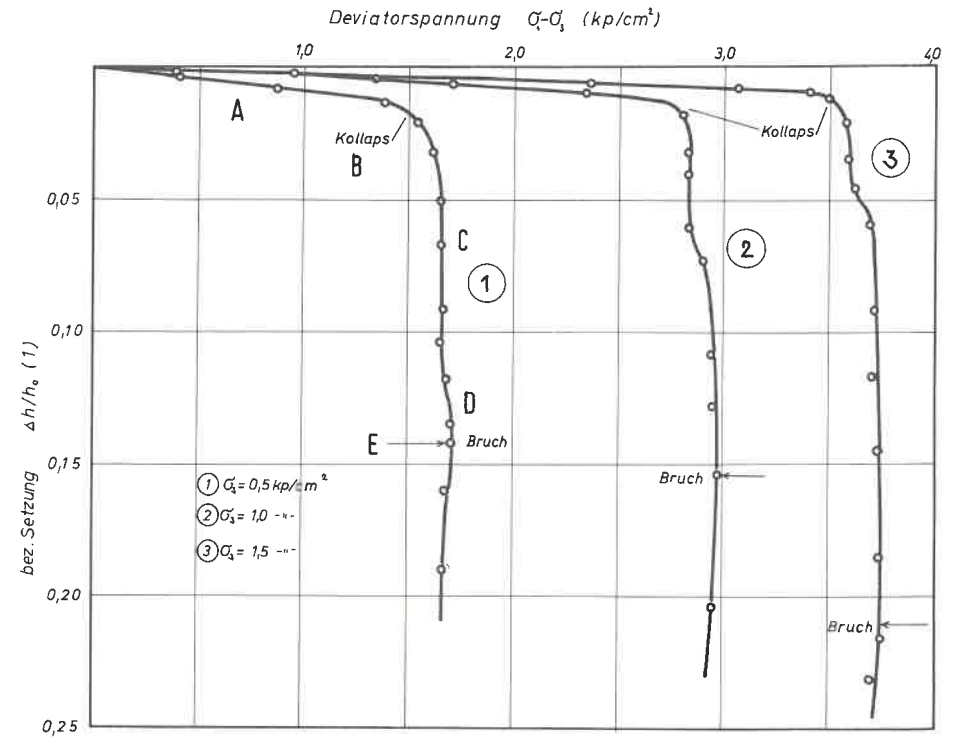
Druck - Setzungsdiagramm von Naßboden III
natürlicher Wassergehalt $w_n = 13,7\%$
Belastungsrichtung parallel Sedimentationsebene

A 12



Ergebnis Zylinderdruckversuch
 LöB IIIb mit natürlichem Wassergehalt

A 13

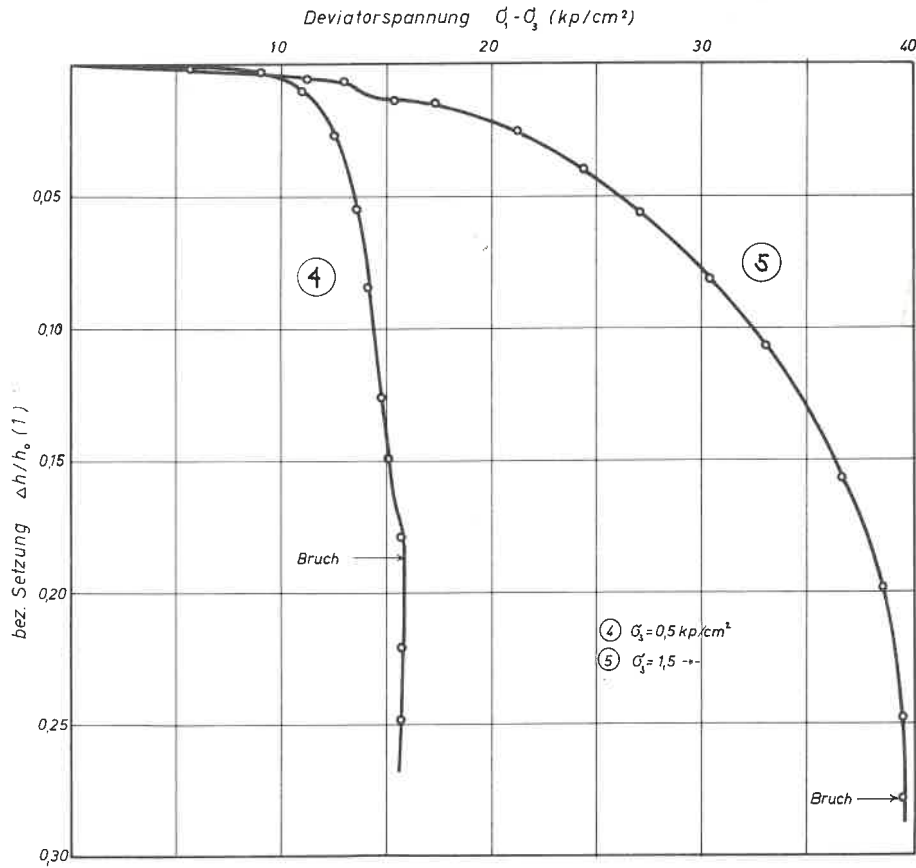


LEGENDE:

- A - Bereich der elastischen Zusammendrückung (Steigungsänderung bei 2 und 3 durch Bruch der Wurzelröhren)
- B - Kollaps des Gefüges
- C - instabile Phase
- D - Verfestigungsphase
- E - Scherbruch

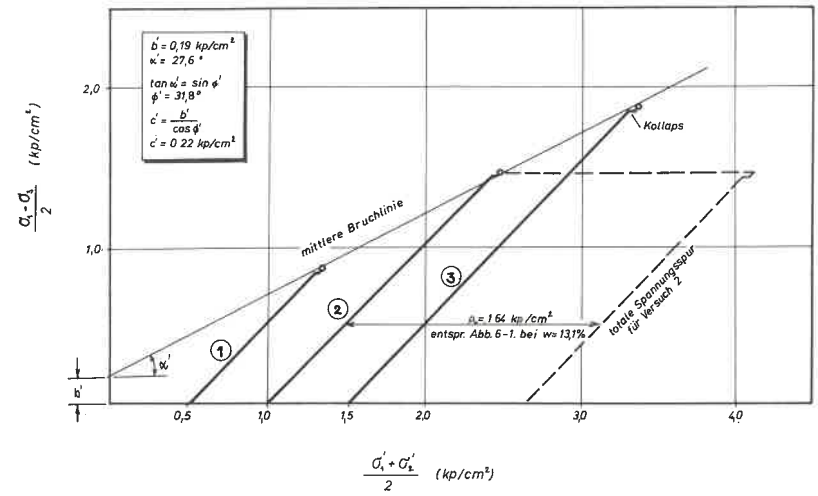
Ergebnisse von CD - Dreiaxialversuchen
 mit LöB IIIb. Größte Hauptspannungsrichtung
 senkrecht Sedimentationsebene

A 14

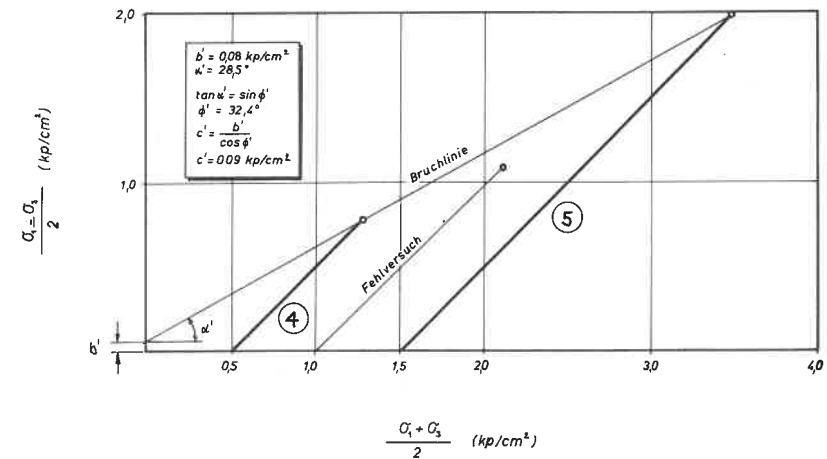


Ergebnisse von CD - Dreiaxialversuchen
mit Löss IIIb. Größte Hauptspannungsrichtung
parallel Sedimentationsebene

A 15



a

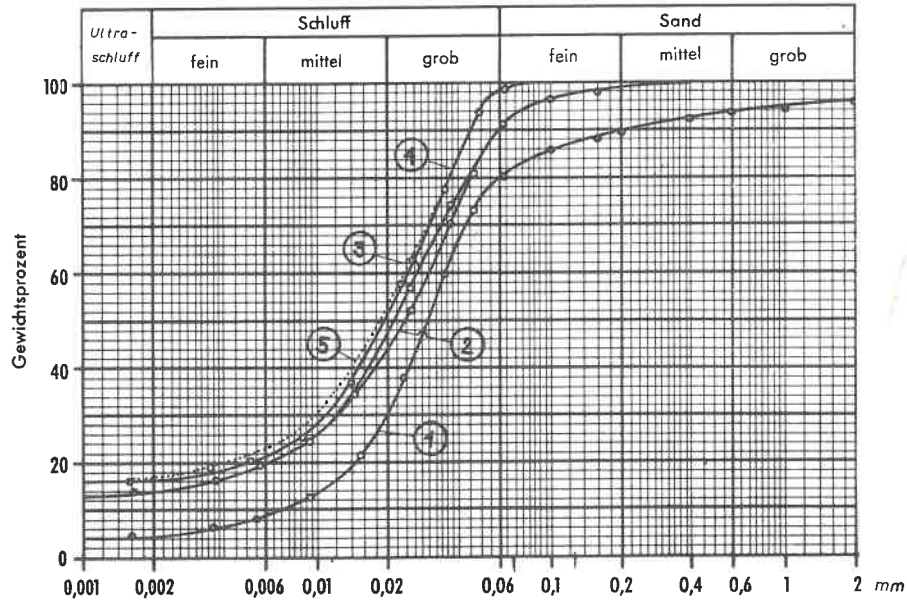


b

Ermittlung der wirksamen Scherparameter für Löss IIIb

- Hauptspannungsrichtung senkrecht Sedimentationsebene
Spannungsspuren von CD-Dreiaxialversuchen, $S_r = 0,44$
- Hauptspannungsrichtung parallel Sedimentationsebene
Spannungsspuren von CD-Dreiaxialversuchen, $S_r = 0,43$

A 16

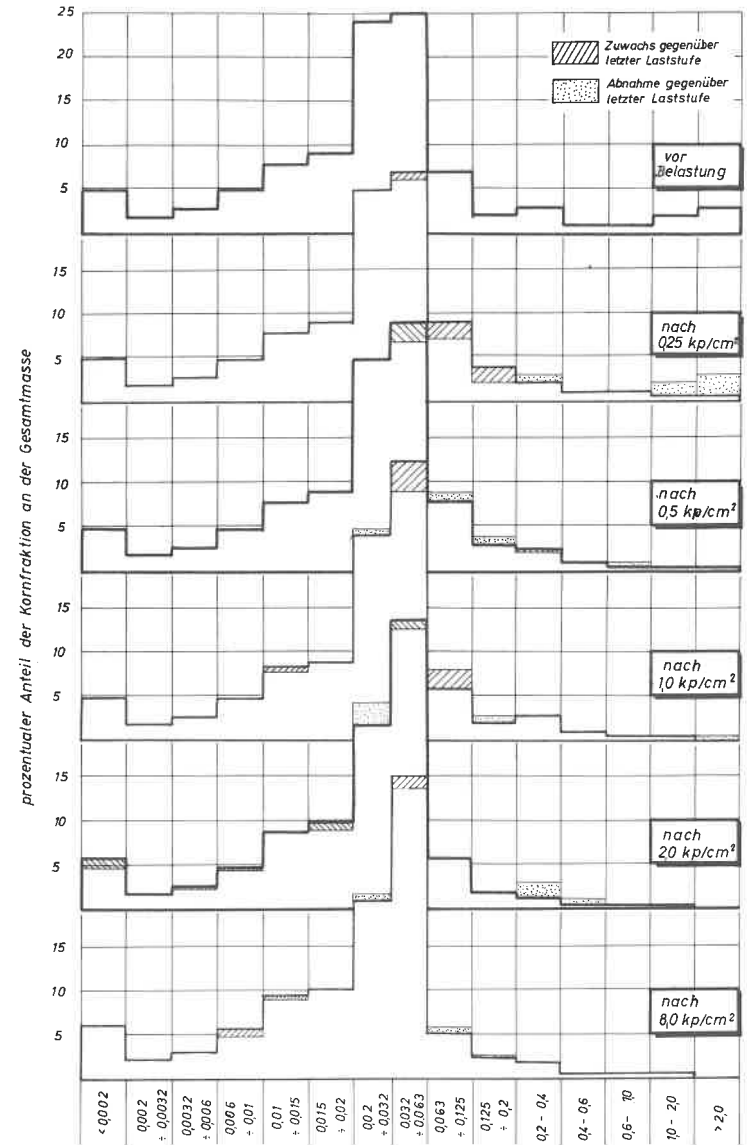


Aufbereitungsmethoden:

- ① Methode 1 (vgl. Abschn. 11.2.1)
- ② nach DIN 18123
- ③ Methode 2 u. 3
- ④ Methode 4
- ⑤ nach ALAILY (vgl. Abschn. 4.2.2)

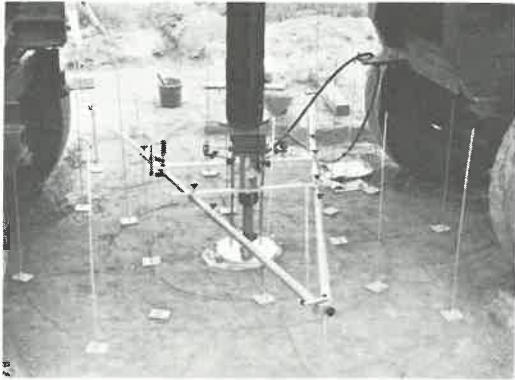
Kornverteilungslinien für Löß IIIb
bei verschiedenartiger Probenaufbereitung
jeweils Mittel aus mindestens zwei Versuchen

A17

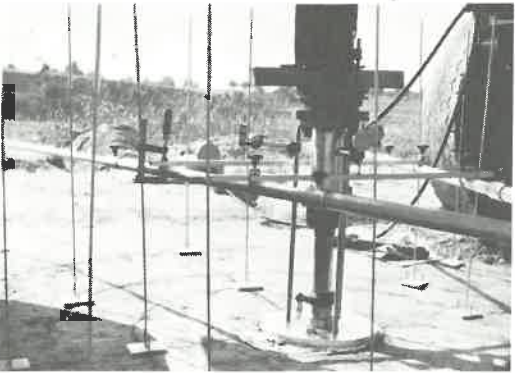


Kornverteilungsdiagramm von Löß IIIb
jeweils nach verschieden hoher Belastung
Mittel aus drei Versuchen

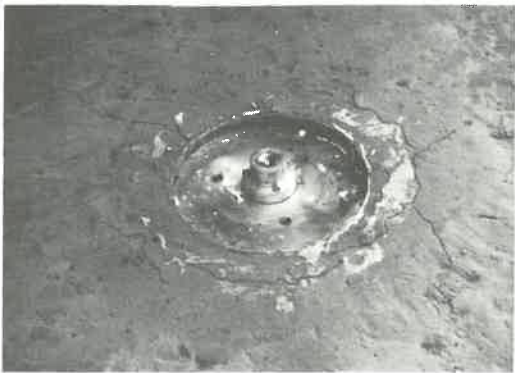
A18



Anordnung der Meß-traverse und Meß-stative für Vertikal-bewegungen des Bodens



Druckplatte \varnothing 35,7 cm und Druckpresse



Anordnung der Zug-risse um die Druck-platte nach Versuchs-ende

Abbildungen zum Lastplattendruckversuch - Versuchsaufbau

A 19



Belastungswagen mit Witterungsschutz für Versuchsstelle



Ausarbeiten der Blockprobe



Entnahme der "ungestörten" Bodenproben mit Entnahme-zylinder

A 20

Weitere Veröffentlichungen des Baugrundinstituts und seiner
Mitarbeiter

- [1] Smoltczyk,U. (1974) *Studienunterlagen*
330 Seiten, broschiert DM 25,-
- [2] Gußmann,P. (1973) *Ausgleichsvorgänge eindimensionaler
Strömungen bei beliebiger Anfangsbe-
dingung unter besonderer Berücksichti-
gung der Konsolidation einseitig drä-
nierter Tonschichten*
Die Bautechnik 50, 20-25 Sonderdruck
- [3] Thamm,B.R. (1973) *Die "Cam-Clay"-Theorie und das
"Critical-State"-Konzept*
Der Bauingenieur 48, 311 - 314 Sonderdruck
- [4] Gußmann,P./ (1973) *Eindimensionale Konsolidation mehr-
Spotka,H. schichtiger Tonböden*
Die Bautechnik 50, 265 - 272 Sonderdruck
- [5] Thamm,B.R. (1973) *Anwendung der Finite-Element-Methode
zur Berechnung von Spannungen in
wassergesättigten Böden*
Der Bauingenieur 48, 370 - 374 Sonderdruck
- [6] Gußmann,P. (1974) *Different methods of evaluating the
influence of seepage forces on slope
stability*
Deutsche Beiträge zur Geotechnik Nr.2, 61-73
- [7] Gußmann,P./ (1974) *Practical considerations in the applicat-
Schad,H. ion of finite element techniques to
soil problems*
Deutsche Beiträge zur Geotechnik Nr.2,74-90
- [8] Gußmann,P./ (1974) *One-dimensional consolidation of
Spotka,H. multi-layered clays*
Deutsche Beiträge zur Geotechnik Nr.2,91-102
- [9] Gußmann,P./Thamm,B. (1974) *Two-dimensional consolidation of triaxial
(1974) test specimen*
Deutsche Beiträge zur Geotechnik Nr.2,103-117
- [10] Schad,H. et al. (1974) *Stresses in concrete caisson bells*
(1974) Deutsche Beiträge zur Geotechnik Nr.2,118-121
- [11] Smoltczyk,U. (1974) *Improved technique for foundations on slopes*
Deutsche Beiträge zur Geotechnik Nr.2, 122-129
- [12] Smoltczyk,U./ (1974) *Pressure cell for the measurement of
Diem,P./Spotka,H. normal and shear tests*
Deutsche Beiträge zur Geotechnik Nr.2,130-136
- [13] Smoltczyk,U./ (1974) *Stabilizing sand grains by overhead water
Ljörterud,L. pressure in bell bottoms of caisson piles*
Deutsche Beiträge zur Geotechnik Nr.2,137-141

Die Nrn.6 - 13 enthält das o.g. Heft 2, das von der Deutschen
Gesellschaft für Erd-und Grundbau e.V.,Essen, zum Preise von
DM 20,- verkauft wird

- [14] Smoltczyk, U. et al. (1975) *Die Anwendung der Methode der Finiten Elemente in der Grundbaupraxis*
CAD-Berichte Heft 1 der Gesellschaft für Kernforschung Karlsruhe (Sonderdruck)
- [15] Gußmann, P./Thamm, B.R. (1974) *Zweidimensionale Konsolidation dreiaxialer Versuchsproben*
Der Bauingenieur 49, 293 - 298 (Sonderdruck)
- [16] Gußmann, P. (1974) *Über den Einfluß unterschiedlicher Wasserdruckansätze auf die Stand- sicherheit von durchströmten Böschungen*
Der Bauingenieur 49, 298-301 (Sonderdruck)
- [17] Smoltczyk, U./Gußmann, P./Schulz, H. (1974) *DIN 4084 Beiblatt Erläuterungen und Berechnungsbeispiele*
20 S., Beuth-Verlag Berlin/Köln DM 18,-

MITTEILUNGEN DES BAUGRUNDINSTITUTS STUTTGART 187

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. U. Smoltczyk

Nr. 1 Bernd Thamm,
Anfangssetzungen und Anfangsporenwasserüberdrücke
eines normalverdichteten wassergesättigten Tones

Preis: DM 10,-

Nr. 2 Peter Gußmann,
Einheitliche Berechnung von Grundbruch und
Böschungsbruch

Preis: DM 5,-

