

Nr. 80-4

Mitteilung des Lehrstuhls  
für Grundbau und Bodenmechanik  
Technische Universität Braunschweig

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. H. Simons

---

**BODENMECHANISCHE EIGENSCHAFTEN DER  
LAUENBURGER SERIE**

**EIN BEISPIEL FÜR STATISTIK IN DER BODENMECHANIK**

von Franz-Reinhard Ruppert

Braunschweig 1980



## V O R W O R T

Am Beispiel der "Lauenburger Serie", eines in Norddeutschland weit verbreiteten Horizontes bindiger Böden, befaßt sich Herr Ruppert mit der Anwendung statistischer Verfahren in der Bodenmechanik. Es wird gezeigt, daß die Abgrenzung einer bodenmechanischen Grundgesamtheit nicht allein durch bodenmechanische Methoden möglich ist. Es muß auch die geologische Geschichte des Bodens berücksichtigt werden.

Ein Verfahren zur statistischen Auswertung bodenmechanischer Datenkontingente wird entwickelt, wobei auch die Faktorenanalyse neben Regressionsanalysen eingesetzt wird.

Bodenmechanische Untersuchungsergebnisse werden unter Berücksichtigung der Geologie gedeutet. Mit statistischen Verfahren wird gezeigt, wie stark Bodenkennwerte bei einem geologisch begrenzten und unterteilten Bodenhorizont schwanken können. Zusammenhänge zwischen einzelnen Variablen werden untersucht. Hierfür wird die Faktorenanalyse verwendet, um Zusammenhänge im Datenfeld zu erkennen.

Mit seinen statistischen Auswertungen legt Herr Ruppert Ergebnisse vor, die für die derzeitige Diskussion des Sicherheitskonzeptes im Grundbau von Bedeutung sind.

Hanns Simons



## Summary

The study presents a statistical analysis of soil mechanical test data of the "Lauenburger Series". The analysis is understood as a contribution to the geotechnical judgement of the "Lauenburger Series", which is a strata of glacial clayey soils, that can be found extensively in the North German Plain.

The "Lauenburger Series" contains mainly the three soil units described in this study

- fat clay
- sandy clay
- laminated clay

The mineralogical compound of the series is quite constant. The sediments differ from normal glacial sediments by a great part of clay minerals with swelling properties, like montmorillonite and mixed - layer - minerals (montmorillonite/illite).

A schematic method for the statistical analysis of soil mechanical test data has been worked out, using different methods of mathematical statistics.

The variability of soil classification data of this geological and regional limited soil strata is shown.

For the statistical evaluation of the soil mechanical test data the "Lauenburger Series" is divided into partial soil units according to petrographical and geographical criterias.

The tested samples are statistically considered as a part of a random sample, which is described by frequency distribution and other statistical parameters.

Correlations between different soil mechanical parameters were found and described by statistical methods.

The moduli of compressibility resulting from oedometer tests are described for different stress sections by frequency distributions and other statistical parameters.

The relationships between moduli of compressibility, compression - and swell index and soil mechanical basic parameters are investigated by correlation analysis.

There is no glory attached  
to the foundations, and the  
sources of success or failure  
are hidden deep in the ground.

Karl Terzaghi 1951



Inhaltsangabe

	Seite
<u>1. EINLEITUNG</u>	1
1.1 Allgemeines	1
1.2 Ziel der Arbeit	2
1.3 Aufbau der Arbeit	2
<u>2. GEOLOGIE</u>	4
2.1 Der Begriff "Lauenburger Ton"	4
2.2 Genese	13
2.3 Tonmineralbestand	14
2.3.1 Untersuchungsmethodik	14
2.3.2 Ergebnisse	15
2.4 Lagerungsformen	21
2.4.1 Eistektonische Beeinflussung	21
2.4.2 Syndimentäre Beeinflussung	30
<u>3. HERKUNFT UND ZUSAMMENSETZUNG DES DATENMATERIALS</u>	35
3.1 Bodenproben	35
3.1.1 Probenahme aus Tongruben	35
3.1.2 Bohrproben	36
3.2 Laboruntersuchungen	36
3.2.1 Wassergehalt	36
3.2.2 Zustandsgrenzen	37
3.2.3 Korngrößenverteilung	37
3.2.4 Dichte	37
3.2.5 Kalkgehalt	38
3.2.6 Glühverlust	38
3.2.7 Versuche zum einaxialen Formänderungsverhalten	39
3.3 Fremde Untersuchungsergebnisse	40
3.4 Klassifizierung der Proben	41
<u>4. DATENORGANISATION</u>	42
4.1 Datenerfassung und -speicherung	42
4.2 Datenausdruck	47
4.3 Sortieren der Daten	49

	Seite
<u>5. ENTWICKLUNG EINES VERFAHRENSSCHEMAS ZUR STATISTISCHEN AUSWERTUNG BODENMECHANISCHER DATENKONTINGENTE</u>	53
5.1 Statistik in der Bodenmechanik	53
5.2 Statistische Behandlung bodenmechanischer Daten	55
5.2.1 Abgrenzung der Grundgesamtheit	55
5.2.1.1 Begriff der bodenmechanischen Grundgesamtheit	55
5.2.1.2 Teilgesamtheiten der "Lauenburger Serie"	58
5.2.2 Stichprobenauswahl	65
5.2.3 Rechenprogramme	66
5.2.4 Verfahren der beschreibenden Statistik	67
5.2.4.1 Häufigkeitsverteilung	67
5.2.4.2 Maßzahlen der Stichprobe	68
5.2.5 Verfahren der analytischen Statistik	70
5.2.5.1 Prüfung auf Normalverteilung	70
5.2.5.2 Vertrauensbereiche des Mittelwertes	71
5.2.5.3 Regressionsanalyse	72
5.2.5.4 Faktorenanalyse	76
5.3 Verfahrensschema zur statistischen Auswertung	80
<u>6. AUSWERTUNG DER BODENMECHANISCHEN GRUNDKENNWERTE</u>	83
6.1 Beschreibung der Stichproben aus den Teilgesamtheiten des gesamten Verbreitungsraumes	83
6.1.1 "Fetter Ton"	83
6.1.2 "Sandiger Ton"	88
6.1.3 "Gebänderter Ton"	92
6.1.4 Bewertung der aufgetretenen Streuungen	96
6.2 Vergleich der Stichproben aus Teilgebieten	98
6.2.1 "Fetter Ton"	98
6.2.2 "Sandiger Ton"	101
6.3 Vertrauensbereiche	103
6.3.1 "Fetter Ton"	103
6.3.2 "Sandiger Ton"	106
6.3.3 "Gebänderter Ton"	106

	Seite
<u>7. ZUSAMMENHÄNGE ZWISCHEN EINZELNEN VARIABLEN</u>	109
7.1 Überblick über die Zusammenhänge im Datenfeld	109
7.2 Einfluß der Entnahmetiefe	114
7.3 Einfluß des Tongehaltes	114
7.4 Einfluß von Fließgrenze, Ausrollgrenze und Wassergehalt	123
7.5 Einfluß des Glühverlustes	126
7.6 Beispiele zur Anwendung der Regressionsgleichungen	131
<u>8. EINAXIALES FORMÄNDERUNGSVERHALTEN</u>	134
8.1 Versuche	134
8.2 Auswertung	134
8.2.1 Kompressions- und Schwellbeiwert, Steifemoduli	134
8.2.2 Maximale geologische Konsolidationsspannung	138
8.3 Ergebnisse	140
8.3.1 Statistische Kennwerte der Steifemoduli, Kompressions- und Schwellbeiwerte	140
8.3.2 Abhängigkeit des Kompressionsbeiwertes	144
8.3.3 Abhängigkeit des Schwellbeiwertes	149
8.3.4 Abhängigkeit der Steifemoduli	152
8.3.5 Überkonsolidation	160
8.4 Ausblick	167
<u>9. ZUSAMMENFASSUNG</u>	172
<u>10. LITERATURVERZEICHNIS</u>	176

## FORMELZEICHEN

## BODENMECHANIK

Formelzeichen	Benennung	Einheit
T	Massenanteil der Tonfraktion	%
U	Massenanteil der Schlufffraktion	%
S	Massenanteil der Sandfraktion	%
w	Wassergehalt	1
w <sub>L</sub>	Fließgrenze	1
w <sub>P</sub>	Ausrollgrenze	1
I <sub>P</sub>	Plastizitätszahl	1
I <sub>C</sub>	Konsistenzzahl	1
I <sub>A</sub>	Aktivitätszahl	1
ρ	Dichte der feuchten Probe	t/m <sup>3</sup>
ρ <sub>d</sub>	Trockendichte	t/m <sup>3</sup>
ρ <sub>s</sub>	Korndichte	t/m <sup>3</sup>
n	Porenanteil	1
e	Porenzahl	1
S <sub>r</sub>	Sättigungszahl	1
V <sub>ca</sub>	Kalkgehalt	1
V <sub>gl</sub>	Glühverlust	1
org. C	Massenanteil an organischem Kohlenstoff	1
h <sub>a</sub>	Anfangsprobenhöhe	} beim Ödometer- versuch
Δh	Zusammendrückung der Probe	
s'	bezogene Setzung	
e <sub>o</sub>	Anfangsporenzahl der Probe	
σ' <sub>vc</sub>	Konsolidationsspannung	MN/m <sup>2</sup>
σ' <sub>vm</sub>	maximale geologische Konsolidationsspannung	MN/m <sup>2</sup>
σ' <sub>vo</sub>	Geostatische Konsolidationsspannung	MN/m <sup>2</sup>
C <sub>c</sub>	Kompressionsbereich	1
C <sub>w</sub>	Wiederbelastungsbeiwert	1
C <sub>s</sub>	Schwellbeiwert	1
E <sub>s</sub>	Steifemodul	MN/m <sup>2</sup>
E <sub>s</sub> (1)	Steifemodul im Erstbelastungsbereich	MN/m <sup>2</sup>
E <sub>s</sub> (2)	Steifemodul im Wiederbelastungsbereich	MN/m <sup>2</sup>
OCR	Überkonsolidationsverhältnis	1

Anmerkung: Verhältnisgrößen sind mit der Einheit 1 gekennzeichnet.

## STATISTIK

Formelzeichen	Benennung
$x_i$	Beobachtungswert
$\bar{x}$	arithmetischer Mittelwert einer Stichprobe
$n$	Anzahl der Beobachtungswerte
$s^2$	Varianz einer Stichprobe
$s$	Standardabweichung einer Stichprobe
$v$	Variationskoeffizient einer Stichprobe
$R$	Spannweite
$\mu$	Mittelwert einer Grundgesamtheit
$\sigma$	Standardabweichung einer Grundgesamtheit
$t$	tabellierte Größe der t-Verteilung
$\alpha$	Irrtumswahrscheinlichkeit
$u$	Freiheitsgrad
$r^2$	Bestimmtheitsmaß
$r$	Korrelationskoeffizient



## 1. EINLEITUNG

### 1.1 Allgemeines

In Norddeutschland ist ein pleistozäner Horizont bindiger Böden weit verbreitet, der als "Lauenburger Ton" bezeichnet wird, seit MÜLLER (1899) die "dunklen, fetten Thone", die er bei einer geologischen Kartierung am Elbsteilufer bei Lauenburg fand, so benannte.

In der Quartärgeologie Norddeutschlands ist der "Lauenburger Ton" als Leithorizont des Pleistozäns seit langer Zeit erkannt (SCHUCHT 1908).

Als Baugrund ist dieser Bodenhorizont wegen seiner weiten und häufig oberflächennahen Verbreitung von Bedeutung. Er wird als Baugrund in den großen norddeutschen Städten wie Hamburg, Bremen und Oldenburg angetroffen und verursacht dabei oft gründungstechnische Probleme (STEINFELD 1969).

Die Wirtschaftlichkeit von Gründungen, die im Bereich des "Lauenburger Tons" ausgeführt werden sollen, setzt die Kenntnis der bodenmechanischen Eigenschaften dieses Bodens voraus. Bisher liegen darüber nur vereinzelte Ergebnisse vor, so daß GRUBE (1971, S. 134) "eine gründliche petrographische-bodenmechanische Untersuchung dieses wichtigen Leithorizontes" fordert.

Die bodenmechanischen Eigenschaften sind Folge der Geschichte des Bodens, deshalb muß die Geologie als Grundlage in die bodenmechanischen Untersuchungen einbezogen werden. Auf sie aufbauend liefern bodenmechanische Untersuchungen die Kenntnis über den "Lauenburger Ton", die für wirtschaftliche Gründungs-bemessungen notwendig sind. Die Bodenmechanik wird in diesem Sinne als verbindende "Wissenschaft zwischen Naturwissenschaft und Technik" (SMOLTCZYK 1972), genutzt.

### 1.2 Ziel der Arbeit

Aus den vorhergehenden Beschreibungen ergibt sich das Ziel der Arbeit, einen Beitrag zu geotechnischen Beurteilung des "Lauenburger Tons" zu leisten.

Ausgehend von der geologischen Analyse dieses Bodens sollen bodenmechanische Untersuchungen mit den Hilfsmitteln der mathematischen Statistik ausgewertet werden. Das Ergebnis dieser Auswertung wird zu bodenmechanischen Beschreibung des "Lauenburger Tons" benutzt.

Mit Hilfe statistischer Verfahren werden qualitative und quantitative Angaben über die bodenmechanischen Eigenschaften und die Beziehungen zwischen diesen erarbeitet. Es soll aufgezeigt werden, wie groß die Streuungen vor allem bei den Klassifizierungskennwerten eines geologisch wie regional begrenzten und beschreibbaren Bodenhorizont sind. Streuungen von Meßwerten sind für Sicherheitskonzepte wesentlich. Insofern soll auch ein Beitrag geleistet werden zu der in letzter Zeit aufgekommenen Diskussion über die Anwendbarkeit des aus dem konstruktiven Ingenieurbau bekannten Sicherheitskonzepts auf den Grundbau.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Im ersten Abschnitt der Arbeit wird die Geologie und Tonmineralogie des "Lauenburger Tons" dargestellt.

Diesem Abschnitt folgt die Erläuterung der bodenmechanischen Untersuchungen, der Datenerfassung und der elektronischen Datenverarbeitung.

Die Stellung und Bedeutung der mathematischen Statistik in der Bodenmechanik sowie der verwendeten statistischen Verfahren wird in einem weiteren Teil der Arbeit beschrieben, an dessen Ende ein Schema zur Verwendung statistischer Verfahren in der Bodenmechanik dargestellt wird.

Mit den Auswertungsergebnissen der bodenmechanischen Grundkennwerte wird anschließend der "Lauenburger Ton" bodenmechanisch beschrieben, bevor Zusammenhänge zwischen diesen Kennwerten dargestellt werden.

Im letzten Abschnitt der Arbeit folgen die Ergebnisse der Untersuchung des einaxialen Formänderungsverhaltens des "Lauenburger Tons".

## 2. GEOLOGIE

### 2.1 Der Begriff "Lauenburger Ton"

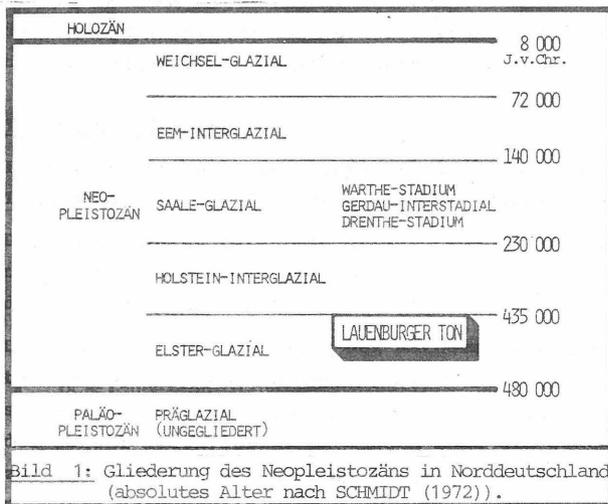
Als "Lauenburger Ton" bezeichnet als erster MÜLLER (1899, S. 51) die "dunklen fetten Thone" am Elbsteufer bei Lauenburg (Elbe).

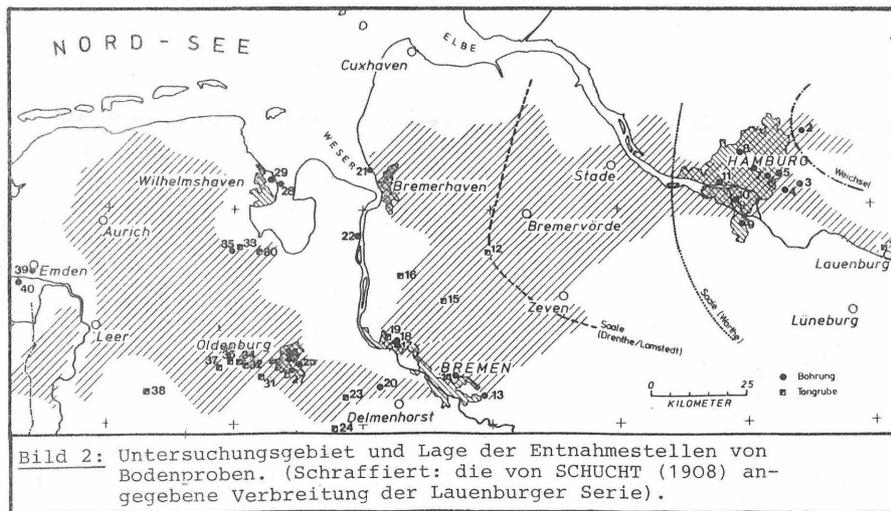
SCHUCHT (1908) erkannte den Ton als durchgehenden lithostratigraphischen Leithorizont des norddeutschen Quartärs.

Stratigraphisch wird der "Lauenburger Ton" heute als glaziäres Beckensediment der ausgehenden Elstervereisung zugeordnet (WOLDSTEDT & DUPHORN 1974, DUPHORN et al. 1973).

Der Tonhorizont schließt die Sedimentfolge der ältesten Vergletscherung Norddeutschlands (Elster-Glazial) ab (Bild 1).

Seine Verbreitung (Bild 2) erstreckt sich von Lauenburg/Elbe im Osten bis Westfriesland (Groningen) im Westen. Die genauen Verbreitungsgrenzen sind bis heute nicht eindeutig festgestellt.





NR.	BEZEICHNUNG	ART
1	Lauenburg	T
2	Meilsdorf	B
3	Glinde	B
4	Hamburg-Mümmelmannsberg	B
5	Hamburg-Berner Heerweg	B
6	Hamburg, Kielmannseggstraße	B
7	Hamburg, Rübenkamp	B
8	Hamburg, Flughafen	B
9	Hamburg, Bahnhof	B
10	Hamburg, Rethespeicher	B
11	Hamburg, Elbtunnel	B
12	Kuhstedt	T
13	Osterholz-Tenever	B
14	Bremen, Universität	B
15	Hambergen	T
16	Hagen i. Br.	T
17	Bremen-Aumund	T
18	Bremen-Aumund, Lerchenstraße	B
19	Bremen-Blumental	B
20	Delmenhorst, Gut Nutzhorn	B
21	Weddewarden	B
22	Nordenham	B
23	Kirchkimmen	T
24	Neerstedt	T
25	Oldenburg, 2. Schleuse	B
26	Oldenburg, Hauptstraße	B
27	Oldenburg, Südumgehung	B
28	Wilhelmshaven	B
29	Wilhelmshaven, Rüstertsiel	B
30	Mosleshöhe	T
31	Edeweht	T
32	Borgstedt	T
33	Bockhorn	T
34	Ekern	T
35	Neuenburg	B
36	Querenstede	T
37	Osterscheps	T
38	Scharrel	T
39	Emden, Grüner Weg	B
40	Emden, Ems	B

Bild 3: Entnahmestellen von Bodenproben  
(Lage Bild 2)

T = Tongrube,  
B = Bohrung.

Der Ton steht in keinem durchgehenden Horizont an, sondern in vielen nichtzusammenhängenden becken- oder rinnenartigen Vorkommen (GRIPP 1964, S. 204), wie aus der Kartierung der Vorkommen zwischen Delmenhorst und Oldenburg deutlich wird (Bild 4).

Vorkommen über die in Bild 2 dargestellten Verbreitungsgrenzen hinaus sind im Norden bis nördlich der Ost- und Westfriesischen Inseln bekannt (SINDOWSKI 1970). Im Osten sind Vorkommen bis Mecklenburg vorhanden (WOLDSTEDT & DUPHORN 1974, S. 129).

Die Mächtigkeit der Tonvorkommen schwankt zwischen wenigen Metern und mehr als 100 Meter (DEWERS 1941, NIEDERMAYER 1965, WOLDSTEDT & DUPHORN 1974).

Der Begriff "Lauenburger Ton" ist vorwiegend stratigraphisch zu verstehen. Er ist daher nicht deckungsgleich mit dem kornanalytischen oder bodenmechanischen Begriff "Ton".

Stratigraphisch wird darunter "eine Serie feinkörniger Bodenarten verstanden, für die der Terminus Ton im bodenmechanischen Sinne zum großen Teil nicht zutrifft" (GRUBE 1971, S. 134).

Diese Serie schwarzer bis dunkelgrauer feinkörniger Bodenarten umfaßt kornanalytisch ein breites Spektrum: "Der Tongehalt kann über 80 % betragen. Es kommen alle Übergänge zu schluffigen und sandigen Tonen sowie zu Schluffen vor" (WOLDSTEDT & DUPHORN 1974, S. 119).

Das breite Korngrößenspektrum wird aus den Kornverteilungsbändern des Bildes 5 deutlich, die nach Angaben aus der Literatur gezeichnet worden sind (GRAUPNER 1970, RUCK 1971).

Der Tonanteil im kornanalytischen Sinne ( $< 0,002$  mm) liegt nach diesen Angaben zwischen 14 und 78 %, der Sandanteil zwischen 0 und 55 %.

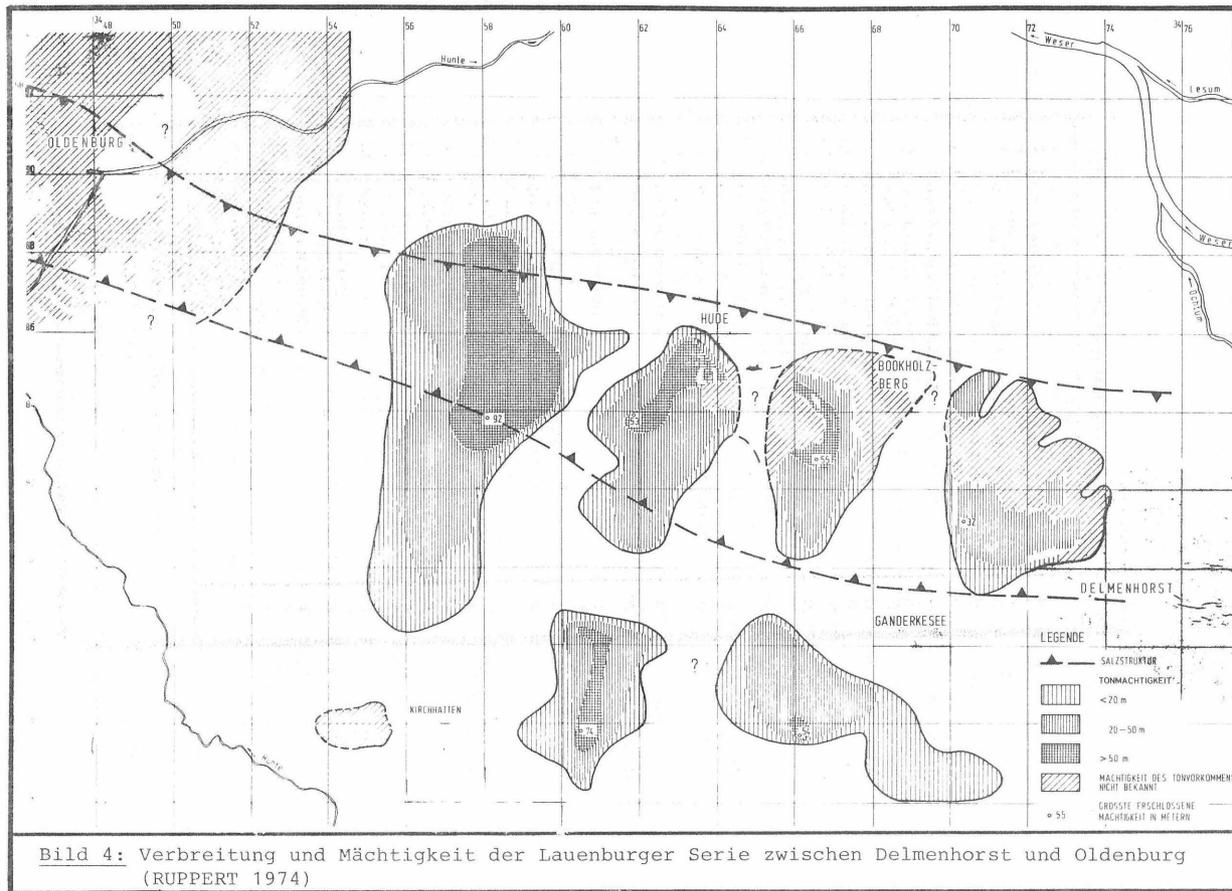


Bild 4: Verbreitung und Mächtigkeit der Lauenburger Serie zwischen Delmenhorst und Oldenburg (RUPPERT 1974)

# Körnungslinie

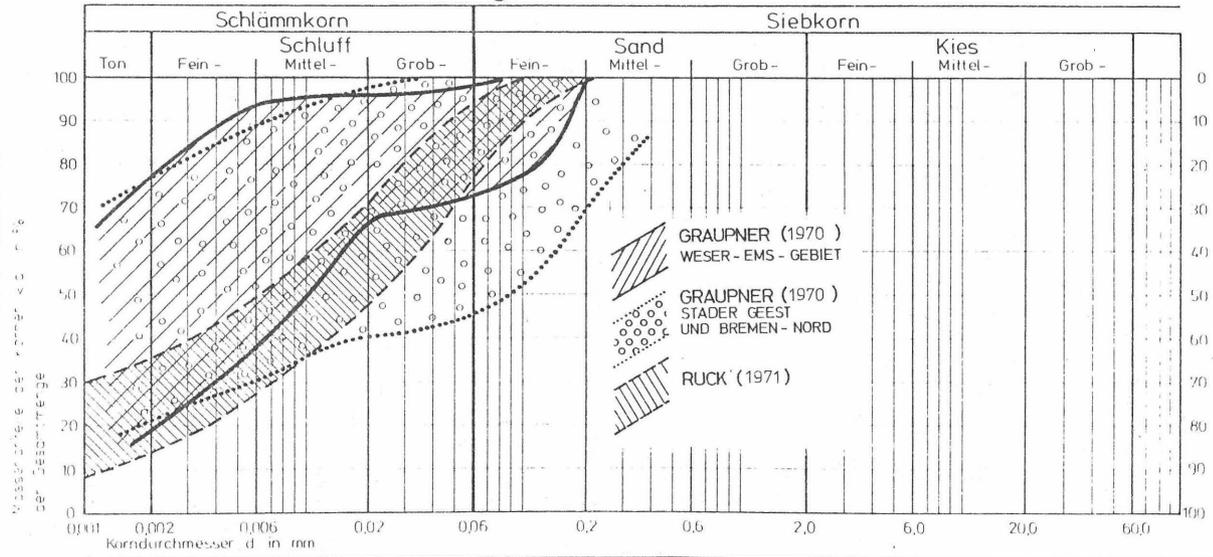


Bild 5: Kornverteilungsbänder der Lauenburger Serie nach Literaturangaben.

Auf der geologischen Übersichtskarte von Norddeutschland im Maßstab 1 : 200 000 wird der "Lauenburger Ton" ausgewiesen als "Ton, schluffig z. T. feinsandig".

Die strukturelle Ausbildung der Sedimentserie ist ebenfalls durchaus nicht einheitlich. Es kommen sowohl völlig ungeschichtete Einheiten als auch gebänderte Einheiten vor (SCHUCHT 1908, KOCH 1953, GRIPP 1964, GRUBE 1971). Diese Einheiten wechseln sowohl im Streichen als auch im Profil (NIEDERMAYER 1965).

KOCH (1954) gliedert den "Lauenburger Ton" im Raum Hamburg in symmetrischen (ungeschichteten) Ton, gebänderten Ton, gefleckten Ton und stark sandigen Ton.

Im Raum Oldenburg/Ostfriesland lassen sich die Vorkommen des "Lauenburger Tons" in die gleichen Einheiten gliedern (RUPPERT 1974).

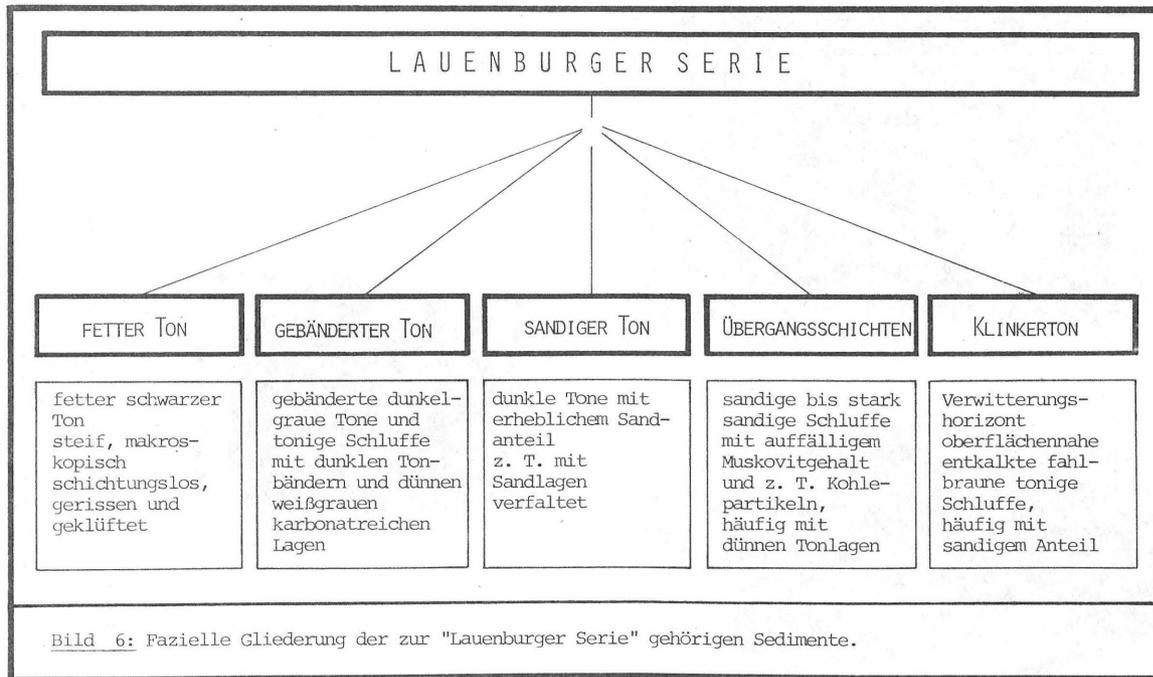
Das folgende Schema gibt einen Überblick über die verschiedenen Faziestypen der Sedimentserie, die hier als "Lauenburger Serie" bezeichnet wird (Bild 6).

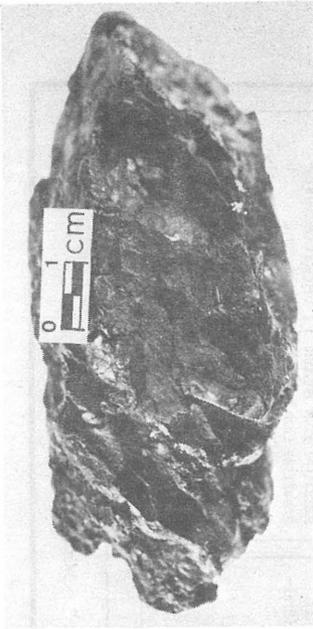
Der fette Ton wird im Gebiet zwischen Weser und Ems, wo er häufig oberflächennah ansteht und in Tongruben abgebaut wird, als "Dwo" bezeichnet (Bild 7a).

Der gebänderte Ton ist ein grauer bis dunkelgrauer toniger Schluff, der häufig durch papierdünne weißgraue Feinsand- und Grobschlufflagen geschichtet ist. Die Bänder des schwarzen Tons treten in unregelmäßigen Abständen auf. Sie können aber auch zusammen mit dem helleren tonigen Schluff dem Sediment ein warvenähnliches Aussehen geben (Bild 7b).

Der sandige Ton ist dem fetten Ton im Aussehen ähnlich, weist aber einen auch makroskopisch deutlichen Sandanteil auf (Bild 7c).

Diese Gliederung läßt sich durch die "Übergangsschichten"





7 a



7 b



7 c

**Bild 7:** Petrographische Einheiten der "Lauenburger Serie"  
(Ausschnitte aus Schlauchkernproben)  
Bild 7 a: fetter Ton  
Bild 7 b: gebänderter Ton  
Bild 7 c: sandiger Ton.

(MEYER 1965) erweitern. Diese sind meistens sandige bis stark sandige Schluffe, die durch ihren hohen Anteil an Muskovit (heller Glimmer) und z. T. inkohlte Partikel auffallen. Eingeschaltet in diese Schicht sind häufig dünne Tonlagen.

Vor allem im Raum Ostfriesland ist außerdem im höchsten Abschnitt der "Lauenburger Serie" als Verwitterungsprodukt ein gelbbraun gefärbter Ton bis max. 2 m Mächtigkeit verbreitet (GRAUPNER 1963). Dieser Horizont geht nach unten ohne scharfe Grenze in den grauen bis grauschwarzen Ton über. Er wird als Rohstoff für die Herstellung von Klinkern verwendet und hier als "Klinkerton" bezeichnet.

## 2.2 Genese

Die Genese der "Lauenburger Serie" ist im Zusammenhang mit den Salzstrukturen Norddeutschlands zu sehen. Die "Lauenburger Serie" schließt die Sedimentenfolge des Elster - Glazials ab.

Diese Sedimente füllten z. T. tief in den präquartären Untergrund eingeschnittene Rinnen auf.

Die pleistozänen Rinnen sind zum großen Teil von einer durch die Salzstrukturen bedingten Tektonik abhängig (LÖHNERT 1966, JOHANNSEN 1971, JOHANNSEN & LÖHNERT 1971).

Die Schmelzwässer, aus denen die "Lauenburger Serie" sedimentiert wurde, wurden in Becken mit morphologisch stark gegliederten aber flachen Reliefs, die häufig durch die Lage der Salzstrukturen im Untergrund als Subrosion- oder Randsenken vorgezeichnet waren, gestaut. Das Fehlen jeglicher Fauna in der "Lauenburger Serie" macht ein lebensfeindliches Milieu in den Sedimentationsbecken wahrscheinlich.

Der Tonmineralbestand der "Lauenburger Serie", der von normalen glazialen Sedimenten abweicht und in allen

Faziesseinheiten relativ konstant ist (s. Abschnitt 2.3), weist auf eine Alkalinität der Beckenwässer hin, aus denen der Ton sedimentiert worden ist. Die erhöhte Alkalinität der Beckenwässer wird auf austretende versalzene Porenwässer zurückgeführt, die unter dem Einfluß von Salzstöcken standen (RUPPERT & SCHNEIDER 1975).

Bereits 1952 hatte GRIPP den "Lauenburger Ton" als "Brackwasser-Fazies sedimentierter Gletschertrübe" gedeutet. Die homogene, "symmetrische" Ausbildung des fetten Tons veranlaßte ihn, die Sedimentation des Tons im Zusammenhang mit dem Salzaufstieg norddeutscher Salzstöcke zu sehen. Die Elektrolytwirkung der salzhaltigen Beckenwässer habe zur Koagulation der Schwebstoffe geführt. Allerdings glaubte GRIPP, daß Salz im Permafrostboden frei ausgetreten und mit den Beckenwässern in Berührung gekommen sei.

Dieser Auffassung, die auf der symmetrischen Ausbildung fußt, widersprach KOCH (1953), indem er zeigte, daß die symmetrischen Einheiten des "Lauenburger Tons" sehr unregelmäßig verteilt sind und mindestens ebenso häufig gebänderte, warvenähnliche Tone auftreten, die der Koagulationswirkung widersprechen.

### 2.3 Tonmineralbestand

#### 2.3.1 Untersuchungsmethodik

Zur Untersuchung des Tonmineralbestandes wurde die Fraktion  $<0,002$  mm mit dem Verfahren nach ATTERBERG vom Gesamtsediment abgetrennt (MÜLLER 1964, S. 85).

Diese Fraktion wurde röntgenographisch untersucht. Die Röntgenaufnahmen wurden an Texturpräparaten durchgeführt. Von jeder Probe sind 3 Texturpräparate durch

Sedimentation von je ca. 2,5 ml Suspension auf Objektträger hergestellt worden.

Die Beugung der Röntgenstrahlen wurde an luftgetrockneten, Gycol-gesättigten und an erhitzten ( $673^{\circ}\text{K}$ ,  $823^{\circ}\text{K}$ ) Präparaten aufgenommen ( Bild 8 und 9).

Über die Methodik dieser Untersuchungen ist im einzelnen von RUPPERT & SCHNEIDER (1975) berichtet worden.

Die Röntgendiagramme wurden in Anlehnung an JOHNS et al. (1954) und LIPPMANN (1960) halbquantitativ ausgewertet. Für diese halbquantitative Bestimmung wurden die Flächen zwischen den Reflexen und der Basislinie miteinander verglichen und zugrunde gelegt.

Es wurden Röntgenaufnahmen an insgesamt 47 Proben aus den drei faziellen Einheiten "fetter Ton", "gebänderter Ton" und "sandiger Ton" ausgewertet.

### 2.3.2 Ergebnisse

Qualitativ wurden folgende Mineralien in der Fraktion  $<0,002$  mm festgestellt:

- ▶ Tonminerale
  - ▶▶ quellfähige Tonminerale
    - Smektit, nach Röntgenfluoreszenz - Aufnahmen als Ca-Montmorillonit indentifiziert (Bild 10)
    - Unregelmäßige Wechsellagerung Illit - Montmorillonit
  - ▶▶ nichtquellfähige Tonminerale
    - dioctaedrischer Illit
    - Kaolinit - Gruppe ( Bild 10)
    - Chlorit - Gruppe
    - Sepiolith - Attapulgit - Gruppe (Bild 10)
- ▶ übrige Mineralgruppen
  - Quarz, Feldspat, Glimmer
  - Karbonate.

Der Tonmineralbestand der "Lauenburger Serie" ist qualitativ sehr einheitlich. Die genannten Tonminerale finden sich in allen untersuchten Proben, unabhängig

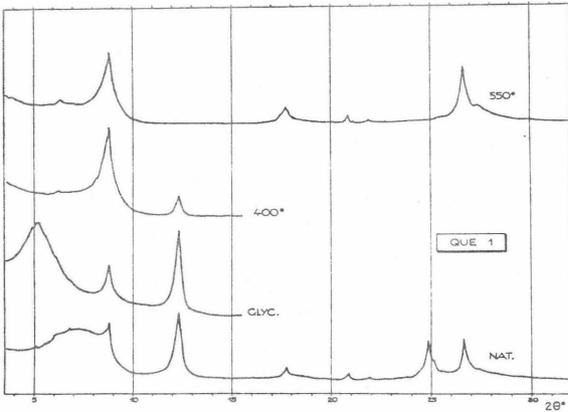


Bild 8: Röntgendiffraktometerkurven einer Probe der Einheit "Fetter Ton" (Entnahmeort Lauenburg).

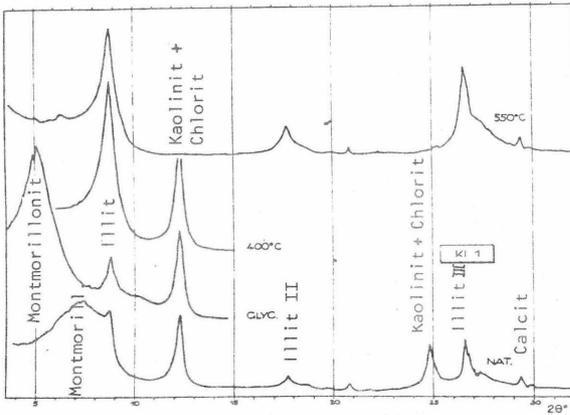


Bild 9: Röntgendiffraktometerkurven einer Probe der gebänderten Einheit (Entnahmeort Kirchkimmen).

davon, welcher petrographischen Einheit (fetter Ton, gebänderter oder sandiger Ton) sie entstammen, und wo sie entnommen wurden.

Die halbquantitative Auswertung der Röntgenaufnahmen unterstreicht die einheitliche Zusammensetzung der untersuchten Fraktion  $<0,002$  mm. Im Bild 11 wurden einige repräsentative Ergebnisse, geordnet nach den faziellen Einheiten, zusammengestellt. Es wurden nur die Anteile der Tonminerale berücksichtigt, da der Anteil der übrigen Mineralgruppen (Quarz, Feldspat, Glimmer, Karbonate) an der Fraktion nur sehr gering war ( $<10$  %).

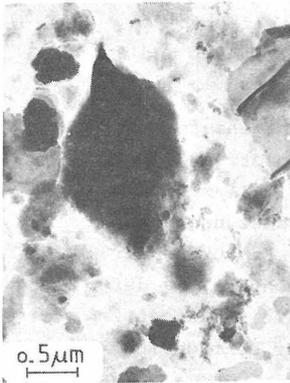
Ähnliche Ergebnisse sind von KHOO (1972) und VALETON et al. (1972) für einige Proben der "Lauenburger Serie" des Hamburger Raumes veröffentlicht worden.

Bemerkenswert an den Ergebnissen ist vor allem, daß der Anteil an Montmorillonit mit ca. 20 - 25 % (i. M.) etwa genau so groß ist wie der Illitanteil bzw., der Anteil an Kaolinit und Chlorit zusammen.

Das Verhältnis der nichtquellfähigen Tonminerale (Illit, Kaolinit und Chlorit) zu den quellfähigen Tonmineralen Montmorillonit und Wechsellagerungsmineral weist aus, daß die quellfähigen Tonminerale insgesamt stärker vertreten sind als die nichtquellfähigen.

Die Wechsellagerungsminerale überwiegen dabei etwas gegenüber dem Montmorillonit in der Gruppe der quellfähigen Tonminerale. Bei den nichtquellfähigen Tonmineralen ist das Verhältnis von Illit zu Kaolinit und Chlorit etwa ausgeglichen.

Der Anteil an quellfähigen Tonmineralen an der Fraktion  $<0,002$  mm des Gesamtsedimentes ist beim gebänderten Ton etwas ausgeprägter als beim fetten Ton. Bei dem sandigen Ton geht dagegen der Anteil der



a



b



c

**Bild 10:** Elektronenmikroskopische Aufnahmen von Tonmineralien

Bild 10 a: Montmorillonit (Bildmitte)

Bild 10 b: Kaolinitkristalle, pseudohexagonal und Glimmerminerale

Bild 10 c: Mineral aus der Sepiolith-Attapulgit-Reihe.

ENTNAHMEORT	FAZIELLE EINHEIT	NICHT QUELLFÄHIGE TONMINERALIEN		QUELLFÄHIGE TONMINERALIEN		VERHÄLTNIS (3+4) zu (5+6)
		Illit	Kaolinit und Chlorit	Mont- morillonit	Wechsel- lagerung Illit/ Montm.	
1	2	3	4	5	6	7
Lauenburg	fetter Ton	20	20	25	35	1 : 1,5
Meilsdorf		20	20	20	40	1 : 1,5
Bremerhaven		25	15	45	15	1 : 1,5
Ekern		20	25	20	35	1 : 1,2
Querenstede		25	20	20	35	1 : 1,2
Kirchkimmen	gebänderter Ton	15	20	20	45	1 : 1,8
Scharrel		15	25	30	30	1 : 1,5
Neerstedt		15	20	25	40	1 : 1,8
Blumenthal	sandiger Ton	30	30	30	10	1 : 0,7
Meilsdorf		20	30	15	35	1 : 1

Bild 11: Tonmineralbestand ausgewählter Proben (Angaben in %).

quellfähigen Mineralgruppe etwas zurück.

Der relativ hohe Anteil an Montmorillonit und der Illit-Montmorillonit-Wechselagerung an den Sedimenten der "Lauenburger Serie" ist für glaziäre Sedimente außergewöhnlich. In glaziären Ablagerungen ist primär mit einer Vormacht von Illit und dann Chlorit zu rechnen (MILLOT 1970, S. 137).

Die Ausnahmestellung der glaziären Beckensedimente der "Lauenburger Serie" läßt sich durch die Genese der Sedimente erklären.

Es ist wahrscheinlich, daß zumindest ein Teil der quellfähigen Tonmineralien authigen, d. h. während der Sedimentation in den Becken entstanden ist (RUPPERT & SCHNEIDER 1975).

Das alkalische Milieu, dessen die authigene Entstehung von Montmorillonit bedarf, ist durch salzreiche Porenwässer entstanden, die im Grunde der Becken austraten. Der Salzgehalt der Porenwässer wiederum ist auf eine Beeinflussung der Wässer durch die bis nahe zur Oberfläche aufgestiegenen Salzstöcke im Untergrund Norddeutschlands zurückzuführen.

Für die genetische Deutung der "Lauenburger Serie" ist der Nachweis von Tonmineralien der Sepiolith-Attapulgit-Reihe von Bedeutung. Diese Mineralien konnten nur elektronenmikroskopisch nachgewiesen werden, da sie in sehr geringen Mengen vorhanden waren und bei den Röntgenaufnahmen keine Reflexe bewirkten. Sie wurden sowohl in der faziellen Einheit des fetten Tons als auch im gebänderten Ton nachgewiesen (Bild 10c).

Der Nachweis von Sepiolith ist deshalb von Bedeutung, weil diese idiomorphen, nadeligen Kristalle wegen ihrer Abmessungen mit einem Durchmesser von ca. 0,17  $\mu\text{m}$  und einer Länge von max. 3,6  $\mu\text{m}$  authigen entstanden sein müssen. Umlagerungsvorgänge würden solche Kristalle

zerstören. Die Sepiolithkristalle beweisen, daß es während der Sedimentation der "Lauenburger Serie" zu Mineralneubildungen gekommen sein muß. Die Mineralgruppe Sepiolith-Attapulgit erfordert für die Entstehung ebenso wie die Montmorillonite ein alkalisches Milieu.

#### 2.4 Lagerungsformen

##### 2.4.1 Eistektonische Beeinflussung

Das Gebiet, in dem die "Lauenburger Serie" als letztes Glied der Sedimentserie der Elster-Vereisung abgelagert worden war, geriet mit Beginn des Saale - Glazials erneut in den Bereich der Vergletscherung.

Das Eis des ersten Eisvorstoßes im Drenthe - Stadium, die Rehburger Phase, reichte etwa bis zum Teutoburger Wald. Der gesamte Verbreitungsraum der "Lauenburger Serie" wurde bei diesem Eisvorstoß von den Gletschern überfahren.

Der zweite Eisvorstoß des Drenthe - Stadiums, die Lamstedter Phase, erreichte noch die Stader Geest.

Die Eisrandlage des Warthe - Stadiums verlief westlich von Hamburg.

In der dritten norddeutschen Glazialzeit, dem Weichsel - Glazial, wurden schließlich nur noch die Ausläufer der "Lauenburger Serie" östlich der Elbe vom Eis bedeckt.

Die einzelnen Randlagen der verschiedenen Eisvorstöße sind aus Bild 2 ersichtlich.

Durch die Druck- und Schubwirkung der Eismassen der jüngeren Glaziale wurden die relativ leicht deformierbaren tonigen Sedimente der "Lauenburger Serie", vergleichbar mit inkompetenten Schichten im Sinne der endogenen Tektonik, tektonisch beansprucht und z. T. verformt.

Die glazigenen Lagerungsstörungen sind grundsätzlich den aus der endogenen Tektonik bekannten Formen ähnlich. Da bei glazigenen Vorgängen im wesentlichen Druck- und Schubbeanspruchungen auftreten, finden sich als Störungen hauptsächlich Einengungsformen, wie Falten, Verschuppungen und Überschiebungen (VIETE 1960).

Grundsätzlich können folgende Arten der glazigenen Schichtstörungen unterschieden werden:

- ▶ Verfaltung und Verschuppung der "Lauenburger Serie" mit anderen stratigraphischen Horizonten bzw. Bodenarten.
- ▶ Verfaltung und Verschuppung der verschiedenen Einheiten der "Lauenburger Serie" untereinander.
- ▶ Gefügestörungen innerhalb einer Schicht der "Lauenburger Serie".

Es finden sich jedoch auch Gebiete, in denen die Sedimente der "Lauenburger Serie" von der eistektonischen Beanspruchung nur schwach oder gar nicht beeinflusst worden sind, wie die beiden folgenden Beispiele zeigen.

Der gebänderte Ton in der Tongrube Knabe in Kirchimmen (Nr. 23 auf Bild 2) ist in horizontaler Lagerung eistektonisch ungestört aufgeschlossen, wie die Bänderung erkennen läßt (Bild 12).

In der Tongrube der Ziegelei Brinkmann in Scharrel (Nr. 38 auf Bild 2) läßt sich in der ebenfalls gebänderten Fazies eine leichte, wellenartige Faltung erkennen (Bild 13 und 14).



Bild 12: Tongrube der Ziegelei Knabe Kirchkimmen (23), Blick auf die SE-Wand. Die nahezu horizontale Bänderung des Tons ist eistektonisch ungestört.

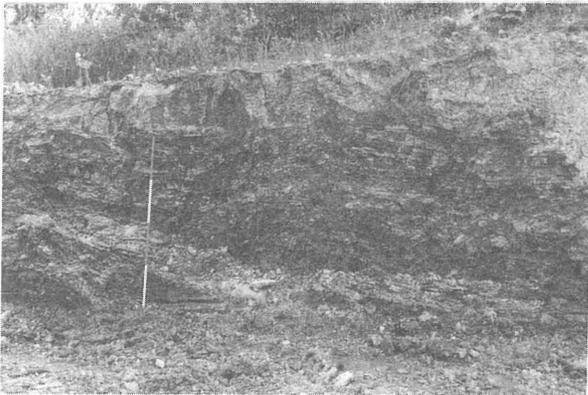


Bild 13: Tongrube der Ziegelei Brinkmann, Scharrel (38), der gebänderte Ton ist durch Eistektonik flexurartig deformiert.

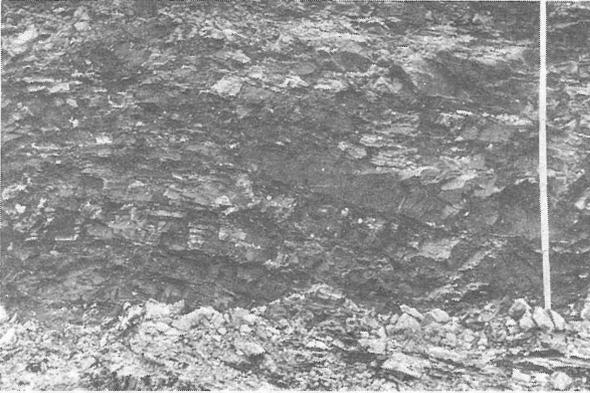


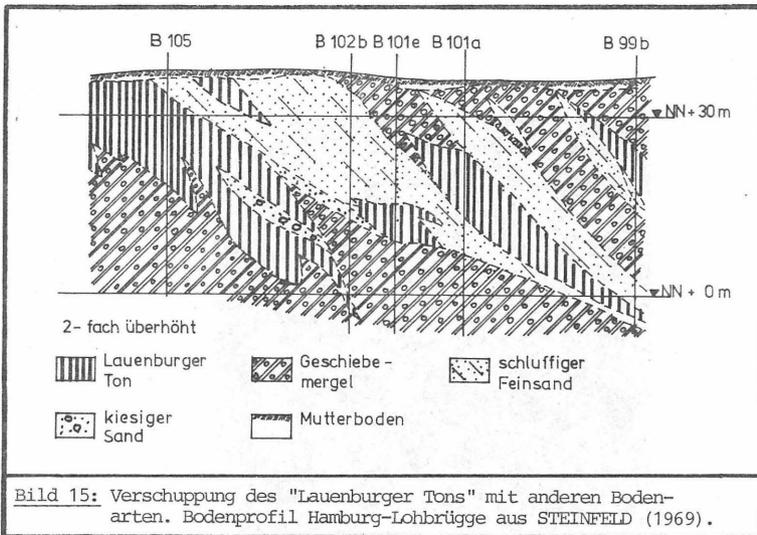
Bild 14: Eistektonische Verformung des gebänderten Tons  
(Ausschnitt aus Bild 12).

Wesentlich intensiver sind dagegen die Lagerungsstörungen, bei denen durch tektonische Wirkung der nachsterzeitlichen Eismassen Schollen der "Lauenburger Serie" aus ihrem primären Verband losgerissen worden und mit anderen lithostratigraphischen Horizonten, z. B. Geschiebemergel, verschuppt worden sind.

Steil aufgerichtete Schollen der "Lauenburger Serie", die in sich gestaucht sein können, sind nicht selten, wobei Winkel gegen die Horizontale von  $70^{\circ}$  erreicht werden (STEINFELD 1969).

Ein Beispiel für diese Aufschuppung gibt STEINFELD (1969) mit einem Profil aus Hamburg-Lohbrügge (Bild 15).

Neben diesen relativ großräumigen Deformationen im Zehnmeterbereich des Schichtenverbandes kommen meistens sehr intensive Verfaltungen der Sedimente der



"Lauenburger Serie" mit Sanden im Meter- bis Dezimeterbereich vor (WOLFF 1929, DEWERS 1941).

In der Tongrube der Ziegelei Schandel KG in Kuhstedt ist sowohl der fette Ton als auch der sandige Ton aus der "Lauenburger Serie" aufgeschlossen. Die Tone sind mit Sanden im Meter- und Dezimeterbereich intensiv verfaultet (Bild 16 und 17). Die eistektonische



Bild 16: Eistektonisch eng verfaultete Sedimente der "Lauenburger Serie" und Sande. Der primäre Schichtverband ist nicht mehr erkennbar. Tongrube der Ziegelei Schandel KG, Kuhstedt (12).

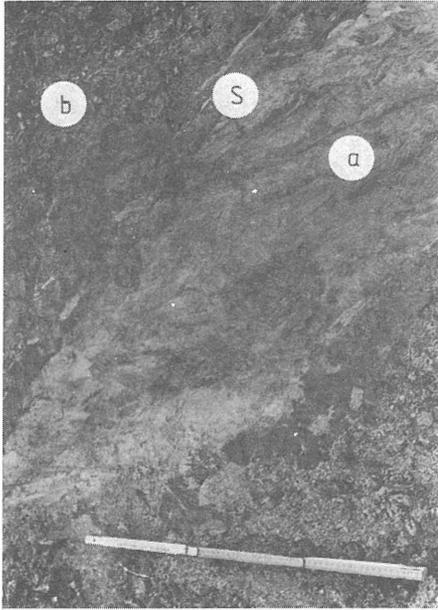


Bild 17: Sandlinse (a) im "Lauenburger Ton" (b). Die Scherfläche (S) ist deutlich erkennbar (Gleiche Tongrube wie Bild 16).

Beanspruchung war so stark, daß der primäre Schichtverband nicht mehr erkennbar ist.

Nicht nur die Verschuppung der "Lauenburger Serie" mit anderen Bodenarten hat eine komplizierte Lagerungsstruktur zur Folge. Die petrographischen Einheiten der "Lauenburger Serie" sind durch eistektonische Einwirkung ebenfalls in ihrer Lage zueinander gestört (Bild 18).

Die Lagerungsstörungen können im allgemeinen nur in großflächigen Aufschlüssen, wie Tongruben, erkannt werden. Das trifft besonders auf Lagerungsverhältnisse

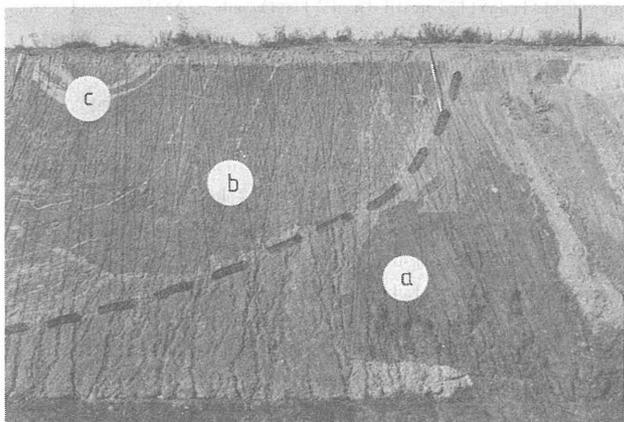


Bild 18: Eistektonische Lagerungsstörung innerhalb der Lauenburger Serie. Aufgestauchter fetter Ton (a) grenzt gegen gebänderten Ton (b), in die Sandlagen muldenförmig eingefaltet sind (c). Tongrube der Ziegelei Lührs, Ekern (34); Sommer 1973, (Länge des Fluchtstabes am oberen Böschungsrund: 2 m ).

zu, bei denen zusätzlich zur Störung der petrographischen Einheiten der "Lauenburger Serie" in ihrer Lagerung zueinander noch Verfaltung mit anderen Bodenarten, z. B. Sanden stattgefunden haben (Bild 19).

Diese komplexen Lagerungsformen können durch Baugrundaufschlußbohrungen normalerweise nur erkannt werden, wenn genügend Bohrungen vorhanden sind, um ein Baugrundprofil zu konstruieren.

Die eistektonische Beanspruchung hat auch innerhalb der einzelnen Schichten zu Gefügestörungen geführt.

Der fette Ton ist häufig durch ein Netzwerk von Rissen durchzogen, die den primär makroskopisch schichtungslosen Ton in vielflächige Bruchstücke einteilen. Diese Gefügestörung hat dazu geführt, daß der ehemals homogene Ton heute beim Abbau in Tongruben, wie z. B. in

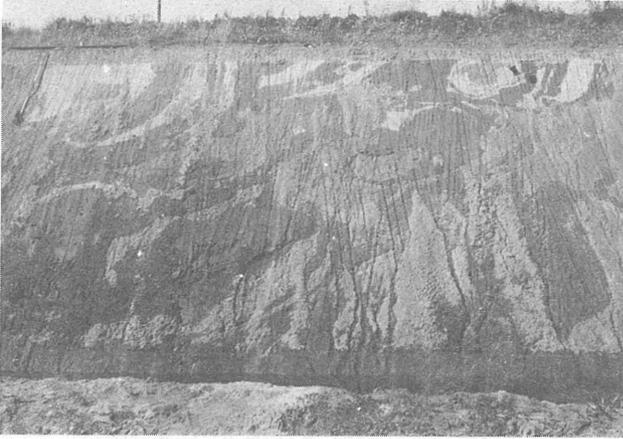


Bild 19: Verfaltung von Sandlagen (helle Partien in der oberen Bildhälfte) und gebändertem Ton. (Gleicher Aufschluß und Grube wie Bild 18).

der Tongrube der Ziegelei Lührs in Ekern (Bild 20), kleinstückig zerfällt. Die Größe der Teilstücke reicht von faustgroßen Stücken bis zu Stücken in der Größenordnung von Feinkies.

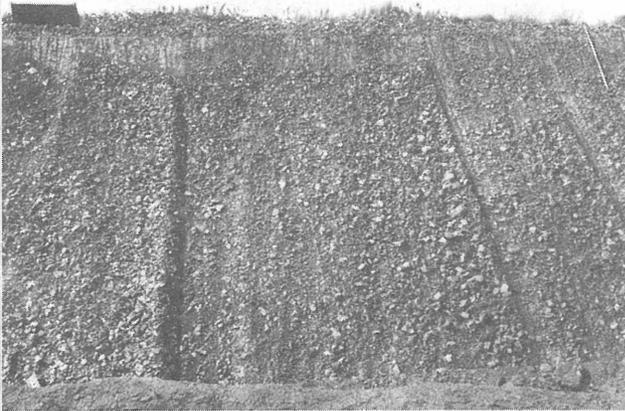


Bild 20: Fetter Ton, der beim Abbau in vielflächige Bruchstücke zerfällt; Tongrube der Ziegelei Lührs in Ekern (34). (Länge des Fluchtstabs am oberen Böschungsrund: 2 m).

Harnische auf diesen Störungsflächen sind die heute noch sichtbaren Marken der Schubbeanspruchung durch die Eis-massen der Saale- und Weichselglaziale. BACKOFEN (1957) hat auf das Vorhandensein dieser Harnische im "Lauen-burger Ton" im Zusammenhang mit der allgemeinen Bedeu-tung solcher Tone hingewiesen.

Die Bilder 21 und 22 zeigen die starke mit der Klüf-tigkeit verbundene Auflockerung und die deutlich er-kennbaren Harnische auf einer Teilfläche.

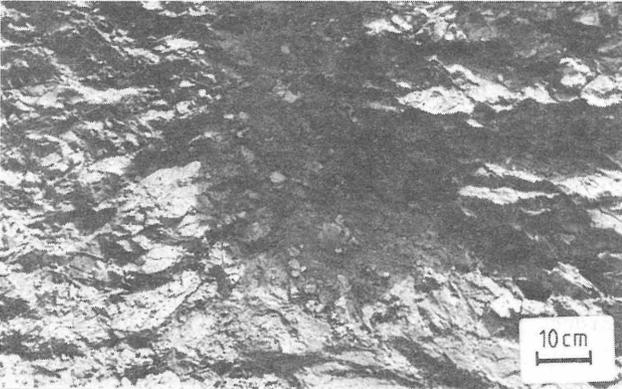


Bild 21: Fetter Ton, den ein durch Eistektonik eingepprägtes räumliches Kluftnetz in vielflächige Bruchstücke teilt. (Gleicher Ort wie Bild 20).

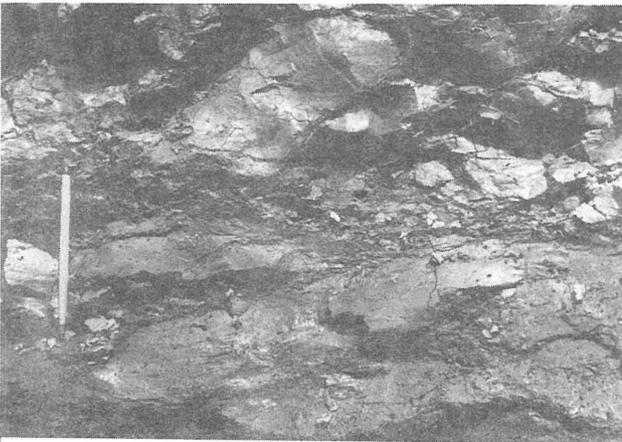


Bild 22: Harnische auf Kluftflächen im "Lauenburger Ton". (Gleicher Ort wie Bild 20).

Tone mit derartigen Gefügestörungen werden bodenmechanisch einem Vorschlag TERZAGHI's (1936) folgend als "stiff fissured clays" bezeichnet.

#### 2.4.2 Synsedimentäre Beeinflussung

Die bisher beschriebenen Lagerungsstörungen sind mehr oder weniger lange Zeit nach der Sedimentation der "Lauenburger Serie" entstanden. Außer diesen sekundären Verformungen, sind in den Sedimenten der "Lauenburger Serie" primäre Strukturen vorhanden, die bereits während bzw. unmittelbar nach der Sedimentation entstanden sind.

Ursache der Deformation sind Rutschungen oder Hanggleitungen als Folge der Schwerkraft (PETTIJOHN & POTTER 1964).

Einzelne Schichten sind subaquatisch abgeglitten und verfaultet worden. Die Gleitfaltung hat die Schichten erfaßt, die relativ zu ihren liegenden bzw. hangenden Schichten grobkörniger waren und deshalb eher zur Verflüssigung, d. h. zur Instabilität neigen.

Derartige Verformungen in der "Lauenburger Serie" waren im Herbst 1975 in der Tongrube der Ziegelei Röben in Querenstedte zu beobachten.

Aufgeschlossen war die fazielle Einheit des gebänderten Tons.

Ungefähr 1,5 m unter der Geländeoberkante waren auf einer vertikalen Distanz von ca. 80 cm zwei Verformungshorizonte angeschnitten, die durch eine ca. 25 cm dicke völlig ungestörte Schicht getrennt wurden (Bild 23).

Die obere ca. 35 mm dicke Schicht (Bild 24) zeigt sogenannte "Wulstschichtung" (PETTIJOHN & POTTER 1964).



Bild 23: Subaquatische Gleitfaltung im gebänderten Ton  
(Tongrube der Ziegelei Rößen, Querenstedt (36)).



Bild 24: Subaquatische Gleitfaltung (Wulstschichtung) im  
gebänderten Ton (Ausschnitt aus Bild 23, oberer  
Horizont).

Die Verformungen in der unteren ca. 20 cm dicken Schicht (Bild 25) kann als Gekröseschichtung gedeutet werden.



Bild 25: Subaquatische Gleitfaltung (Ausschnitt aus Bild 23, unterer Horizont).

Ursache dieser Verformungen ist eine bereichsweise Verflüssigung (liquefaction) des Bodens.

Zu diesen Verflüssigungserscheinungen kommt es, wenn wassergesättigte kohäsionslose bzw. -arme Böden zwischen weniger permeablen Schichten eingeschlossen werden (FINN et al. 1978).

Zur Verflüssigung neigen bevorzugt Sand und Schluffe. Die Kornverteilungskurven (s. Bild 26) weisen auch in diesem Falle Schluffe in der verformten Schicht aus. Die Schluffe sind von einer impermeablen Tonschicht überlagert. Die Schluffschicht hat weder nach unten noch nach oben eine Dränagemöglichkeit. Dadurch kann der Porenwasserdruck in der Schicht sich aufbauen. Verflüssigung tritt ein, wenn der Porenwasserdruck

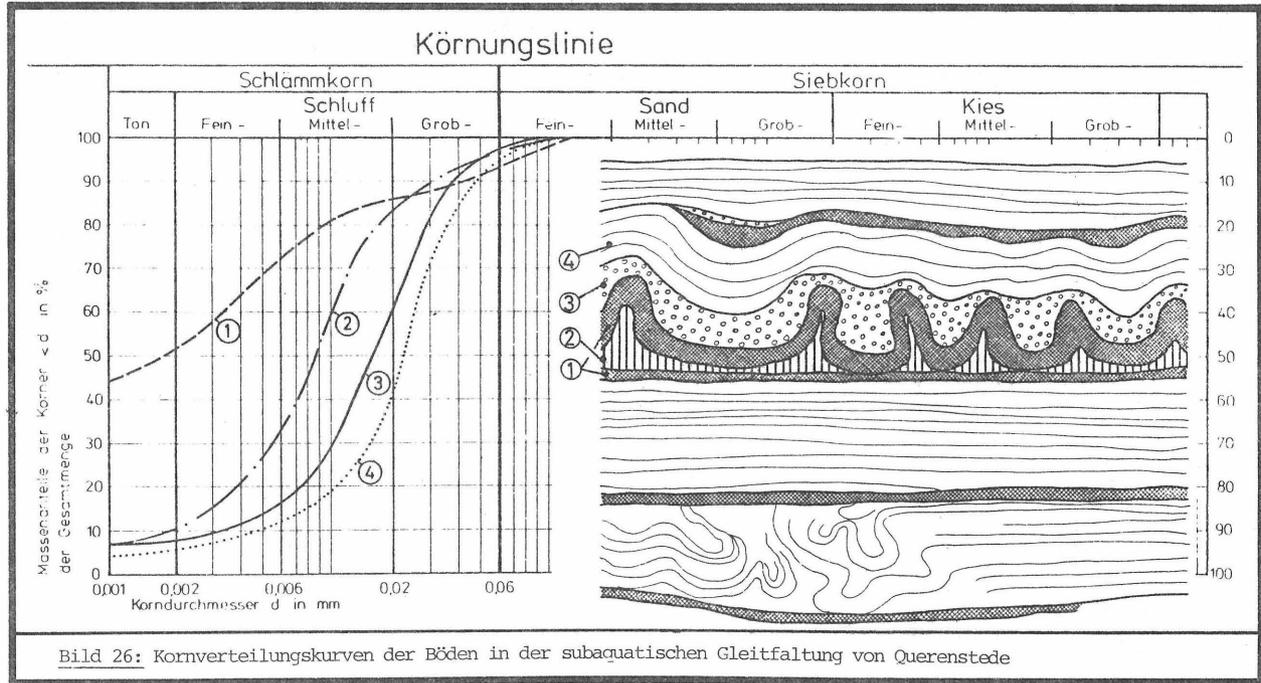


Bild 26: Kornverteilungskurven der Böden in der subaquatischen Gleitfaltung von Querensede

in der eingeschlossenen Schicht den Wert der vertikalen effektiven Überlagerungsspannung erreichen (FINN et al. 1978).

### 3. HERKUNFT UND ZUSAMMENSETZUNG DES DATENMATERIALS

#### 3.1 Bodenproben

##### 3.1.1 Probennahme aus Tongruben

Die besonders im Raum Oldenburg/Ostfriesland und Bremen-Nord/Stader Geest oberflächennah verbreiteten Sedimente der "Lauenburger Serie" (Geologische Übersichtskarte von Norddeutschland im Maßstab 1 : 200 000) sind schon frühzeitig als Rohstoffe für die Ziegelherstellung in zahlreichen Tongruben erschlossen worden (GRAUPNER 1970).

Mit dem wirtschaftlichen Rückgang der Ziegelindustrie, vor allem der kleineren Ziegeleien, wurden zahlreiche Tongruben offengelassen oder als Mülldeponien genutzt.

Es war naheliegend, für die bodenmechanischen Untersuchungen die noch zugänglichen Tongruben aufzusuchen und daraus Proben zu entnehmen (Bild 2 und 3).

Tongruben haben den Vorteil, nicht nur die stratigraphisch und faziell orientierte Probennahme zu ermöglichen, sondern auch Einblick über eine größere Erstreckung in die komplexen Lagerungsformen und den Aufbau der faziellen Einheiten der "Lauenburger Serie" zu erhalten.

Die Ausbildung aller Ausbildungstypen (Zusammensetzung, Textur, Struktur) war hier eingehend zu erkunden.

Proben, die aus Bohrungen entnommen wurden, konnten danach mit den Proben aus den Tongruben verglichen werden, um ihre Zuordnung zur "Lauenburger Serie" im allgemeinen und zu den verschiedenen Faziestypen zu sichern.

Die Proben wurden in den Tongruben immer unmittelbar nach dem Anschneiden einer Schicht durch das Abbaugerät genommen. Nachdem auf der vom Abbaugerät freigelegten

Sohle durch Nachgraben von Hand eine ebene Fläche hergestellt war, konnten mit dem Ausstechzylinderverfahren nach DIN 18 125, Blatt 2, Stutzenproben entnommen werden.

Die für Kompressionsversuche vorgesehenen Proben wurden mit Ringen ( $\varnothing = 7,0$  bzw.  $10,0$  cm, Höhe  $1,4$  cm bzw.  $2,0$  cm) aus den geebneten Flächen ausgestochen und im Labor unmittelbar in das Ödometer eingebaut.

Gestörte Proben wurden ebenfalls aus den frisch angeschnittenen Bereichen der Tongruben in 1l-Gläsern oder Bechern entsprechend DIN 4021 entnommen.

### 3.1.2 Bohrproben

Die Proben aus Bohrungen entstammen mit Ausnahme der Bohrung Meilsdorf Baugrundaufschlußbohrungen. In Meilsdorf wurde eine Brunnenbohrung zur Grundwassererschließung niedergebracht, aus der Kerne und gestörte Proben vorlagen.

Aus den Baugrundaufschlußbohrungen stammen sowohl Sonderproben (Stutzenproben,  $\varnothing = 11,3$  cm, Höhe  $15,0 - 30,0$  cm) als auch Bohrproben (gestörte Proben) in 1l-Gläsern oder Bechern.

In einigen Fällen bestand die Möglichkeit, das Profil an Schlauchkernen aufzunehmen und daraus Proben zu entnehmen. (Bohrungen Weddewarden, Neuenburg, Wilhelms-haven).

Über alle Bohrungen lagen Schichtenverzeichnisse nach DIN 4022 oder Bohrprofile nach DIN 4023 vor.

## 3.2 Laboruntersuchungen

### 3.2.1 Wassergehalt

Der Wassergehalt  $w$  wurde durch Ofentrocknung nach DIN 18 121, Teil 1 bestimmt.

### 3.2.2 Zustandsgrenzen

Die Versuche zur Bestimmung der Fließgrenze  $w_L$  und der Ausrollgrenze  $w_P$  wurden nach DIN 18 122, Teil 1 durchgeführt.

Aus diesen Kennwerten lassen sich folgende weitere Kennziffern errechnen:

$$\text{PLASTIZITÄTZAHL} \quad I_P = w_L - w_P \quad (\text{Gl. 1})$$

$$\text{KONSISTENZZAHL} \quad I_C = \frac{w_L - w}{I_P} \quad (\text{Gl. 2})$$

### 3.2.3 Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung wurde nach DIN 18 123 durch die Schlämmanalyse mit dem Aräometerverfahren bestimmt. Die fraktionellen Anteile für Ton, Schluff und Sand wurden in die Datensammlung übernommen.

Auf die Errechnung weiterer kennzeichnender Parameter wie Ungleichförmigkeitszahl, Schiefe, Abweichung wurde verzichtet, da in die Berechnung dieser Kennzahlen Korndurchmesser bei Massenanteilen unter 50 % der Gesamtmenge eingehen. Bei den tonreichen Böden waren diese Korndurchmesser nicht zu bestimmen.

Das Verhältnis des Tonanteils T zur Plastizitätszahl  $I_P$  wird als Aktivitätszahl  $I_A$  bezeichnet.

$$\text{AKTIVITÄTZAHL} \quad I_A = \frac{I_P}{T[\%]} \cdot 100 \quad (\text{Gl. 3})$$

### 3.2.4 Dichte

An den ungestörten Proben wurde die Dichte der feuchten Probe  $\rho$  [ $t/m^3$ ] nach DIN 18 125, Blatt 1 bestimmt.

Das Probenvolumen wurde durch das Verfahren der Tauchwägung ermittelt. Bei den Proben, an denen Kompressionsversuche durchgeführt worden sind, wurde das

Volumen des Ausstechrings zugrunde gelegt.

Die Trockendichte der Probe ergibt sich zu:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w} \quad [\text{t/m}^3] \quad (\text{Gl. 4})$$

Die Korndichte  $\rho_s$  [ $\text{t/m}^3$ ] ist mit dem Luftvergleichspyknometer nach BECKMANN, dessen Arbeitsweise bei MÜLLER (1964, S. 258) beschrieben ist, bestimmt worden. Die Proben wurden hierbei entsprechend DIN 18 124, Blatt 1 vorbereitet.

Mit diesen Dichtewerten läßt sich berechnen:

$$\text{PORENANTEIL} \quad n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad (\text{Gl. 5})$$

$$\text{PORENZAHL} \quad e = \frac{n}{1 - n} \quad (\text{Gl. 6})$$

$$\text{SÄTTIGUNGSZAHL} \quad S_r = \frac{w \cdot \rho_s}{e} \quad (\text{Gl. 7})$$

### 3.2.5 Kalkgehalt

Der nach DIN 1080 als Kalkgehalt  $V_{\text{Ca}}$  bezeichnete Gesamtkarbonatgehalt ( $\text{CaCO}_3$  und  $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ) ist gasometrisch mit dem Gerät nach SCHEIBLER bestimmt worden (SCHULTZE & MUHS 1967, S. 361).

### 3.2.6 Glühverlust

Der Glühverlust  $V_{\text{Gl}}$  gilt in der Bodenmechanik als ein Maß für die organischen Bestandteile eines Bodens. Die Proben wurden bei ca.  $60^\circ\text{C}$  im Trockenschrank vortrocknet, analysenfein gemahlen und anschließend 2 Stunden lang bei  $800^\circ\text{C}$  im Muffelofen geglüht. Der Glühverlust ist allerdings bei bindigen Böden für den Anteil an organischen Material nur von begrenzter Aussagefähigkeit (KEZDI, Bd. I, 1969).

Der Massenverlust eines bindigen Bodens während des

Glühens beruht nicht nur auf der Oxidation des organischen Kohlenstoffs zu Kohlendioxyd ( $\text{CO}_2$ ), sondern stellt ein komplexes System verschiedener Oxidationsvorgänge dar.

So wird eventuell vorhandenes Kalziumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) zu Kalziumoxyd ( $\text{CaO}$ ) gebrannt. Auch dabei wird  $\text{CO}_2$  frei und führt zu einer Massenverminderung des Bodens.

Beim Glühen wird sowohl das Kristallwasser als auch das gebundene Wasser der Tonminerale frei, entweicht dampfförmig und führt ebenfalls zu einer Massenverminderung.

Es sind aber auch Reaktionsverläufe möglich, die zu einer Massenzunahme führen. Enthält der Boden z. B. Eisenverbindungen, liegt das Eisen in diesen Verbindungen im reduzierenden Milieu der organischen Beimengungen in zweiwertiger Form vor. Das ist beim "Lauenburger Ton" der Fall. Beim Glühen wird das Eisen in seine dreiwertige Form überführt, es vermag mehr Sauerstoff zu binden, was eine Zunahme der Masse zur Folge hat.

An insgesamt 55 Proben ist deshalb zusätzlich zum Glühverlust der Anteil an Kohlenstoff organischen Ursprungs (org. C) ermittelt worden.

Die Proben wurden dazu mit  $\text{HCl}$  aufbereitet, um den karbonatischen Kohlenstoff herauszulösen. Danach wurden die Proben im Rohofen bei ca.  $1300^\circ\text{C}$  im Sauerstoffstrom verbrannt. Das entweichende  $\text{CO}_2$  wurde volumetrisch bestimmt und auf den Gehalt an org. C umgerechnet.

### 3.2.7 Versuche zum einaxialen Formänderungsverhalten

Die Versuche zur Ermittlung des Spannungs-Verformungsverhalten der Proben werden im Abschnitt 8 beschrieben.

### 3.3 Fremde Untersuchungsergebnisse

Neben den Ergebnissen der eigenen Untersuchungen sind in die Datensammlung auch Untersuchungsergebnisse einbezogen worden, die von folgenden Institutionen zur Verfügung gestellt worden sind:

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Außen-  
stelle Küste, Hamburg  
- Abteilung Erd- und Grundbau -

Erdbaulaboratorium Prof. Dr.-Ing. K. Stein-  
feld, Hamburg

Erdbaulabor der Hochschule für Technik der  
Freien und Hansestadt Bremen, Prof.  
Dr.-Ing. H. Jagau, Bremen.

In allen Fällen sind Bodenproben (Sonderproben und Bohrproben) aus Baugrundaufschlußbohrungen untersucht worden.

Die Bohrprofile nach DIN 4023 bzw. Schichtenverzeichnisse nach DIN 4022 der Bohrungen standen zur Verfügung.

Bei den von der BAW, Hamburg und vom Erdbaulabor der Hochschule für Technik, Bremen übernommenen Daten konnten alle zugehörigen Bodenproben eingesehen werden. Einige Bodenproben wurden ergänzend im Labor des Lehrstuhls für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig untersucht.

Von den Proben, die im Erdbaulaboratorium Prof. Dr.-Ing. Steinfeld, Hamburg untersucht worden sind, stand nur ein sehr geringer Teil der nachträglichen Einsichtnahme zur Verfügung, da die Untersuchungen z. T. schon einige Jahre zurücklagen.

Die Untersuchungsergebnisse der nicht mehr vorliegenden Proben wurden nur übernommen, wenn die Zugehörigkeit zur "Lauenburger Serie" eindeutig festzustellen war. Das geschah entweder durch eigene Kenntnis des Gebietes, aus der die Proben stammten (z. B. Nähe Delmenhorst,

Wilhelmshaven) oder durch Rückfragen beim Geologischen Landesamt Hamburg für die Bohrungen im Raum Hamburg.

Übernommen wurde nicht das reine Datenmaterial, sondern soweit möglich Versuchsprotokolle und graphische Darstellungen.

Die Ergebnisse von Ödometerversuchen lagen als Last-Setzungs-Linien vor. Sie sind nur dann verwertet worden, wenn die Ödometerversuche unter vergleichbaren Bedingungen wie die eigenen (Probengeometrie, Lastintervalle) durchgeführt worden waren.

#### 3.4 Klassifizierung der Proben

Die Bodenproben wurden unmittelbar bei der Entnahme oder bei der Durchsicht der Bohrproben nach DIN 4021 bezeichnet. Zusätzlich wurden die Proben nach dem in Bild 5 dargestellten Schema klassifiziert.

Jede Probe erhielt eine Kennzahl, die in die Datensammlung einging und die Zuordnung zu den petrographischen Einheiten der "Lauenburger Serie" kenntlich macht:

- PE 1: fetter Ton ("Lauenburger Ton" im engeren Sinne)  
fetter, schwarzer Ton, rissig, ausgeprägte Plastizität.
- PE 2: gebänderter Ton  
erkennbar an der Hell-Dunkel-Bänderung.
- PE 3: sandiger Ton.

Die Untersuchung beschränkte sich auf diese drei Einheiten. Die weiteren Einheiten "Übergangsschichten" und "Klinkerton" wurden nicht berücksichtigt.

#### 4. DATENORGANISATION

##### 4.1 Datenerfassung und -speicherung

Aus der Aufgabenstellung ergibt sich die Forderung, möglichst flexible Zugriffsmöglichkeiten zu jedem Einzelwert des Datenmaterials zu haben, die Daten nach vorgegebenen Gesichtspunkten auswählen zu können und schließlich das Datenkontingent ganz oder teilweise statistisch auszuwerten.

Diese Forderung setzt voraus, daß die bei den Untersuchungen anfallenden Daten systematisch erfaßt und in einer EDV - Anlage gespeichert werden.

Die Erfassung der Daten wurde zunächst auf die Anlage des Rechenzentrums der Technischen Universität Braunschweig, Typ ICL 1906, abgestimmt. Als Speichermedium wurde die Lochkarte gewählt.

Um die Daten systematisch erfassen zu können, wurde ein Datenerfassungsblatt entwickelt. Dieses Formblatt (Bild 27) ist über die eigentlichen Ziele dieser Arbeit hinaus so gestaltet worden, daß es dem allgemeinen bodenmechanischen Laborbetrieb gerecht werden kann, denn für das neueingerichtete Bodenlabor des Lehrstuhls bestand noch keine Datenerfassung. Das Erfassungsblatt wurde so aufgebaut, daß eine anschließende Ablochung der Daten auf das primäre Speichermedium, die Lochkarte, möglichst leicht durchzuführen ist.

Das Erfassungsblatt hat außerdem die Funktion als Datendokument. Es ist dadurch ohne Computer und Lochkarten ein Nachschlagen einzelner Daten möglich. Aus diesem Grund wurden auch Werte in das Erfassungsformular aufgenommen, die auch durch den Rechner aus anderen Werten berechnet werden könnten, z. B. Plastizitätszahl, Konsistenzzahl.

BODENMECHANISCHE GRUNDKENNWERTE

Proben Nr.	PLZ	X-Koord.	Y-Koord.	Tiefe	EAPEGE	Datum	T	Su	S	G	T·Su	fS	mS	gS	mG	gG	St	d <sub>10</sub>	d <sub>30</sub>	d <sub>50</sub>	d <sub>60</sub>	U
		m 10 <sup>1</sup>	m 10 <sup>1</sup>	m		MON JAHR	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	mm	mm	mm	mm	-

1. LOCKKARTE

W	W <sub>L</sub>	W <sub>p</sub>	J <sub>p</sub>	J <sub>c</sub>	J <sub>A</sub>	S <sub>R</sub>	n	e	ρ	ρ <sub>D</sub>	ρ <sub>S</sub>	min ρ <sub>D</sub>	max ρ <sub>D</sub>	D	c <sub>U</sub>	K · 10 <sup>-X</sup>	V <sub>CA</sub>	V <sub>GL</sub>	Ö	T	D
									1/m <sup>3</sup>	1/m <sup>3</sup>	1/m <sup>3</sup>	1/m <sup>3</sup>	1/m <sup>3</sup>	-	kg/m <sup>2</sup>	m/sec	%	%			

2. LOCKKARTE

ÖDOMETERVERSUCH

ProbenNr.	ZS	maxLast	G	Z	HEA	E <sub>S1</sub>	E <sub>S2</sub>	c <sub>c</sub>	c <sub>s</sub>	σ <sub>v1</sub>	σ <sub>v2</sub>	γ <sub>h</sub>	
		KN/m <sup>2</sup>	0.05	0.15	0.3	HN/m <sup>2</sup>	0.5	1.0			HN/m <sup>2</sup>	HN/m <sup>2</sup>	HN/m <sup>2</sup>

3. LOCKKARTE

TRIAxiaLER SCHERVERSUCH

DIREKTER SCHERVERSUCH

ProbenNr.	VA	Z	G	F	bp	φ'	c'	φ <sub>U</sub>	c <sub>U</sub>	φ <sub>r</sub>	A	ProbenNr.	VA	Z	G	F	φ'	c'	φ <sub>U</sub>	c <sub>U</sub>	φ <sub>r</sub>
							KN/m <sup>2</sup>		KN/m <sup>2</sup>									KN/m <sup>2</sup>		KN/m <sup>2</sup>	

4. u. 3. LOCKKARTE

DATENERFASSUNGSBLATT

PROBENNUMMER \_\_\_\_\_  
 AUFTRAG \_\_\_\_\_

Bild 27: Datenerfassungsblatt, Originalgröße DIN A 4.

Die Erfassung der Daten ist nicht nach Versuchen, sondern nach Probennummern organisiert. Die zu untersuchenden Bodenproben werden im Labor des Lehrstuhls fortlaufend nummeriert. Diese Nummer ist die Adresse der Probe. Sie erscheint auf allen Laborformblättern. Unter dieser Nummer werden die Daten der Probe, wie Probeneingang, Auftrag, Bauvorhaben, Bohrung in einer Kartei geführt.

Da sich der Datenbestand zu einer Probe nicht auf einer einzigen Lochkarte darstellen läßt, ist eine Gliederung in einzelne logische Sätze notwendig.

Maschinentechnische Gegebenheiten bestimmen bei den verschiedenen Speichermedien die sogenannten "physischen Sätze". Sie sind im Gegensatz zu den logischen Sätzen vom Anwender nicht frei wählbar, sondern vom Speichermedium abhängig (WEDEKIND 1972).

Bei einer Lochkarte ist die maximale Länge für einen physischen Satz durch die 80 Spalten der Karte gegeben. Ist ein logischer Satz länger als 80 Spalten, so müssen mehrere physische Sätze, d. h. in diesem Falle Lochkarten, angelegt werden.

Die zu einer Probe gehörenden Daten wurden in vier logische und fünf physische Sätze geteilt.

Es wurde folgende Gliederung in logische Sätze gewählt (Bild 28):

Der erste Satz beinhaltet die Probennummer, die geographische Kennzeichnung, Angaben über die Entnahmetiefe und -art der Probe und die bodenmechanischen Grundkennwerte. Da der Umfang dieses Satzes größer ist als ein physischer Satz, muß er auf zwei Lochkarten gespeichert werden.

Der zweite Satz enthält die Versuchsergebnisse des Ödometerversuchs. Als Versuchsergebnisse werden nicht die bezogenen Setzungen bei bestimmten Normalspannungen,

1. LOCHKARTE

BODENMECHANISCHE GRUNDKENNWERTE 1. SATZ

Proben Nr.	PLZ	X-Koord.	Y-Koord.	Tiefe	EAPEGE	Datum	T	Su	S	G	T·Su	fs	mS	gS	fG	mG	gG	St	d <sub>10</sub>	d <sub>30</sub>	d <sub>50</sub>	d <sub>60</sub>	U
①		10 <sup>1</sup>	10 <sup>1</sup>	m			%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	mm	mm	mm	mm	-

SEGMENTE

2. LOCHKARTE

W	W <sub>L</sub>	W <sub>P</sub>	J <sub>P</sub>	J <sub>C</sub>	J <sub>A</sub>	s <sub>R</sub>	n	e	e	e <sub>D</sub>	e <sub>S</sub>	min e <sub>D</sub>	max e <sub>D</sub>	D	c <sub>U</sub>	K · 10 <sup>-X</sup>	V <sub>CA</sub>	V <sub>GL</sub>	ö	T	D
⑤									1/m <sup>3</sup>	1/m <sup>3</sup>	1/m <sup>3</sup>	1/m <sup>3</sup>	1/m <sup>3</sup>	-	kg/m <sup>2</sup>	m/sec	%	%	%	%	

3. LOCHKARTE

ÖDOMETERVERSUCH 2. SATZ

ProbenNr.	ZS	maxLast	G	Z	HEA	E <sub>S1</sub>	E <sub>S2</sub>	c <sub>c</sub>	c <sub>s</sub>	σ <sub>v1</sub>	σ <sub>v2</sub>	γ·h
①		kg/m <sup>2</sup>			0.05 - 0.15 - 0.3	0.5 - 1.0 <	0.05 - 0.15 - 0.3			HN/m <sup>2</sup>	HN/m <sup>2</sup>	HN/m <sup>2</sup>

SEGMENTE

4. 3. LOCHKARTE

TRIAXIALER SCHERVERSUCH 3. SATZ										DIREKTER SCHERVERSUCH 4. SATZ											
ProbenNr.	NA	Z	G	F	bp	φ'	c'	φ <sub>U</sub>	c <sub>U</sub>	φ <sub>r</sub>	A	ProbenNr.	NA	Z	G	F	φ'	c'	φ <sub>U</sub>	c <sub>U</sub>	φ <sub>r</sub>
①							kg/m <sup>2</sup>		kg/m <sup>2</sup>			①						kg/m <sup>2</sup>		kg/m <sup>2</sup>	

SEGMENTE

**DATENERFASSUNGSBLATT**

PROBENUMMER \_\_\_\_\_

AUFTRAG \_\_\_\_\_

Bild 28: Gliederung des Datenerfassungsblattes in logische Sätze und Segmente.

sondern die Steifemoduli in Lastbereichen übernommen.

Im dritten Satz werden die Daten aus triaxialen Scherversuchen und im vierten Satz die Ergebnisse aus direkten Scherversuchen erfaßt.

Beim triaxialen Scherversuch wurden die Ergebnisan-gaben auf Scherwinkel, Kohäsion und den  $A_f$ -Wert be-schränkt. Angaben über den Versuchsablauf selbst, wie Spannungs-Verformungsbeziehungen, Daten zum Spannungspfad werden während des Versuchs separat gespeichert und ausgewertet.

Die Datenangabe auf dem Erfassungsblatt geschieht aus-schließlich numerisch. Dadurch sind bei der Kontrolle der eingegebenen Daten fehlerhafte Eingaben wie Buch-staben oder Sonderzeichen leicht zu erkennen.

Angaben auf dem Datenerfassungsblatt, die ursprünglich nicht numerischer Art sind, wie Entnahmeart der Probe, Geologie usw. müssen kodiert werden und gehen dann mit der Kodezahl in die Datenerfassung ein.

Die Angabe des Kommas bzw. des Punktes wurde zugunsten einer eindeutigen und übersichtlichen Lochung ausge-schlossen. Dem Punkt wird eine feste Stelle zugeordnet, aber keine besondere Zeichenspalte, sondern eine Stelle zwischen zwei Zeichen.

Ermöglicht wird dies durch eine im Einleseprogramm vorgegebenes festes Format, das in einer beliebig langen Zahlenkette an den durch das Leseformat vorge-gbenen Stellen die Punkte zuordnet.

Das unmittelbare Ablochen der Daten auf Lochkarten ist nicht die einzige Möglichkeit, die Werte des Da-tenerfassungsblattes auf ein Speichermedium zu über-tragen.

Da dem Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik über ein Terminal ein direkter Anschluß an die ICL-Anlage

des Rechenzentrums zur Verfügung steht, ist es möglich, Daten über den Bildschirm einzugeben, zwischenspeichern und von dort auf Lochkarten übertragen zu lassen.

Seitdem am Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik Tischcomputer vom Typ Hewlett & Packard 9825A vorhanden sind, besteht die Möglichkeit, die Daten vom Erfassungsblatt nach dem gleichen Schema wie bei den Lochkarten direkt in den Rechner einzugeben und auf Magnetkassetten zu speichern. Von dieser Möglichkeit ist ebenfalls Gebrauch gemacht worden.

Die Daten konnten sowohl an der Großrechenanlage des Rechenzentrums der Technischen Universität nach Eingabe durch Lochkarten oder über den Bildschirm als auch mit dem Kleinrechner des Lehrstuhls ausgewertet werden. Dieses System hat sich für die Auswertung als sehr nützlich erwiesen, da äußerst variabel gearbeitet werden konnte (s. Abschnitt 5).

#### 4.2 Datenausdruck

Zur Ausschaltung von Übertragungsfehlern müssen die neu eingegebenen Daten überprüft werden. Eine Kontrolle der Daten ließ sich allerdings nicht optimal verwirklichen, wenn direkt vom Eingabemedium (Lochkarte oder Bildschirm) die Werte mit denen auf dem Erfassungsblatt verglichen werden sollten.

Deshalb wurde ein Programm erstellt, das die Werte einliest und in übersichtlicher Weise anschließend ausdruckt. Der Ausdruck (Bild 29) wurde so gewählt, daß die Zahlen in der gleichen Reihenfolge wie auf dem Formular in einer Zeile ausgedruckt werden. Die Zeilenfolge wird durch die Reihenfolge der Eingabekarten bestimmt, d. h. es wird keine Sortierung nach Probennummern durchgeführt.

Anhand dieses Kontrollausdrucks kann die Dateneingabe

BUDENMECHANISCHE GRUNDKENNWERTE

PH NR PLZ X=K00 Y=K00 TIEFE E P G DATUM T SU S G TS FS HS GS FG HG GG ST D 10 D 30 D 50 D 60 U

7034	4900	34477	58890	11.5	0 2 0	3 75	20 74	6	0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0	0.0000	0.0045	0.0110	0.0150	0.0
7035	4900	34477	58890	14.5	0 2 0	3 75	4 83 13	0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0	0.0000	0.0160	0.0250	0.0300	0.0	
7036	4900	34477	58890	17.5	0 2 0	3 75	2 71 27	0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0	0.0000	0.0300	0.0420	0.0500	0.0	
7037	4900	34477	58890	20.5	0 2 0	3 75	3 78 19	0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0	0.0000	0.0220	0.0350	0.0400	0.0	
7038	4900	34477	58890	23.5	0 2 0	3 75	6 89 5	0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0	0.0000	0.0160	0.0220	0.0290	0.0	
7039	4900	34477	58890	21.5	0 2 0	3 75	20 71 9	0 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0	0.0000	0.0055	0.0150	0.0180	0.0	

M WL MP IP IA SH H E RHO RHO D RHO S MIN MAX D QU K V CA V GL O TD

0.337	0.447	0.258	0.189	0.580	0.950	0.990	0.470	0.880	1.840	1.380	2.560	0.000	0.000	0.0	0.0	0.0E 00	0.0	0.0	1 1
0.537	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.980	0.500	1.000	1.790	1.320	2.560	0.000	0.000	0.0	0.0	0.0E-04	0.0	0.0	1 1
0.375	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.950	0.470	0.890	1.800	1.310	2.560	0.000	0.000	0.0	0.0	0.0E-07	0.0	0.0	1 1
0.270	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.900	0.480	0.910	1.770	1.300	2.560	0.000	0.000	0.0	0.0	0.0E 00	0.0	0.0	1 1
0.344	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.930	0.500	1.000	1.730	1.300	2.560	0.000	0.000	0.0	0.0	0.0E 00	0.0	0.0	1 1
0.265	0.414	0.208	0.206	0.750	1.030	0.990	0.420	0.730	1.920	1.320	2.600	0.000	0.000	0.0	0.0	0.0E 00	0.0	0.0	1 1

BEDECKUNGSVERSUCH

PR NR Z MAX L G Z H V ES1 ES1 ES1 ES1 ES1 ES2 ES2 ES2 ES2 ES2 CC CS SIG SIG GH

7034	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7035	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7036	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7037	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7038	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7039	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

TRIAXIALER SCHERVERSUCH

PR NR V Z G F B PHI C PHIU CU PHIR A

DIREKTER SCHERVERSUCH

PR NR V Z G F PHI C PHIU CU PHIR A

KEIN TRIAXIALER SCHERVERSUCH DURCHFUEHRT

7054	0	0	0	0	0.0	0.	0.0	0.	0.0
7055	0	0	0	0	0.0	0.	0.0	0.	0.0

Bild 29: Kontrollausdruck der abgespeicherten Daten.

auf ihre Richtigkeit überprüft werden. Gleichzeitig zeigt der Ausdruck, ob die Eingabewerte beim Einlesen und dem darauffolgenden Ausgabeprozess vom Computer richtig verarbeitet wurden.

Außer dem Kontrollausdruck ist ein Ausdruck der Daten auf einem offiziellen Ausgabeformular möglich (Bild 30).

Das Formular enthält im Kopf Angaben über die Herkunft der Bodenprobe. Die Postleitzahl des Entnahmeortes und die Probennummer werden angegeben, es folgen darunter die Rechts- und Hochwerte des Entnahmepunktes, das Entnahmedatum und die Art der Entnahme der Proben, sowie die petrographische und geologische Einheit. Die drei letzten Angaben werden durch das Programm aus den Zahlenkodierungen in die entsprechenden Begriffe umgesetzt.

Bei den folgenden Versuchsergebnissen sind zwei Formen des Ausdrucks möglich, abhängig davon, ob es sich um bindige oder nichtbindige Bodenproben handelt. Das Programm wird durch die Angabe der petrographischen Einheit gesteuert.

Sowohl der Kontrollausdruck als auch der offizielle Ausdruck werden von der Großrechenanlage und vom Tischrechner in gleicher Weise ausgedruckt.

#### 4.3 Sortieren der Daten

Ein wichtiges Ziel beim Aufbau einer Datei ist, unter Vorgabe bestimmter Kriterien Sortierungen bzw. Gruppierungen innerhalb der Gesamtheit der Datei durchzuführen.

Vor statistischen Auswertungen ist es z. B. erforderlich, Kriterien für die Grundgesamtheit vorzugeben,

```

=====
I
I Technische Universitaet Braunschweig
I
I Lehrstuhl fuer Grundbau und Bodenmechanik
I
=====

```

```

I
I Entnahme Ort 2900 Proben Nr. 7000
I
I
I
I X-Koord 39471
I
I Y-Koord 58832 Entnahmeart gestcert
I
I L.-Tiefe 5.3 Petrog.Einn. fetter Ton
I
I L.Datum 4 76 Geoloo.Einn. Pleisto.(cl)
I
=====

```

T	U	S	3	D 10	D 30	D 50	D 60
%	%	%	%	l	l	l	l
45	46	9	0	0.0000	0.0010	0.0025	0.0033

W	WL	WP	IP	IC	IA
0.380	0.054	0.267	0.587	0.810	1.300

Sr	n	e	rho	rho d	rho s
			2	2	2
0.940	0.520	1.070	1.770	1.230	2.550

cu	k	vca	vjl
3	5	%	%
0	0.0E 00	5.40	14.30

Es	0.05	0.15	0.3	0.5	1.0	<
4						
	1	3.400	4.900	7.900	13.600	25.300
	2	5.300	7.200	11.700	22.500	39.900

Cc	Cs	sig v	sig v	gamma*n
		4	4	
0.300	0.030	0.210	0.000	0.101

1 = [mm] 2 = [t/m3] 3 = [kN/m2] 4 = [MN/m2] 5 = [π/ε]

Bild 30: Ausdruck der Daten einer Probe.  
(Originalgröße DIN A 4).

aus der die statistisch zu untersuchenden Daten stammen sollen.

Die Gesamtdatei muß dementsprechend nach diesen Kriterien sortiert werden.

Das Sortieren geschieht durch ein Sortierprogramm (Bild 31). Ein Vorsortieren von Hand ist dabei nicht erforderlich.

Das zu diesem Zweck erstellte Sortierprogramm kann bis zu zehn Kriterien verarbeiten. Die Kriterien können in beliebiger Reihenfolge aufgezählt werden.

Die angegebenen Kriterien werden nacheinander abgefragt. Die Ausgangsdatei wird dabei jeweils um die Daten verringert, die nicht in den durch die Kriterien vorgegebenen Bereich fallen.

Die neu entstandene Datei kann jetzt gegebenenfalls wiederum nach dem nächsten Kriterium sortiert werden. Jede der neuen Dateien bleibt als neues Datenfile im Rechner und kann für weitere Rechnungen verwendet werden.

Nach jedem Sortierungsvorgang besteht die Möglichkeit, die neu entstandene Datei entweder als Kontrollausdruck oder als offiziellen Ausdruck vom Rechner ausgeben zu lassen.

Dieses Programm ist sowohl für die ICL-Anlage des Rechenzentrums der Technischen Universität als auch für den Tischrechner des Lehrstuhls erstellt worden.

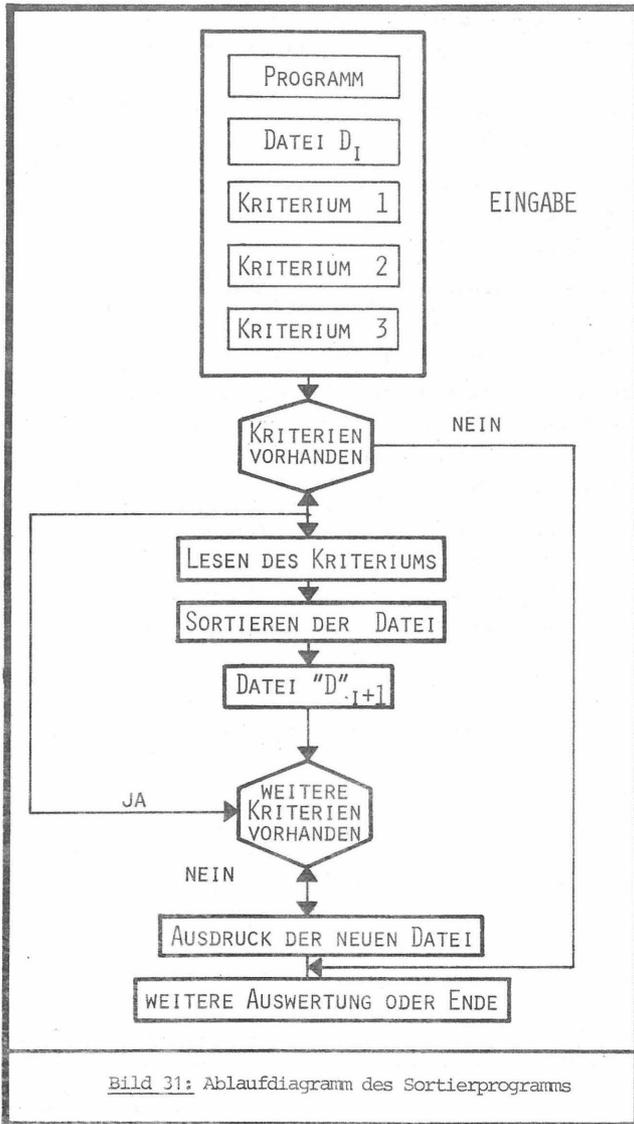


Bild 31: Ablaufdiagramm des Sortierprogramms

## 5. ENTWICKLUNG EINES VERFAHRENSSCHEMAS ZUR STATISTISCHEN AUSWERTUNG BODENMECHANISCHER DATENKONTINGENTE

### 5.1 Statistik in der Bodenmechanik

Der Baugrund als Werkstoff der Bodenmechanik weist sowohl in seiner Zusammensetzung als auch in seinen Eigenschaften größere Streuungen auf als jeder andere Werkstoff in der Bautechnik.

Mit diesen Streuungen gehen Unsicherheiten einher, die ebenfalls größer sind als die allgemein im Bauwesen üblichen Unsicherheiten z. B. über Lastannahmen, Idealisierung der statischen Systeme usw..

Statistische Verfahren können hier von großer Bedeutung sein, da es durch sie möglich ist, die vorhandenen Unsicherheiten durch numerische Wahrscheinlichkeiten auszudrücken.

Das Maß der Streuung der Bodeneigenschaften kann z. B. durch die Angabe der Häufigkeitsverteilung, des Mittelwertes und des Variationskoeffizienten angegeben werden. Mit diesen Parametern der beschriebenen Statistik ist es wiederum möglich, Aussagen über die Wahrscheinlichkeit des Versagens einer Gründung und damit über die Sicherheit zu machen. Aussagen über Sicherheiten wirken sich wiederum unmittelbar auf Kosten-Nutzen-Betrachtungen aus.

Die Anwendung statistischer Verfahren bietet sich für die Bodenmechanik noch aus einem anderen Grunde an. Der Baugrund wird im allgemeinen nur punktförmig erschlossen. Auch die Bodenproben werden mehr oder weniger punktförmig über die Tiefe einer Bohrung entnommen. Die bodenmechanische Beurteilung eines Baugrundes muß aufgrund weniger Proben vorgenommen werden. Im statistischen Sinne liegt dabei eine Stichprobenproblem vor. Eines der wichtigsten Anwendungsgebiete

der Statistik ist es, Verfahren zur Verfügung zu stellen, mit denen aus derartigen begrenzten Probenumfängen (Stichproben) Aussagen über die zu beurteilende Gesamtheit unter Vorgabe einer Wahrscheinlichkeit ermöglicht werden.

Statistische Verfahren und Betrachtungsweisen haben erst seit relativ kurzer Zeit Eingang in die Bodenmechanik gefunden.

In seinem Bericht über die 1. Konferenz über die Anwendung der Statistik und Wahrscheinlichkeitsrechnung auf die Bodenmechanik und den konstruktiven Ingenieurbau in Hong Kong 1971 betont SCHULTZE (1972), "daß hier ein Neuland beschritten wurde, das bisher in der Bodenmechanik zu wenig beachtet wurde".

Die zunehmende Bedeutung zeigt sich allerdings an den folgenden Konferenzen in Aachen 1975 und in Sydney 1979.

Die Anwendung statistischer Methoden auf die Bodenmechanik ist bisher nur von LUMB (1974) in umfassender Form beschrieben worden.

Einige der wichtigsten Anwendungsbereiche der Statistik und Wahrscheinlichkeitsrechnung auf die Bodenmechanik lassen sich wie folgt beschreiben:

- ▶ Auswertung bodenmechanischer Untersuchungen mit Hilfe der mathematischen Statistik. Die Streuung und Verteilung der Parameter einzelner Bodenarten wird untersucht, wie auch die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Kennwerten.
- ▶ Überprüfung der Genauigkeit und der Sorgfalt bodenmechanischer Laboruntersuchungen.
- ▶ Sicherheits- und Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen. In Abhängigkeit von den Streuungen der Baugrunderkennwerte werden Aussagen über die Sicherheit eines Bauwerks, die Wahrscheinlichkeit des Versagens und die Auswirkungen auf die Bemessung

und damit auf Wirtschaftlichkeit gemacht.

- ▶ Güteprüfungen  
Für die Überprüfung der geleisteten Arbeit im Erdbau werden statistische Verfahren angewendet, um zu ermitteln, in wievielen Fällen bei einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit ein geforderter Grenzwert über- oder unterschritten wird.
- ▶ Auswertung von Modell- und Großversuchen  
Der Einfluß verschiedener Parameter auf die gemessenen Ergebnisse (Zielgröße) wird durch geeignete statistische Verfahren, z. B. multiple Regressionsanalysen, untersucht.

In dieser Arbeit werden zwei Bereiche der Statistik angewendet, die beschreibende und die analytische Statistik, deren Grenzen allerdings fließend sind.

Mit den Methoden der beschreibenden Statistik werden die Untersuchungsergebnisse dargestellt. Es werden Maßzahlen erarbeitet, mit denen die Stichprobe charakterisiert werden kann.

Die Verfahren der analytischen Statistik werden bei folgenden Problemstellungen eingesetzt

- ▶ Schluß von der Verteilung eines Merkmals der Stichprobe auf die Verteilung der Grundgesamtheit.
- ▶ Zusammenhänge zwischen zwei oder mehr Variablen in einem Datenfeld.

## 5.2 Statistische Behandlung bodenmechanischer Daten

### 5.2.1 Abgrenzung der Grundgesamtheit

#### 5.2.1.1 Begriff der bodenmechanischen Grundgesamtheit

Sinn statistischer Untersuchungen ist es, von den Ergebnissen einer Stichprobe auf allgemeingültige Aussagen zu schließen.

Allgemeingültig bedeutet im statistischen Sinn die

Gültigkeit der Aussage - in bestimmten, von der Wahrscheinlichkeitstheorie vorgegebenen Grenzen - für die Grundgesamtheit, der die Stichprobe entstammt.

Als Grundgesamtheit wird in der mathematischen Statistik die "Menge von statistischen Einheiten mit übereinstimmenden Identifikationskriterien" bezeichnet (SCHWARZE 1975). COCHRAN (1972, S. 20) definiert die Grundgesamtheit als "die Menge von Elementen, aus der die Stichprobe gezogen werden soll".

MARSAL (1967) führt mit der räumlichen Ausdehnung einer Grundgesamtheit einen weiteren für die Bodenmechanik wesentlichen Gesichtspunkt in die Definition ein. Er stellt fest, daß ein Körper (z. B. Bodenart) dann als homogene oder reine Gesamtheit erscheint, wenn das untersuchte Merkmal an allen Punkten des betrachteten Gebietes annähernd idealstatistisch variiert und lokale Stichproben keine signifikanten Unterschiede zeigen.

Von dieser reinen Gesamtheit unterscheidet MARSAL die gemischte Gesamtheit, die genetisch bedingte Unterschiede in der Zusammensetzung aufweist und aus mehreren Einheiten besteht. Jede dieser Einheiten kann nach LUMB (1974) als selbstständige Gesamtheit aufgefaßt und statistisch entsprechend behandelt werden.

Es muß einer der ersten Schritte bei der Anwendung der analytischen Statistik sein, die Identifikationskriterien festzulegen, nach denen eine Grundgesamtheit abgegrenzt werden soll (MORSE 1971).

LUMB (1974) betont, daß dieser Schritt besonders in der Bodenmechanik auf keinen Fall als unbedeutend angesehen werden darf.

Die Frage nach der Grundgesamtheit im statistischen Sinn ist in der Bodenmechanik zunächst die Frage nach

den Randbedingungen, die eingehalten sein müssen, um von einer Bodeneinheit (soil unit) zu sprechen.

Diese Randbedingungen sind nicht alleine mit bodenmechanischen Methoden festzulegen. Die Frage greift z. T. weit in die Geologie über.

Eine Bodeneinheit muß als das Produkt geologischer Prozesse aufgefaßt werden, von denen jeder eine bestimmte Zeit und mit einer bestimmten Intensität gewirkt hat (MORSE 1971).

Für die daraus resultierenden bodenmechanischen Eigenschaften kann davon ausgegangen werden, daß sie von Zufallsprozessen gesteuert werden (LUMB 1974).

Die gesamte geologische Geschichte des Bodens muß berücksichtigt werden. Besonders die postsedimentäre Geschichte - Überdeckung durch Sedimente oder Gletscher, Entlastung, tektonische Störungen - kann für die Unterscheidung wichtig sein. SMOLTCZYK (1972) nennt diese Aufgabe das geomorphologische Problem der Bodenmechanik.

Eine weitere Aufgabe der Geologie ist, die Verbreitung der Bodeneinheit abzugrenzen und ggf. zu kartieren.

Dadurch ist es u. a. möglich, die Bodenart in regionale Bereiche zu gliedern.

Erst im Anschluß an diese geologischen Kriterien kann der Boden bodenmechanisch klassifiziert werden.

Die genaue Definition der Grundgesamtheit ist auch für die Beschreibung der Stichprobe selbst unerlässlich.

Wird die Grundgesamtheit bzw. die Teilgesamteinheit unzureichend oder ungenau abgegrenzt, besteht die Gefahr, daß die Stichprobe eine Mischung aus mehreren Grundgesamtheiten enthält, LUMB (1974) spricht von "contaminated samples".

Die Verteilung derartiger "unsauberer" Stichproben ist bei großen Umfängen mehrgipfelig. Bei kleinen Stichprobenumfängen treten die Werte aus der zusätzlichen (falschen) Grundgesamtheit als Extremwerte oder Ausreißer hervor (LUMB 1974).

Vermischte Stichproben aus nicht sauber voneinander getrennten Grundgesamtheiten liefern sowohl in den Parametern, die die Stichprobe beschreiben (Mittelwert, Streuung usw.) als auch in den Erwartungswerten der Gesamtheiten zweifelhafte Ergebnisse wie MORSE (1971) am Beispiel von Geschiebelehmhorizonten beschreibt.

MORSE unterteilt einen Geschiebelehmhorizont (normal till) nach glaziärgeologischen Kriterien in mehrere Teilhorizonte. Die statistischen Parameter für die Zylinderdruckfestigkeit werden dem Vergleich zugrunde gelegt. Es zeigt sich, daß der Variationskoeffizient von 29,0 % für die Gesamtheit "normal till" auf 14,8 % bzw. 14,7 % für die Teilgesamtheiten abnimmt.

Das Beispiel zeigt, daß die Methoden der Statistik in der Bodenmechanik nur dann sinnvoll eingesetzt werden können, wenn die Geologie des untersuchten Bodens entsprechend berücksichtigt wird.

Selbst bei einer relativ gleichmäßigen Bodenart wie dem Rheinischen Schluff war die Unterteilung in vier Einheiten nach geologischen Gesichtspunkten noch nicht ausreichend, da sie "der Verschiedenartigkeit des geologischen Werdegangs nicht gerecht wird" (HEITFELD im Vorwort zu KAHL 1972, S. XV).

#### 5.2.1.2 Teilgesamtheiten der "Lauenburger Serie"

Die "Lauenburger Serie" stellt sowohl stratigraphisch als auch genetisch eine Einheit dar. Petrographisch kann die Sedimentserie jedoch differenziert werden.

Der Begriff "Lauenburger Serie" wird daher wie in Abschnitt 2.1 gezeigt wurde, übergreifend auf verschiedene petrographische Einheiten angewendet. Alle untersuchten Proben wurden nach geologisch-petrographischen Kriterien den drei petrographischen Einheiten nach Abschnitt 3.4 zugeordnet.

Daraus ergibt sich die Frage, ob diese Einheiten eine bodenmechanisch sinnvolle Gliederung bedeuten und im statistischen Sinn als Teilgesamtheiten anzusehen sind.

Eine allgemeine Gliederung der Tone geht auf TERZAGHI (1936) zurück. Danach ist zwischen folgenden Gruppen zu unterscheiden:

- ▶ Weiche homogene Tone (soft intact clays).
- ▶ Steife homogene Tone (stiff intact clays).
- ▶ Steife gerissene Tone (stiff fissured clays).

SKEMPTON & HUTCHINSON (1969) erweitern diese Gliederung. Es wird zunächst unterschieden zwischen homogenen (intact) Tonen und Tonen, die Diskontinuitäten in ihrer Struktur enthalten.

Die Tone mit strukturellen Diskontinuitäten werden unterteilt in:

- ▶ Tone mit einem Netzwerk von Rissen mehr oder weniger zufallsbedingter Orientierung, den "fissured clays"  
Eine weitere Untergliederung ist nach der Länge und dem Abstand der Rissestrukturen möglich.
- ▶ Laminierte Tone, die in ihrer Struktur eine bevorzugte Orientierung parallel zur Sedimentationsebene zeigen.

Von den drei untersuchten Einheiten der "Lauenburger Serie" gehören die Einheiten "fetter Ton" (PE 1) und "sandiger Ton" (PE 3) in die Gruppe der fissured clays. Beim sandigen Ton (PE 3) tritt das Netzwerk der Risse nicht immer so deutlich hervor wie beim fetten Ton (PE 1),

ist aber dennoch häufig zu beobachten.

Die petrographische Einheit PE 2 der "Lauenburger Serie", der gebänderte Ton, stellt auch im Sinne der Gliederung von SKEMPTON & HUTCHINSON eine separate Gruppe dar.

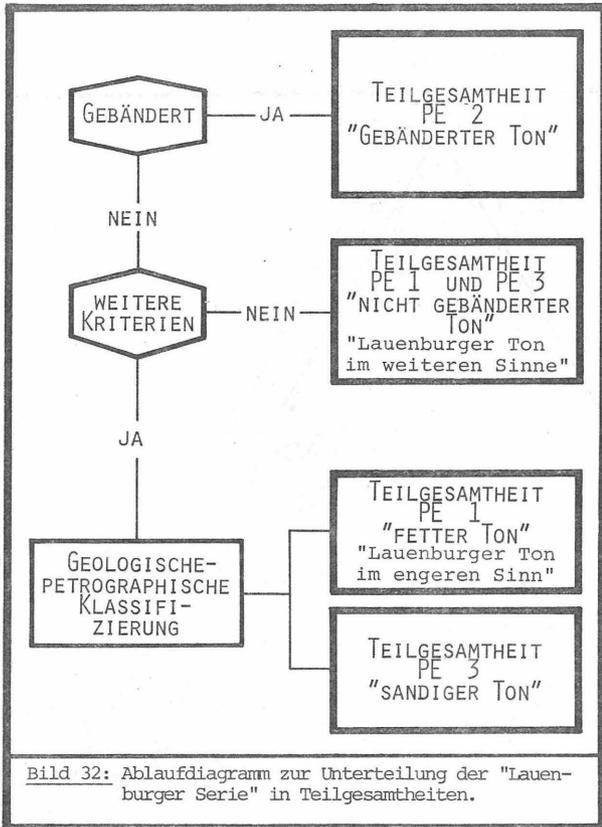
Diese Einheit PE 2 ist deshalb bei der statistischen Bearbeitung immer als eigenständige Teilgesamtheit behandelt worden. Sie ist bei der visuellen Klassifizierung im allgemeinen durch die Bänderung ohne Schwierigkeiten zu erkennen.

Aus dem verbleibenden Datenkontingent sind nach verschiedenen Kriterien alternativ weitere Teilgesamtheiten gebildet worden (Bild 32):

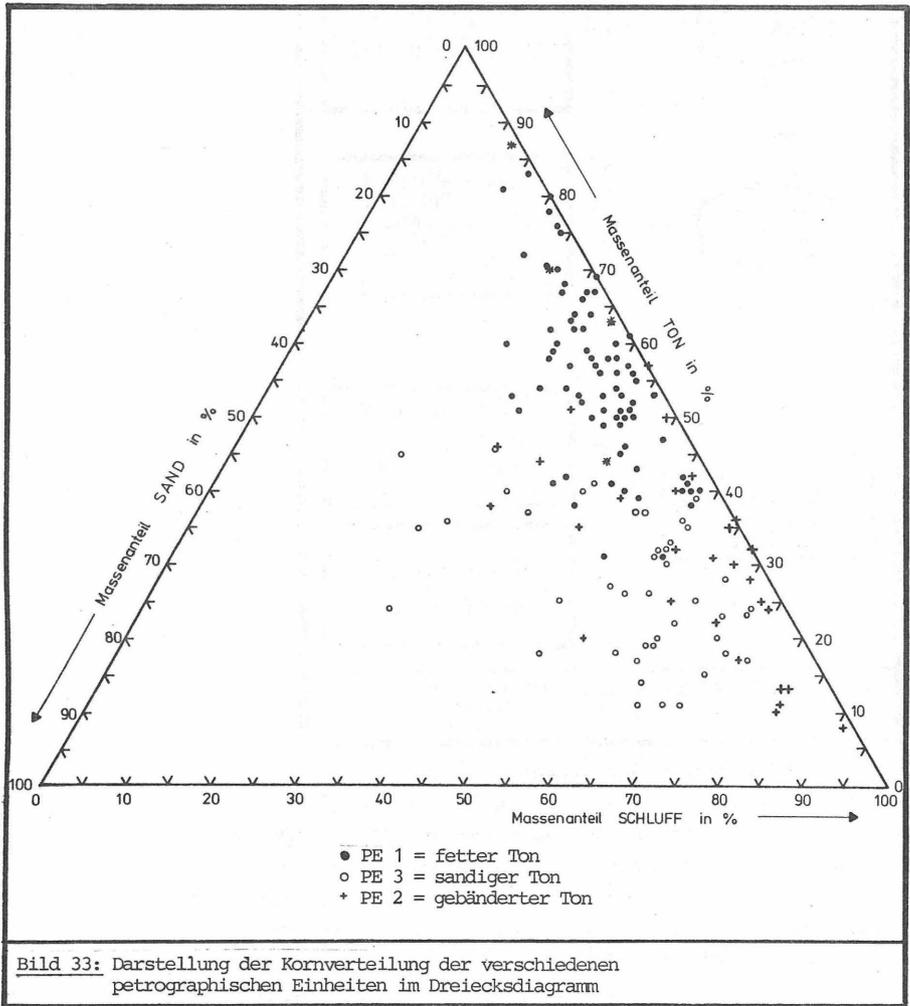
- ▶ Die petrographischen Einheiten PE 1 und PE 3 bilden die Teilgesamtheit "nicht gebänderter Ton" ("Lauenburger Ton" im weiteren Sinne)
- ▶ Die petrographischen Einheiten PE 1 "fetter Ton" und PE 3 "sandiger Ton" bilden je eine Teilgesamtheit. Der fette Ton wird als "Lauenburger Ton" im engeren Sinne gedeutet.

Die Darstellung der Kornfraktionsanteile der untersuchten Proben im Dreiecksdiagramm (Bild 33), sowie der Wertepaare Fließgrenze/Plastizitätszahl (Bild 34) zeigt, daß die ausgewiesenen Teilgesamtheiten auch nach bodenmechanischen Kriterien eigenständige Gruppen bilden.

Eine weitere Gliederung ist nach regionalen Gesichtspunkten vorgenommen worden (Bild 35). Im gesamten Verbreitungsraum sind die Teilgebiete "Raum Hamburg" und "westlicher Verbreitungsraum" unterschieden worden. Die "Lauenburger Serie" hat in beiden Gebieten eine unterschiedliche postsedimentäre Geschichte erfahren (s. Abschnitt 2.4.1).



Das Gebiet "westlicher Verbreitungsraum" ist von den Gletschern nur während einer nachfolgenden Eiszeit (Saale-Drenthe) überfahren worden. Der Raum Hamburg liegt dagegen im Bereich mehrerer jüngerer Vergletschungen (Bild 2). Innerhalb des Gebietes "westlicher Verbreitungsraum" ist der "Raum Oldenburg" abgegrenzt worden, da hier eine Konzentration der Entnahmestellen vorhanden ist. Einen noch engeren regionalen Teilbereich stellt innerhalb des "Raumes Oldenburg" der Bereich "2. Schleuse Oldenburg" dar. Hier wurden auf einer Länge von ca. 1 000 m entlang des Küstenkanals insgesamt 13 Bohr- und Sonderproben aus der "Lauenburger Serie" entnommen.



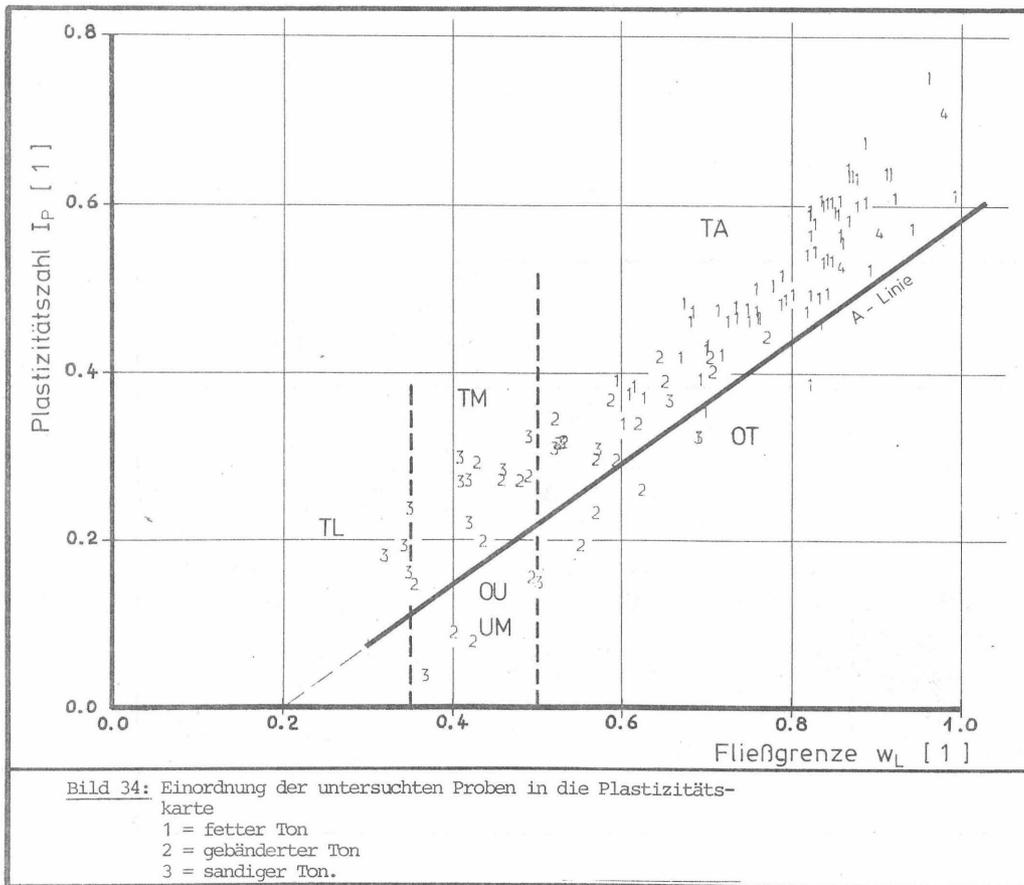
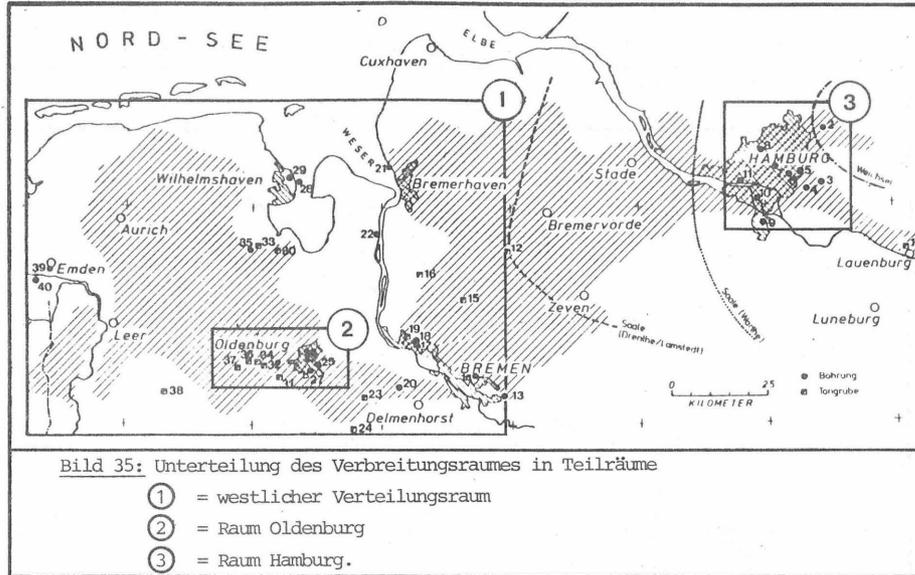


Bild 34: Einordnung der untersuchten Proben in die Plastizitätskarte  
 1 = fetter Ton  
 2 = gebänderter Ton  
 3 = sandiger Ton.



### 5.2.2 Stichprobenauswahl

Bodenproben aus einer Bodeneinheit sind im statistischen Sinn Stichprobenelemente aus einer unendlichen Grundgesamtheit. Der Stichprobenumfang ist daher gegenüber der Grundgesamtheit immer als klein im mathematischen Sinn anzusehen. Statistisch dagegen wird eine Stichprobe mit mehr als 30 Elementen schon als groß bezeichnet (CLAUSS & EBNER 1977, S. 17).

Um von den Ergebnissen einer Stichprobe auf die Grundgesamtheit folgern zu können, muß die Stichprobe repräsentativ für die Grundgesamtheit sein.

Die Forderung nach repräsentativen Stichproben beinhaltet sowohl einen materialgebundenen, fachlichen Aspekt als auch einen statistischen.

Fachtechnisch muß sichergestellt sein, daß die einzelnen Proben (Stichprobenelemente) durch die Entnahme ihre Eigenschaften möglichst wenig ändern. Das wird z. B. durch die Güteklasseinteilung nach DIN 4022 geregelt.

Statistisch wird gefordert, daß die Zusammensetzung der Stichprobe der Zusammensetzung der Gesamtheit möglichst gleicht. Das wird durch die Zufallsauswahl der Stichprobenelemente sichergestellt. Jedes Element der Grundgesamtheit muß mit der gleichen Wahrscheinlichkeit in die Stichprobe gelangen können (SACHS 1974).

Die Zufälligkeit muß bei Bodenproben sowohl über die Verbreitungsfläche der Bodeneinheit als auch über die Tiefe (Mächtigkeit) gewährleistet sein.

Im idealen Fall kann das durch Planung, also durch gesetzmäßige Probennahme sichergestellt werden. Vorausgesetzt werden muß dabei aber, daß die Verbreitung und die Mächtigkeit des zu untersuchenden Bodenhorizontes genau bekannt ist.

Im allgemeinen kann dieser Weg nicht beschritten werden. Es liegen häufig Ergebnisse von bodenmechanischen Untersuchungen an einer Bodeneinheit vor, die z. T. über einen längeren Zeitraum gesammelt wurden und einer statistischen Auswertung zugeführt werden sollen.

Im vorliegenden Fall war keine systematische Probenahme über das Gesamtgebiet erreichbar. Auf die Bohrungen konnte kein Einfluß genommen werden, da sie entweder schon abgeteuft oder im Rahmen von Bauvorhaben fest eingeplant waren.

Die eigentliche Probennahme war auf die oberflächennahen Bereiche beschränkt, die durch Tongruben erschlossen waren.

Die Lage der Entnahmeorte (Bild 2) zeigt bereichsweise Konzentrationen vor allem im Raum Oldenburg und Hamburg.

Aus fachlichen Überlegungen heraus muß beurteilt werden, ob die vorliegenden Bodenproben aus der Grundgesamtheit zufällig ausgewählt worden sind.

Ein Einfluß der Entnahmeorte ist dann nicht zu erwarten, wenn vorausgesetzt wird, daß die Grundgesamtheit keinen gesetzmäßigen Änderungen in vertikaler und horizontaler Richtung unterworfen ist.

Die Zufälligkeit der Auswahl ist für Teilräume der "Lauenburger Serie" als gegeben vorausgesetzt. Für das gesamte Verbreitungsgebiet erscheint sie nicht mit Sicherheit gegeben zu sein. Deshalb werden bei der Auswertung Folgerungen in erster Linie für Teilräume gezogen, die Auswertung für das gesamte Verbreitungsgebiet wird dagegen nur mit Vorbehalten vorgenommen.

### 5.2.3 Rechenprogramme

Für die umfangreiche Rechenarbeit, die für statistische Verfahren notwendig ist, sind elektronische Rechner

benutzt worden.

Die meisten Aufgaben sind mit Tischrechnern HP 9825A der Firma Hewlett & Packard gerechnet worden. Die Rechner dieser Generation sind in der Lage, nahezu alle Verfahren auszuführen, die für die statistische Auswertung bodenmechanischer Daten erforderlich sind.

Mit der bestehenden soft-ware können Verfahren der beschreibenden Statistik (Histogramme, Verteilungsanalysen, und der analytischen Statistik (Varianzanalysen, Korrelationsrechnung, Regressionsrechnung mit verschiedenen mathematischen Funktionen, multiple Regressionsrechnung, Testverfahren) durchgeführt werden. Für spezielle Problemstellungen sind die Programme dieser soft-ware abgeändert worden.

Da dem Rechner ein Plattenplotter als Peripheriegerät angeschlossen ist, konnten, wo es sinnvoll erschien, regressive Zusammenhänge auch graphisch dargestellt werden.

In einigen Fällen wurde auf das soft-ware Angebot des Rechenzentrums der Technischen Universität zurückgegriffen. Anwendung fand hier das Programmpaket "SPSS - Statistical Package for the Social Sciences" (NIE et al. 1970).

Hieraus sind vor allem die Programme "CONDSCRIPTIVE", "SCATTERGRAM", und "FACTORANALYSIS" benutzt worden. Die Programme werden bei der Behandlung der statistischen Verfahren im einzelnen erwähnt.

#### 5.2.4 Verfahren der beschreibenden Statistik

##### 5.2.4.1 Häufigkeitsverteilung

Die Verfahren der beschreibenden Statistik dienen dem Zweck, die Versuchsergebnisse einer Stichprobe graphisch oder durch charakteristische Maßzahlen sinnvoll darzustellen.

In der Bodenmechanik liegen die Beobachtungswerte fast ausschließlich als stetige Merkmale (Meßwerte) vor, die in einem Intervall jeden beliebigen Wert annehmen können.

Graphisch können derartige Versuchsergebnisse als Häufigkeitsverteilung (Histogramm) aufgetragen werden. Diese Darstellung erlaubt einen Überblick über die Lage und Verteilung der Daten im Meßbereich (Bild 36).

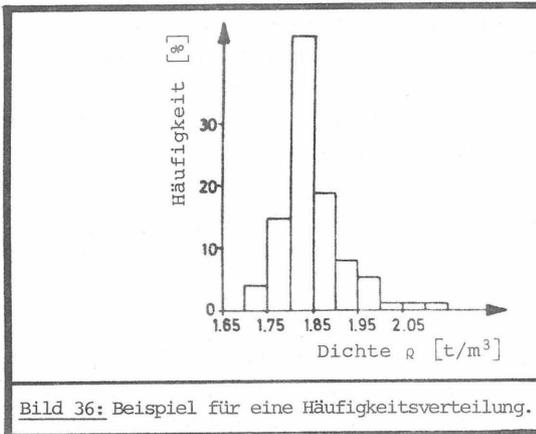


Bild 36: Beispiel für eine Häufigkeitsverteilung.

#### 5.2.4.2 Maßzahlen der Stichprobe

Aus der Häufigkeitsfunktion können statistische Maßzahlen errechnet werden, die die Stichprobe summarisch beschreiben.

Diese statistischen Kennwerte werden nach DIN 55 302, Blatt 1 benannt und berechnen sich wie folgt:

#### Arithmetischer Mittelwert

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{Gl. 8})$$

$n$  = Anzahl der Beobachtungswerte einer Variablen  
 $x_1 \dots x_i$  = Beobachtungswerte

### VARIANZ

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{Gl. 9})$$

### STANDARDABWEICHUNG

$$s = [\sqrt{s^2}] \quad (\text{Gl. 10})$$

### VARIATIONSKOEFFIZIENT

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \text{ bzw. } v = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 [\%] \quad (\text{Gl. 11})$$

### SPANNWEITE

$$R = \max x - \min x \quad (\text{Gl. 12})$$

Die Standardabweichung  $s$  ist ein Maß für die Abweichung der Einzelwerte  $x_i$  vom Mittelwert  $\bar{x}$  sowie der einzelnen Werte untereinander. Mit ihr kann für jede beliebige Verteilung ein Intervall  $\bar{x} \pm 2s$  angegeben werden, in dem mindestens 75 % aller Beobachtungswerte liegen. In der Praxis wird in der überwiegenden Anzahl der Fälle etwa 95 % aller Beobachtungswerte in diesem Intervall liegen (DIN 55 302, Bl. 1, Abschnitt 3).

Der Variationskoeffizient  $v$  ist von der Einheit der betrachteten Kennzahl unabhängig und eignet sich deshalb zu Vergleichszwecken.

Die Maßzahlen wurden entweder mit dem Unterprogramm "CONDISCRPTIVE" aus der SPSS-software berechnet oder mit dem Programm "SAMPLE STATISTICS" aus der software der HP 9825A.

5.2.5 Verfahren der analytischen Statistik  
5.2.5.1 Prüfung auf Normalverteilung

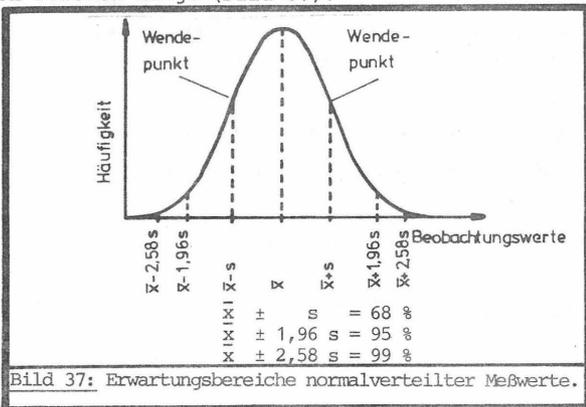
Soll von den Maßzahlen der Häufigkeitsfunktion einer Stichprobe auf die entsprechenden Maßzahlen der zugehörigen Grundgesamtheit geschlossen werden, muß deren Verteilungsfunktion bekannt sein.

Für die von Zufallsprozessen gesteuerten bodenmechanischen Parameter kann zumindest angenähert eine Normalverteilung erwartet werden (KÖNIG 1969, SCHULTZE 1972).

Für nichtnormalverteilte Grundgesamtheiten kann mit hinreichender Genauigkeit in den meisten Fällen für Stichprobenumfänge  $n > 30$  die Normalverteilung benutzt werden (SCHWARZE 1975).

Normalverteilungen spielen in der Statistik eine wesentliche Rolle und sind Grundlage vieler Schätzverfahren, bei denen aus einer Stichprobe ein Parameter der Grundgesamtheit geschätzt werden soll.

Für Normalverteilungen ist der prozentuale Anteil der Beobachtungswerte, die in einem bestimmten Bereich links und rechts der Maximalordinate liegen, bekannt (CLAUSS & EBNER 1977). Es kann die Wahrscheinlichkeit angegeben werden, mit der ein Beobachtungswert in einem bestimmten Bereich liegt (Bild 37).



Wird aus der normalverteilten Grundgesamtheit  $N(\mu, \sigma)$  mit dem Mittelwert  $\mu$  und der Standardabweichung  $\sigma$  eine Stichprobe vom Umfang  $n$  gezogen und daran die Beobachtungswerte  $x_i$  gemessen, so sind die  $x_i$  unter der Voraussetzung sie seien zufällig und unabhängig der Grundgesamtheit entnommen sämtlich  $N(x, s)$  verteilt (SCHWARZE 1975).

Es ist deshalb ausreichend, die Verteilungsfunktion der Stichprobe zu prüfen, um Aussagen über die Grundgesamtheit machen zu können.

Die Hypothese, eine bestimmte Variable  $x$  aus der Grundgesamtheit sei normalverteilt wird durch einen Anpassungstest am Ergebnis der Stichprobe überprüft.

Ein solcher häufig verwendeter Anpassungstest ist der  $\chi^2$  - Test (LUMB 1974, SACHS 1974, CLAUSS & EBNER 1977).

Einen Anhalt, ob die Häufigkeitsverteilungen normalverteilt sind, gibt der Variationskoeffizient, der bei normalverteilten Gesamtheiten nicht größer als  $v = 33\%$  sein darf (SACHS 1974).

#### 5.2.5.2 Vertrauensbereich des Mittelwertes

Der Mittelwert einer Grundgesamtheit kann aus den Ergebnissen einer Stichprobe in bestimmten, auf Wahrscheinlichkeitstheoretischen Überlegungen beruhenden Vertrauensgrenzen geschätzt werden.

Dem Schätzverfahren wird häufig die t-Verteilung nach STUDENT zugrunde gelegt. Die t-Verteilung ist in der Gestalt und Symmetrie der Normalverteilung ähnlich. Sie unterscheidet sich von der Normalverteilung dadurch, daß sie unabhängig ist vom Mittelwert und von der Standardabweichung, aber abhängig von der Anzahl der untersuchten Stichprobenelemente.

Für sehr große Stichprobenumfänge  $n \rightarrow \infty$  strebt die Funktion der t-Verteilung gegen die Funktion der Normalverteilung mit dem Mittelwert  $\mu$  und der Varianz 1 (KREYSZIG 1975).

Mit der t-Verteilung kann der Mittelwert einer annähernd normalverteilten Grundgesamtheit mit folgender Beziehung geschätzt werden

$$\mu = \bar{x} \pm t \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (\text{Gl. 13})$$

t = tabellierte Größe der t-Verteilung, die von der Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  und dem Freiheitsgrad  $\nu$  abhängt t<sub>( $\alpha, \nu$ )</sub>.  
Freiheitsgrad  $\nu$  = Anzahl n der Stichprobenelemente minus der geschätzten Parameter.

Für die Schätzung des Mittelwertes wird  $\nu = n - 1$  und t<sub>( $\alpha, \nu$ )</sub>.  
s = Standardabweichung der Stichprobe.  
 $\bar{x}$  = Mittelwert der Stichprobe.

Der Vertrauensbereich des Mittelwertes ist in dieser Arbeit mit dem Programm "ONE-SAMPLE-t-TEST" aus der soft-ware der HP 9825A berechnet worden.

Den Berechnungen wird eine Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 5\%$  zugrunde gelegt. Diese Irrtumswahrscheinlichkeit gilt auch für alle folgenden Untersuchungen. Sie ist für bodenmechanische Fragestellungen ausreichend, da z. B. die "Empfehlungen des Arbeitsausschusses Ufer-einfassungen" (EAU) nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% ein Überschreiten der unteren Grenze bestimmter bodenmechanischer Parameter verlangen (EAU 1975, E 96), d. h. einer Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 10\%$ .

### 5.2.5.3 Regressionsanalyse

Bei den bisher beschriebenen Verfahren wurde immer nur eine Variable für sich alleine betrachtet. Es ist

aber häufig von Interesse etwas über die Zusammenhänge zwischen mehreren Variablen zu erfahren.

Die funktionale Beziehung zwischen zwei Variablen aufzudecken ist Aufgabe der einfachen Regressionsanalyse (linear oder nichtlinear), bei mehreren Variablen finden die multiple Regressionsanalyse und die Faktorenanalyse Anwendung.

Mit der Regressionsanalyse wird versucht, einen physikalischen bzw. hier einen bodenmechanischen Zusammenhang mathematisch zu beschreiben. Die funktionale Beziehung zwischen zwei oder mehr Variablen, die durch physikalische Gleichungen exakt beschrieben wird, tritt bei Variablen, die aus Meßverfahren gewonnen werden, im allgemeinen durch Meßfehler und natürliche Streuungen nur unscharf hervor. Die Variablen hängen nur noch mehr oder weniger lose zusammen. Es besteht ein stochastischer Zusammenhang.

Mit der einfachen Regressionsanalyse soll durch eine empirische Funktion

$$y = f(x_i) \quad \text{oder} \quad x = f(y_i) \quad (\text{Gl. 14})$$

aus dem Wert einer Variablen  $x_i$ , der Einflußgröße, der Wert der anderen Variablen  $y$ , der Zielgröße, berechnet werden.

Dazu sollen  $n$  Wertepaare einer Stichprobe aus einer zweidimensionalen  $xy$ -Grundgesamtheit vorliegen.

Die Funktion beschreibt, welcher Zusammenhang zwischen den Variablen besteht (SACHS 1974).

Der Zusammenhang wird aus einer Richtung beschrieben, nämlich von  $x_i$  nach  $y$ , bzw. von  $y_i$  nach  $x$ .

Zu der angenommen empirischen Funktion, dem mathematischen Modell, werden die zugehörigen Koeffizienten bestimmt.

von der Anzahl der Wertepaare mit vorgegebener Irrtumswahrscheinlichkeit im gültigen oder ungültigen Bereich liegt. Ungültig heißt, der Korrelationskoeffizient ist nur zufällig von Null verschieden, eine Korrelation zwischen den Variablen ist statistisch nicht gesichert. Demgegenüber besteht bei Korrelationskoeffizienten im gültigen Bereich mit der vorgegebenen Irrtumswahrscheinlichkeit eine statistisch gesicherter Zusammenhang zwischen den Variablen.

#### 5.2.5.4 Faktorenanalyse

Neben der multiplen Regressionsanalyse stellt die mathematische Statistik mit der Faktorenanalyse ein weiteres multivariates Verfahren zur Verfügung.

Durch dieses Verfahren wird eine größere Anzahl abhängiger Größen, z. B. bodenmechanischer Daten, die aus einer Grundgesamtheit stammen, auf eine kleinere Anzahl unabhängiger echter Einflußgrößen zurückgeführt. Untereinander stark korrelierte Merkmale werden zusammengefaßt. Die neuen Einflußgrößen sind die sog. Faktoren (SACHS 1974).

Mit den Faktoren werden hypothetische Größen ermittelt, von denen angenommen wird, daß sie in den Variablen wirksam sind und damit zur Korrelation zwischen den Variablen beitragen (CLAUSS & EBNER 1977).

Es werden Korrelationskoeffizienten, sogenannte Ladungen, zwischen den ursprünglichen Variablen und den neuen abstrakten Größen, den Faktoren, errechnet. Die Ladung einer Variablen auf einem Faktor gibt ein Maß für dessen Einfluß auf die Variable an.

Die Faktorenanalyse ist eines der wenigen Verfahren in der mathematischen Statistik, mit dem Hypothesen nicht nur getestet sondern aufgrund umfangreicher Datensammlungen auch aufgestellt werden können (ÜBERLA 1971).

Mit dieser Vorgehensweise können Strukturen in einem Datensatz erkannt und interpretiert werden, die bei ausschließlicher Betrachtung der Korrelationsmatrizen nicht entdeckt werden oder dort nicht enthalten sind.

Die Grundlagen der Faktorenanalyse werden von ÜBERLA (1971) und CLAUS & EBNER (1977) eingehend beschrieben. Auf die mathematische Berechnungsweise der in Bild 39 dargestellten Einzelschritte soll hier deshalb nicht näher eingegangen werden.

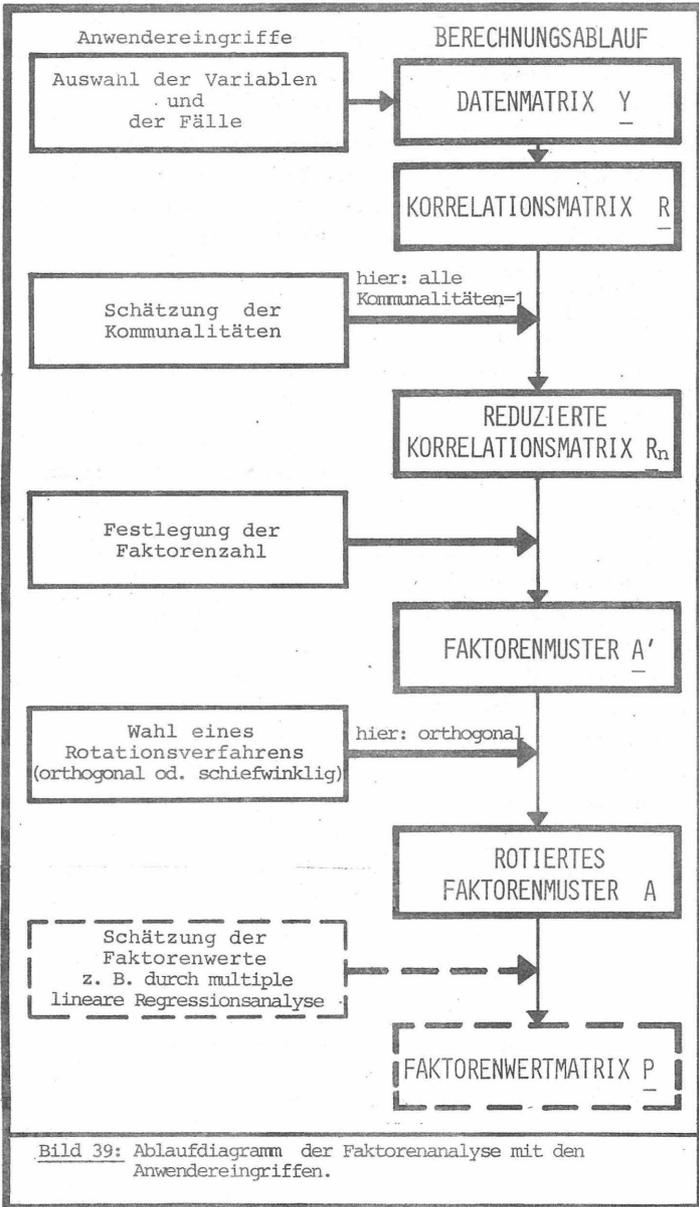
Die faktorenanalytischen Berechnungen sind mit dem Programm "FAKTOR ANALYSIS" aus der SPSS - software am Rechenzentrum der Technischen Universität Braunschweig ausgeführt worden.

Der Ablauf dieses Programms und die Steuerungseingriffe werden von BEUTEL et al. (1976) und von NIE et al. (1970) beschrieben.

Mit der rotierten Faktorenmatrix, die die Korrelationskoeffizienten der einzelnen Variablen mit den neuen beschreibenden Größen, den Faktoren, enthält, liegt das mathematische Ergebnis der Faktorenanalyse vor. Die extrahierten Faktoren müssen nun in ihrer Bedeutung für das Variablenfeld gewürdigt werden, sie müssen identifiziert werden. Mit der Identifikation der Faktoren setzt nach der mathematischen Analyse die bodenmechanische Analyse ein.

Indem geprüft wird, welche Variablen auf den verschiedenen Faktoren laden, muß versucht werden, den Faktor einer bodenmechanischen oder geologischen Größe zuzuordnen, ihn verbal zu beschreiben.

Für die bodenmechanische Fragestellung ist eine quantitative Auswertung nicht sinnvoll. Die in einem Datensatz enthaltenen Informationen sollen ausschließlich qualitativ ausgewertet werden.



Die quantitative Auswertung einzelner in der Faktorenmatrix aufgedeckter Abhängigkeiten wird im Anschluß mit Regressionsrechnungen durchgeführt.

Für bodenmechanische Fragestellungen ist die Faktorenanalyse von HOLTZ & SCHRODE (1975) und COROTIS et al. (1975) eingesetzt worden. BALASUBRAMANIAM et al. (1979), WONG & BRENNER (1979) und RUPPERT & RAABE (1979) zeigen Anwendungsbeispiele für die Faktorenanalyse auf.

Trotz dieser Beispiele sollte die Bedeutung dieses Verfahrens für die Bodenmechanik nicht überbewertet werden. Die faktorenanalytische Bearbeitung von Datensätzen erfordert einen hohen rechen-technischen Aufwand, der trotz der einfachen Zugriffsmöglichkeit zu fertigen Rechenprogrammen, z. B. das SPSS-Programm, nur an Großrechnern geleistet werden kann. Dieser Aufwand erscheint zumindest für Routineauswertungen nicht angemessen zu sein, da die qualitativen Zusammenhänge zwischen verschiedenen Variablen in der Bodenmechanik allgemein bekannt sind.

Eine sinnvolle Anwendungsmöglichkeit könnte in einer Unterscheidungsanalyse verschiedener bodenmechanischer oder geologischer Grundgesamtheiten liegen. Faktorenanalysen werden an Datensätzen verschiedener Grundgesamtheiten mit den jeweils gleichen Variablen durchgeführt. Durch die Identifikation der extrahierten Faktoren können möglicherweise die unterscheidenden Merkmale zwischen den Grundgesamtheiten herausgefunden werden.

Die Faktorenanalyse ersetzt wie alle übrigen statistischen Verfahren auf keinen Fall das Denken in physikalischen Zusammenhängen. Die Zahlen, die sie liefert erhalten nicht ihren Sinn aus sich selbst, sondern durch physikalische, d. h. hier bodenmechanische Deutung.

### 5.3 Verfahrensschema zur statischen Auswertung

Durch die elektronische Datenspeicherung und -verarbeitung ist es möglich geworden, große Datenmengen fast beliebig zugriffsbereit zu halten und die Gesamtdaten oder Teile davon statistisch zu bearbeiten.

Da sowohl an den großen Rechenzentren als auch für Tischrechner zumeist ein umfangreiches software-Angebot für statistische Fragestellungen vorhanden ist, besteht die Gefahr, die statistischen Verfahren mehr oder weniger wahllos anzuwenden.

Es erschien daher sinnvoll, die in den vorausgegangenen Kapiteln beschriebenen Verfahren zu einem Verfahrensschema zusammenzufassen.

Das Schema soll sowohl die Verwendung ganzer Datenkontingente erlauben als auch von Teilmengen, die nach vorgegebenen Kriterien aus dem Datenkontingent auszuwählen sind.

Das Ablaufdiagramm (Bild 40) gibt einen Überblick über die Bestandteile dieses Verfahrensschemas.

Das wesentliche Element dieses Schemas liegt in der Anordnung der Verfahren der analytischen Statistik. Die Faktorenanalyse wird hier als Ergänzung und Basis der Regressionsanalysen eingeführt.

Bei der bisherigen Anwendung in der Bodenmechanik (HOLTZ & SCHRODE 1979, COROTIS et al. 1975) wurde die Faktorenanalyse als Alternative zur Regressionsrechnung verstanden.

Diese Vorgehensweise bringt folgende Vorteile:

- ▶ In der Faktorenanalyse werden alle Variablen gleichwertig behandelt. Eine Ordnung nach Ziel- und Einflußgrößen wird nicht vorgenommen. Die Daten werden so aus einer objektiveren Distanz betrachtet.

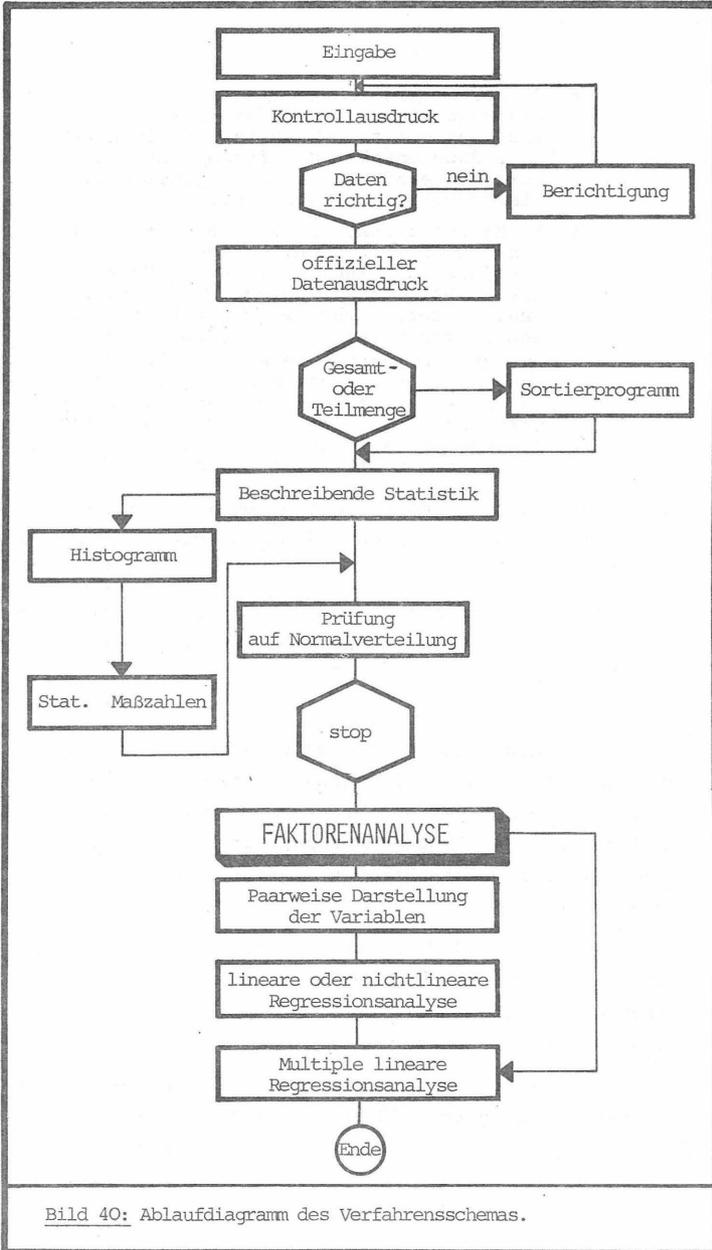


Bild 40: Ablaufdiagramm des Verfahrensschemas.

- ▶ In der multiplen Regressionsanalyse bestehen die Einflußgrößen ausschließlich aus gemessenen Variablen. Im Gegensatz dazu enthält die faktorenanalytische Regression auch nicht gemessene, einflußnehmende Dimensionen.
- ▶ In Korrelationsanalysen muß stets sehr genau geprüft werden, ob indirekte Einflüsse zu einer berechneten Korrelation beigetragen haben. Die Faktorenanalyse untersucht dagegen auch die Ursachen der Korrelationen, indem über eine integrierte partielle Korrelationsrechnung nur dort Ladungen erzeugt werden, wo diese unabhängig von den anderen - festgehaltenen - Faktoren vorhanden sind. Die Faktorenanalyse schaut also sozusagen hinter die beobachteten Zusammenhänge.

Bei der weiteren Behandlung der Daten wird von den im Faktorenmuster aufgedeckten Zusammenhängen zwischen den Variablen ausgegangen.

Soweit diese bodenmechanisch sinnvoll sind, werden Zusammenhänge zwischen je einer Ziel- und Einflußgröße graphisch dargestellt.

Aus dieser Darstellung kann zumindest qualitativ die Güte und die Art des Zusammenhangs ersehen werden. Anschließend werden zweiseitige Zusammenhänge zwischen den Ziel- und Einflußgrößen durch lineare oder nicht-lineare Regressionsfunktionen berechnet und graphisch dargestellt.

Falls die Varianz der Zielgröße durch mehrere Einflußgrößen besser reproduziert werden kann, wird mit den verschiedenen Einflußgrößen eine multiple lineare Regressionsanalyse durchgeführt.

Sowohl die Variablen als auch die Fälle mit denen eine Faktorenanalyse durchgeführt werden soll, werden aus dem Kontingent aller Daten durch Sortierprogramme ausgesucht.

## 6. AUSWERTUNG DER BODENMECHANISCHEN GRUNDKENNWERTE

### 6.1 Beschreibung der Stichproben aus den Teilgesamtheiten des gesamten Verbreitungsraumes

#### 6.1.1 "Fetter Ton"

Die bodenmechanischen Grundkennwerte des "fetten Tons" (PE 1) werden statistisch durch die Häufigkeitsverteilungen und Maßzahlen (Bild 41 bis 43) beschrieben.

Beim "fetten Ton" handelt es sich nicht nur wegen der "bestimmenden Eigenschaften" (DIN 4022) um einen Ton, sondern vor allem wegen der Massenanteile der Tonfraktion ( $<0,002$  mm). Diese Korngröße herrscht mit einem Mittelwert von 54,4 % deutlich vor. Der Sandanteil ist mit einem Mittelwert von 6,6 % sehr gering.

Zwar ist die Spannweite R sowohl beim Tonanteil (17 - 83 %) als auch beim Schluffgehalt (14 - 65 %) sehr groß, doch sind diese Extremwerte als Ausreißer zu deuten, wie der Variationskoeffizient mit 23 bzw. 27 % und die Darstellung der Versuchsergebnisse im Dreiecksdiagramm (Bild 33) erkennen läßt.

Mit einer mittleren Konsistenzzahl von  $I_C = 0,90$  weist der "fette Ton" eine steife Konsistenz auf, die bereits nahe der Grenze zur halbfesten Konsistenz liegt.

Beim natürlichen Wassergehalt mit einem Mittelwert von  $w = 0,331$  fällt die geringe Standardabweichung ( $s = 0,051$ ) bzw. der geringe Variationskoeffizient ( $v = 15,4$  %) auf. Sie zeigen, daß hier nur relativ geringe Abweichungen vom Mittelwert zu erwarten sind.

Sowohl der Mittelwert für die Fließgrenze  $w_L = 0,786$  als auch für die Plastizitätszahl  $I_P = 0,505$  weisen den Boden als Ton mit ausgeprägter Plastizität (TA) aus. Mit einer mittleren Aktivitätszahl  $I_A = 0,921$  ist der Ton als normal aktiv einzustufen. Der relativ hohe Montmorillonitanteil (Abschnitt 2.3) wird in der

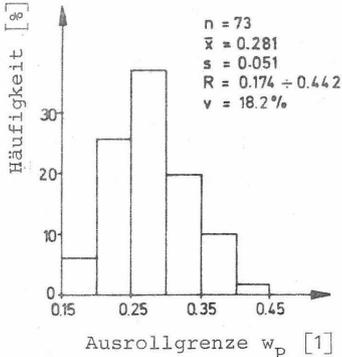
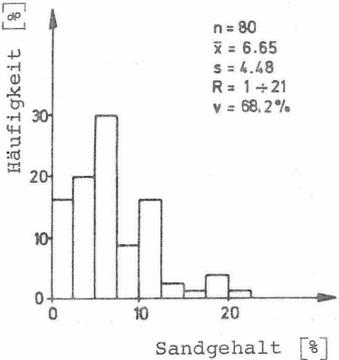
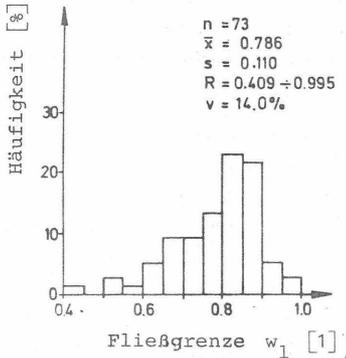
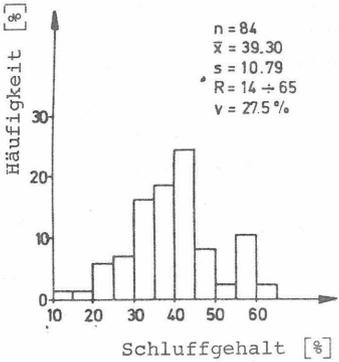
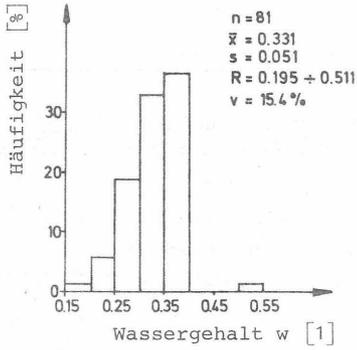
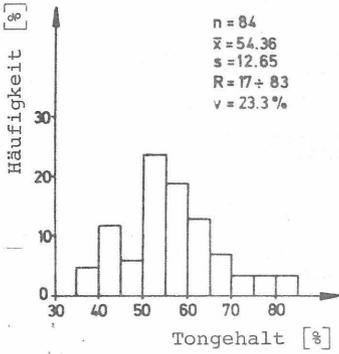


Bild 41: Häufigkeitsverteilungen für die bodenmechanischen Grundkennwerte der petrographischen Einheit "fetter Ton".

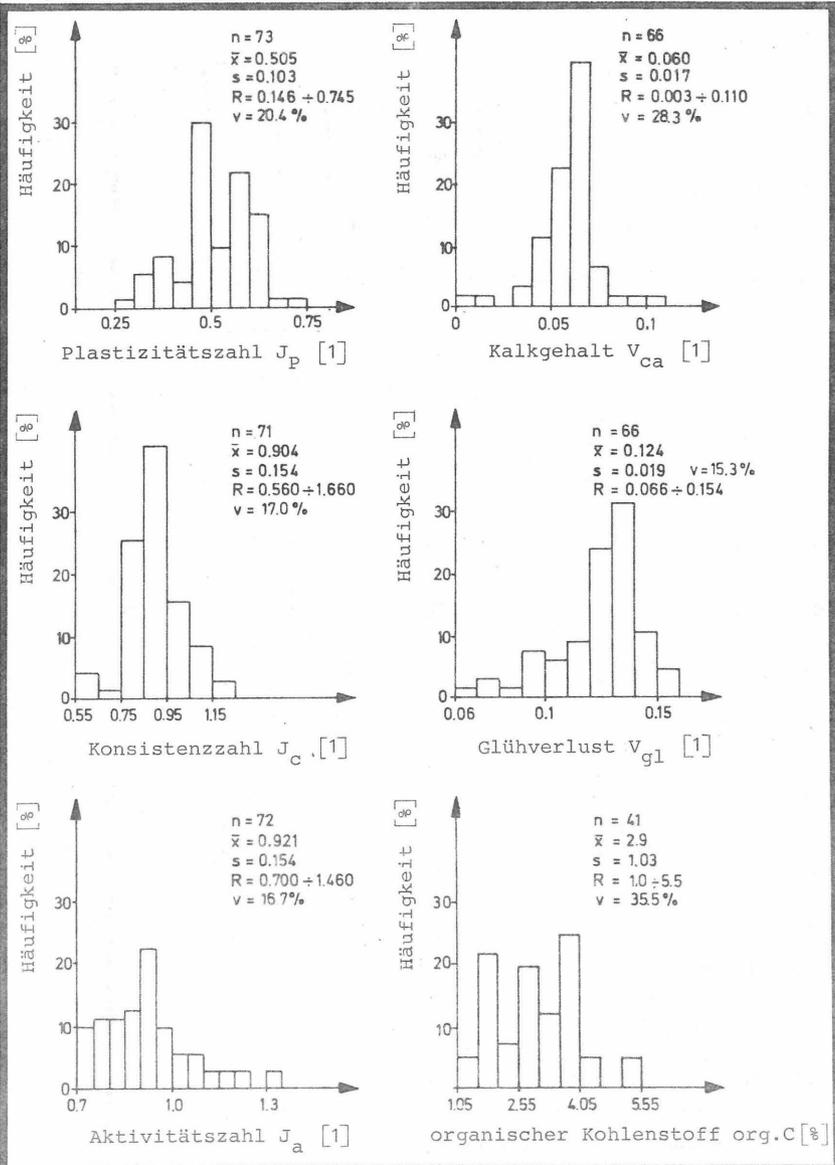


Bild 42: Häufigkeitsverteilungen für die bodenmechanischen Grundkennwerte der petrographischen Einheit "fetter Ton".

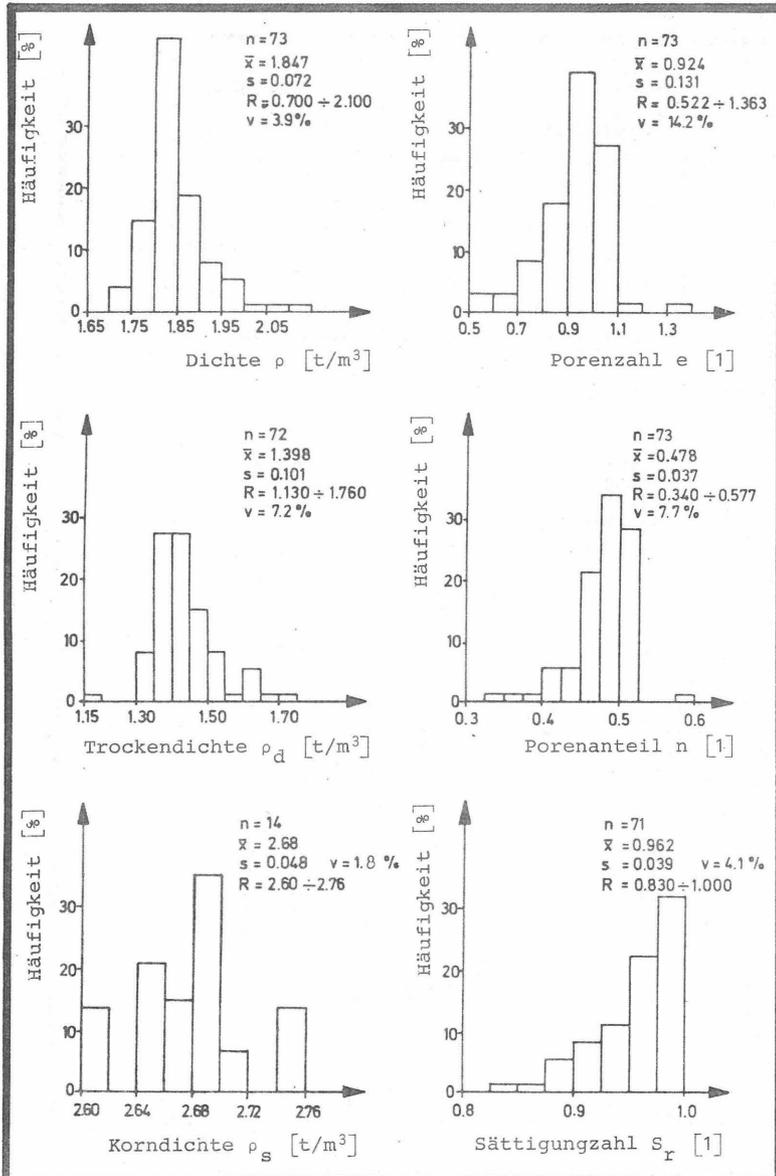


Bild 43: Häufigkeitsverteilungen für die bodenmechanischen Grundkennwerte der petrographischen Einheit "fetter Ton".

Aktivitätszahl durch den ebenfalls vorhandenen Kaolinitanteil kompensiert.

Die statistische Auswertung der Dichte des feuchten Bodens und deren Folgewerte zeigt auffallenderweise sehr geringe Variationskoeffizienten. Der Mittelwert der Dichte der feuchten Probe  $\rho = 1,847 \text{ t/m}^3$  ergab nur einen Variationskoeffizienten von 3,9 %.

Der "fette Ton" ist nach den Stichprobenergebnissen nahezu wassergesättigt, wie der Mittelwert der Sättigungszahl  $S_r = 0,962$  mit dem geringen Variationskoeffizienten  $v = 4,1\%$  erkennen läßt.

Der Mittelwert für die Kornrohichte beträgt  $\rho_s = 2,68 \text{ t/m}^3$ . Der Ton weist mit einem Mittelwert von  $V_{gl} = 0,124$  einen relativ hohen Glühverlust auf, aufgrund dessen er nach DIN 1 054, Abschnitt 2.1.1.3 als organischer Boden ( $V_{gl} > 0,05$  bei bindigen Böden) einzustufen ist.

Angesichts der überwiegend dunkelgrauen bis schwarzen Farben der "Lauenburger Serie" überraschen die relativ hohen Werte des Glühverlustes nicht.

Die Eintragung der Wertepaare Fließgrenze und Plastizitätszahl in die Plastizitätskarte (Bild 34) ermöglicht auch eine Gruppierung in organische und anorganische Tone. Trotz der organischen Anteile des "fetten Tons" liegt die überwiegende Anzahl der Versuchsergebnisse oberhalb der A-Linie im Bereich der anorganischen Tone TA.

Auf die begrenzte Aussagefähigkeit des Glühverlustes bei bindigen Böden ist im Abschnitt 3.26 bereits hingewiesen worden.

Der Anteil an organischem Material ist gesondert bestimmt worden (s. Abschnitt 3.26), sein Mittelwert beträgt  $org. C = 0,029$  (2,9 %). Das organische Material stammt wahrscheinlich aus älteren Bodenhorizonten (z. B. Tertiär), die durch die Gletscher aufgearbeitet worden.

Mit einem mittleren Kalkgehalt von  $V_{Ca} = 0,06$  ist der Ton als kalkreich einzustufen.

#### 6.1.2 "Sandiger Ton"

Die Häufigkeitsverteilungen und statistischen Maßzahlen des "sandigen Tons" sind in den Bildern 44 bis 46 dargestellt.

Gegenüber dem "fetten Ton" ist beim "sandigen Ton" (PE 3) nicht der Massenanteil der Tonfraktion, sondern der der Schluffraktion vorherrschend. Der Mittelwert der Tonfraktion beträgt 27,9 %. Der hohe Sandanteil (Mittelwert = 19,0 %) dieses Bodens rechtfertigt die Klassifizierung in eine eigene Teilgesamtheit.

Von der Verteilung der Massenanteile der Kornfraktionen ist der Boden als stark toniger, sandiger Schluff einzuordnen.

Nach den Ergebnissen der Plastizitätsparameter, die wegen des höheren Sandgehaltes geringere Werte aufweisen als der "fette Ton", handelt es sich um einen Ton mittlerer Plastizität (TM), mit einem Mittelwert der Fließgrenze von  $w_L = 0,471$  und der Plastizitätszahl  $I_p = 0,268$ .

Trotz des gegenüber dem "fetten Ton" etwas geringeren Wassergehaltes (Mittelwert  $w = 0,266$ ) hat der sandige Ton eine geringere Konsistenzzahl ( $I_C = 0,839$ ), die aber ebenfalls steife Konsistenz ausweist.

Die Dichte des "sandigen Tons" wie auch die Trockendichte ist größer als beim "fetten Ton" (Mittelwerte  $\rho = 1,939 \text{ t/m}^3$ ,  $\rho_d = 1,535 \text{ t/m}^3$ ). Dementsprechend geringer ist die Porenzahl ( $e = 0,738$ ) bzw. der Porenanteil ( $n = 0,422$ ).

Wie beim "fetten Ton" hat die Dichte einen bemerkenswert geringen Variationskoeffizienten ( $v = 4,4 \%$ , Bild 46).

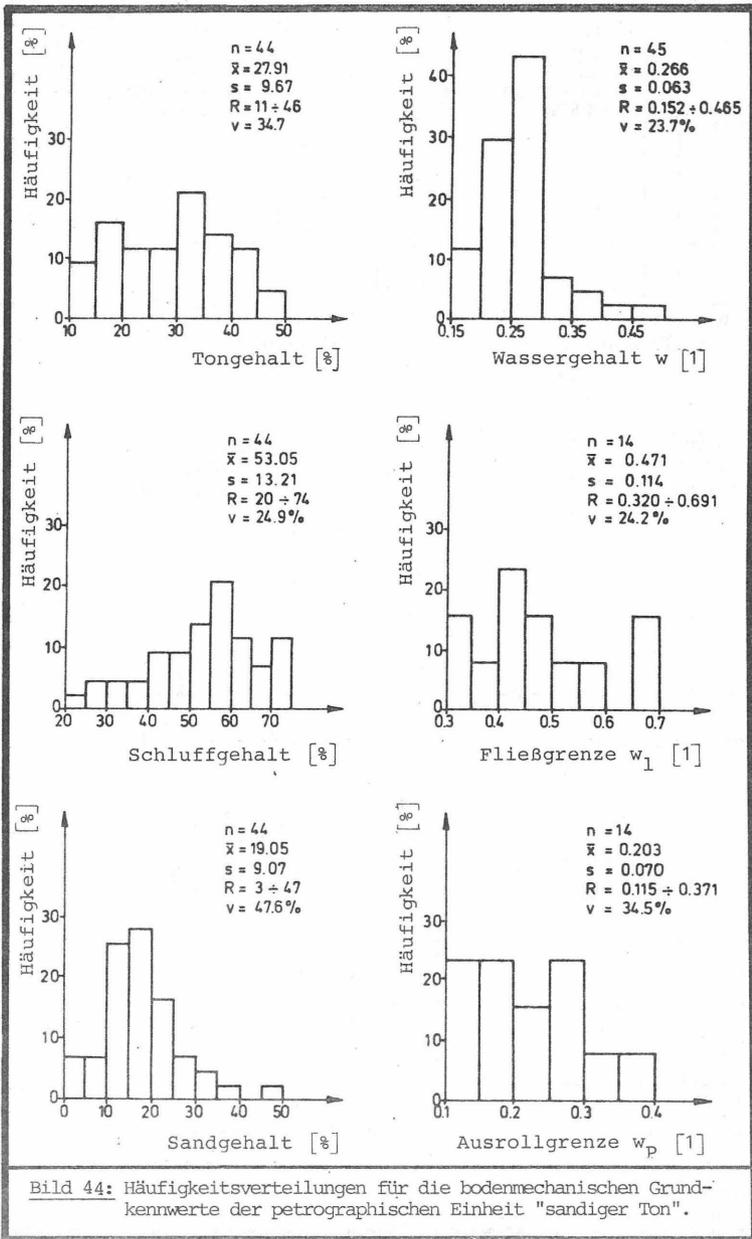


Bild 44: Häufigkeitsverteilungen für die bodenmechanischen Grundkennwerte der petrographischen Einheit "sandiger Ton".

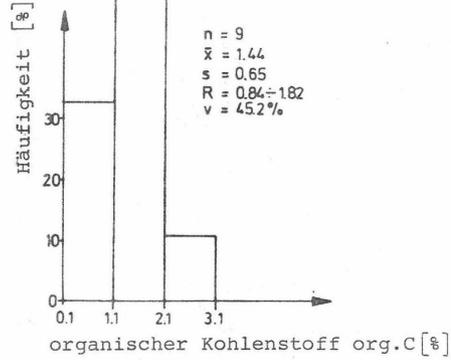
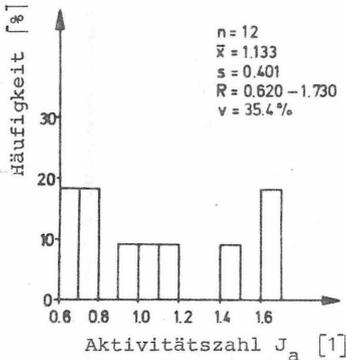
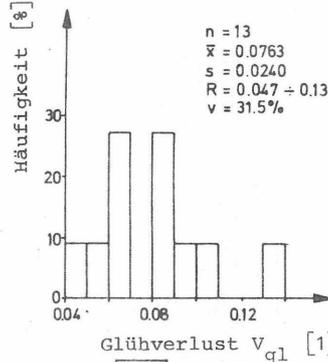
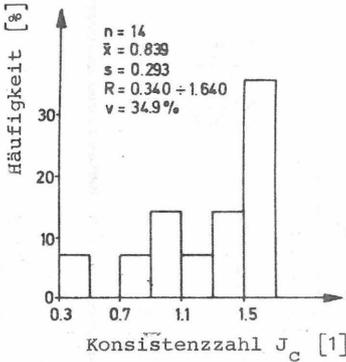
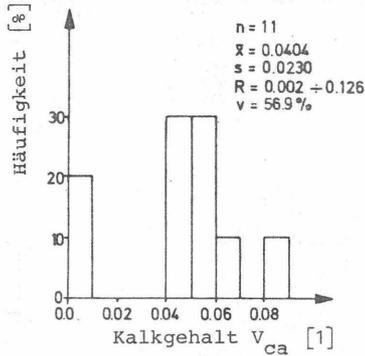
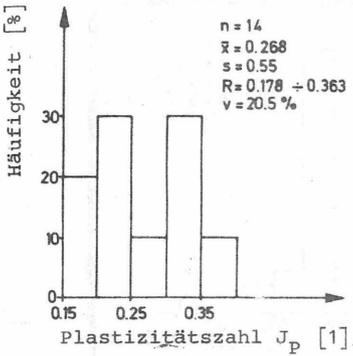


Bild 45: Häufigkeitsverteilungen für die bodenmechanischen Grundkennwerte der petrographischen Einheit "sandiger Ton".

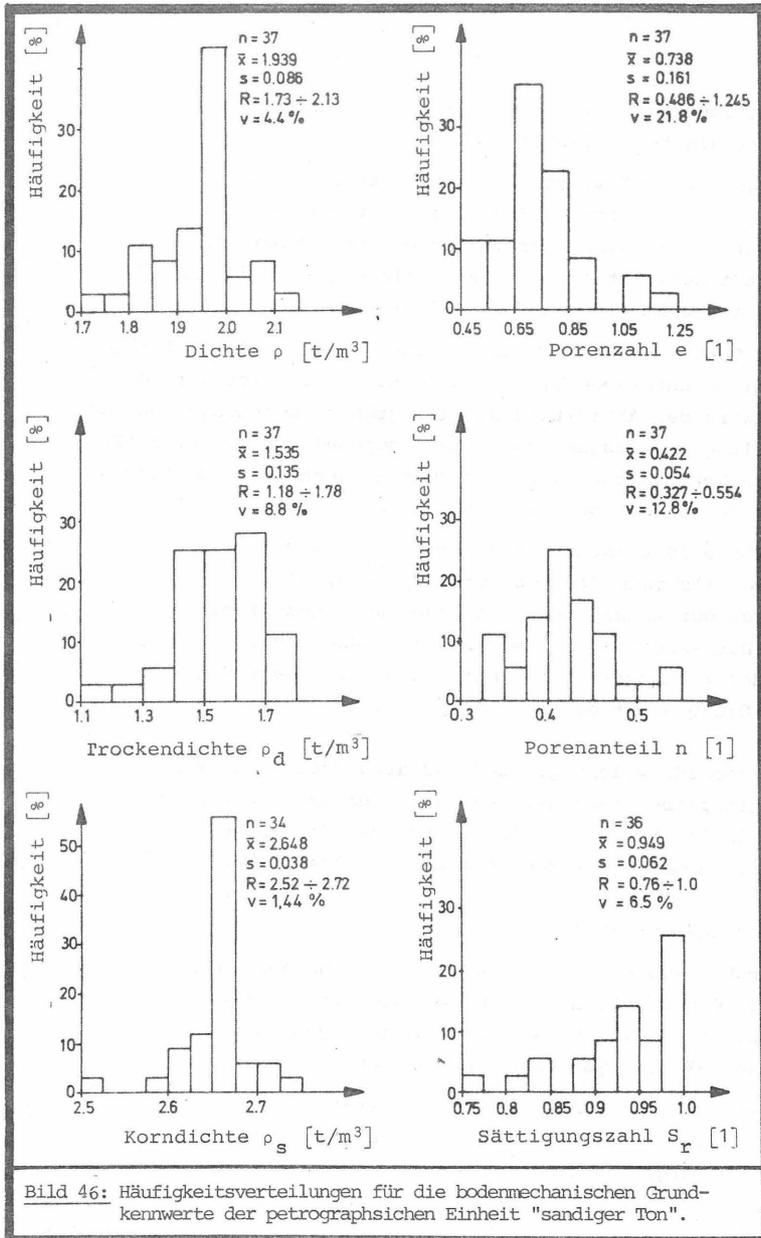


Bild 46: Häufigkeitsverteilungen für die bodenmechanischen Grundkennwerte der petrographischen Einheit "sandiger Ton".

Der Sättigungsgrad ( $S_r = 0,949$ ) ist nur unwesentlich geringer als beim "fetten Ton".

Der "sandige Ton" weist eine Aktivitätszahl von  $I_A = 1,13$  auf, aufgrund der er als aktiver Ton eingeordnet werden kann. Der Variationskoeffizient der Aktivitätszahl ist mit  $v = 38 \%$  allerdings wesentlich größer als beim "fetten Ton" ( $17 \%$ ).

Da der Tonmineralbestand sich nicht von den anderen Teilgesamtheiten unterscheidet (s. Abschnitt 2.3), ist der höhere Mittelwert der Aktivitätszahl auf größere Streuungen bei der Ermittlung der Ausgangsparameter Tongehalt und Plastizitätszahl zurückzuführen. Diese Kennwerte haben beide deutlich höhere Variationskoeffizienten als beim "fetten Ton".

Der Glühverlust ist im Mittel mit  $V_{gl} = 0,076$  geringer als beim "fetten Ton" ( $V_{gl} = 0,124$ ), wie auch der Anteil an organischem Kohlenstoff mit einem Mittelwert  $org. C = 0,014$  gegenüber  $org. C = 0,029$ . Auch der Kalkgehalt liegt mit einem Mittelwert von  $V_{ca} = 0,040$  unter dem des "fetten Tons".

Die Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der Stichprobe "sandiger Ton" sind ausnahmslos größer als beim "fetten Ton". Sie zeigen, daß der "sandige Ton" ein heterogeneres Sediment als der "fette Ton" ist.

### 6.1.3 "Gebänderter Ton"

Die Proben aus dem "gebänderten Ton" sind ausnahmslos aus dem Hauptsediment dieser Einheit entnommen worden. Die darin enthaltenen dünnen Lagen, die sogenannten "Bänder" wurden nicht beprobt.

Aus den Häufigkeitsdiagrammen und statistischen Maßzahlen (Bild 47 bis 49) läßt sich der "gebänderte Ton" wie folgt beschreiben.

Vom Massenanteil her herrscht bei diesem Sediment der

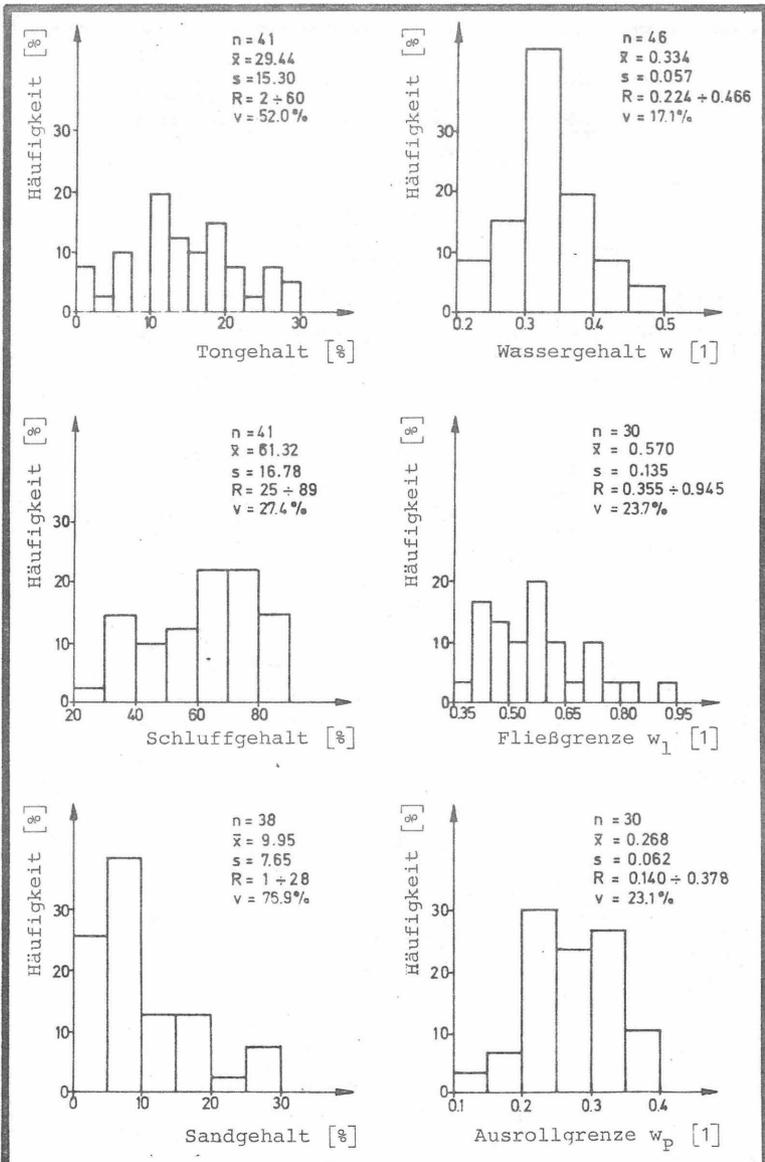


Bild 47: Häufigkeitsverteilungen für die bodenmechanischen Grundkennwerte der petrographischen Einheit "gebänderter Ton".

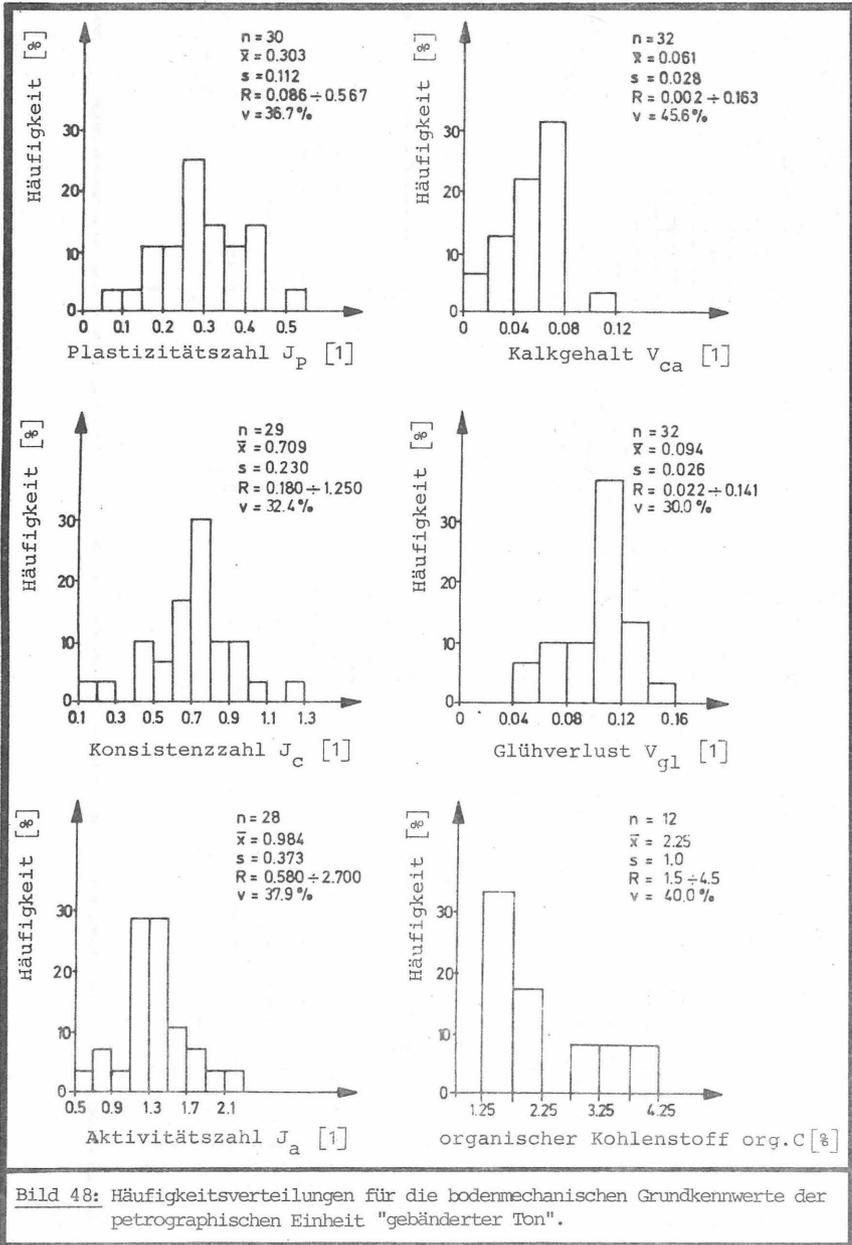


Bild 48: Häufigkeitsverteilungen für die bodenmechanischen Grundkennwerte der petrographischen Einheit "gebänderter Ton".

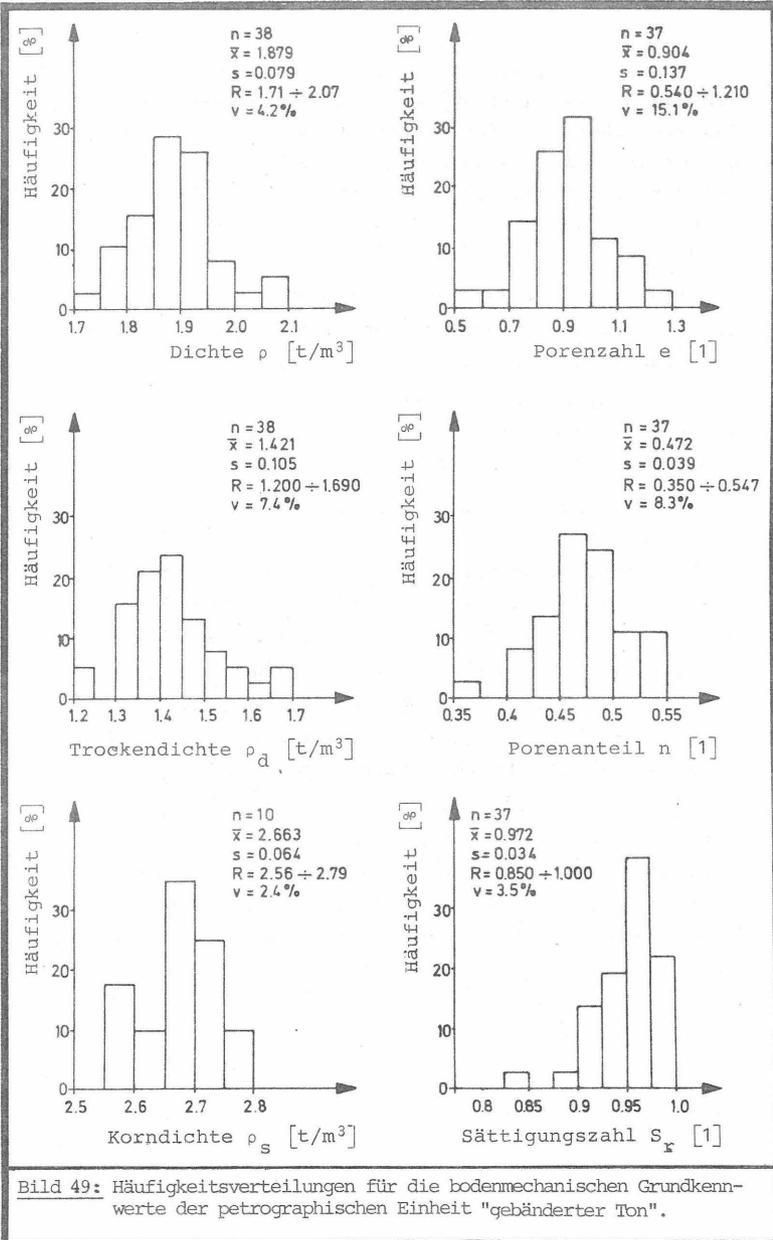


Bild 49: Häufigkeitsverteilungen für die bodenmechanischen Grundkennwerte der petrographischen Einheit "gebänderter Ton".

Schluff mit einem Mittelwert von 61,3 % deutlich vor. Der Mittelwert des Tonanteils ist mit 29,4 % etwas größer als beim "sandigen Ton", der Sandanteil mit einem Mittelwert von 9,9 % aber geringer als bei diesem (19 %), jedoch um 3,3 % höher als beim "fetten Ton".

Die Plastizitätskennwerte ( $w_L = 0,570$ ;  $w_P = 0,268$ ;  $I_P = 0,303$ ) weisen das Sediment als Ton mit ausgeprägter Plastizität (TA) aus.

Der gebänderte Ton hat einen mittleren Wassergehalt von  $w = 0,334$  der fast identisch ist mit dem des "fetten Tons" ( $w = 0,331$ ).

Da die Mittelwerte sowohl der Plastizitätszahl als auch der Fließgrenze geringer sind als beim "fetten Ton", weist die Konsistenzzahl des gebänderten Tons mit  $I_C = 0,709$  eine weiche Konsistenz aus, die allerdings nahe der Grenze zur steifen Konsistenz liegt.

Die Mittelwerte der Dichte ( $\rho = 1,879 \text{ t/m}^3$ ), Trockendichte ( $\rho_d = 1,421 \text{ t/m}^3$ ) und Sättigungsgrad ( $S_r = 0,972$ ) sind etwas größer als die des "fetten Tons" aber geringer als die des "sandigen Tons".

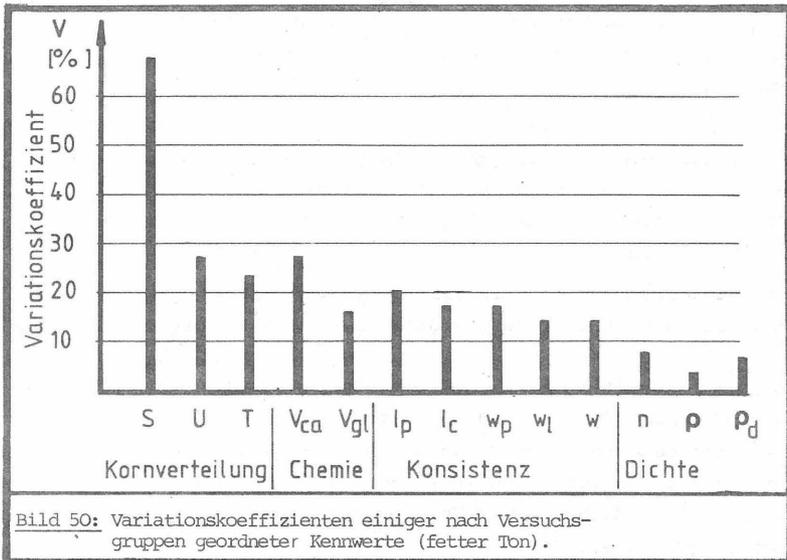
Dem Mittelwert der Aktivitätszahl ( $I_A = 0,984$ ) nach gehört der gebänderte Ton zu den normalaktiven Tonen. Der Kalkgehalt ist im Mittel fast genauso hoch wie beim "fetten Ton" ( $V_{ca} = 0,061$ ). Der Glühverlust liegt im Mittel ( $V_{gl} = 0,094$ ) unter dem des "fetten Tons" ( $V_{gl} = 0,124$ ), aber über dem des "sandigen Tons" ( $V_{gl} = 0,076$ ). Der Mittelwert des organischen Kohlenstoffs beträgt  $\text{org. C} = 2,25 \%$ .

#### 6.1.4 Bewertung der aufgetretenen Streuungen

Streuungen, ausgedrückt durch den Variationskoeffizienten, können nach ihrer Art in folgender Weise unterschieden werden:

1. stoffbedingte Streuungen (primäre Streuungen)
2. versuchsbedingte Streuungen (sekundäre Streuungen).

Die primären, also stoffbedingte Streuungen sind beim Boden größer als bei jedem anderen Werkstoff der Bautechnik. Beide Streuungsarten überlagern sich normalerweise. Der Anteil der sekundären, versuchsbedingten Streuung hängt von dem jeweiligen Versuch ab, mit dem der Kennwert bestimmt worden ist. Das wird am Beispiel verschiedener bodenmechanischer Kennwerte für die Bodeneinheit "fetter Ton" deutlich (Bild 50).



Überdurchschnittlich hohe Variationskoeffizienten haben die Massenanteile der Korngrößengruppen Sand, Schluff und Ton. Hier macht sich ein starker Einfluß der versuchsbedingten Streuung bemerkbar. Die Schlämmanalyse, mit der diese Werte mittelbar, nämlich über die Dichte der Suspension bestimmt werden, ist ein fehleranfälliger Versuch der Bodenmechanik.

Der als Ausreißer nach oben erscheinende Variationskoeffizient des Sandgehaltes ist ebenfalls erklärbar. Die Korngröße "Sand" hat sich im Schlämmzylinder bereits vor der ersten Dichteablesung abgesetzt. Diese erste Ablesung ist die schwierigste und fehlerbehaftetste des Versuches. Zudem ist der Sandanteil bei der Bodeneinheit "fetter Ton" nur in geringen Prozentsätzen vertreten (Mittelwert 6,6 %). Bereits kleine Abweichungen der Einzelmeßwerte gegenüber dem arithmetischen Mittelwert ergeben prozentual große Streuungen.

Auch beim Kalkgehalt dürfte die versuchsbedingte Streuung wesentlich sein, da es sich auch hier um einen fehleranfälligen Versuch handelt (sehr kleine Probemengen).

Bei den Kennwerten für den Glühverlust und die Konsistenz können die Anteile der stoffbedingten und der versuchsbedingten Streuung nicht erkannt werden. Die Variationskoeffizienten liegen mit 15 bis 20 % in der Größenordnung vergleichbarer Untersuchungen.

Eine Ausnahmestellung, die in allen durchgeführten Untersuchungen bestätigt wurde, nimmt die Dichte  $\rho$  ein.

Der Variationskoeffizient liegt mit 4,2 % weit unter den Variationskoeffizienten der anderen Kennwerte. Das ist umso bemerkenswerter, da der Dichtebestimmung kein einheitliches Verfahren zugrunde lag. Es wurden unterschiedliche Methoden wie Tauchwägung und Ausstechverfahren angewendet.

Die mit der Dichte zusammenhängenden Kennwerte wie Trockendichte  $\rho_d$ , Porenzahl  $e$  und Porenanteil  $n$  hatten ebenfalls unterdurchschnittliche Variationskoeffizienten.

## 6.2 Vergleich der Stichproben aus Teilgebieten

### 6.2.1 "Fetter Ton"

Es werden die statistischen Kennzahlen der Stichproben aus den Teilgebieten Raum Hamburg, westlicher

Verbreitungsraum, Raum Oldenburg und innerhalb des Raums Oldenburg der Bereich der 2. Schleuse Oldenburg verglichen (Bild 35). Die Ergebnisse sind im Bild 51 zusammengefasst.

Der Vergleich zeigt eine weitgehende Übereinstimmung der Mittelwerte aus den Teilgebieten westlicher Verbreitungsraum, Raum Oldenburg und 2. Schleuse Oldenburg. Diese Mittelwerte weichen nur geringfügig von den Mittelwerten des gesamten Verbreitungsgebietes ab.

Die Standardabweichungen und die Variationskoeffizienten zeigen eine eindeutige Tendenz. Sie werden mit abnehmender Größe des betrachteten Gebietes geringer, d. h. für die Stichprobe aus dem gesamten Verbreitungsraum sind diese Kennwerte am größten, für die Proben aus dem Bereich der 2. Schleuse Oldenburg am kleinsten.

Aus dieser Systematik fällt die Stichprobe aus dem Raum Hamburg heraus. Zu berücksichtigen ist dabei allerdings die insgesamt recht geringe Anzahl an Bodenproben aus diesem Raum.

Der Tonanteil dieser Stichprobe ist deutlich geringer (Mittelwert  $T = 44,3 \%$ ) als der Mittelwert für die Stichprobe aus dem gesamten Verbreitungsraum ( $T = 54,4 \%$ ) bzw. als die Mittelwerte der Stichproben aus den anderen Teilräumen. Dafür ist der Sandanteil mit  $S = 10,7 \%$  im Raum Hamburg größer als im gesamten Verbreitungsraum ( $S = 6,6 \%$ ) und den Vergleichsgebieten.

Die von den Vergleichsgebieten abweichende Korngrößenverteilung hat geologische Ursachen. Im Raum Hamburg ist die "Lauenburger Serie" im Gegensatz zu den übrigen betrachteten Gebieten mehrfach von Gletschern überfahren worden. Die Sedimente sind dadurch z. T. umgelagert worden und mit anderen Bodenarten, z. B.

KLASSIFIZIERUNG	STATISTISCHE MASSZAHLEN	KORNVERTEILUNG				PLASTIZITÄT UND KONSISTENZ					DICHTE					CHEMISUS		
		T	U	S	d <sub>50</sub>	w	w <sub>L</sub>	w <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>c</sub>	ρ	ρ <sub>D</sub>	e	n	S <sub>R</sub>	I <sub>A</sub>	V <sub>Ca</sub>	V <sub>Gi</sub>
		%	%	%	mm	—	—	—	—	—	t/m <sup>3</sup>	t/m <sup>3</sup>	—	—	—	—	—	—
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)		
RAUM HAMBURG	$\bar{x}$	44.3	45.7	10.7	0.005	0.314	0.738	0.301	0.443	1.02	1.888	1.445	0.865	0.483	0.981	0.979	0.065	0.111
	s	13.3	10.7	5.9	0.008	0.055	0.199	0.072	0.152	0.285	0.091	0.128	0.165	0.049	0.038	0.198	0.022	0.022
	v	30.1	23.5	55.8	180.0	17.5	27.0	23.9	34.3	27.9	4.8	8.8	19.1	10.8	4.1	20.0	34.5	20.2
	n	16	16	16	16	16	9	9	9	9	15	15	15	15	15	8	10	9
WESTLICHER VERBREITUNGS - RAUM	$\bar{x}$	57.2	37.4	5.8	-	0.335	0.795	0.278	0.516	0.888	1.836	1.373	0.939	0.482	0.962	0.905	0.059	0.126
	s	10.7	9.8	3.5	-	0.049	0.090	0.068	0.092	0.120	0.063	0.088	0.119	0.033	0.039	0.132	0.016	0.018
	v	18.7	28.3	81.8	-	14.8	11.3	17.3	17.8	13.5	3.4	6.4	12.7	6.8	4.1	14.8	28.7	14.6
	n	87	87	67	-	84	63	63	63	63	57	58	57	57	55	63	55	56
RAUM OLDENBURG	$\bar{x}$	59.2	35.7	5.4	-	0.343	0.813	0.280	0.534	0.878	1.831	1.364	0.945	0.484	0.963	0.910	0.061	0.131
	s	10.4	9.2	3.3	-	0.041	0.071	0.064	0.083	0.111	0.050	0.070	0.109	0.028	0.040	0.137	0.012	0.014
	v	17.5	25.9	80.1	-	11.9	8.7	15.7	15.5	12.6	2.7	3.8	11.5	5.8	4.2	15.1	20.4	10.4
	n	49	49	49	-	48	48	48	48	48	44	44	44	44	44	48	43	45
RAUM 2. SCHLEUSE OLDENBURG	$\bar{x}$	55.8	38.2	6.0	-	0.345	0.758	0.288	0.471	0.878	1.819	1.358	0.908	0.475	0.967	0.846	0.054	0.132
	s	5.3	5.0	2.0	-	0.031	0.043	0.023	0.037	0.062	0.038	0.058	0.079	0.023	0.029	0.062	0.008	0.012
	v	9.5	13.2	32.6	-	9.0	5.7	8.0	7.9	7.1	2.0	4.1	8.7	4.8	3.0	7.3	11.5	9.2
	n	13	13	13	-	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	9	9

Bild 51: Statistische Maßzahlen für den Vergleich von Stichproben aus Teilgebieten ("fetter Ton").

Sandlagen vermischt und verschuppt worden.

Die mehrfache Belastung der "Lauenburger Serie" durch die Gletscher zeigt sich auch in den Dichtewerten. Die Stichprobe aus dem Raum Hamburg weist, verglichen mit den übrigen Gebieten, den höchsten Mittelwert der Dichte auf. Entsprechend sind die Mittelwerte für die Porenzahl, den Porenanteil, die Trockendichte und den Wassergehalt für den Hamburger Raum am geringsten.

Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der Stichprobe aus dem Hamburger Raum sind bei nahezu allen Variablen größer als die der Vergleichsproben und der Stichprobe aus dem gesamten Verbreitungsraumes.

Auch hierbei deutet sich die durch die mehrfache glaziale Beanspruchung bedingte Sonderstellung des "Lauenburger Tons im engeren Sinne" aus dem Raum Hamburg an. Das Sediment ist weniger einheitlich und weist deshalb größere Streuungen der Variablen auf als der "fette Ton" aus den übrigen betrachteten Gebieten.

#### 6.2.2 "Sandiger Ton"

Für die Stichproben aus den Teilgebieten Hamburg, westlicher Verbreitungsraum und Raum Oldenburg sind die statistischen Kennzahlen ermittelt worden. Im Gegensatz zur petrographischen Einheit "fetter Ton", wurde der Raum 2. Schleuse Oldenburg nicht berücksichtigt, da daraus zu wenig Proben des "sandigen Tons" vorlagen.

Die Kennwerte der Stichproben aus dem Raum Hamburg und dem westlichen Verbreitungsraum unterscheiden sich nur wenig voneinander (Bild 52). Sie unterscheiden sich außerdem kaum von denen der Stichprobe des gesamten Verbreitungsraumes.

Die Stichprobe aus dem Raum Oldenburg unterscheidet sich von denen der übrigen Teilgebiete und der des

KLASSIFIZIERUNG	STATISTISCHE MASSZAHLEN	KORNVERTEILUNG				PLASTIZITÄT UND KONSISTENZ					DICHTE					CHEMISMS		
		T	U	S	d <sub>50</sub>	w	w <sub>L</sub>	w <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>	I <sub>c</sub>	ρ	ρ <sub>0</sub>	e	n	S <sub>R</sub>	I <sub>A</sub>	V <sub>Co</sub>	V <sub>Cl</sub>
		%	%	%	mm	—	—	—	—	—	t/m <sup>3</sup>	t/m <sup>3</sup>	—	—	—	—	—	—
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	
RAUM HAMBURG	$\bar{x}$	29.3	50.5	20.1	0.008	0.287	0.440	0.155	0.265	0.707	1.943	1.550	0.740	0.422	0.946	—	0.037	0.065
	s	7.2	12.0	10.8	0.004	0.080	0.044	0.013	0.031	0.158	0.108	0.167	0.211	0.065	0.049	—	0.017	0.001
	v	24.5	23.7	53.6	50.0	31.1	10.0	8.4	10.9	22.1	5.6	10.8	28.5	15.4	5.2	—	48.2	1.1
	n	15	15	15	15	16	13	13	13	3	14	14	14	14	14	—	3	2
WESTLICHER VERBEREITUNGS- RAUM	$\bar{x}$	28.5	52.6	18.8	0.012	0.274	0.495	0.220	0.275	0.893	1.935	1.522	0.740	0.423	0.952	1.138	0.033	0.076
	s	10.8	13.6	8.4	0.010	0.054	0.137	0.082	0.062	0.342	0.075	0.119	0.133	0.049	0.073	0.436	0.022	0.030
	v	37.2	25.7	44.7	83.3	19.7	27.7	37.3	22.6	38.3	3.9	7.8	18.0	11.6	7.7	38.3	66.7	39.4
	n	26	26	26	26	26	9	9	9	9	21	21	21	21	21	9	6	6
RAUM OLDENBURG	$\bar{x}$	38.3	36.3	25.5	—	0.284	0.545	0.233	0.312	0.830	1.930	1.523	0.693	0.410	0.950	0.883	—	—
	s	11.1	16.4	6.8	—	0.054	0.082	0.049	0.037	0.134	0.053	0.108	0.076	0.026	0.011	0.317	—	—
	v	29.1	45.4	28.7	—	19.0	15.1	20.6	11.9	16.1	2.8	7.1	14.0	6.3	1.2	35.9	—	—
	n	4	4	4	—	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	—	—

Bild 52: Statistische Maßzahlen für den Vergleich von Stichproben auf Teilgebieten ("sandiger Ton").

gesamten Verbreitungsraumes. Sie weist einen höheren Tonanteil, Sandanteil, Wassergehalt und eine höhere Fließgrenze sowie geringeren Schluffgehalt und geringere Dichte auf als die übrigen Stichproben.

Die beim "fetten Ton" mit abnehmender Größe der Teilgebiete feststellbare Tendenz abnehmender Standardabweichungen und Variationskoeffizienten kann beim "sandigen Ton" nicht beobachtet werden. Die Stichproben aus den Teilgebieten zeigen beim "sandigen Ton" insgesamt höhere Werte für die Standardabweichung und den Variationskoeffizienten als beim "fetten Ton", ein weiterer Hinweis für die bereits erwähnte größere Heterogenität dieser Einheit.

### 6.3 Vertrauensbereiche

#### 6.3.1 "Fetter Ton"

Die Vertrauensbereiche der Mittelwerte sind nach Gleichung 13 mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha = 5\%$  berechnet worden. Im Bild 53 sind die berechneten Vertrauensbereiche neben den Mittelwerten und die daraus resultierenden unteren und oberen Grenzen der Vertrauensbereiche zusammengestellt. Unterschieden wurden neben dem gesamten Verbreitungsraum die Teilgebiete westlicher Verbreitungsraum, Raum Oldenburg und 2. Schleuse Oldenburg. Auf die Berechnung der Vertrauensbereiche für die Stichprobe aus dem Raum Hamburg wurde wegen der beschriebenen Schwierigkeiten (s. Abschnitt 6.2.1) verzichtet.

Die Vertrauensintervalle sind im allgemeinen relativ eng. Ihre Größe ändert sich nur geringfügig mit der abnehmenden Größe des betrachteten Gebietes und der abnehmenden Probenanzahl (maximal 84, minimal 13). Der Grund hierfür sind die mit abnehmender Größe des betrachteten Gebietes kleiner werdenden Streuungen bzw.

Bodenmech. Kennwert	Einheit	Gesamter Verbreitungsraum			westl. Verbreitungsraum			Raum Oldenburg			2. Schleuse Oldenburg		
		Vertrauensintervall	untere Grenze	obere Grenze	Vertrauensintervall	untere Grenze	obere Grenze	Vertrauensintervall	untere Grenze	obere Grenze	Vertrauensintervall	untere Grenze	obere Grenze
T	%	54,4 ±2,8	51,6	57,1	57,2 ±2,6	54,6	59,8	59,2 ±3,0	56,2	62,2	55,8 ±3,2	52,6	59,0
U	%	39,3 ±2,3	37,0	41,6	37,4 ±2,4	35,0	39,8	35,7 ±2,6	33,1	38,3	38,2 ±3,0	35,2	41,2
S	%	6,6 ±1,0	5,6	7,6	5,6 ±0,8	4,8	6,4	5,4 ±0,9	4,5	6,3	6,0 ±1,2	4,8	7,2
w	1	0,331±0,012	0,319	0,342	0,335±0,012	0,323	0,347	0,343±0,012	0,331	0,355	0,345±0,019	0,326	0,364
w <sub>L</sub>	1	0,786±0,026	0,760	0,811	0,795±0,023	0,772	0,818	0,813±0,021	0,792	0,834	0,758±0,026	0,732	0,784
w <sub>P</sub>	1	0,281±0,012	0,269	0,293	0,278±0,012	0,266	0,290	0,280±0,013	0,267	0,293	0,288±0,014	0,274	0,302
I <sub>P</sub>	1	0,505±0,025	0,480	0,529	0,516±0,024	0,492	0,539	0,534±0,024	0,510	0,558	0,471±0,023	0,448	0,494
I <sub>C</sub>	1	0,905±0,037	0,868	0,941	0,879±0,041	0,838	0,918	0,879±0,032	0,847	0,911	0,878±0,037	0,841	0,915
S <sub>r</sub>	1	0,962±0,010	0,952	0,971	0,962±0,010	0,952	0,972	0,963±0,012	0,951	0,975	0,967±0,018	0,949	0,985
ρ	t/m <sup>3</sup>	1,847±0,017	1,830	1,864	1,835±0,017	1,818	1,852	1,831±0,015	1,816	1,846	1,819±0,022	1,797	1,841
ρ <sub>d</sub>	t/m <sup>3</sup>	1,389±0,024	1,365	1,413	1,373±0,024	1,349	1,397	1,364±0,021	1,343	1,385	1,358±0,034	1,324	1,392
n	1	0,479±0,009	0,470	0,487	0,482±0,009	0,473	0,491	0,484±0,009	0,475	0,493	0,475±0,014	0,461	0,489
e	1	0,924±0,031	0,893	0,954	0,939±0,032	0,907	0,971	0,945±0,033	0,912	0,978	0,908±0,048	0,860	0,956
I <sub>A</sub>	1	0,921±0,036	0,885	0,957	0,905±0,033	0,872	0,938	0,910±0,040	0,870	0,950	0,846±0,038	0,808	0,884
V <sub>ca</sub>	1	0,060±0,004	0,056	0,064	0,059±0,004	0,055	0,063	0,061±0,004	0,057	0,065	0,054±0,005	0,049	0,059
V <sub>gl</sub>	1	0,124±0,005	0,119	0,129	0,126±0,005	0,121	0,131	0,131±0,004	0,127	0,135	0,132±0,009	0,123	0,141

Bild 53: Vertrauensbereiche der bodenmechanischen Kennwerte für den fetten Ton

Variationskoeffizienten (Bild 51).

Im Vergleich mit den anderen Gebieten weisen die aus der Stichprobe "2. Schleuse Oldenburg" errechneten Mittelwerte die größten Vertrauensbereiche auf. Absolut gesehen liegen die Erwartungswerte der Grundgesamtheit dennoch in einem engen Toleranzbereich, obwohl diese Werte auf der Grundlage von nur 13 Stichprobenelementen geschätzt worden sind.

Das Ergebnis zeigt die Homogenität der Einheit "fetter Ton". Durch diese Homogenität ist es möglich, schon mit wenigen Stichprobenelementen die Mittelwerte der Grundgesamtheit in engen Vertrauensbereichen abzuschätzen.

Aufgrund dieses Ergebnisses wurde folgende Vergleichsrechnung durchgeführt. Aus dem Bereich "2. Schleuse Oldenburg" wurde eine Bohrung ausgesucht, von der 3 Proben vorlagen. Von diesen 3 Stichprobenelementen sind die Mittelwerte und die Vertrauensbereiche einiger bodenmechanischer Kennwerte berechnet worden (Bild 54).

Die Mittelwerte liegen im Bereich der Mittelwerte aus den größeren Stichproben. Die Vertrauensbereiche sind

Bodenmech. Kennwert	Einheit	Mittelwert	Vertrauensintervall	untere Grenze	obere Grenze
T	%	57,0	± 11,4	45,6	68,4
w	%	0,343	± 0,045	0,298	0,387
w <sub>L</sub>	%	0,780	± 0,12	0,660	0,899
I <sub>P</sub>	%	0,501	± 0,101	0,401	0,602
ρ	t/m <sup>3</sup>	1,82	± 0,05	1,77	1,87

Bild 54: Vertrauensbereiche der Mittelwerte einiger bodenmechanischer Kennwerte auf der Grundlage von 3 Stichprobenelementen.

erwartungsgemäß wesentlich größer als die der größeren Stichprobenumfänge. Es zeigt sich ein deutlicher Sprung

in der Größe der Vertrauensintervalle zu den Werten, die auf der Grundlage von 13 Stichprobenelementen geschätzt wurden (Bereich 2. Schleuse Oldenburg). Das Ergebnis zeigt auch, daß die Berechnung von Vertrauensbereichen aus weniger als 10 - 13 Stichprobenelementen wenig sinnvoll ist.

#### 6.3.2 "Sandiger Ton"

Die Vertrauensbereiche sind für den gesamten Verbreitungsraum, den westlichen Verbreitungsraum und den Raum Hamburg errechnet worden. Der Raum Oldenburg wurde wegen der geringen Probenanzahl nicht betrachtet.

Die Ergebnisse sind in Bild 55 zusammengestellt. Die Vertrauensintervalle sind im allgemeinen größer als beim "fetten Ton". Auch an diesen Ergebnissen zeigt sich damit deutlich die bereits im Abschnitt 6.2.2 beschriebene genetisch bedingte größere Inhomogenität des "sandigen Tons".

Die relativ engsten Vertrauensbereiche ergeben sich bei den Mittelwerten der Stichprobe aus dem gesamten Verbreitungsraum, die relativ größten Intervalle sind für die Mittelwerte aus der Stichprobe aus dem Raum Hamburg berechnet worden. Hier ist bei weniger als 10 Stichprobenelementen nichts über den Vertrauensbereich ausgesagt worden.

#### 6.3.3 "Gebänderter Ton"

Beim "gebänderten Ton" ist nur die Stichprobe aus dem Gebiet "westlicher Verbreitungsraum" betrachtet worden. Aus dem Raum Hamburg und dem Raum Oldenburg lagen keine bzw. zu wenig Proben dieser petrographischen Einheit vor.

Bild 56 zeigt die Ergebnisse der Berechnung. Die Vertrauensbereiche sind größer als beim "fetten Ton".

Bodenmech. Kennwert	Einheit	Gesamter Verbreitungsraum			westl. Verbreitungsraum			Raum Hamburg		
		Vertrauensintervall	obere Grenze	untere Grenze	Vertrauensintervall	obere Grenze	untere Grenze	Vertrauensintervall	obere Grenze	untere Grenze
T	%	27,9 ±3,0	24,9	30,9	28,5 ±3,4	24,2	32,8	29,3 ±4,0	25,3	33,3
U	%	53,1 ±4,0	49,1	57,1	52,6 ±5,5	47,1	58,1	50,5 ±6,6	43,9	57,1
S	%	19,0 ±2,8	16,2	21,8	18,8 ±3,4	15,4	22,2	20,1 ±6,0	14,1	26,1
w	1	0,266±0,019	0,247	0,285	0,274±0,022	0,252	0,296	}Probenanzahl < 10		
w <sub>L</sub>	1	0,471±0,066	0,405	0,537	0,495±0,105	0,390	0,600			
w <sub>P</sub>	1	0,203±0,044	0,162	0,244	0,220±0,063	0,157	0,213			
I <sub>P</sub>	1	0,268±0,032	0,236	0,300	0,275±0,048	0,227	0,323			
I <sub>C</sub>	1	0,84 ±0,17	0,67	1,01	0,89 ±0,26	0,63	1,15			
S <sub>r</sub>	1	0,95 ±0,02	0,93	0,97	0,95 ±0,035	0,92	0,99	0,95 ±0,03	0,92	0,98
ρ	t/m <sup>3</sup>	1,94 ±0,03	1,91	1,97	1,94 ±0,035	1,90	1,97	1,94 ±0,06	1,88	2,00
ρ <sub>d</sub>	t/m <sup>3</sup>	1,54 ±0,05	1,48	1,58	1,52 ±0,055	1,47	1,58	1,55 ±0,10	1,45	1,65
n	1	0,42 ±0,52	0,40	0,44	0,42 ±0,025	0,40	0,45	0,42 ±0,04	0,38	0,46
e	1	0,74 ±0,05	0,69	0,79	0,74 ±0,06	0,68	0,80	0,74 ±0,12	0,62	0,86
I <sub>A</sub>	1	1,14 ±0,26	0,88	1,39	1,14 ±0,34	0,80	1,48	}Probenanzahl < 10		
v <sub>ca</sub>	1	0,040±0,016	0,024	0,056	0,033±0,023	0,010	0,056			
v <sub>gl</sub>	1	0,076±0,015	0,061	0,091	0,076±0,024	0,052	0,100			

Bild 55: Vertrauensbereiche der bodenmechanischen Kennwerte für den sandigen Ton

Gegenüber dem "sandigen Ton" sind sowohl größere Vertrauensbereiche vorhanden, als auch kleinere. Relativ große Vertrauensbereiche ergeben sich bei den Korngrößenanteilen, während die Dichtewerte besonders kleine Intervalle aufweisen.

Bei den Vertrauensintervallen des Tonanteils und des Schluffanteils überschneiden sich die Werte für den "gebänderten Ton" und den "sandigen Ton". Dagegen fallen die Intervalle für die Dichte deutlich auseinander.

Bodenmech. Kennwert	Einheit	westlicher Verbreitungsraum		
		Vertrauensintervall	obere Grenze	untere Grenze
T	%	29,4 ± 4,8	24,6	34,2
U	%	61,3 ± 5,3	56,0	66,6
S	%	9,9 ± 2,5	7,4	12,4
w	1	0,334 ± 0,018	0,316	0,352
w <sub>L</sub>	1	0,570 ± 0,050	0,520	0,620
w <sub>P</sub>	1	0,268 ± 0,023	0,245	0,291
I <sub>P</sub>	1	0,303 ± 0,042	0,261	0,345
I <sub>C</sub>	1	0,71 ± 0,09	0,62	0,80
ρ	t/m <sup>3</sup>	1,88 ± 0,03	1,85	1,91
ρ <sub>d</sub>	t/m <sup>3</sup>	1,42 ± 0,03	1,39	1,45
S <sub>r</sub>	1	0,97 ± 0,01	0,96	0,98
n	1	0,47 ± 0,01	0,46	0,48
e	1	0,90 ± 0,04	0,86	0,94
V <sub>ca</sub>	1	0,061 ± 0,010	0,051	0,071
V <sub>gl</sub>	1	0,094 ± 0,010	0,084	0,104

Bild 56: Vertrauensbereiche der Mittelwerte - Bodenmechanischer Kennwerte, "gebänderter Ton".

## 7. ZUSAMMENHÄNGE ZWISCHEN EINZELNEN VARIABLEN

### 7.1 Überblick über die Zusammenhänge im Datenfeld

Mit den wichtigsten Variablen zur bodenmechanischen Klassifizierung und den gesamten Fällen des Datenfeldes, also mit den Meßwerten aller drei petrographischer Einheiten, wurde eine Faktorenanalyse durchgeführt. Das Ziel dieser Rechenoperation war, qualitative Antworten auf folgende Fragen zu finden:

- ▶ sind zwischen den Variablen über die bodenmechanisch allgemein bekannten Zusammenhänge hinaus weitere Zusammenhänge vorhanden?
- ▶ hat die geographische Lage (Gauß-Krüger-Koordinaten, Entnahmetiefe) der Bodenprobe einen Einfluß auf die bodenmechanischen Parameter?
- ▶ läßt sich der Einfluß der petrographischen Einheiten auch im Ergebnis der Faktorenanalyse erkennen?

Bild 57 gibt das Ergebnis der Faktorenanalyse als rotierte Faktorenmatrix wider.

Der Faktor 1 repräsentiert die petrographische Einheit. Obwohl die Variable PE (petrographische Einheit) selbst mit diesem Faktor 1 nur schwach korreliert ( $- 0,60$ ), laden auf diesem Faktor alle Kennwerte hoch, durch die sich die petrographischen Einheiten voneinander unterscheiden (Tongehalt, Fließgrenze, Plastizitätszahl).

Die Korrelation des Glühverlustes mit diesem Faktor kommt mittelbar, d. h. über den Tongehalt zustande. Mit steigendem Tongehalt nimmt wegen des Verlustes von Kristallwasser beim Glühversuch (s. Abschnitt 3.26) auch der Glühverlust zu.

Die Ladungen der Variablen "petrographische Einheit" und "Schluffgehalt" sind durch das Minuszeichen als gegensinnig zu den übrigen hoch ladenden Variablen gekennzeichnet.

VARIABLE	FAKTOR 1	FAKTOR 2	FAKTOR 3	FAKTOR 4
x-Koord.	- 0,02	- 0,26	0,06	0,01
y-Koord.	- 0,00	- 0,05	0,95	0,10
EF	0,04	- 0,17	0,51	- 0,01
PE	- 0,60	- 0,19	0,02	- 0,03
T	0,90	0,13	- 0,02	0,01
U	- 0,92	- 0,03	- 0,05	- 0,06
S	- 0,21	- 0,26	0,17	0,10
w	0,17	0,93	0,13	0,29
w <sub>L</sub>	0,84	0,39	0,09	0,19
w <sub>P</sub>	0,14	0,56	0,11	0,41
I <sub>P</sub>	0,94	0,18	0,04	- 0,01
I <sub>C</sub>	0,14	- 0,16	0,15	0,77
I <sub>A</sub>	- 0,20	0,03	- 0,05	- 0,09
S <sub>r</sub>	- 0,05	0,00	0,20	- 0,58
e	0,25	0,90	- 0,13	- 0,14
ρ	- 0,29	- 0,82	0,21	- 0,10
V <sub>ca</sub>	0,08	- 0,01	- 0,18	- 0,05
V <sub>gl</sub>	0,65	0,35	0,11	0,21

Bild 57: Ergebnis der Faktorenanalyse mit den Daten aller drei petrographischer Einheiten (rotierte Faktorenmatrix).

Das heißt, je höher z. B. der Tongehalt, desto niedriger die Kennzahl der petrographischen Einheit und der Schluffgehalt (PE 1 steht für den "fetten Ton"). Der Faktor 2 kann der Dichte des Bodens zugeordnet werden. Hohe Ladungen weisen außer der Dichte  $\rho$  die Porenzahl  $e$  und der Wassergehalt  $w$  auf. Sie sind erwartungsgemäß gegensinnig zur Dichte geladen, d. h. mit zunehmender Dichte werden diese Werte kleiner. Beachtenswert an diesem Faktor ist wiederum die Ladung des Glühverlustes, die hier allerdings nur schwach hervortritt (0,35). Die Ladungen der Ausrollgrenze und der Fließgrenze auf diesem Faktor stehen in keinem ursächlichen Zusammenhang zur Dichte. Sie kommen dadurch zustande, daß mit diesem Faktor mehrere Variable schwach korrelieren, wie z. B. Tongehalt und Sandgehalt; die in direkter Beziehung zu den Konsistenzgrenzen stehen.

Der Faktor 3 zeigt hohe Ladungen der  $y$ -Koordinaten und der Entnahmetiefe der Proben.

Da auf diesem Faktor keine bodenmechanischen Größen signifikant mitladen, ist der Faktor bodenmechanisch nicht interpretierbar.

Mit dem Faktor 4 korrelieren die Konsistenzzahl, die Sättigungszahl und die Ausrollgrenze. Umso fester die Konsistenz ist, je höher ist die Ausrollgrenze des Bodens. Allerdings wird die Sättigungszahl geringer werden.

In einer zweiten Faktorenanalyse sind Variable mit Meßwerten, die ausschließlich zur petrographischen Einheit 1, "fetter Ton", gehören, untersucht worden. Das Ergebnis gibt Bild 58 wider.

Mit dem Faktor 1 wird in diesem Fall die Plastizität beschrieben. Die Variablen Tongehalt, Schluffgehalt (gegensinnig), Fließgrenze und Plastizitätszahl laden sehr hoch. Von Einfluß sind außerdem der Sandgehalt (gegensinnig), der Wassergehalt und der Glühverlust.

VARIABLE	FAKTOR 1	FAKTOR 2	FAKTOR 3	FAKTOR 4
x-Koord.	- 0,07	- 0,13	- 0,06	0,09
y-Koord.	- 0,16	- 0,07	0,11	0,95
ET	0,03	- 0,28	0,15	0,54
T	0,93	0,11	- 0,04	- 0,12
U	- 0,81	- 0,21	- 0,09	0,09
S	- 0,39	0,03	0,35	0,34
w	0,30	0,87	0,09	- 0,03
w <sub>L</sub>	0,86	0,40	0,14	0,04
w <sub>P</sub>	0,11	0,19	0,94	0,08
I <sub>P</sub>	0,86	0,31	- 0,33	0,02
I <sub>C</sub>	- 0,16	- 0,38	0,72	0,14
S <sub>R</sub>	0,11	- 0,21	- 0,18	0,23
e	0,29	0,92	- 0,06	- 0,15
ρ	- 0,20	- 0,89	- 0,09	0,29
V <sub>Ca</sub>	0,05	- 0,02	0,03	- 0,08
V <sub>gl</sub>	0,33	0,40	0,23	- 0,42

**Bild 58:** Ergebnis der Faktorenanalyse mit den Daten der petrographischen Einheit "fetter Ton" (rotierte Faktorenmatrix).

Der Faktor 2 ist der "Dichtefaktor". Dichte, Porenzahl und Wassergehalt laden sehr hoch auf diesem Faktor. Wie bei der ersten Faktorenanalyse laden auf diesem Faktor einige Variable mittelstark, die mit der Dichte nicht direkt zusammenhängen. Von Interesse ist die Ladung des Glühverlustes.

Mit dem Faktor 3 liegt ein die Konsistenz beschreibender Faktor vor. Er zeigt, wie der Faktor 4 bei der ersten Faktorenanalyse, die mit steigender Ausrollgrenze ebenfalls steigende Konsistenz an. In dieser Faktorenanalyse sind aber wesentlich ausgeprägtere Ladungen der Variablen vorhanden. Von mittelstarken Einfluß sind der Sandgehalt und Plastizität.

Der Faktor 4 zeigt den in der ersten Faktorenanalyse bereits beobachteten, bodenmechanisch bedeutungslosen Zusammenhang zwischen den Hoch-Werten ( $\gamma$ -Koordinaten) und der Entnahmetiefe an. Sandgehalt und Glühverlust werden von den genannten Variablen mittelstark beeinflusst.

Durch die Faktorenanalyse war ein Einfluß der geographischen Lage der Entnahmestelle (Entnahmetiefe, Koordinaten der Entnahmestelle) nicht aufzudecken.

Über bekannte oder vermutete Zusammenhänge zwischen einzelnen Variablen hinaus, sind keine weiteren Zusammenhänge nachgewiesen worden.

Nach diesem faktorenanalytischen Überblick über die Zusammenhänge im Datenfeld werden Variablenpaare auf ihre gegenseitige Abhängigkeit untersucht.

Für diese Untersuchung werden zwei petrographische Gruppen unterschieden:

- ▶ "fetter Ton" (Lauenburger Ton im engeren Sinn)
- ▶ "nicht gebänderter Ton"  
(Lauenburger Ton im weiteren Sinne)

Die zweite Gruppe enthält die Meßwerte aus den petrographischen Einheiten PE 1 "fetter Ton" und PE 3 "sandiger Ton". Für die Einheit "sandiger Ton" alleine ebenso wie für die Einheit "gebänderter Ton" wird wegen der geringen Fallzahl auf eine gesonderte Auswertung verzichtet.

In den Fällen, in denen sich die Regressionsfunktion beider Gruppen nicht oder nur unwesentlich voneinander unterscheiden, ist jeweils nur der Zusammenhang der zweiten Gruppe (nicht gebänderter Ton) dargestellt worden.

In den graphischen Darstellungen werden die errechneten Ausgleichfunktionen, die Anzahl der Wertepaare  $n$  und die Korrelationskoeffizienten  $r$  angegeben.

### 7.2 Einfluß der Entnahmetiefe

Aus der faktorenanalytischen Untersuchung war keine Abhängigkeit der bodenmechanischen Kennwerte von der Entnahmetiefe der Bodenproben abzulesen. Dieses Ergebnis fand seine Bestätigung in den Korrelationsanalysen zwischen den einzelnen bodenmechanischen Parametern und der Entnahmetiefe. Weder für den gesamten Verbreitungsraum noch für den Raum Oldenburg waren signifikante Abhängigkeiten nachweisbar. Als Beispiele sind in den Bildern 59 und 60 die Dichte der feuchten Probe und der Tongehalt als Funktion der Entnahmetiefe für den Raum Oldenburg dargestellt.

### 7.3 Einfluß des Tongehaltes

Der Tongehalt beeinflußt erwartungsgemäß in starkem Maße die Plastizitätseigenschaften. Insbesondere ist die Fließgrenze vom Tongehalt abhängig (Bild 61 und 62).

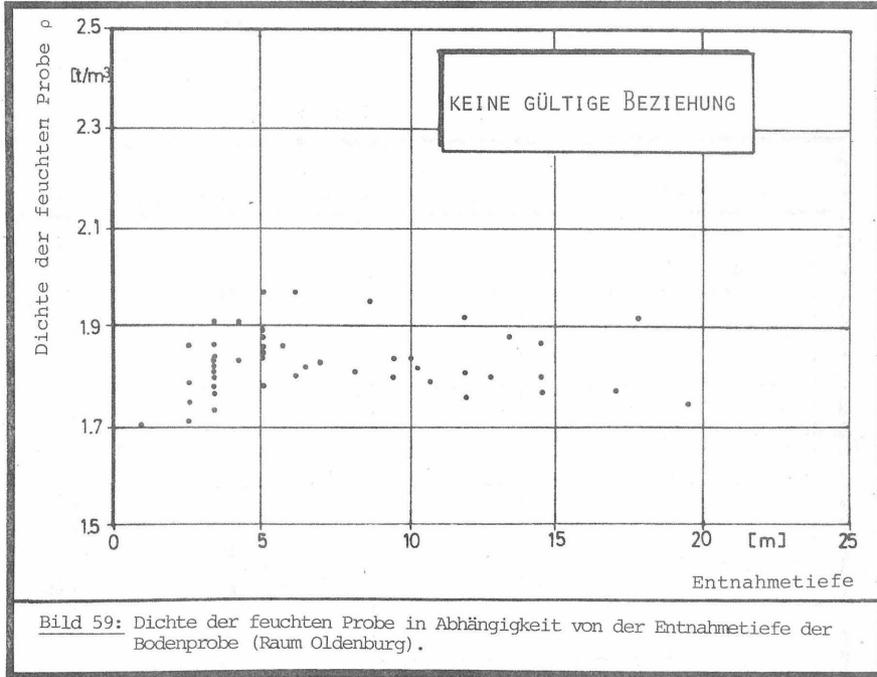


Bild 59: Dichte der feuchten Probe in Abhängigkeit von der Entnahmetiefe der Bodenprobe (Raum Oldenburg).

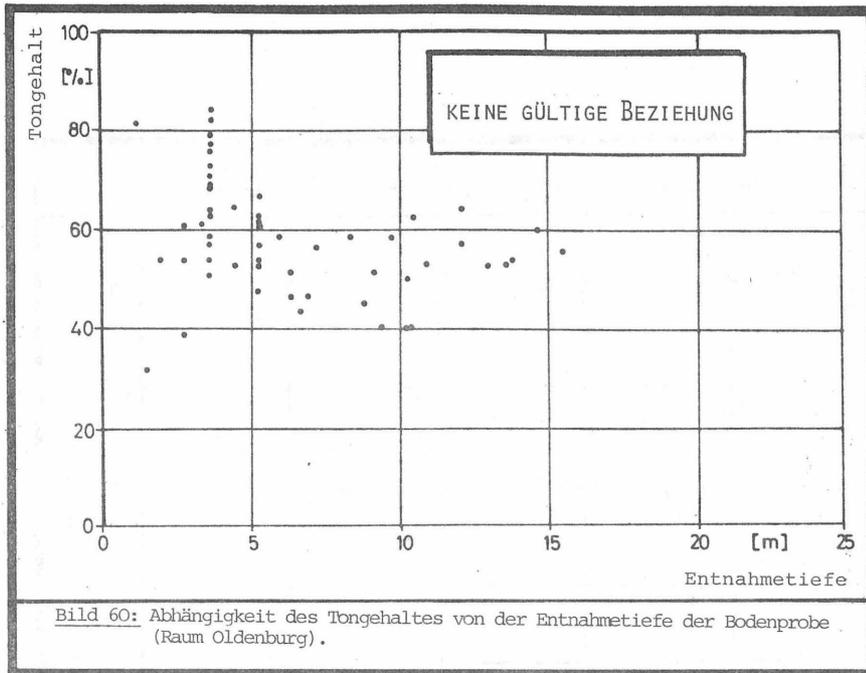


Bild 60: Abhängigkeit des Tongehaltes von der Entnahmetiefe der Bodenprobe (Raum Oldenburg).

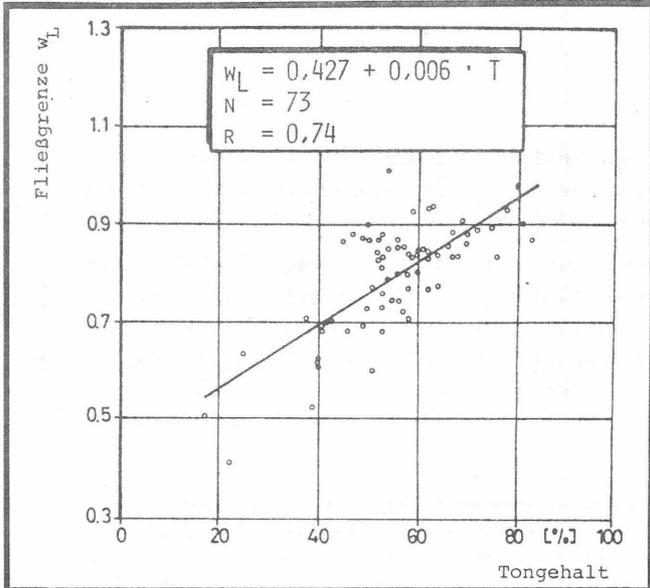


Bild 61: Abhängigkeit der Fließgrenze vom Tongehalt ("fetter Ton").

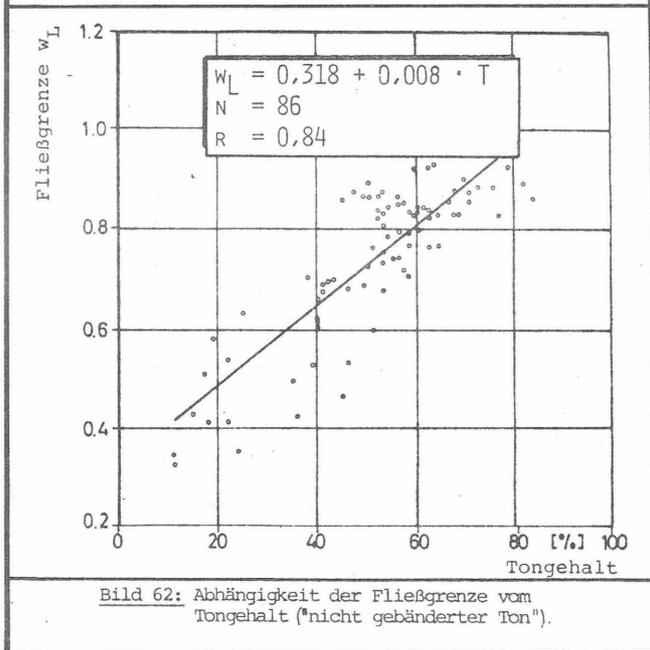
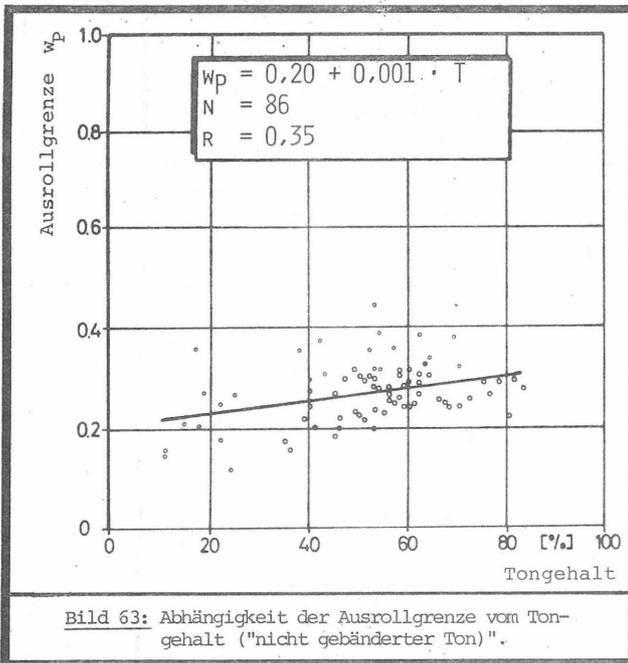


Bild 62: Abhängigkeit der Fließgrenze vom Tongehalt ("nicht gebänderter Ton").

Im Gegensatz zur Abhängigkeit der Fließgrenze ist ein Einfluß des Tongehaltes auf die Ausrollgrenze statistisch nur schwach vorhanden (Bild 63).

Die Abhängigkeit der Plastizitätszahl vom Tongehalt kommt deshalb im wesentlichen über die Fließgrenze zustande. In die Bilder 64 und 65 sind die Grenzgeraden für die Aktivität der Tone nach SKEMPTON (1953) eingetragen worden. Sie machen deutlich, daß die Wertepaare des "Lauenburger Tons" überwiegend im normal aktiven Bereich liegen.



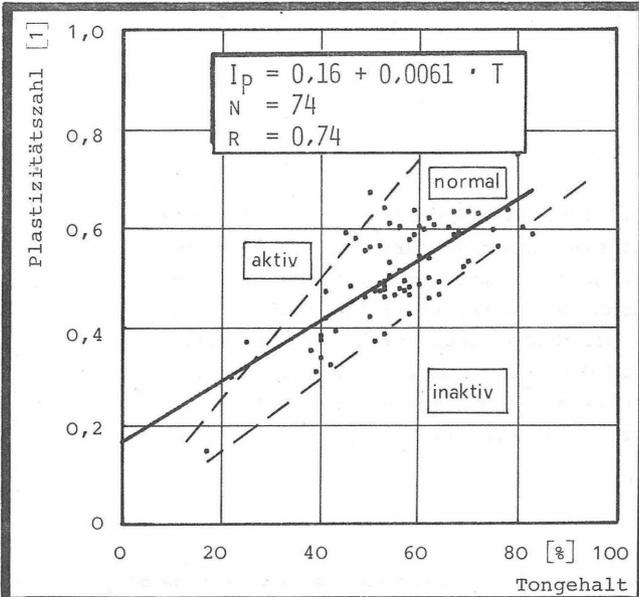


Bild 64: Abhängigkeit der Plastizitätszahl vom Tongehalt ("fetter Ton").

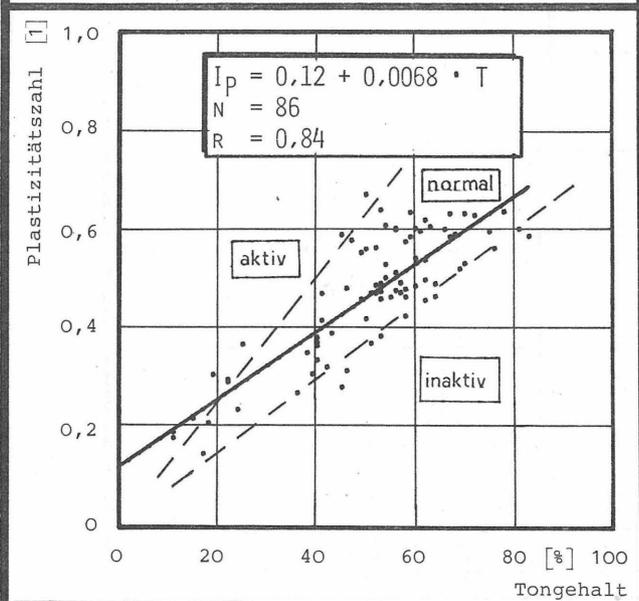
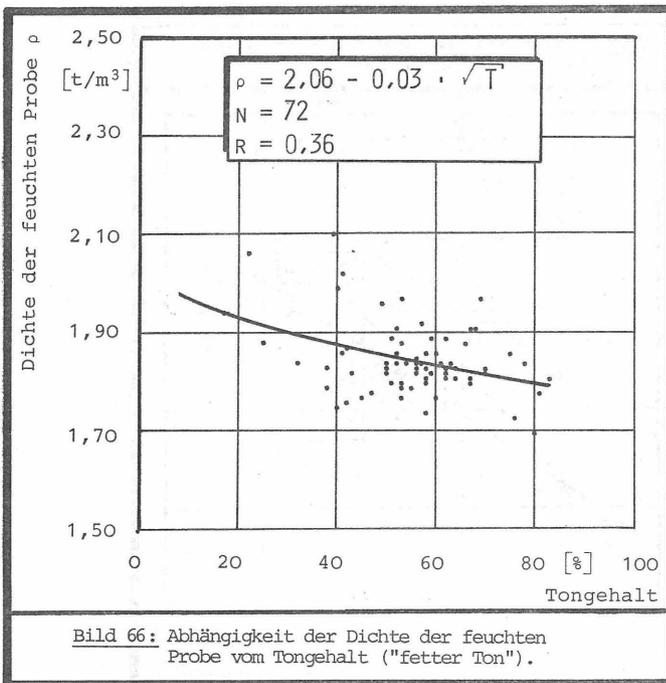
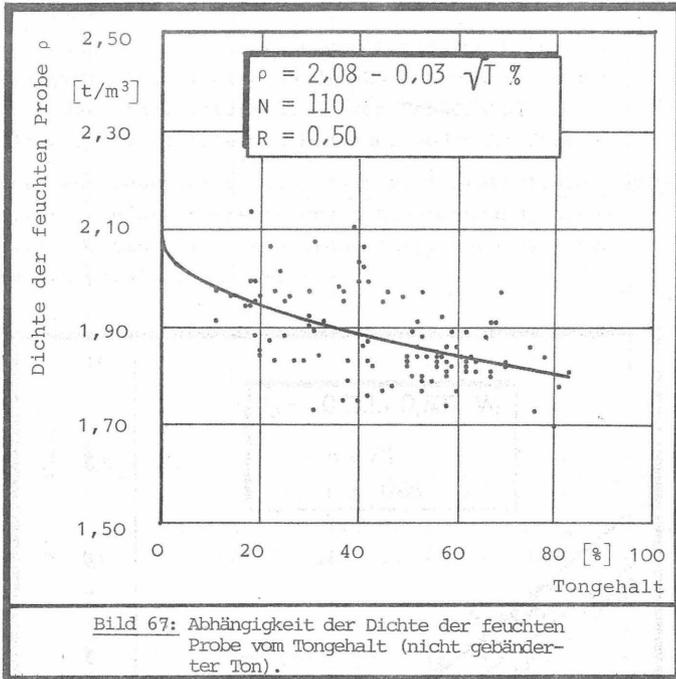


Bild 65: Abhängigkeit der Plastizitätszahl vom Tongehalt ("nicht gebänderter Ton").

Zwischen der Dichte der feuchten Probe und dem Tongehalt besteht eine negative Korrelation, d. h. mit zunehmendem Tongehalt nimmt die Dichte ab (Bild 66 und 67). Der Zusammenhang ist statistisch nicht sehr stark ausgeprägt. Der Grund liegt darin, daß die Korrelation nur einen auf die Dichte einflußnehmenden Faktor erfaßt, in Wirklichkeit aber mehrere Faktoren auf die Dichte einwirken (z. B. die Vorbelastung).





Der Einfluß des Tongehaltes auf den Glühverlust kommt für den "fetten Ton" nur schwach zum Ausdruck (Bild 68), für die Einheit "nicht gebänderter Ton" tritt er deutlicher hervor (Bild 69).

Es wird aus den Darstellungen deutlich, daß der Glühverlust mit steigendem Tonanteil zunimmt. Hierfür kommen zwei Ursachen infrage. Zum einen kann das organische Material vorwiegend an die Tonpartikel gebunden sein und zum anderen wird beim Glühvorgang Kristallwasser und adsorbtiv an die Tonminerale gebundenes Wasser freigesetzt.

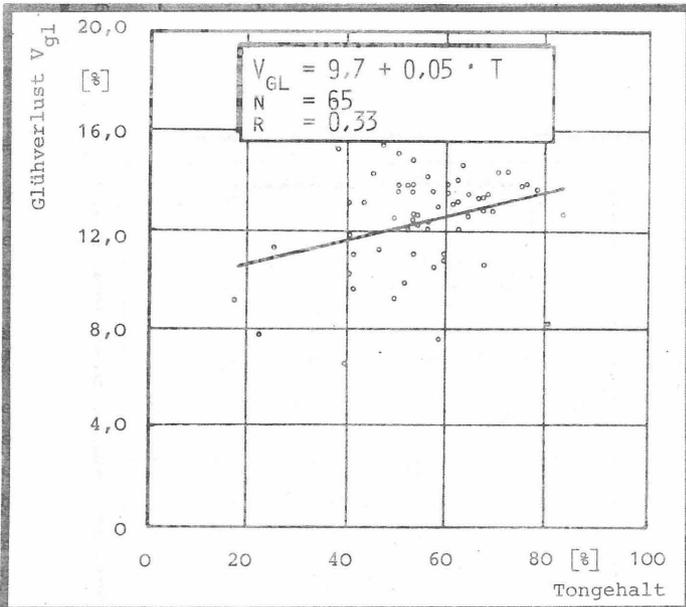


Bild 68: Zusammenhang zwischen dem Glühverlust und dem Tongehalt ("fetter Ton").

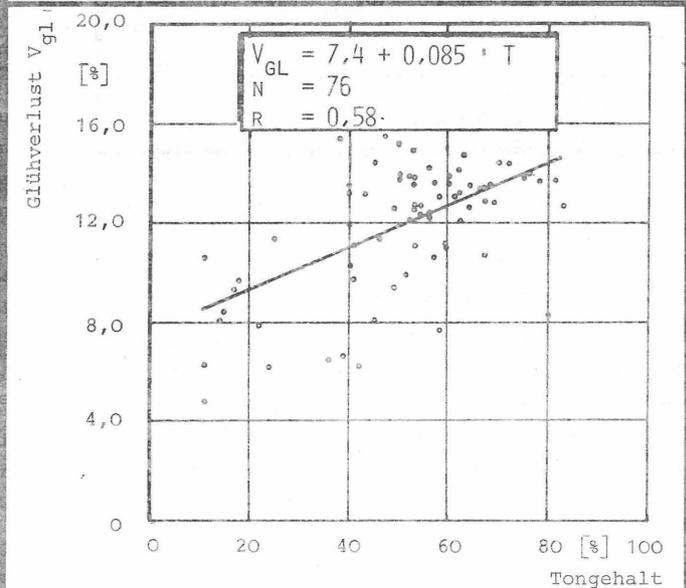
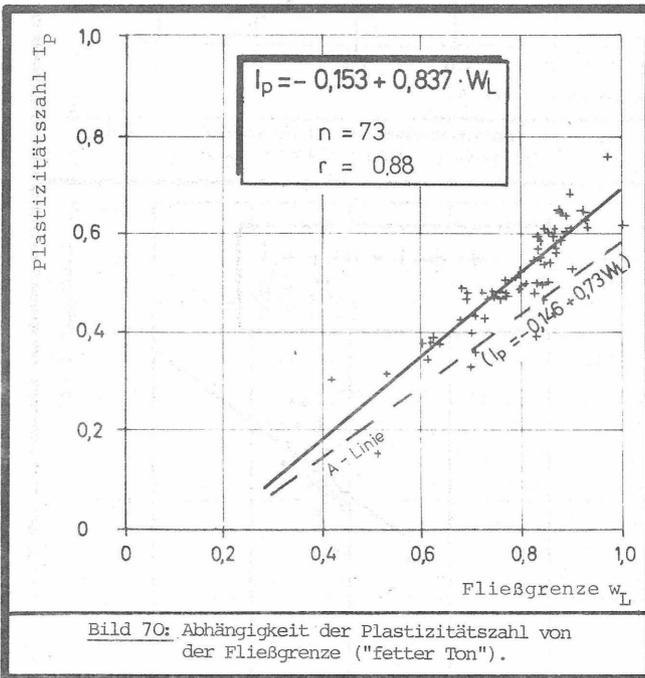


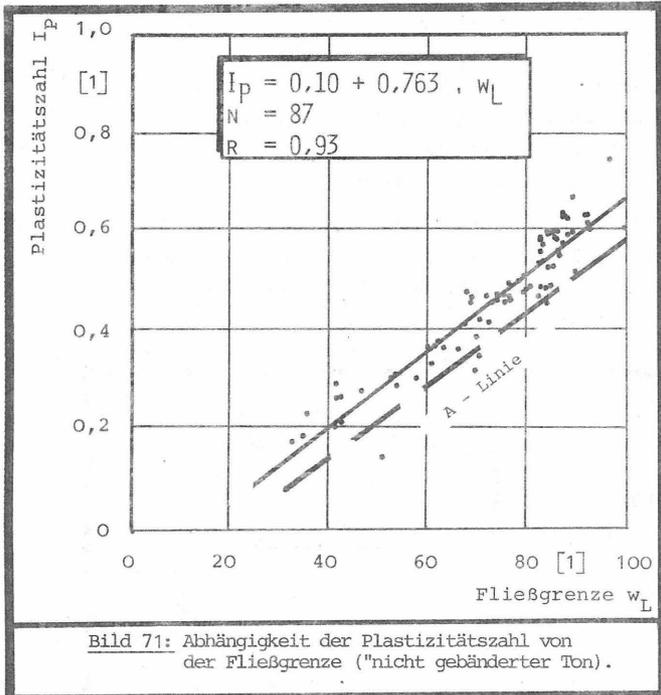
Bild 69: Zusammenhang zwischen dem Glühverlust und dem Tongehalt ("nicht gebänderter Ton").

#### 7.4 Einfluß von Fließgrenze, Ausrollgrenze und Wassergehalt

Der Zusammenhang zwischen der Fließgrenze und der Plastizitätszahl wird in der Bodenmechanik in der Form der Plastizitätskarte nach CASAGRANDE (Bild 34) zur Klassifizierung bindiger Böden benutzt.

Für den "Lauenburger Ton" läßt sich statistisch signifikant ein gut korrelierender Zusammenhang angeben (Bild 70 und 71). Die Regressionsgeraden verlaufen nahezu parallel zur A-Linie.





Die Ausrollgrenze beeinflusst die Konsistenzzahl in der Weise, daß mit steigender Ausrollgrenze auch die Konsistenzzahl zunimmt (Bild 72). Zwar nimmt auf diese Beziehung der Wassergehalt als weitere Variable Einfluß, der aber selbst nur geringe Streuungen aufweist (s. Abschnitt 6.1). Deshalb ergeben sich relativ gute Korrelationen zwischen der Konsistenzzahl und der Ausrollgrenze, die sich bereits in den Faktorenanalysen angedeutet haben.

Die Beziehung zwischen der Konsistenzzahl und dem Wassergehalt (Bild 73) setzt eine konstante Sättigungszahl voraus. Da diese in bestimmten Grenzen variierte, kommt nur eine mittlere Korrelation zustande.

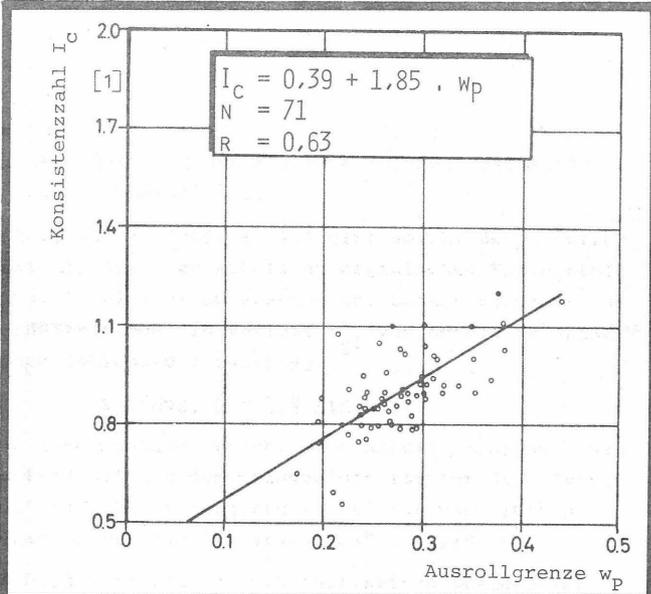


Bild 72: Abhängigkeit der Konsistenzzahl von der Ausrollgrenze ("nicht gebänderter Ton").

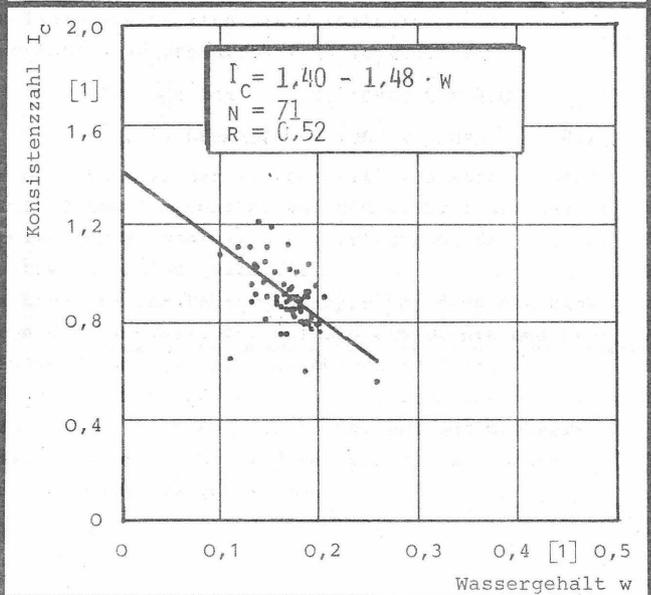
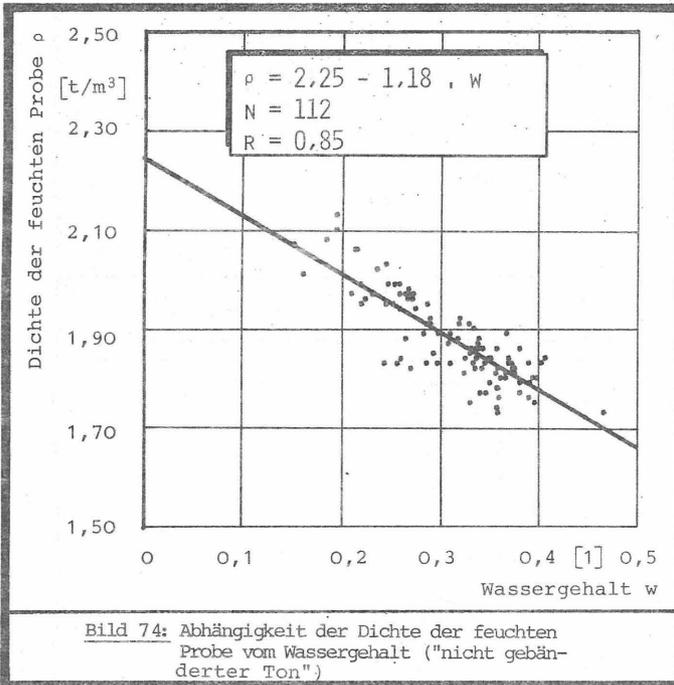


Bild 73: Abhängigkeit der Konsistenzzahl vom Wassergehalt ("nicht gebänderter Ton").

Aus der eindeutigen Beziehung der Dichte der feuchten Probe zum Wassergehalt (Bild 74) läßt sich die angegebene Regressionsgleichung als Schätzfunktion verwenden. Über die einfache Bestimmung des Wassergehaltes kann damit auf die Dichte der Probe geschlossen werden.



### 7.5 Einfluß des Glühverlustes

Im Abschnitt 3.26 ist dargestellt worden, daß der Glühverlust bei bindigen Böden kein eindeutiges Maß für den Anteil an organischem Kohlenstoff sein kann.

Aus diesem Grunde ist für einige Proben der

Anteil an organischem Kohlenstoff gesondert bestimmt worden, dessen Einfluß auf den Glühverlust zunächst betrachtet werden soll.

KEZDI, Bd. 1, 1969, S. 101 gibt sowohl den Glühverlust als auch den Anteil an organischem Kohlenstoff (org. C) einiger Bodenarten an. Danach schwankt das Verhältnis von Glühverlust  $V_{gl}$  zum Anteil an organischem Kohlenstoff zwischen

$$V_{GL}/ORG. C = 1,4 \text{ BIS } 4,3.$$

Der Zusammenhang zwischen dem Anteil an organischem Kohlenstoff und dem Glühverlust ist für den "fetten Ton" in Bild 75 dargestellt und für den "fetten Ton" zusammen mit dem "sandigen Ton" im Bild 76.

In beiden Fällen ist ein statistisch gesicherter Zusammenhang vorhanden. Die Steigung der Ausgleichsgeraden verschiebt sich nur geringfügig. Aus dieser Steigung ergibt sich das Verhältnis von Glühverlust zum Anteil an organischem Kohlenstoff zu

$$\text{"FETTER TON"} \quad V_{GL}/ORG. C = 4,0$$

$$\text{"NICHT GEBÄNDERTER TON"} \quad V_{GL}/ORG. C = 4,2$$

Im Gegensatz zu dem im Abschnitt 7.3 aufgezeigten Einfluß des Tongehaltes auf den Glühverlust hat ein steigender Sandanteil die Verringerung des Glühverlustes zur Folge (Bild 77).

Im Ergebnis der Faktorenanalyse hat sich ein Einfluß des Glühverlustes auf den die Dichte beschreibenden Faktor gezeigt (s. Abschnitt 7.1).

Diesem Einfluß ist durch die Untersuchung der Zusammenhänge zwischen der Dichte und dem Glühverlust bzw. zwischen der Porenzahl und dem Glühverlust nachgegangen worden.

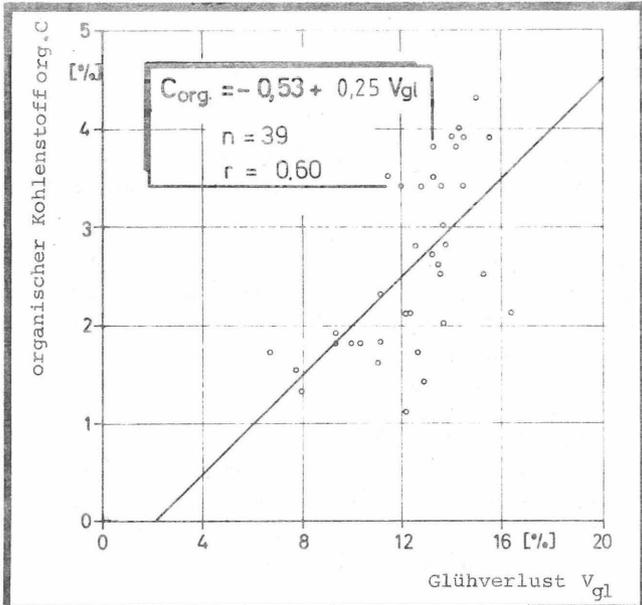


Bild 75: Zusammenhang zwischen dem Anteil an organischem Kohlenstoff und Glühverlust ("fetter Ton").

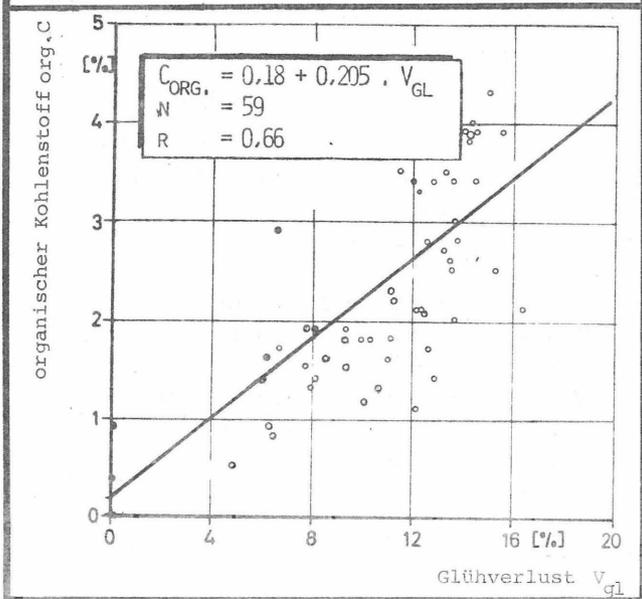


Bild 76: Zusammenhang zwischen dem Anteil an organischem Kohlenstoff und Glühverlust ("nicht gebänderter Ton").

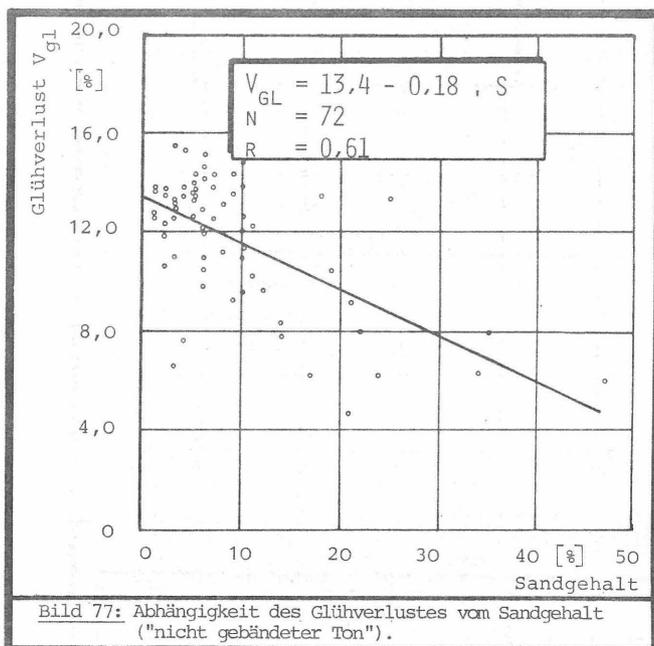


Bild 77: Abhängigkeit des Glühverlustes vom Sandgehalt ("nicht gebändeter Ton").

Ein relativ hoher Korrelationskoeffizient errechnet sich für die Beziehung der Dichte der feuchten Probe zum Glühverlust (Bild 78). Der Glühverlust hat danach einen negativen Einfluß auf die Dichte, eine Zunahme des Glühverlustes bewirkt eine Verringerung der Dichte.

Ebenso deutlich ist der Einfluß des Glühverlustes auf die Porenzahl (Bild 79). Mit steigendem Glühverlust nimmt die Porenzahl zu.

Der in der Faktorenanalyse hervorgetretene Einfluß des Glühverlustes auf die Dichte hat sich durch diese Untersuchung bestätigt.

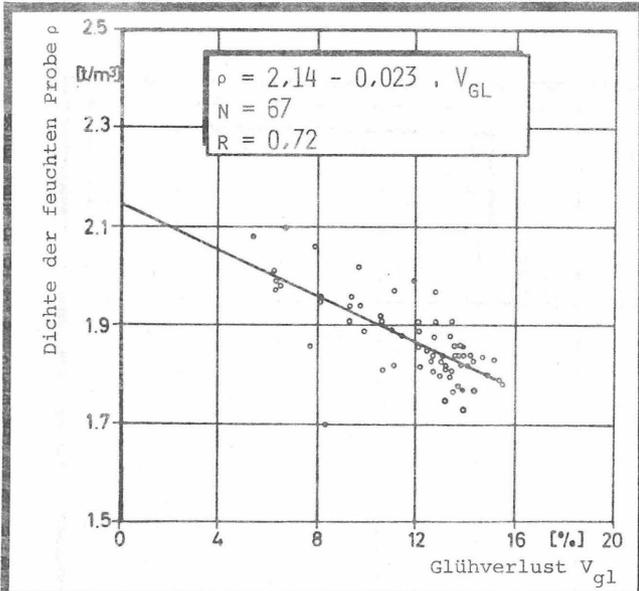


Bild 78: Abhängigkeit der Dichte der feuchten Probe vom Glühverlust ("nicht gebänderter Ton").

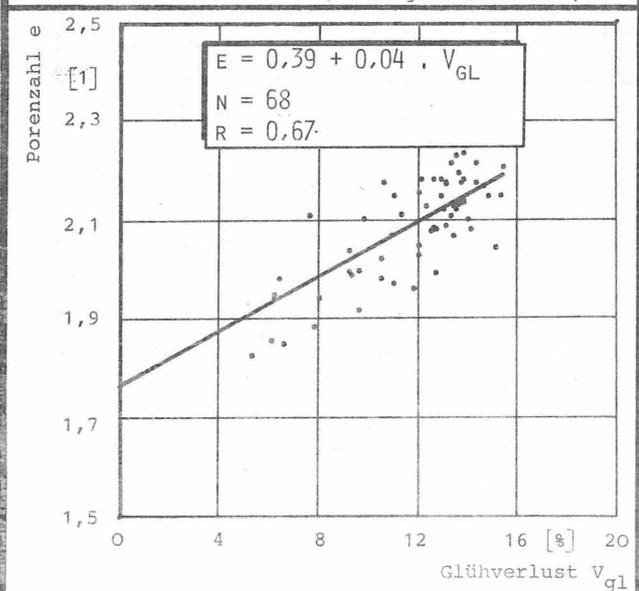


Bild 79: Abhängigkeit der Porenzahl vom Glühverlust ("nicht gebänderter Ton").

### 7.6 Beispiele zur Anwendung der Regressionsgleichungen

Für die Praxis sind die aufgezeigten Zusammenhänge zwischen den Variablen dann von Bedeutung, wenn es durch sie möglich wird, aufgrund einfach zu bestimmender Kenngrößen mit ausreichender Genauigkeit auf andere Kenngrößen zurückzuschließen.

Die wichtigsten Regressionsgleichungen sind im Bild 80 zusammengestellt worden. Sie werden im folgenden auf zwei Beispiele angewendet. Die Untersuchungsergebnisse dieser Beispiele sind nicht in dem in dieser Arbeit ausgewerteten Datensatz enthalten.

Eine Probe stammt aus einer Bohrung aus der Nähe von Dannenberg. Dort ist in einer Tiefe von ca. 30 m unter Gelände "Lauenburger Ton" erbohrt worden. Die zweite Probe ist in der Nähe von Oldenburg aus 6 m Tiefe entnommen worden.

Die Proben haben folgende Kennwerte:

<u>Kennwerte</u>	<u>Probe Dannenberg</u>	<u>Probe Oldenburg</u>
Tongehalt T	36 %	58 %
Schluffgehalt U	49 %	37 %
Sandgehalt S	15 %	5 %
Wassergehalt w	0,231	0,336
Fließgrenze $w_L$	0,629	0,805
Ausrollgrenze $w_p$	0,280	0,284
Plastizitätszahl $I_p$	0,349	0,521
Konsistenzzahl $I_c$	1,14	0,90
Dichte der feuchten Probe $\rho$	1,995 t/m <sup>3</sup>	1,85 t/m <sup>3</sup>
Porenzahl e	0,698	0,911

Die Probe Dannenberg wurde der petrographischen Einheit "sandiger Ton" zugeordnet, die Probe Oldenburg der Einheit "fetter Ton".

Mit dem Tongehalt als Ausgangsgröße errechnen sich folgende Zielgrößen:

Probe Dannenberg

$$\begin{aligned} I_P &= 0,12 + 0,0068 T &= 0,36 & \text{gemessen: } 0,349 \\ w_L &= 0,318 + 0,008 T &= 0,61 & \text{gemessen: } 0,629 \\ \rho &= 2,08 - 0,03 \sqrt{T} &= 1,90 & \text{gemessen: } 1,995 \text{ t/m}^3 \end{aligned}$$

Probe Oldenburg

$$\begin{aligned} I_P &= 0,16 + 0,0061 T &= 0,51 & \text{gemessen: } 0,521 \\ w_L &= 0,427 + 0,006 T &= 0,78 & \text{gemessen: } 0,805 \\ \rho &= 2,06 - 0,03 \sqrt{T} &= 1,83 & \text{gemessen: } 1,85 \text{ t/m}^3 \end{aligned}$$

Aus dem Wassergehalt  $w$  wird die Dichte der feuchten Probe geschätzt.

Probe Dannenberg

$$\rho = 2,25 - 1,18 w = 1,98 \quad \text{gemessen: } 1,995 \text{ t/m}^3$$

Probe Oldenburg

$$\rho = 2,25 - 1,18 w = 1,85 \quad \text{gemessen: } 1,85 \text{ t/m}^3$$

Die Schätzwerte weisen eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten auf. Lediglich bei der aus dem Tongehalten errechneten Dichte der Probe Dannenberg ergibt sich gegenüber der gemessenen Größe ein zu geringer Wert. Die Abweichung beträgt gegenüber dem gemessenen Wert allerdings nur 5 %.

Gesuchte Größe	vorhandene Größe				
	Tongehalt	Fließgrenze	Glühverlust	Wassergehalt	Ausrollgrenze
	T	w <sub>L</sub>	V <sub>gl</sub>	w	w <sub>P</sub>
	[%]	[1]	[%]	[1]	[1]
1	2	3	4	5	6
I <sub>P</sub> [1]	0,16+0,0061 T (0,12+0,0068 T)	-0,153+0,837 w <sub>L</sub> (-0,10 +0,763 w <sub>L</sub> )	(0,07+0,034 V <sub>gl</sub> )	-	-
w <sub>L</sub> [1]	0,427+0,006 T (0,318+0,008 T)	-	0,40+0,03 V <sub>gl</sub> (0,15+0,05 V <sub>gl</sub> )	-	-
I <sub>C</sub> [1]	-	-	-	(1,40 - 1,48 w)	(0,39+1,85 w <sub>P</sub> )
ρ [t/m <sup>3</sup> ]	2,06-0,03 √T (2,08-0,03 √T)	-	-	(2,25-1,18 w)	-
e [1]	-	-	(0,39+0,04 V <sub>gl</sub> )	-	-
V <sub>gl</sub> [1]	9,7 +0,05 T (7,4 +0,085 T)	-	-	-	-
Anmerk.: eingeklammerte Gleichungen gelten für den "Lauenburger Ton" im weiteren Sinn ("nicht gebänderter Ton"), die nicht eingeklammerten für den "fetten Ton".					
Bild 80: Zusammenstellung der Regressionsgleichungen für die bodenmechanischen Grundkennwerte.					

## 8. EINAXIALES FORMÄNDERUNGSVERHALTEN

### 8.1 Versuche

Die Kompressionsversuche bei behinderter Seitendehnung sind an ungestörten Proben in Ödometern mit festem ausgeführt worden. Die Probekörper hatten Durchmesser von 10 cm bzw. 7 cm und Höhen von 2 cm bzw. 1,4 cm.

Die Belastung wurde in Intervallen aufgebracht, die je Laststufe 24 Stunden konstant blieben. Gesteigert wurde die Belastung jeweils durch Verdoppelung der vorhergehenden Last.

Vor dem Aufbringen der maximalen Spannung von 2,0 MN/m<sup>2</sup> ist mindestens ein Entlastungs- und Wiederbelastungszyklus eingeschaltet worden.

### 8.2 Auswertung

#### 8.2.1 Kompressions- und Schwellbeiwert, Steifemoduli

Die durch die Konsolidationsspannungen verursachten einaxialen Formänderungen können entweder durch die Zusammendrückung (Setzung) der Probe ausgedrückt werden

$$s' = \frac{\Delta h}{h_a} \quad (\text{Gl. 16})$$

$s'$  = bezogene Setzung

$\Delta h$  = Zusammendrückung der Probe

$h_a$  = Anfangsprobenhöhe

oder durch die Änderung der Porenzahl  $e$ .

Zwischen der bezogenen Zusammendrückung  $s'$  und der Porenzahl besteht folgender Zusammenhang (SCHULTZE & MUHS 1967):

$$s' = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (\text{Gl. 17})$$

Als Ergebnis der Kompressionsversuche werden die bezogene Zusammendrückung  $s'$  und die Porenzahl  $e$  als Funktion der Konsolidierungsspannung  $\sigma'_{vc}$  im halblogarithmischen Maßstab in Druck-Setzungs-Diagramme bzw. Druck-Porenzahl-Diagramme eingetragen (Bild 81 und 82).

Aus der Druck-Setzungs-Linie wurden die Steifemoduli  $E_s$  abschnittsweise für die Lastbereiche 0,05 bis 0,15 MN/m<sup>2</sup>, 0,15 bis 0,30 MN/m<sup>2</sup>, 0,30 bis 0,50 MN/m<sup>2</sup> und 0,50 bis 1,0 MN/m<sup>2</sup> errechnet.

Druck-Setzungs-Linien und Druck-Porenzahl-Linien überkonsolidierter Böden lassen sich vereinfachend durch 2 Geraden annähern, wie in den Bildern 81 und 82 dargestellt. Die eine Gerade zwischen den Konsolidationsspannungen  $\sigma'_{vo}$  und  $\sigma'_{vm}$  stellt den Wiederbelastungsast dar, die andere von  $\sigma'_{vm}$  bis  $\sigma'_{ve}$  gibt den Erstbelastungsast wieder. Diese Verformungslinien wurden in folgender Weise ausgewertet:

► Druck-Porenzahl-Linie (Bild 81)

Kompressionsbeiwert  $C_c$

der die Steigung der Kurve im Erstbelastungsbereich angibt.

Wiederbelastungsbeiwert  $C_w$

der die Steigung der Kurve im Wiederbelastungsbereich angibt.

Schwellbeiwert  $C_s$

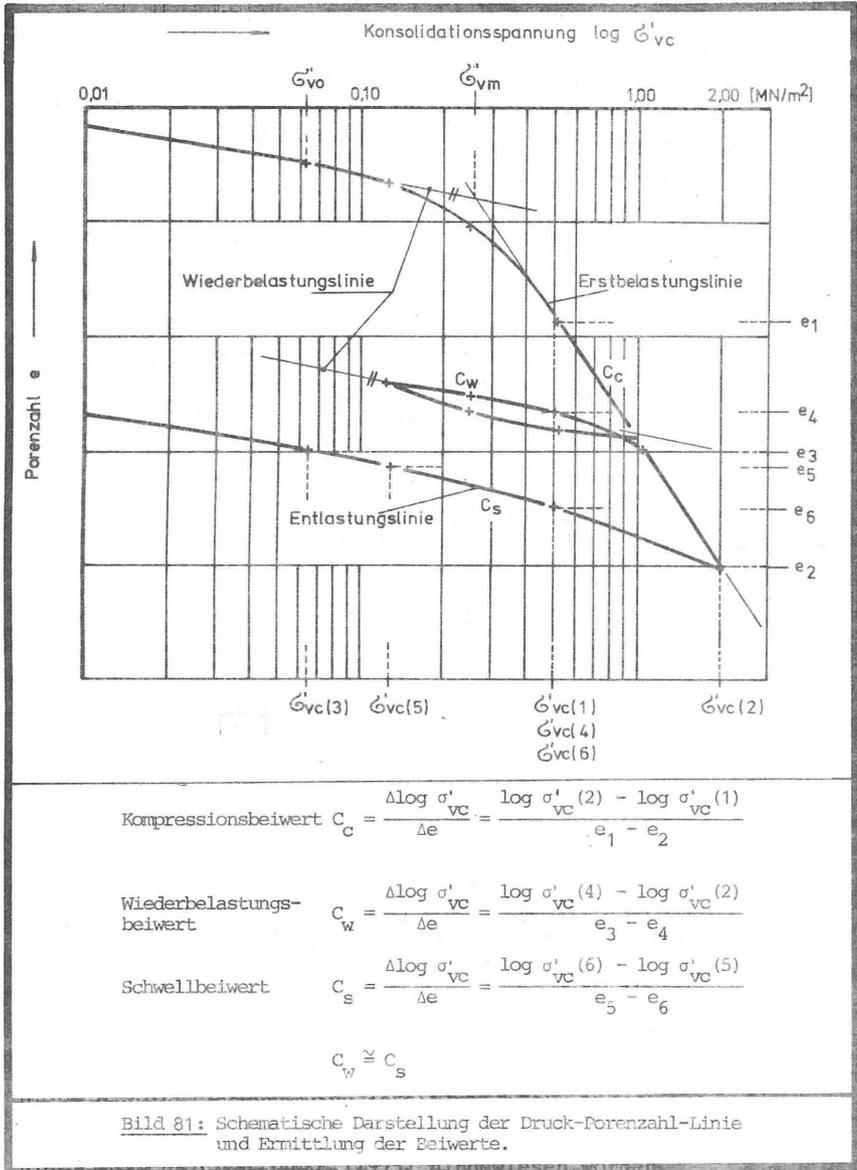
der die Steigung der Kurve bei der Entlastung angibt

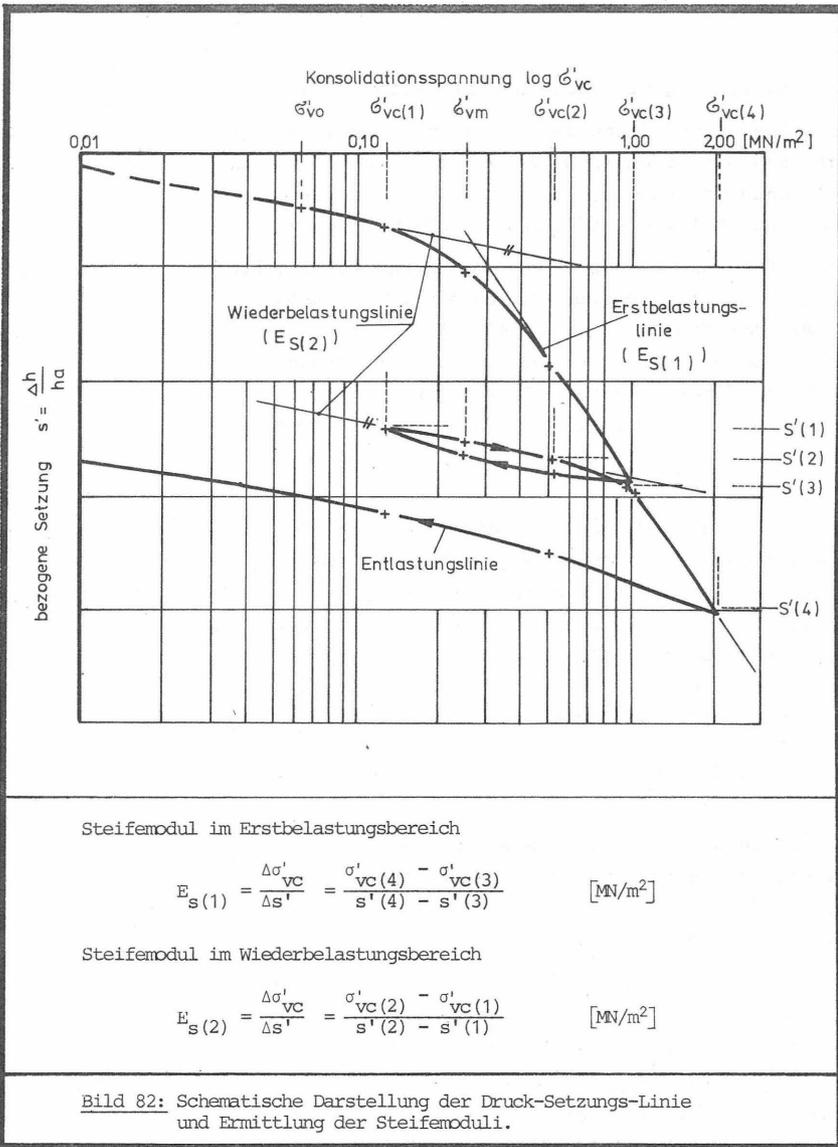
Der Wiederbelastungsbeiwert  $C_w$  läßt sich mit ausreichender Genauigkeit durch den Schwellbeiwert  $C_s$  ersetzen (LADD 1973).

► Druck-Setzungs-Linie (Bild 82)

Steifemodul im Erstbelastungsbereich  $E_{s(1)}$

Steifemodul im Wiederbelastungsbereich  $E_{s(2)}$ .





Steifemodul im Erstbelastungsbereich

$$E_{s(1)} = \frac{\Delta \sigma'_{vc}}{\Delta s'} = \frac{\sigma'_{vc(4)} - \sigma'_{vc(3)}}{s'(4) - s'(3)} \quad [\text{MN/m}^2]$$

Steifemodul im Wiederbelastungsbereich

$$E_{s(2)} = \frac{\Delta \sigma'_{vc}}{\Delta s'} = \frac{\sigma'_{vc(2)} - \sigma'_{vc(1)}}{s'(2) - s'(1)} \quad [\text{MN/m}^2]$$

Bild 82: Schematische Darstellung der Druck-Setzungs-Linie und Ermittlung der Steifemoduli.

### 8.2.2 Maximale geologische Konsolidationsspannung

Die Belastungen, denen ein Boden im Laufe seiner geologischen Geschichte ausgesetzt war, führen im Boden zu Spannungszuständen, die auch nach Abbau der ursprünglichen Belastung in ihm eingepreßt bleiben.

Dieses "Gedächtnis" des Bodens hat einen erheblichen Einfluß auf sein Spannungsverformungsverhalten. Deshalb muß der geologisch bedingte Spannungszustand bekannt sein und berücksichtigt werden, wenn das Verformungsverhalten eines Bodens unter neuer Belastung, z. B. bei einer Bebauung, untersucht werden soll.

War der Boden in seiner geologischen Geschichte jemals größeren Spannungen ausgesetzt, als zum gegenwärtigen Zeitpunkt, wird er als überkonsolidiert bezeichnet. Das Verhältnis der größten jemals wirksamen vertikalen Spannung  $\sigma'_{vm}$  zu der heute wirksamen Überlagerungsspannung  $\sigma'_{vo}$  wird als Überkonsolidationsverhältnis OCR (overconsolidation ratio) bezeichnet.

$$OCR = \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{vo}} .$$

Die Spannungsgeschichte des Bodens läßt sich an den Druck-Setzungs-Kurven bzw. Druck-Porenzahl-Kurven, die als Ergebnis von Ödometerversuchen erhalten werden, abschätzen.

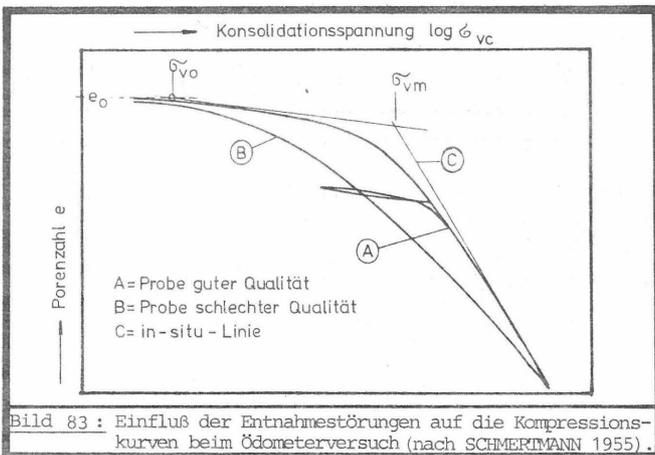
Es stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, mit denen die maximale geologische Konsolidationsspannung aus den Kompressionskurven abgeschätzt werden kann.

Die vorliegenden Kompressionskurven sind mit dem bekanntesten dieser Verfahren, das auf CASAGRANDE (1936) zurückgeht, ausgewertet worden. Zum Vergleich kam das Verfahren nach VAN ZELST (Maximalwerte) zur Anwendung.

Die Verfahren sind ausführlich bei SCHULTZE & MUHS (1967, S. 467) beschrieben.

Alle Verfahren beruhen darauf, daß bei Spannungen in Ödometerversuchen, die kleiner sind als die maximale geologische Konsolidationsspannung, geringere Zusammendrückungen vorhanden sind als im Erstbelastungsbereich. Ein deutlicher Wechsel in der Kurvenneigung tritt dort auf, wo sich die Versuchsspannung der maximalen geologischen Konsolidationsspannung nähert.

Die Verfahren liefern keine exakten Werte für die maximale geologische Konsolidationsspannung, denn die aus dem Kompressionsversuch erhaltenen Druck-Setzungs-Linien bzw. Druck-Porenzahl-Linien weichen durch Störungen der Probe (Entnahme, Einbau) mehr oder weniger weit von der in-situ-Linie ab.



Dadurch werden mit den graphischen Verfahren im allgemeinen geringere Werte für die maximale geologische Konsolidationsspannung erhalten, als es der Wirklichkeit entspricht.

Die aus den Kompressionsversuchen graphisch ermittelten maximalen Konsolidationsspannung  $\sigma'_{vm}$  sind hier auf die jeweilige Überlagerungsspannung  $\sigma'_{v0}$  bezogen worden, um das Überkonsolidationsverhältnis OCR zu bestimmen.

### 8.3 Ergebnisse

#### 8.3.1 Statistische Kennwerte der Steifemoduli, Kompressions- und Schwellbeiwerte

Die aus den Druck-Setzungs-Linien abschnittsweise errechneten Steifemoduli sowie die aus den Druck-Porenzahl-Linien errechneten Kompressions- und Schwellbeiwerte werden statistisch durch Häufigkeitsverteilung, Maßzahl des Mittelwertes, Standardabweichung und Variationskoeffizient beschrieben (Bilder 83 bis 88).

Die Variationskoeffizienten sind relativ hoch, liegen aber in der Größenordnung vergleichbarer Untersuchungen (KAHL 1972).

Die Streuungen, die in den Variationskoeffizienten zum Ausdruck kommen, sind offensichtlich zum erheblichen Teil versuchsbedingt (sekundäre Streuungen), da der Kompressionsversuch störanfällig ist.

Die Proben können sowohl durch die Entnahme als auch beim Einbau in das Versuchsgerät gestört werden. Besonders die Störung bei der Entnahme kann sich auch noch bei relativ hohen Konsolidationsspannungen auswirken (SCHMERTMANN 1955) (Bild 83). Auf die Einbaustörungen und die versuchsbedingten Störeinflüsse ist von JÄNKE (1975) hingewiesen worden.

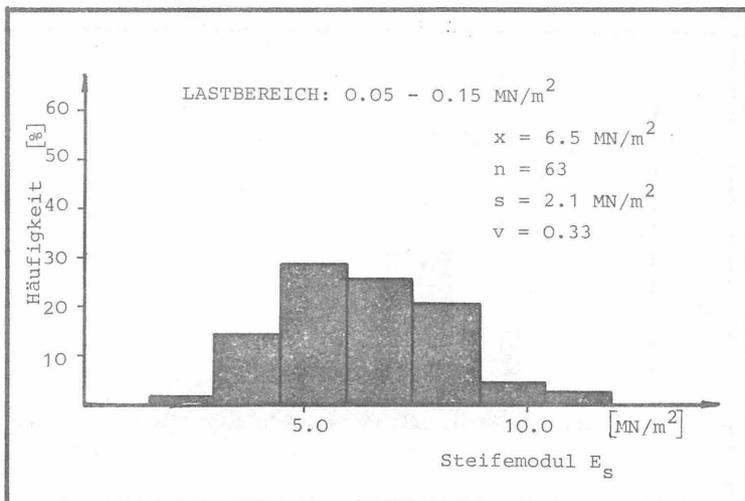


Bild 83: Häufigkeitsverteilung des Steifemoduls E<sub>s</sub> im Lastbereich 0.05 - 0.15 MN/m<sup>2</sup>

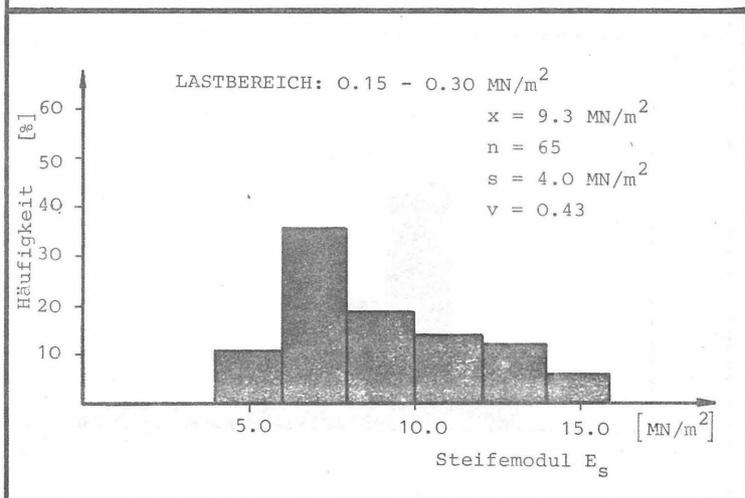


Bild 84: Häufigkeitsverteilung des Steifemoduls E<sub>s</sub> im Lastbereich 0.15 - 0.30 MN/m<sup>2</sup>

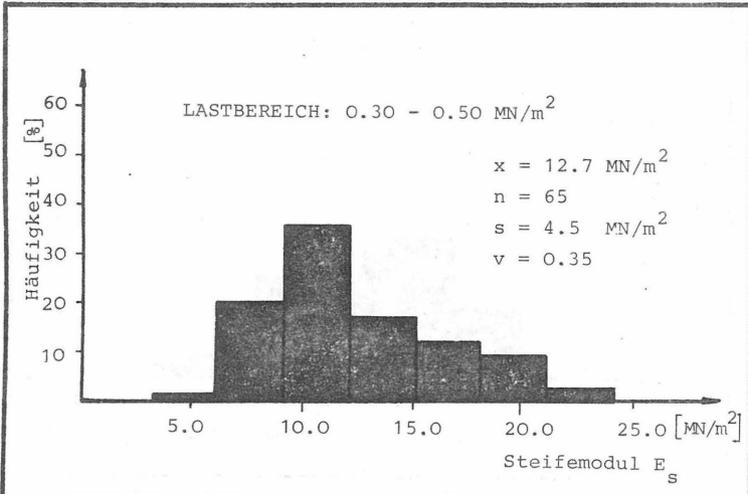


Bild 85: Häufigkeitsverteilung des Steifemoduls E<sub>s</sub> im Lastbereich 0.30 - 0.50 MN/m<sup>2</sup>

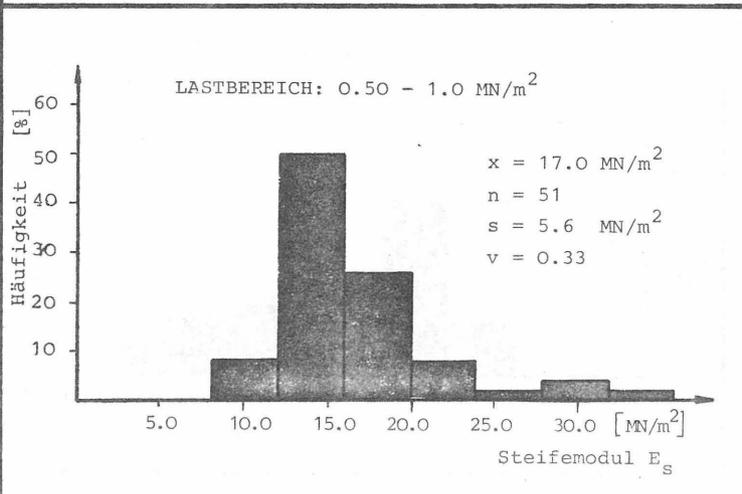


Bild 86: Häufigkeitsverteilung des Steifemoduls E<sub>s</sub> im Lastbereich 0.50 - 1.0 MN/m<sup>2</sup>

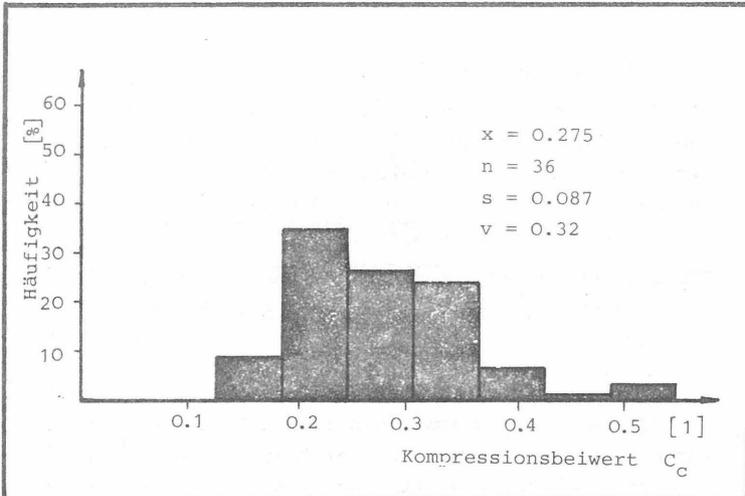


Bild 87: Häufigkeitsverteilung des Kompressionsbeiwertes  $C_c$

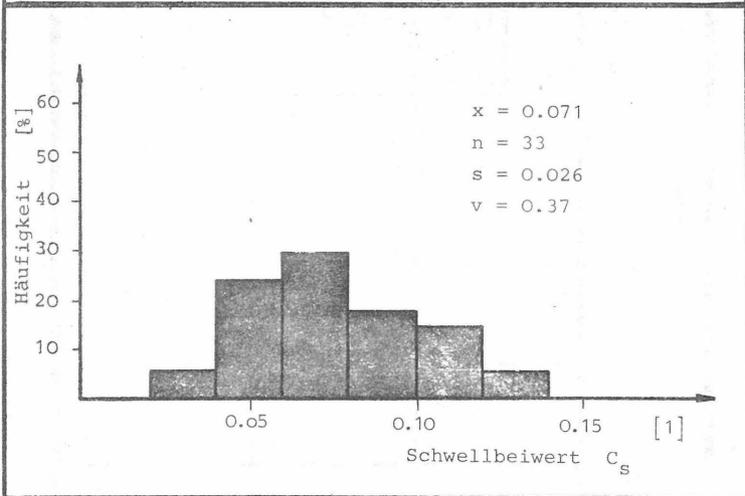


Bild 88: Häufigkeitsverteilung des Schwellbeiwertes  $C_s$

### 8.3.2 Abhängigkeit des Kompressionsbeiwertes $C_c$

Mit Regressionsanalysen sind Zusammenhänge zwischen dem Kompressionsbeiwert  $C_c$  und verschiedenen Klassifizierungsparametern untersucht worden.

Aus der Literatur sind verschiedene empirische Beziehungen dieser Art bekannt.

Für die Abhängigkeit des Kompressionsbeiwertes  $C_c$  von der Anfangsporenzahl  $e_0$  gibt NISHIDA (1956) folgende Beziehung an

$$C_c = 0,54 E_0 - 0,19.$$

Der Zusammenhang zwischen den beiden Parametern tritt für die untersuchten Proben der "Lauenburger Serie" ("Lauenburger Ton" im weiteren Sinn) ebenfalls hervor (Bild 89).

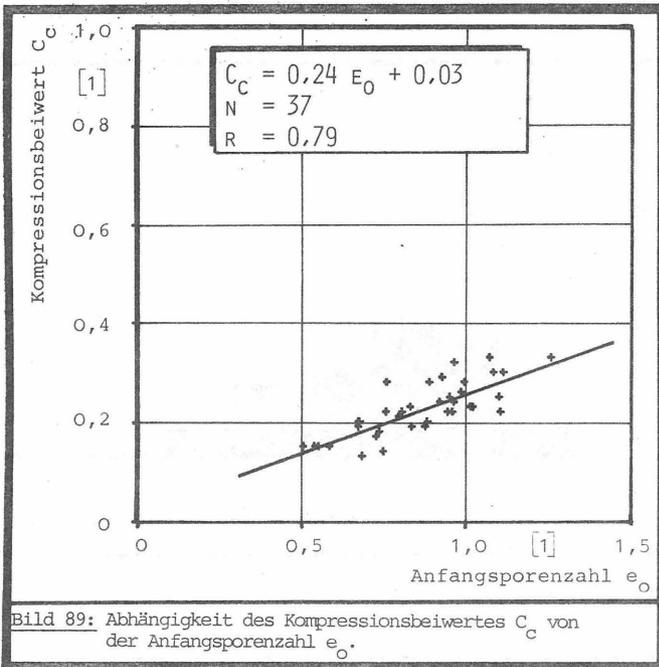


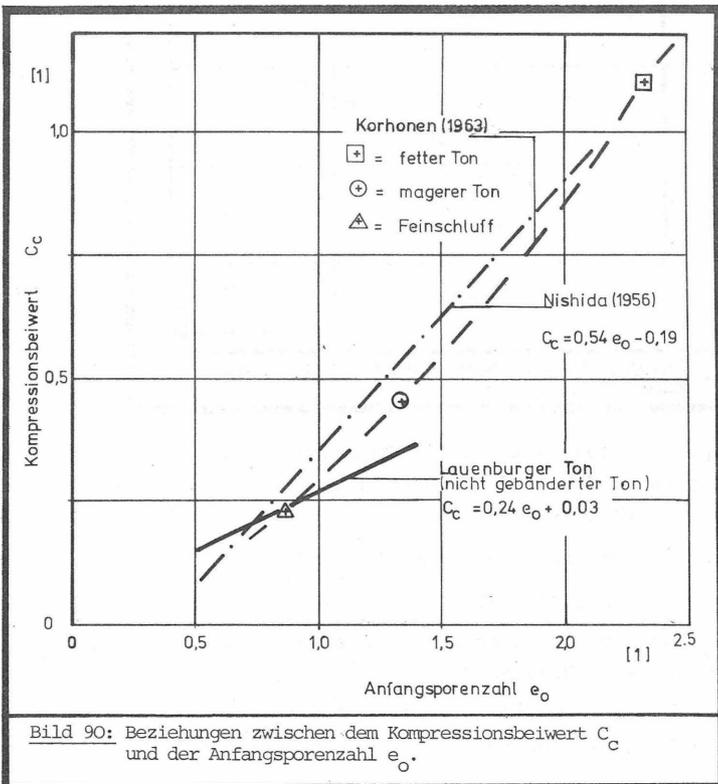
Bild 89: Abhängigkeit des Kompressionsbeiwertes  $C_c$  von der Anfangsporenzahl  $e_0$ .

KORHONEN (1963) zeigt die Abhängigkeit des Kompressionsbeiwertes von der Anfangsporenzahl für die Mittel-

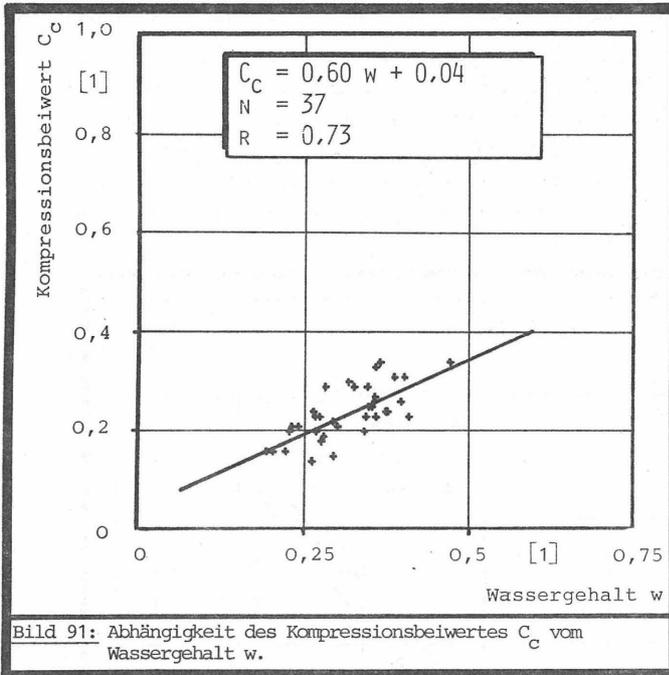
werte verschiedener Bodenarten (Bild 90).

In das Bild sind außer der von KORHONEN (1963) angegebenen Beziehung auch die nach NISHIDA (1956) und die für die "Lauenburger Serie" gefundenen eingetragen worden.

Die Funktionen für den "Lauenburger Ton im weiteren Sinne" haben geringere Steigungsmaße als die beiden anderen. Der Kompressionsbeiwert reagiert also träger gegenüber einer Änderung der Anfangsporenzahl  $e_o$ . Dennoch ist in dem für den "Lauenburger Ton" definierten Bereich die Porenzahl ( $e_o = 0,5 - 1,3$ ) zwischen allen Beziehungen gute Übereinstimmung vorhanden.



Der Einfluß des Wassergehaltes  $w$  auf dem Kompressionsbeiwert  $C_c$  wird am deutlichsten durch die lineare Funktion in Bild 91 wiedergegeben.



Die Kompressionsbeiwerte dieser Funktion liegen geringfügig unter denen, die von KORHONEN (1963) angegeben wurden (Bild 92).

LADD (1973) nennt für organische Böden das Verhältnis

$$C_c = 1,0 \text{ BIS } 1,5 w,$$

Die graphische Darstellung dieser Beziehung findet sich ebenfalls im Bild 92.

Für Böden aus den westlichen USA wird von LAMBE & WHITMAN (1969) die Abhängigkeit des Erstbelastungs-

verhältnisse  $CR = C_c / (1 + e_0)$  vom Wassergehalt  $w$  angegeben (Bild 93).

Aus den Funktionen  $C_c = f(e_0)$  und  $C_c = f(w)$  ist für den "Lauenburger Ton im weiteren Sinne" der Zusammenhang  $CR = f(w)$  ermittelt und im Bild 93 ergänzend dargestellt worden.

Die Gerade liegt im Bereich der amerikanischen Werte, weist aber eine geringere Steigung auf als die dort angegebene Funktion.

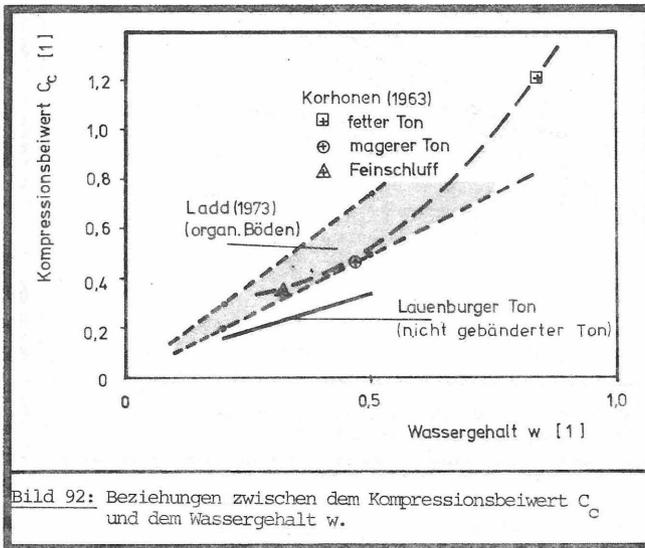


Bild 92: Beziehungen zwischen dem Kompressionsbeiwert  $C_c$  und dem Wassergehalt  $w$ .

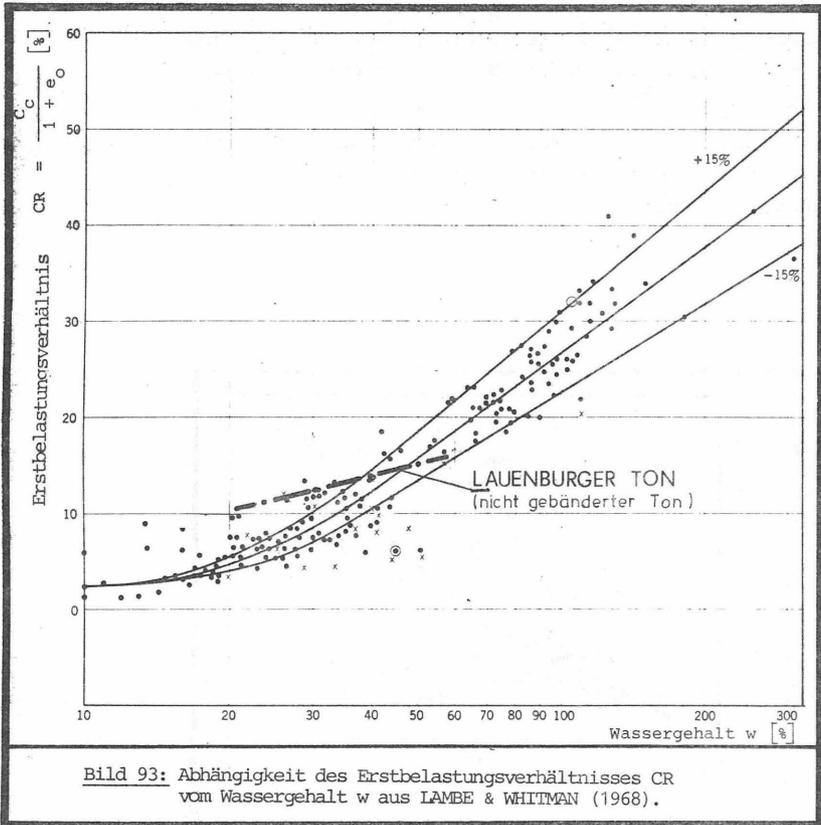
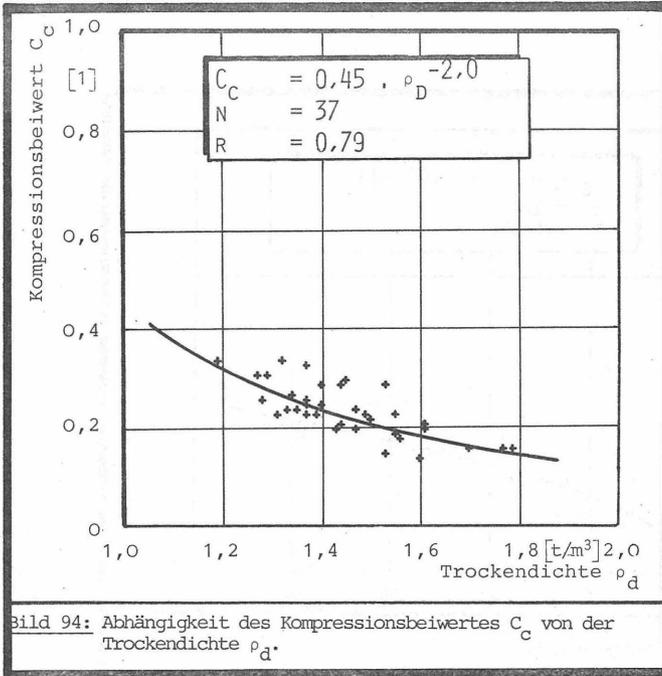


Bild 93: Abhängigkeit des Erstbelastungsverhältnisses CR vom Wassergehalt  $w$  aus LAMBE & WHITMAN (1968).

Für die untersuchten Proben der "Lauenburger Serie" war ein Einfluß des Tongehaltes auf den Kompressionsbeiwert wie er von GILLOT (1968) angedeutet wird ebenso wenige nachzuweisen wie der häufig zitierte Zusammenhang mit der Fließgrenze (TERZAGHI & PECK 1967).

Dagegen ist der Kompressionsbeiwert sehr deutlich von der Trockendichte  $\rho_d$  abhängig (Bild 94).



### 8.3.3 Abhängigkeit des Schwellbeiwertes $C_s$

Der Schwellbeiwert  $C_s$  ist ein Maß dafür, wie stark eine Bodenprobe beim Entlasten ihr Volumen vergrößert. Da die Volumenvergrößerung mit einer Wasseraufnahme verbunden ist, ist theoretisch eine Abhängigkeit des Schwellbeiwertes von den bodenmechanischen Kennwerten zu erwarten, die ihrerseits eng mit dem Wasseraufnahme- bzw. Wasserbindevermögen verbunden sind.

Während der Einfluß des Tongehaltes und der Fließgrenze auf den Kompressionsbeiwert nicht nachzuweisen war, ist die Abhängigkeit des Schwellbeiwertes von diesen bodenmechanischen Kennwerten signifikant (Bild 95) und 96). Beide sind für das Verhalten des Boden gegenüber Wassergehaltsänderungen bedeutungsvoll. Der Tongehalt bestimmt die Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens,

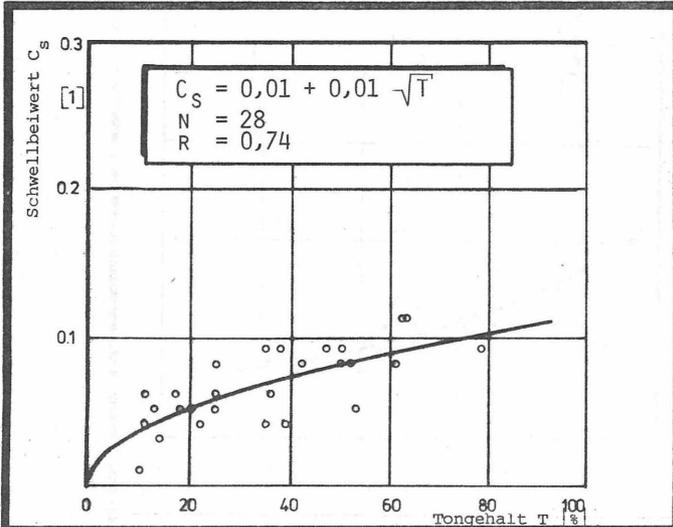


Abb. 95: Abhängigkeit des Schwellbeiwertes  $C_s$  vom Tongehalt  $T$ .

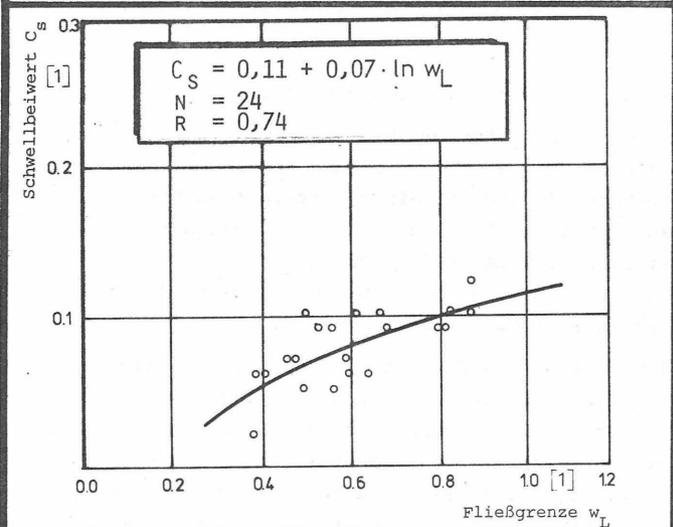
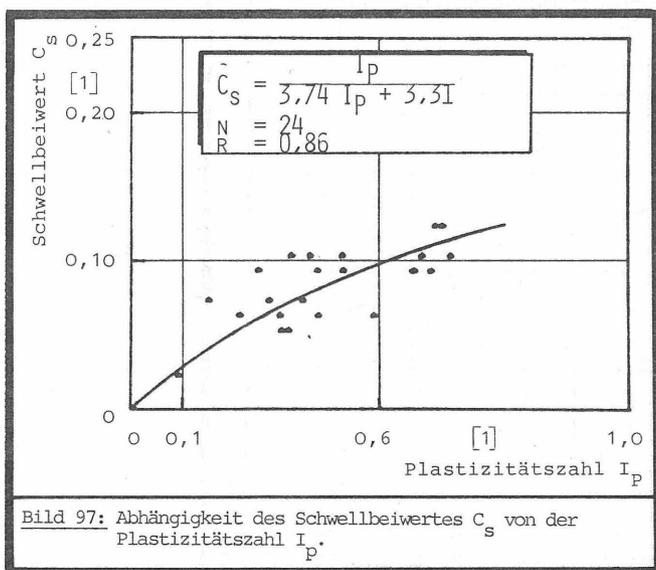


Abb. 96: Abhängigkeit des Schwellbeiwertes  $C_s$  von der Fließgrenze  $w_L$ .

die Fließgrenze seine Empfindlichkeit hinsichtlich der Konsistenzänderung.

Aus der Abhängigkeit der beiden Kennwerte untereinander und ihrer jeweiligen Beziehung zur Plastizitätszahl (s. Abschnitt 7.3 und 7.4) versteht sich der Zusammenhang zwischen dem Schwellbeiwert und der Plastizitätszahl (Bild 97).



### 8.3.4 Abhängigkeit der Steifemoduli

Wie beim Kompressionsbeiwert  $C_c$  bestehen Zusammenhänge zwischen dem Steifemodul im Erstbelastungsbereich  $E_{S(1)}$  einerseits und der Porenzahl  $e_0$ , dem Wassergehalt  $w$  und der Trockendichte  $\rho_d$  andererseits (Bild 98 bis 100).

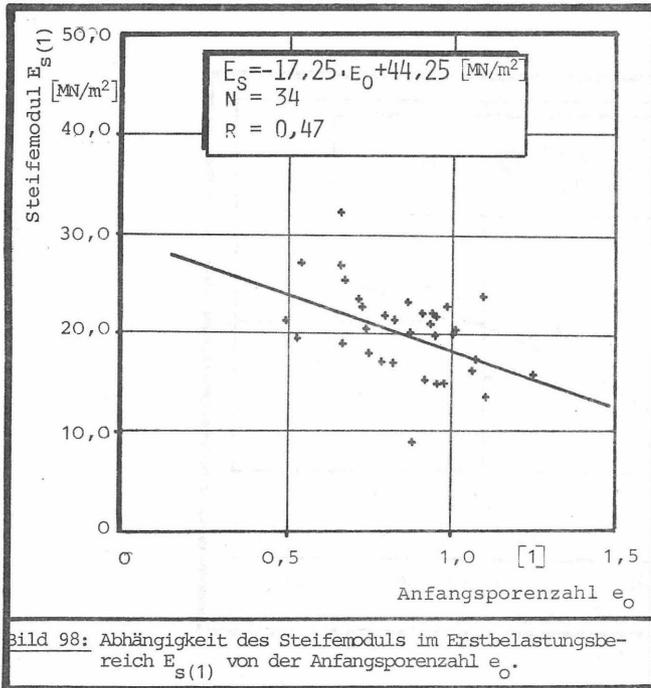


Bild 98: Abhängigkeit des Steifemoduls im Erstbelastungsbereich  $E_{S(1)}$  von der Anfangsporenzahl  $e_0$ .

Die Abhängigkeit des Steifemoduls von diesen bodenmechanischen Kennwerten ist schwächer als diejenige des Kompressionsbeiwertes.

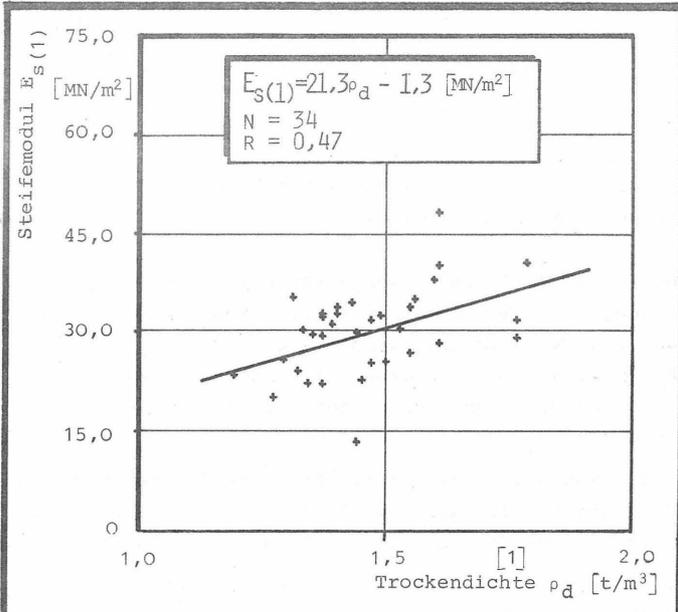


Abb. 99: Abhängigkeit des Steifemoduls im Erstbelastungsbereich  $E_s(1)$  von der Trockendichte  $\rho_d$ .

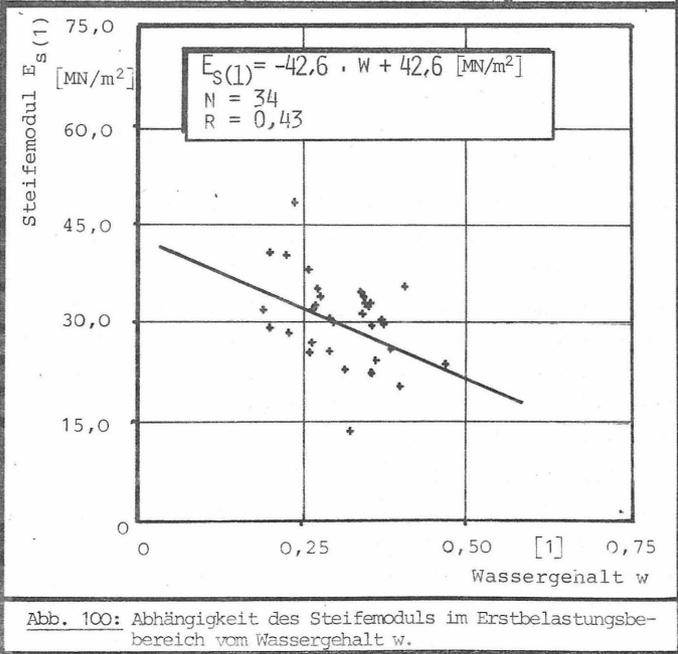


Abb. 100: Abhängigkeit des Steifemoduls im Erstbelastungsbereich vom Wassergehalt w.

der Fließgrenze waren, wie schon beim Kompressionsbeiwert, nicht nachweisbar.

Der Steifemodul im Wiederbelastungsbereich  $E_{s(2)}$  ist abhängig vom Tongehalt, von der Fließgrenze und von der Plastizitätszahl (Bild 101 bis 103).

Es zeigt sich eine Analogie zum Schwellbeiwert  $C_s$ , der ebenfalls von diesen bodenmechanischen Parametern abhängt.

Bodenmechanisch interpretierbar ist die Analogie durch die Annahme, daß der Schwellbeiwert  $C_s$  mit dem Wiederbelastungsbeiwert  $C_w$  identisch ist (LADD 1973).

Im Gegensatz zur Abhängigkeit des Steifemoduls im Erstbelastungsbereich  $E_{s(1)}$  sind die dargestellten Abhängigkeiten des Steifemoduls im Wiederbelastungsbereich  $E_{s(2)}$  überlinear. Die Regressionsrechnung brachte mit der Potenzfunktion der Art

$$y = a x^b$$

in allen Fällen die beste Anpassung an die gemessenen Wertepaare.

Der Einfluß der genannten bodenmechanischen Kennwerte auf den Steifemodul  $E_{s(2)}$  ist stärker, als er es beim Schwellbeiwert  $C_s$  gewesen ist.

Besonders der Tongehalt ist hier von Bedeutung, da die Fließgrenze und die Plastizitätszahl ihrerseits vom Tongehalt abhängen. Geringe Änderungen des Tongehaltes können bereits starke Änderungen des Steifemoduls nachsichziehen.

Die Abhängigkeiten haben unmittelbare Auswirkungen auf die Praxis, da sich die Gründungen auf den Tonen der "Lauenburger Serie" die durch das Bauwerk verursachten Zusatzspannungen überwiegend in der Größenordnung bewegen werden, die dem Wiederbelastungsbereich für den der

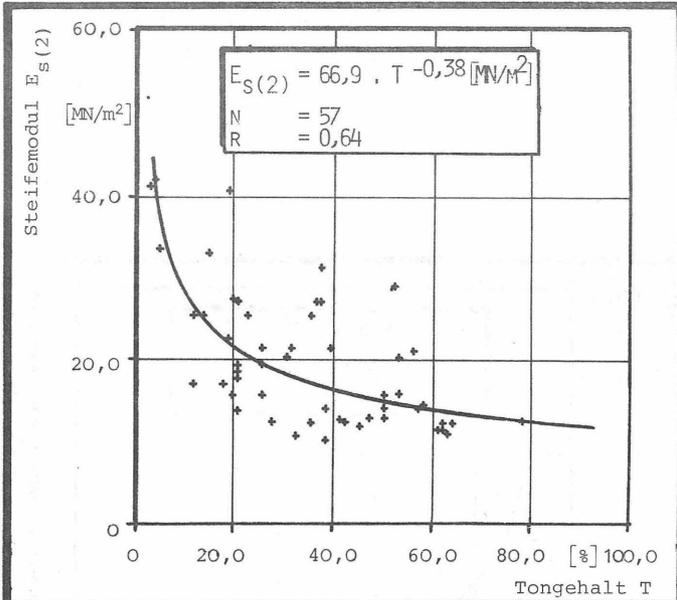


Bild 101: Abhängigkeit des Steifemoduls im Wiederbelastungsbereich  $E_S(2)$  vom Tongehalt T.

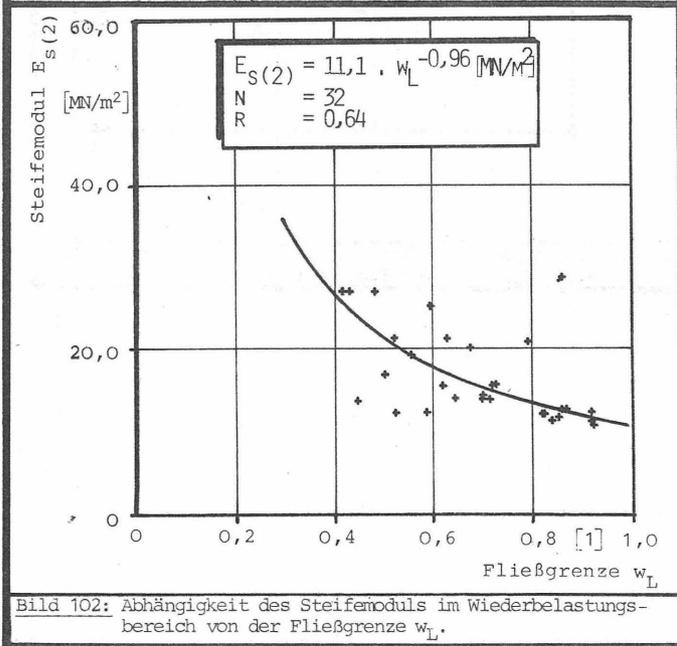
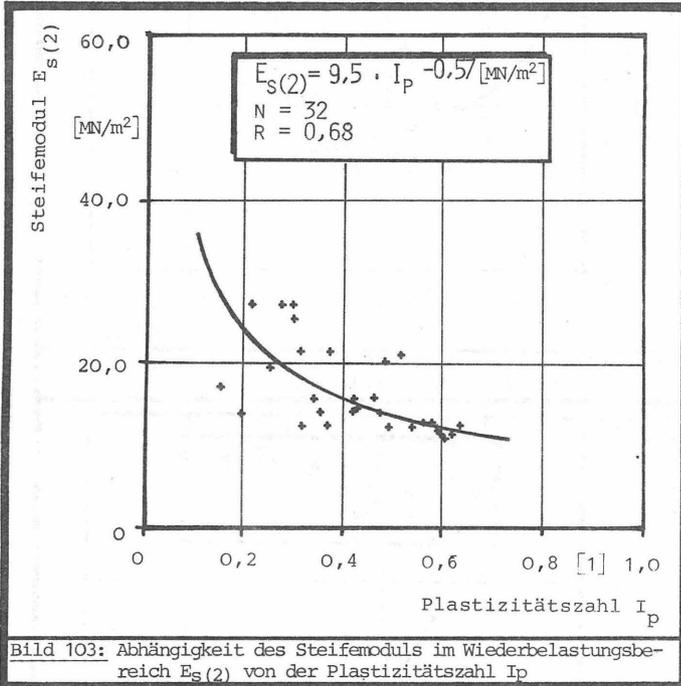


Bild 102: Abhängigkeit des Steifemoduls im Wiederbelastungsbereich von der Fließgrenze  $w_L$ .



Steifemodul  $E_{s(2)}$  bestimmt worden ist, entspricht.

Für die Planung von 60-geschossigen Hochhäusern im Hamburger Stadtteil Sankt Georg ist das einaxiale Formänderungsverhalten des "Lauenburger Tons" untersucht worden, wobei Konsolidationsspannungen bis zu  $6 \text{ MN/m}^2$  aufgebracht wurden (STEINFELD 1969).

Aus den dort angegebenen Konsolidationsspannungs-Steifemodul-Diagramm lassen sich folgende Steifemoduli ablesen:

Wiederbelastungsbereich ( $0,1 - 0,5 \text{ MN/m}^2$ )

$$E_{s(2)} = 12 - 27 \text{ MN/m}^2, \text{ Mittel } E_{s(2)} = 20 \text{ MN/m}^2$$

Erstbelastungsbereich ( $10 - 30 \text{ MN/m}^2$ )

$$E_{s(1)} = 15 - 40 \text{ MN/m}^2, \text{ Mittel } E_{s(1)} = 28 \text{ MN/m}^2.$$

Der Tongehalt wird mit 17 % angegeben, die Plastizitätszahl mit 0,15 bis 0,35. Die Proben wurden mit einer Anfangsporenzahl  $e_0 = 0,86$  und einem Wassergehalt  $w = 0,355$  eingebaut.

Ausgehend von diesen Werten lassen sich die Steifemoduli nach den Regressionsgleichungen (Bild 104) berechnen. Bild 105 gibt einen Vergleich der errechneten und der aus STEINFELD (1969) entnommenen Werte.

Die mit den angegebenen Regressionsgleichungen errechneten Steifemoduli stimmen gut mit den gemessenen Werten überein.

	gesuchte Größe	vorhandene Größe					
		Anfangsporen- zahl $e_0$ [1]	Wassergehalt $w$ [1]	Trockendichte $\rho_d$ [t/m <sup>3</sup> ]	Tongehalt $T$ [%]	Fließgrenze $w_L$ [1]	Plastizitäts- zahl $I_p$ [1]
Erstbelastungs- bereich	Kompressions- beiwert $C_c$ [1]	$0,24e_0 + 0,03$	$0,60 \cdot w + 0,04$	$0,45 \cdot \rho_d^{-2,0}$			
	Steifemodul $E_{s(1)}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$-17,25e_0 + 44,25$	$-42,6 \cdot w + 42,6$	$21,3 \cdot \rho_d^{-1,3}$			
Wiederbelastungs- bereich	Schwellbeiwert $C_s$ [1]				$0,01 + 0,01 \sqrt{T}$	$0,11 + 0,07 \cdot \ln w_L$	$\frac{I_p}{3,74 I_p + 3,31}$
	Steifemodul $E_{s(2)}$ [MN/m <sup>2</sup> ]				$66,9 \cdot T^{-0,38}$	$11,1 \cdot w_L^{-0,96}$	$9,5 \cdot I_p^{-0,57}$
Bild 104: Zusammenstellung der Regressionsgleichungen.							

zu berechnender Wert	Berechnet aus	Formel	Ergebnis Steifemodul $E_s$	Gemessen
Steifemodul im Wiederbelastungsbereich $E_{s(2)}$	Tongehalt $T = 17 \%$	$E_{s(2)} = 66,9 \cdot T^{-0,38}$	$E_{s(2)} = 22,8 \text{ MN/m}^2$	$E_{s(2)} = 12 - 27 \text{ MN/m}^2$ Mittelwert $E_{s(2)} = 20 \text{ MN/m}^2$
	Plastizitätszahl $I_P = 0,15$ $I_P = 0,35$	$E_{s(2)} = 9,5 \cdot I_P^{-0,57}$	$E_{s(2)} = 28,0 \text{ MN/m}^2$ $E_{s(2)} = 17,3 \text{ MN/m}^2$	
Steifemodul im Erstbelastungsbereich $E_{s(1)}$	Anfangsporenzahl $e_o = 0,86$	$E_{s(1)} = -17,3 e_o + 44,3$	$E_{s(1)} = 29,4 \text{ MN/m}^2$	$E_{s(1)} = 15 - 40 \text{ MN/m}^2$ Mittelwert $E_{s(1)} = 28 \text{ MN/m}^2$
	Wassergehalt $w = 0,355$	$E_{s(1)} = -42,6 w + 42,6$	$E_{s(1)} = 27,5 \text{ MN/m}^2$	
Bild 105: Vergleich von gemessenen und mit Regressionsfunktionen errechneten Steifemoduli.				

### 8.3.5 Überkonsolidation

Die Sedimente der "Lauenburger Serie" sind im Laufe ihrer postsedimentären Geschichte durch das nachelster-eiszeitliche Inlandeis belastet worden. Das Inlandeis der Saalevereisung (Drenthe-Stadium), als Vorbelastungspotential der "Lauenburger Serie", soll nach BERNHARD (1962) im Raum Oldenburg-Bremen-Hamburg mindestens 350.m mächtig gewesen sein (Bild 106).

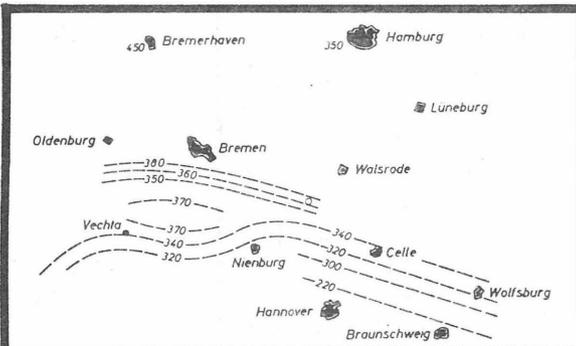


Bild 106: Mächtigkeit des saalezeitlichen Inlandeises (Drenthe-Stadium) nach BERNHARD (1962).

Im westlichen Verbreitungsraum der "Lauenburger Serie" sind die Sedimente nur von dem Eis dieses Drenthe-Stadiums bedeckt gewesen. Wegen dieser Eindeutigkeit wird die Überkonsolidation an Proben betrachtet, die aus diesem Gebiet stammen.

Der Zusammenhang zwischen dem Überkonsolidationsverhältnis OCR und der Entnahmetiefe für die Proben aus dem Gebiet mit nur einfacher Eisbedeckung nach der Elstervereisung (westliches Verbreitungsgebiet) ist signifikant (Bild 107 und 108). Die Korrelationskoeffizienten sind wegen der Streuungen, die sich aus den Ungenauigkeiten bei der Bestimmung der geologischen Konsolidationsspannung ergeben, nur mäßig hoch.

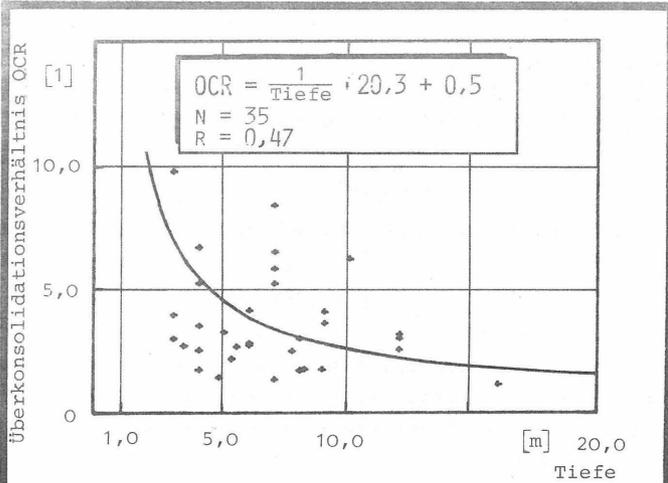


Bild 107: Abhängigkeit des nach CASAGRANDE bestimmten Überkonsolidationsverhältnisses OCR von der Entnahmetiefe

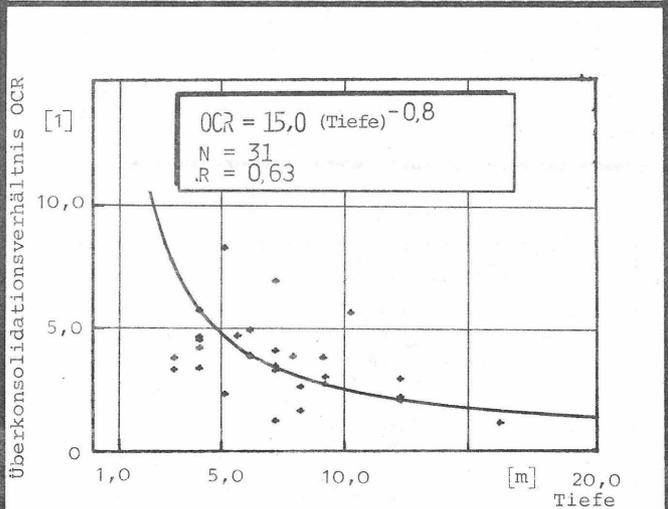


Bild 108: Abhängigkeit des nach VAN ZEIST bestimmten Überkonsolidationsverhältnisses OCR von der Entnahmetiefe

Beide Verfahren zur Schätzung der geologischen Konsolidationsspannung führen zu ähnlichen Beziehungen des Überkonsolidationsverhältnisses zur Entnahmetiefe.

Der Vergleich der Korrelationskoeffizienten zeigt den stärkeren Zusammenhang für die nach dem Verfahren von VAN ZELST geschätzten OCR-Werte.

Das Ergebnis ist in zweifacher Hinsicht überraschend. Zwar haben alle untersuchten Probe OCR-Werte, die größer als 1 sind, und damit Überkonsolidation ausweisen, doch strebt das Überkonsolidationsverhältnis mit zunehmender Entnahmetiefe sehr schnell gegen eins. Ab einer Entnahmetiefe von 15 bis 20 m ist der Ton nur noch gering überkonsolidiert.

Diesem Ergebnis zufolge hat sich die Wirkung der Erstbelastung vor allem auf den oberflächennahen Bereich der "Lauenburger Serie" beschränkt.

STEINFELD (1969) veröffentlichte Druck-Setzung-Linien vom "Lauenburger Ton" aus Hamburg (Bild 109). Aus

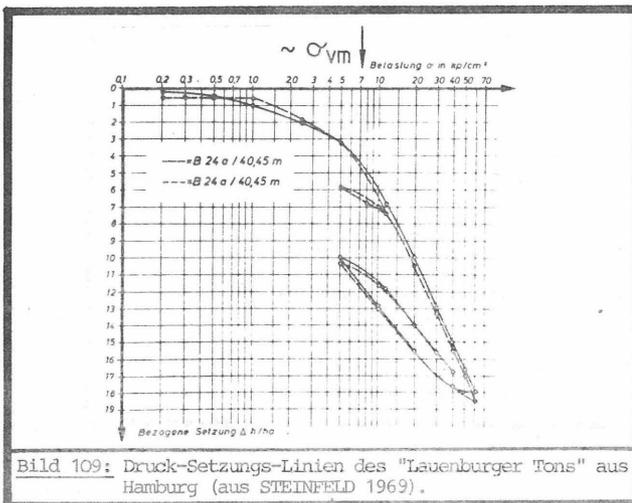


Bild 109: Druck-Setzungs-Linien des "Lauenburger Tons" aus Hamburg (aus STEINFELD 1969).

diesen Kurven läßt sich die maximale geologische Konsolidationsspannung  $\sigma'_{vm}$  zu ca. 700 - 800 kN/m<sup>2</sup> abschätzen. Die Proben sind aus 40 m Tiefe entnommen worden. Bei einer Wichte der überlagernden Sedimente von 19 kN/m<sup>3</sup> errechnet sich die derzeit wirkende Konsolidationsspannung

$$\sigma'_{vo} = 40 \cdot 19 = 760 \text{ kN/m}^2.$$

Daraus läßt sich das Überkonsolidationsverhältnis berechnen:

$$\text{OCR} = \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_{vo}} \cong \frac{800}{760} = 1$$

Selbst wenn man annimmt, die überlagernden Sedimente lägen im Grundwasserbereich und haben eine Wichte von 11 kN/m<sup>3</sup> ergibt sich das Überkonsolidationsverhältnis zu

$$\text{OCR} \cong \frac{800}{40 \cdot 11} \cdot 1,8.$$

Der "Lauenburger Ton" liegt in dieser Tiefe demnach auch in Hamburg normalkonsolidiert, bzw. nur schwach überkonsolidiert vor.

Aus den Beziehungen wird zum zweiten deutlich, daß die Überkonsolidationsverhältnisse insgesamt wesentlich geringer sind, als dies den von BERNHARD (1962) angegebenen Eismächtigkeiten entsprechen würde.

Für die Entnahmetiefe von 5 m ergeben sich z. B. OCR-Werte von ca. 5. In dieser Tiefe unterliegt die Probe unter Annahme einer Wichte des überlagernden Bodens von 19 kN/m<sup>3</sup> einer wirksamen Vertikalspannung

$$\sigma_{vo} = 19 \cdot 5 = 95 \text{ kN/m}^2.$$

Bei einem OCR-Wert von 5 errechnet sich die geologische Konsolidationsspannung

$$\sigma_{vm} = 95 \cdot 5 = 475 \text{ kN/m}^2.$$

Setzt man vereinfachend weiterhin voraus, diese maximale geologische Spannung sei durch reines Eis der

Wichte  $9,0 \text{ kN/m}^3$  verursacht worden, müßte das Eis demnach eine Mächtigkeit von 50 bis 55 m gehabt haben.

Da bei dieser Berechnung die Geröllzone höherer Wichte zwischen dem Boden und dem Eiskörper nicht berücksichtigt worden ist, stellt die errechnete Eismächtigkeit einen maximalen Wert dar.

Die von BERNHARD (1962) angegebenen wesentlich größeren Eismächtigkeiten sind auf der Grundlage der Abschätzung der geologischen Konsolidationsspannung aus Kompressionskurven errechnet worden.

Die Gültigkeit dieser Art der Bestimmung der Inlandeismächtigkeit ist von VIETE (1957) angezweifelt worden. VIETE glaubt, daß sich allenfalls Hinweise auf die ehemalige Inlandeismächtigkeit ergeben können. Er nennt als Unsicherheitsfaktoren die Unkenntnis über die Wichten, des z. T. mit Geröll und Geschiebe durchsetzten Inland-eises, nachträgliche Gefügeänderungen durch eiszeitliche Bodengefrornis und Änderungen des Wassergehaltes der Ablagerungen.

In diesem Zusammenhang stellt sich aber auch die Frage nach der bodenmechanischen Bedeutung des Vorbelastungswertes, der sich aus dem Kompressionsversuch ergibt. Andere Ursachen als eine vormals wirksame Spannung durch eine heute nicht mehr vorhandenen Überlagerung können zu ähnlichen Verhalten des Bodens im Kompressionsversuch führen. LADD (1973) nennt drei mögliche Ursachen:

Änderung der totalen Spannungen  
z. B. durch Gletscher, Abtragung überlagernder Sedimente

Änderung im Porenwasserdruck  
z. B. durch Änderung des Grundwasserhorizontes, Austrocknung

Änderung in der Struktur des Bodens  
z. B. durch sekundäre Konsolidation (Alterung).

Die Ursachen können einzeln oder gemeinsam wirksam werden. Es sind demnach Tone vorstellbar, bei denen sich aus dem Kompressionsversuch eine scheinbare geologische

Vorbelastungsspannung ergibt, ohne daß diese Böden jemals einer größeren wirksamen Spannung durch Überlagerung ausgesetzt waren als heute.

Die geologische Geschichte eines überkonsolidierten Tones läßt sich nach BJERRUM (1973) in folgende einzelne Abschnitte einteilen (Bild 110).

- ▶ Sedimentation unter der Eigenlast, Bildung einer Zusatzauflast (z. B. Eisüberdeckung) →  $\sigma_{vmr}$  (Pkt. a)
- ▶ Sekundäre Setzung (Alterung) → (Pkt. b)
- ▶ Reduktion des Erdauflastdruckes durch Erosion (bzw. Eisschmelze) → (Pkt. c)
- ▶ Sekundäres Schwellen →  $\sigma_{vo}$  (Pkt. d).

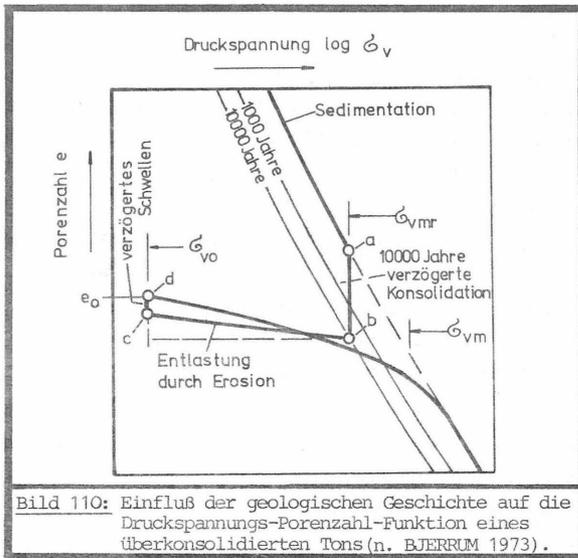


Bild 110: Einfluß der geologischen Geschichte auf die Druckspannungs-Porenzahl-Funktion eines überkonsolidierten Tons (n. BJERRUM 1973).

Im Hinblick auf die Abschätzung der Eismächtigkeit ist besonders die Alterung (sekundäre Konsolidation) von Bedeutung.

Unter einer konstanten Last, die über einen geologischen Zeitraum wirkt, treten in dem belasteten

Boden verzögerte Zusammendrückungen (BJERRUM 1973) auf, die wiederum die Porenzahl verringern (s. Linie a - b, Bild 110). Die Porenzahl nimmt bei der Entlastung (Abschmelzen des Eises) wieder zu (s. Linie b - c). Sie kann sich nochmals durch das sekundäre (verzögerte) Schwellen auf die heute vorhandene Porenzahl  $e_0$  erhöhen (s. Linie c - d).

Bei einer neuen Belastung, z. B. im Kompressionsversuch, wird die Kompressionslinie zunächst den Wiederbelastungsbereich beschreiben und dann in die Erstbelastungslinie einmünden. Hieraus ergibt sich eine wirksame Spannung die einer scheinbaren Vorbelastung entspricht.

Die Größe dieser, der scheinbaren Vorbelastung zugehörigen, wirksamen Spannung ist ein Funktion der Größe der Belastung und der Zeit, während der diese Belastung wirken konnte.

Die Deutung der aus Kompressionskurven erhaltenen geologischen Konsolidationsspannung durch Eismächtigkeiten kann deshalb ohne die Berücksichtigung des Faktors Zeit zu falschen Ergebnissen führen. Das Eis wäre dann nämlich scheinbar umso mächtiger gewesen, je länger es belastend auf ein Sediment wirken konnte.

Den Zweifeln, die VIETE (1957) gegenüber der Umrechnung von geologischen Konsolidationsspannungen in ehemalige Eismächtigkeiten äußert, können damit um die genannten bodenmechanischen Zweifel erweitert werden. Nicht nur die Lastbedingungen (Eiswichte, Wichte und Dicke der Geröllzone) sind unbekannt, sondern ebensowenig kann über den Zeitraum der Eisbelastung ausgesagt werden. Das Eis stellt insgesamt keinen stationären Belastungszustand dar, sondern seine Dicke wird ständigen Änderungen unterworfen sein (Temperatur-

änderungen innerhalb eines Jahreszyklus, langzeitliche Temperaturzyklen usw.).

Für die grundbautechnische Beurteilung eines Bodens ist jedoch nicht die verursachende Last einer Überkonsolidation von Interesse, sondern allein die Folgen, die diese Last in dem Boden verursacht hat und die bis heute diesem Boden eingeprägt geblieben sind. Sie bestimmen das Verhalten dieses Bodens unter neuer Belastung, z. B. durch ein Bauwerk.

#### 8.4 Ausblick

Die Beanspruchung der "Lauenburger Serie" durch das Inlandeis der jüngeren Glaziale hat nicht nur eine Überkonsolidation verursacht, sondern sie hat darüberhinaus zu der bereits beschriebenen Aufschuppung (s. Abschnitt 2.4.1) und zu den ebenfalls genannten Rissen geführt.

Beide Gefügestörungen haben unmittelbare Auswirkungen auf das Spannungs-Verformungsverhalten.

Nach der Sedimentation wird dem Boden beim Konsolidieren eine Spannungsanisotropie eingeprägt, wobei die vertikale Spannung die größere und die horizontale Spannung die kleinere Hauptspannung ist. Verknüpft sind beide durch den Erddruckbeiwert  $k_0$ .

Diesem primären Spannungssystem überlagert sich durch die Auflast des Inlandeises ein neues sekundäres System.

Bei der Entlastung des Tons treten Gefügeänderungen auf. Durch die Spannungsumlagerung entstehen durch Wasserionen - Doppelschichten in den Tonmineralien starke osmotische Drücke in Richtung der Entlastung. Die Tonminerale biegen sich aufgrund des oberflächenparallelen Drucks und der senkrecht dazu wirkenden

Zugkräfte durch.

Wird dabei die Festigkeit des Bodenmaterials überschritten, bilden sich die Scherflächen mit ca.  $45^{\circ} - 50^{\circ}$  gegen die Oberfläche geneigt aus (Bild 111).

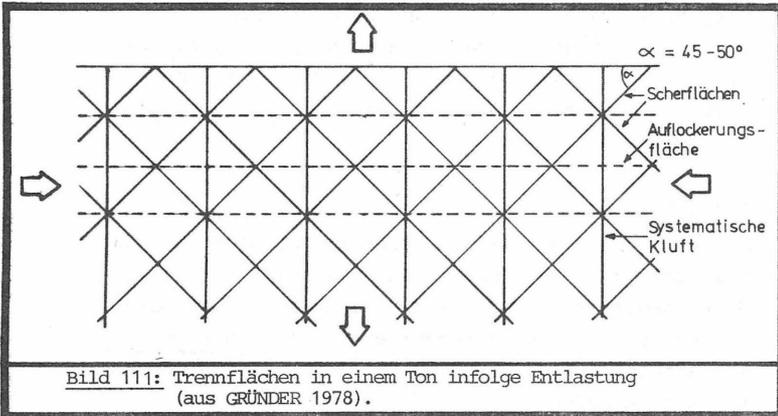


Bild 111: Trennflächen in einem Ton infolge Entlastung  
(aus GRÜNDER 1978).

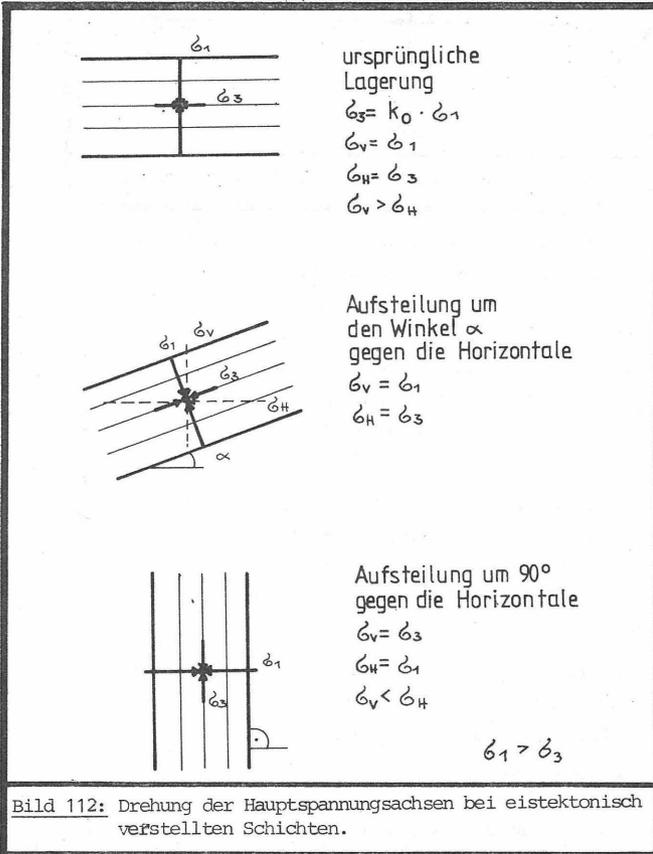
Zusätzlich entstehen oberflächenparallele Ausdehnungsrisse.

Dieser Vorgang dauert so lange an, bis die partiell im Boden auftretenden Spannungsspitzen durch Scherfugen abgebaut worden sind. Ändern sich im Laufe der geologischen Geschichte die Spannungszustände ständig, so können sich ebenfalls kleine, von den genannten Hauptrichtungen abweichende, unregelmäßige Risse ausbilden, wie dies insbesondere beim fetten Ton der "Lauenburger Serie" der Fall ist.

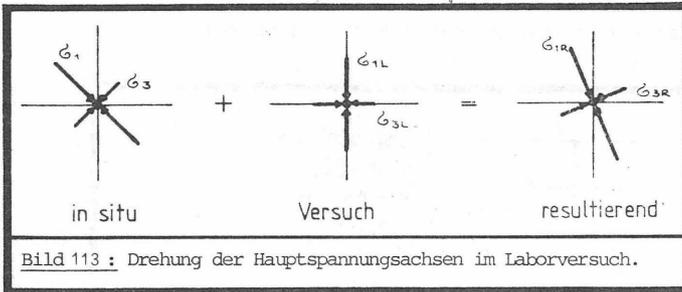
Ein möglicher tertiärer Spannungszustand resultiert aus der Aufschuppung der Schichten.

Im allgemeinen werden die Bodenproben in vertikaler Richtung entnommen und im Labor bei der Ermittlung des Spannungs-Verformungsverhaltens mit senkrecht und waagrecht wirkenden Hauptspannungen belastet. Durch die tektonische Verstellung der Bodenschichten stim-

men die Hauptspannungen der Probe nicht mehr mit der vertikalen bzw. horizontalen Richtung überein (Bild 112).



Bei der Belastung im Laborversuch wird ein neues Hauptspannungssystem aufgebracht, das eine zur ursprünglichen Richtung der Achsen unterschiedliche Orientierung besitzt und damit zu einer Drehung der Hauptspannungsachsen führt (Bild 113).



Die Lage der Hauptspannungsachsen im Ausgangszustand ist im Normalfall nicht bekannt, da die Probe nicht orientiert, z. B. senkrecht zur Schichtfläche, sondern vertikal zur Erdoberfläche entnommen wird. Folgerichtig ist der resultierende Spannungszustand im Laborversuch ebenfalls unbekannt. Diesem Umstand wird im Routineversuch bisher kaum Aufmerksamkeit geschenkt.

Zu der beschriebenen Unsicherheit über das Spannungssystem kommt hinzu, daß durch die Auflast eines Bauwerkes dem Boden ein weiteres Spannungssystem aufgezungen wird, das wiederum zu einer Drehung der Hauptspannungsachsen führen kann.

Die Drehung der Hauptspannungsachsen in einem Boden ist eine Art der Anisotropie, wie LADD (1971) in folgender Systematik deutlich macht.

- ▶ Die natürliche Anisotropie (inherent anisotropy)  
Dieses ist diejenige Anisotropie, die ein Boden infolge seiner besonderen Mikro- bzw. Makrostruktur besitzt. Natürliche Anisotropie zeigen z. B. Bändertone oder Tone mit feinen Haarrissen (Fissuren).
- ▶ Die Anisotropie aufgrund des Spannungssystems (induced anisotropy)

Diese Art der Anisotropie besitzt der Boden sowohl beim Konsolidieren als auch im Versuch während des Abscherens.

Damit ergibt sich eine Abhängigkeit von folgenden Faktoren:

Größe und Richtung der Konsolidationsspannungen

Art des aufgebrachtten Spannungssystems beim Bruch.

Für die zweite Art der Anisotropie sind Größe und Richtung der Hauptspannungsänderungen von entscheidender Bedeutung.

Der Einfluß von Drehungen der Hauptspannungsachsen auf das Festigkeits- und Spannungsverformungsverhalten insbesondere von überkonsolidierten Tonen ist z. B. von CAIRNCROSS & JAMES (1977) und FROSS (1973) dargestellt worden. LADD et al. (1977) geben einen Überblick über Auswirkungen der Anisotropie auf das Festigkeitsverhalten der Böden.

Bei der "Lauenburger Serie" können beide genannten Arten der Anisotropie zusammenkommen.

Ihren Einfluß auf das Spannungs-Verformungs- und das Festigkeitsverhalten nachzugehen, stellt sich als sinnvolle weitere Forschungsaufgabe dar. Hierbei wäre es von besonderem Interesse, die Abhängigkeit der Festigkeitseigenschaften von den verschiedenen Anisotropiearten aufzudecken.

## 9. ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit werden statistische Auswertungen bodenmechanischer Untersuchungen an der "Lauenburger Serie" vorgestellt.

Die Genese und die Tonmineralogie der "Lauenburger Serie", eines in Norddeutschland weit verbreiteten pleistozänen Horizontes toniger Böden, werden beschrieben.

Unter dem Begriff "Lauenburger Serie" wird eine stratigraphisch und genetisch einheitliche Serie feinkörniger Bodenarten verstanden, die im wesentlichen aus den in dieser Arbeit untersuchten petrographischen Einheiten

FETTER TON  
SANDIGER TON  
GEBÄNDERTER TON

besteht.

Diese Serie tritt in nicht zusammenhängenden Rinnen und Becken auf, die ihrerseits häufig mit den im Untergrund liegenden Salzstrukturen in Verbindung stehen.

Die tonmineralogische Zusammensetzung der Sedimentserie ist ziemlich konstant. Durch einen hohen Anteil an quellfähigen Tonmineralien (Montmorillonit, Illit/Montmorillonit-Wechselagerung) weichen die Sedimente von normalen glaziären Sedimenten ab.

Das Vorhandensein dieser quellfähigen Tonmineralien wird ebenfalls auf den Einfluß salinärer Porenwässer zurückgeführt.

Um die bodenmechanischen Untersuchungen mit Hilfe von Elektronenrechnern auswerten zu können, ist ein Programm zur Erfassung der Daten erarbeitet worden, das ebenfalls im routinemäßigen Laborbetrieb Verwendung finden kann.

Zur Auswertung der Daten wurde unter Verwendung verschiedener Verfahren der mathematischen Statistik ein Schema erarbeitet. Probleme bei der Anwendung statistischer Verfahren in der Bodenmechanik werden aufgezeigt.

Für die Auswertung der aus den bodenmechanischen Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse wird die "Lauenburger Serie" in Teilgesamtheiten nach petrographischen Kriterien, wie oben gezeigt und nach geographischen Kriterien unterteilt. Die untersuchten Bodenproben werden als Stichprobenelemente aus diesen Teilgesamtheiten aufgefasst. Die Stichproben werden durch Häufigkeitsverteilungen und statistische Kenngrößen beschrieben.

Anhand der Untersuchungsergebnisse werden die drei Einheiten der "Lauenburger Serie" bodenmechanisch beschrieben. Aufgrund des Vergleichs der Variationskoeffizienten erweist sich die Einheit "fetter Ton" als besonders homogen.

Am Beispiel der Einheit "fetter Ton" wird der Versuchseinfluß auf die Streuungen der bodenmechanischen Kennwerte aufgezeigt.

Die Variationskoeffizienten der bodenmechanischen Kennwerte wurden nach Versuchsgruppen geordnet.

Daraus ergibt sich eine qualitative Unterteilung der Streuungen, die durch die Variationskoeffizienten beschrieben werden, in stoffbedingte (primäre) und versuchsbedingte (sekundäre) Streuungen. Fehleranfällige bodenmechanische Versuche ergeben erwartungsgemäß hohe Variationskoeffizienten der Kennwerte.

Besonders geringe Variationskoeffizienten errechneten sich bei allen Untersuchungen für die Dichte und deren Folgewerte wie Porenzahl und Porenanteil.

Bei der korrelativen Untersuchung verschiedener Variablen war eine Abhängigkeit bodenmechanischer Kennwerte weder von der Entnahmetiefe noch von der geographischen Lage (Entnahmeort) der Proben festzustellen.

Der Einfluß des Tongehaltes auf die Fließgrenze, die Plastizitätszahl und den Glühverlust wird aufgezeigt und quantifiziert.

Bei der Ausrollgrenze dagegen war keine Abhängigkeit vom Tongehalt feststellbar, sie nimmt aber deutlichen Einfluß auf die Konsistenzzahl.

Ein statistisch gut abgesicherter Zusammenhang besteht zwischen dem Wassergehalt und der Dichte der feuchten Probe.

Der Glühverlust beeinflußt die Dichte der feuchten Probe, die sich mit zunehmenden Glühverlust des Bodens verringert.

Das Verhältnis zwischen dem gesondert bestimmten Anteil an organischem Kohlenstoff und dem Glühverlust als Maß für die organischen Bestandteile eines Bodens ergibt sich zu 1 : 4.

Bei der Untersuchung des einaxialen Formänderungsverhaltens sind für die verschiedenen Spannungsbereiche berechneten Steifemoduli durch Häufigkeitsverteilungen und statistische Maßzahlen beschrieben worden.

Die Druck-Setzungs-Linien bzw. Druck-Porenzahl-Linien wurden in einen Erstbelastungs- und einen Wiederbelastungsast zerlegt. Die Steigung des Erstbelastungsastes wurde im Druck-Setzungs-Diagramm durch einen Kompressionsbeiwert ausgedrückt.

Im Wiederbelastungsbereich wurden sinngemäß Steifemodul und Schwellbeiwert errechnet.

Die Abhängigkeiten dieser Parameter von bodenmechanischen Grundkennwerten sind durch Korrelationsanalysen untersucht worden.

Ein guter Zusammenhang zwischen dem Kompressionsbeiwert einerseits und dem Wassergehalt bzw. der Trockendichte andererseits wurde nachgewiesen.

Für den Schwellbeiwert ergaben sich statistisch abgesicherte überlineare Abhängigkeiten vom Tongehalt, der Fließgrenze und von der Plastizitätszahl.

Der Steifemodul im Erstbelastungsbereich der Druckspannungs-Verformungskurve hängt von der Anfangsporenzahl, dem Wassergehalt und der Trockendichte ab.

Allerdings treten die gefundenen linearen Zusammenhänge nur unscharf hervor. Deutlichere Abhängigkeiten überlinearen Charakters zeigen sich dagegen beim Steifemodul im Wiederbelastungsbereich vom Tongehalt, von der Fließgrenze und von der Plastizitätszahl.

Die Überkonsolidierungsverhältnisse wurden mit den geologischen Konsolidationsspannungen errechnet, die sich nach den Verfahren von CASAGRANDE und VAN ZELST ergaben.

Die nach dem Verfahren von VAN ZELST abgeschätzten Werte führten zu einer besseren Korrelation zwischen dem Überkonsolidierungsverhältnis und der Entnahmetiefe als die nach den Verfahren von CASAGRANDE geschätzten Werte. Das Überkonsolidierungsverhältnis nimmt exponentiell mit der Entnahmetiefe ab.

Das Ergebnis der Untersuchung zeigt, daß die Tone der "Lauenburger Serie" in einer Tiefe von 15 bis 20 m nur noch wenig überkonsolidiert sind.



- [10] COROTIS, R.B.; AZZOUZ, A.S. & KRIZEK, R.J. Statistical Evaluation of Soil Index Properties and Constrained Modulus  
Proc. 2<sup>nd</sup> ICASP, 273 - 293, Aachen 1975
- [11] DEWERS, F. Das Diluvium  
in: GRIPP, K.; DEWERS, F. & OVERBECK, F.:  
Das Känozoikum in Niedersachsen  
Geologie und Lagerstätten Niedersachsens, 3, 503 S., 216 Abb., 1 Taf., (Stalling) Oldenburg i. O. 1941
- [12] DUPHORN, K.; GRUBE, F.; MEYER, K.D.; STREIF, H. & VINKEN, R. Area of the Scandinavian Claciation  
- Pleistocene and Holocene -  
Eiszeitalter u. Gegenwart, 23/24, 222 - 250, Öhringen/Württ. 1973
- [13] FINN, W.D.L. & YONG, R.N. Liquefaction of thawed layers in frozen Soils  
J. Teotech. Engng. Div., 1978 1243 - 1255, 8. Abb., 1 Tab., New York 1978
- [14] FROSS, M. Untersuchungen über die Zusammendrückbarkeit vorbelasteter toniger Böden des Wiener Beckens  
Mitt. Inst. Grundb. u. Bodenm. TH Wien, 1973, 11.12, 10 - 21, 10 Abb., 5 Tab., Wien 1973
- [15] GILLOT, J.E. Clay in Engineering Geology  
296 S., 118 Abb., 18 Tab., (Elsevier), Amsterdam 1968
- [16] GRAUPNER, A. Die Tonvorkommen im Weser-Ems-Gebiet  
Ziegelind., 16, 423 - 426, 3 Abb., Wiesbaden 1963
- [17] GRAUPNER, A. Steine und Erden  
Geologie und Lagerstätten Niedersachsens  
5, X, 299 S., 19 Abb., 9 Taf., 2 Kt., (Wurm) Göttingen 1970
- [18] GRIPP, K. Inlandeis und Salzaufstieg  
Geol. Rdsch. 40., 74 - 81, 2. Abb., Stuttgart 1952

- [19] GRIPP, K.                    Erdgeschichte von Schleswig-Holstein  
411 S., 63 Abb., 57 Taf.,  
11 Tab., 3 Kt., (Wachholtz)  
Neumünster 1964
- [20] GRUBE, F.                    Baugeologie der Lockergesteine im weiteren Hamburger Raum  
in: SCHRÖDER, H. (Ed.):  
Grundbautaschenbuch, 1,  
Ergänzungsband, 109 - 160,  
26 Abb., (Ernst) Berlin 1971
- [21] GRÜNDER, J.                Struktureller Aufbau und geomechanische Eigenschaften eines stark überkonsolidierten Tones - am Beispiel des Feuerletzens -  
Veröff. Grundbauinst. Landesgewerbeanstalt Bayern, H. 31,  
100 S., 79 Abb., 8 Tab.,  
Nürnberg 1978
- [22] HOLTZ, R.D. &                Statistical Evaluation of  
SCHRODE, J.E.                Soils Test Data II:  
Factor Analysis.  
Proc. 2<sup>nd</sup> ICASP, 339 - 364,  
Aachen 1975
- [23] JÄNKE, S.                    Einflüsse auf die Ergebnisse von Kompressionsversuchen im Ödometer  
Veröff. Grundbauinst. Landesgewerbeanstalt,  
Nürnberg 1975
- [24] JOHANNSEN, A.                Salinartektonische Einflüsse auf die Ausbildung und Verbreitung tertiärer und quartärer Sedimente in Ost-Holstein  
Meyniana 21, 33 - 39, 6 Abb.  
Kiel 1971
- [25] JOHANNSEN, A. &            Gologie und Grundwasservorkommen im schleswig-holsteinischen Unterelbe-Gebiet, 21  
LÖHNERT, E.                Meyniana 41 - 66, 18 Abb.  
Kiel 1971
- [26] JOHNS, W.D.                Quantitative estimations of clay minerals by diffraction methods  
GRIM, R.E. &                J. Sediment. Petrol, 24,  
BRADLEY, W.F.                242 - 251. 3 Abb., (Lawrence)  
Kansas 1954

- [27] KAHL, R.W. Geologie und Bodenmechanik des Rheinischen Schluiffs Mitt. Inst. f. Verkehrswasserbau, Grundbau u. Bodenmechanik (VGB), TH Aachen, H. 54, 218 S., 81 Abb., 19 Tab., Aachen 1972
- [28] KEZDI, A. Handbuch der Bodenmechanik, 1, Bodenphysik, 259 S., 400 Abb., (Verl. f. Bauwesen) Berlin 1969
- [29] KHOO, F. Die Sedimentpetrographie des Mindel-Riß-Interglazial-Tones von Wacken, Schleswig-Holstein, insbesondere die Rotfärbung und das Vorkommen von 2M-Muskowit-Ooiden  
N. Jb. Geol. Paläont. Mh. 1972, 344 - 355, 6 Abb., Stuttgart 1972
- [30] KOCH, E. Muldenbildung an den Flanken der Struktur von Langenfelde vom Miozän bis in die Jetztzeit  
Geol. Jb., 68, 133 - 140, 3 Abb., Hannover 1953
- [31] KOCH, E. Vom Untergrund Hamburgs  
Mitt. Geol. Staatsinst. Hamburg, 23, 10 - 17, 8 Abb., Hamburg 1954
- [32] KÖNIG, G. Die Ermittlung der bodenmechanischen Kennwerte  
Bauing. 44, 263 - 266, 5 Abb., 5 Tab., Berlin 1969
- [33] KORHONEN, K.H. Über die Zusammendrückbarkeit von Bodenarten  
Proc. Europ. Conf. Soil Mech. Found. Engng. Vol. 1, 37 - 40, 2 Abb., 3 Taf., Wiesbaden 1963
- [34] KREYSZIG, E. Statistische Methoden und ihre Anwendung  
451 S., (Vandenhoeck & Rupprecht) Göttingen 1975
- [35] LADD, C.C. Estimating settlements of structures supported on cohesive soils  
Research Report R 7/1-2, No. 272, Dep. of Civil Engng. MIT, Cambridge, Mass. 1973

- [36] LADD, C.C. Strength parameters and stress-strain behavior of saturated clays  
Research Report R 71 - 23,  
Soils Public. 278, MIT,  
Cambridge, Mass. 1971
- [37] LADD, C.C.; Stress-Deformation and Strength  
FOOT, R.; characteristics  
ISHIHARA, K.; Proc. 9<sup>th</sup> Conf. Soil Mech.  
SCHLOSSER, F. & Found. Engng., Vol.2  
POULOS; H.G. 421 - 494, 57 Abb., 4 Tab.,  
Tokio 1977
- [38] LAMBE, T.W.& Soil mechanics  
WHITMAN, R.V. 553 S., (Wiley&S.) N. York,  
London, Sydney, Toronto 1969
- [39] LIPPMANN, F. Röntgendiagramme von Ton-  
mineralien mit unregelmäßiger  
Wechselagerung Glimmer-  
Montmorillonit  
Fortschr. Miner., 38, 176 - 182,  
5 Abb., Stuttgart 1960
- [40] LÖHNERT, E. Glaziäre Rinnen im Raum Ham-  
burg und ihre Beziehungen zum  
präquartären Untergrund  
Abh. Verh. Nat. Ver. Hamburg,  
N. F., 10, 47 - 51, Hamburg  
1966
- [41] LUMB, P. Application of Statistics in  
Soil Mechanics  
in: LEE, i. K. (Ed.): Soil  
Mechanics - New Horizons  
286 S., (Newness-Bütterworths)  
London 1974
- [42] MARSAL, Statistische Methoden für Erd-  
wissenschaftler  
152 S., (Schweizerbart),  
Stuttgart 1967
- [43] MEYER, K.D. Das Pleistozän im Gebiete  
Lauenburg/Elbe unter beson-  
derer Berücksichtigung des  
Elbsteiluferprofils  
57 S., 14 Abb., 4 Anl.,  
wiss. Arb. für das 2. Staats-  
examen für Geologen,  
Hannover 1965 (ungedruckt)

- [44] MILLOT, G. Geology of clays  
- Weathering, sedimentology,  
geochemistry, 429 S. 85 Abb.,  
(Springer) New York, Heidel-  
berg Berlin 1970
- [45] MORSE, R.K. The importance of proper soil  
units  
Proc. 1st Int. Conf. Appli-  
cations Statistics & Probab.  
Soil & Structural Engng.,  
347 - 356, Hongkong 1971
- [46] MÜLLER, G. Die Ergebnisse der Unter-  
suchungen auf Blatt Lauen-  
burg (Elbe) im Sommer 1899  
Jb. kg. preuß. geol. Landes-  
anst., 20, 50 - 58, Berlin  
1899
- [47] MÜLLER, G. Methoden der Sedimentunter-  
suchung  
in: ENGELHARDT, W. von,  
FÜCHTRAUER, H. & MÜLLER, G.  
(Ed.): Sediment-Petrologie,  
1, 303 S., 91 Abb., 2 Taf.,  
30 Tab., 3 Anl., (Schweizer-  
bart), Stuttgart 1964
- [48] NIE, N.H.; SPSS-Statistical Package for  
BENT, D.H. & the Social Sciences 343 S.,  
HULL, C.H. (McGraw-Hill) New York 1970
- [49] NIEDERMAYER, H. Gliederung und Ausbildung des  
Quartärs im Niederelbegebiet  
Max-Richter-Festschrift,  
73 - 81, 1 Abb., Clausthal-  
Zellerfeld 1965
- [50] NISHIDA, Y. A brief note on compression  
index of soil  
Proc. Am. Soc. Civil Engng.,  
82, 1027/1-14, 9 Abb.,  
New York 1956
- [51] PETTIJOHN, F. J. & Atlas and Glossery of primary  
POTTER, P. E. sedimentary structures  
370 S., 117 Taf., (Springer)  
Berlin 1964

- [52] RUCK, K.W. Baugeologie der Lockergesteine im Nord- und Ostseeraum in: SCHRÖDER, H. (Ed.): Grundbautaschenbuch, 1, Ergänzungsband, 161 - 217, 41 Abb., 2 Taf., (Ernst) Berlin 1971
- [53] RUPPERT, F.R. Sedimentpetrographische und bodenmechanische Untersuchungen im Lauenburger Ton sowie seine Verbreitung zwischen Delmenhorst und Oldenburg, 77 S., 17 Abb., 17 Taf., 3 Tab., 18 Anl., (Dipl. Arbeit), Braunschweig 1974 (unveröffentlicht)
- [54] RUPPERT, F.R. & RAABE, E. W. Factor analysis as a basis for regression procedures with soil parameters Proc. 3<sup>rd</sup> ICASP, 59 - 70, 5 Abb., Sydney 1979
- [55] RUPPERT, F.R. & SCHNEIDER, W. Hinweise auf Zusammenhänge zwischen der Genese des Lauenburger Tons (Elster-Glazial) und den Salzstrukturen Norddeutschlands aufgrund tonmineralogische Untersuchungen N. JB. Geol. Paläont. Mh., 1975, 606 - 627, 12 Abb., 2 Tab., Stuttgart 1975
- [56] SACHS, L. Angewandte Statistik 545 S., 59 Abb., 190 Tab., (Springer) Berlin 1974
- [57] SCHMERTMANN, J.H. The undisturbed consolidation behavior of clay Proc. Am. Soc. Civil Engng., 120, 1201 - 1233, 21 Abb., 2 Tab., New York 1955
- [58] SCHMIDT, K. Erdgeschichte 246 S., 94 Abb., 16 Tab., (de Gruyter) Berlin, New York 1972

- [59] | SCHUCHT, F. | Der Lauenburger Ton als leitender Horizont für die Gliederung und Altersbestimmung des norddeutschen Diluviums  
Jb. kgl. preuß. geol. Landesanst., 29, Teil 2, 130 - 150, 1 Kt., Berlin 1908
- [60] | SCHULTZE, E. | Bodenmechanik und Statistik in: Dt. Ges. Erd- und Grundbau e. V., Essen (Ed.): Vorträge der Baugrundtagung 1972 in Stuttgart, 159 - 178, 7 Abb., Essen 1972
- [61] | SCHULTZE, E. & MUHS, H. | Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten  
722 S., 782 Abb., 1 Taf., (Springer) Berlin, Heidelberg, New York 1967
- [62] | SCHWARZE, J. | Statistik für Bauingenieure  
Verlesungsumdruck des Lehrstuhl f. Statistik u. Ökonometrie, TU Braunschweig 1975
- [63] | SINDOWSKI, K.H. | Das Quartär im Untergrund der Deutschen Bucht (Nordsee) - Eiszeitalter u. Gegenwart, 21, 33 - 46, 8 Abb., Öhringen 1970
- [64] | SKEMPTON, A.W. | The colloidal "Activity" of clays  
Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng. 57 - 61, 4 Abb., 2 Tab., Zürich 1953
- [65] | SKEMPTON, A.W. & HUTCHINSON, J. | Stability of natural slopes and embankment foundations  
Proc. 7<sup>th</sup> Int. Conf. Soil Mech. Found Engng., Plate of the art report, 291 - 340, 35 Abb., Mexico 1969
- [66] | SMOLTZYK, U. | Bodenmechanik zwischen Naturwissenschaft und Technik  
Bauing., 47, 73 - 80, 15 Abb., Berlin 1972
- [67] | STEINFELD, K. | Zur Gründung von 60zig geschossigen Hochhäusern in Hamburg  
in: Dt. Ges. Erd- und Grundbau e. V., Essen (Ed.): Vorträge der Baugrundtagung 1968 in Hamburg, 35 - 91, 32 Abb., Essen 1969

- [68] TERZAGHI, K.           Stability of Slopes of Natural Clay  
Proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng., 1, 161 - 165, 3 Abb., 2 Tab., Cambridge, Mass. 1936
- [69] TERZAGHI, K.           The influence of modern soil studies on the design and construction of foundations  
Proc. Building Research Congress, Div. 1, Part III, 139 - 145, London 1951
- [70] TERZAGHI, K. & PECK, R.           Soil Mechanics in Engineering Practice  
729 S., (J. Wiley & Grus), New York 1967
- [71] ÜBERLA, A.            Faktorenanalyse  
399 S. (Springer) Berlin, Heidelberg, New York 1971
- [72] VALETON, J.; LÖHNERT, E. & KHOO, F.            Genese pleistozäner Rottone in Raum Hamburg  
Mitt. Geol. Paläont. Inst. Univ. Hamburg, 41, 171 - 184, 3 Tab., 11 Taf., Hamburg 1972
- [73] VIETE, G.            Kritische Bemerkungen zur Bestimmung der pleistozänen Inlandeismächtigkeit mit Hilfe von Durchsetzungsmessungen  
Eiszeitalter und Gegenwart, 8, 97 - 106, 2 Tab., Öhringen/Württ. 1957
- [74] VIETE, G.            Zur Entstehung der galzigenen Lagerungsstörungen unter besonderer Berücksichtigung der Flözdeformationen im mitteldeutschen Raum  
Freiberger Forsch.-H., C 78, 1 - 257, 9 Abb., 30 Taf., 18 Beil., 5 Tab., Berlin 1960
- [75] WEDEKIND, H.        Datenorganisation  
272 S., (de Gruyter), Berlin 1972

- [76] WOLSTEDT, P. & DUPHORN, K. Norddeutschland und angrenzende Gebiete im Eiszeitalter 500 S., 90 Abb., 27 Tab., (Koehler), Stuttgart 1974
- [77] WOLFF, W. Geologie der nordwestdeutschen Tonlager Tonind. 7, 53, 1076 - 1078, 4 Abb., 1929
- [78] WONG, S.T & BRENNER, R.P. A multivariate analysis of Bangkok Clay Proc. 3<sup>rd</sup> ICASP, 247 - 262, 2 Abb., 12 Tab., Sydney 1979

#### NORMEN

- DIN 1054 Baugrund - Zulässige Belastung des Baugrunds, 1976
- DIN 1080, Bl. 6 Begriffe, Formelzeichen und Einheiten im Bauingenieurwesen - Bodenmechanik und Grundbau, 1976
- DIN 4021, Bl. 1 Baugrund - Erkundung durch Schürfe und Bohrungen sowie Entnahme von Proben, Aufschlüsse im Boden, 1971
- DIN 4022, Bl. 1 Baugrund und Grundwasser, Benennen und Beschreiben von Bodenarten und Fels, Schichtenverzeichnis für Untersuchungen und Bohrungen ohne durchgehender Gewinnung von gekernten Proben, 1969
- DIN 4023 Baugrund und Wasserbohrungen - Zeichnerische Darstellung der Ergebnisse, 1975
- DIN 18 121, Teil 1 Baugrund; Untersuchung von Bodenproben - Wassergehalt, Bestimmung durch Ofentrocknung, 1976
- DIN 18 122, Teil 1 Baugrund; Untersuchung von Bodenproben - Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze, 1976

- |                   |  |
|-------------------|--|
| DIN 18 123        | Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Korngrößenverteilung, Vornorm 1971  |
| DIN 18 124, Bl. 1 | Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung der Korndichte mit dem Kapillarpyknometer, Vornorm 1973                            |
| DIN 18 125, Bl. 1 | Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung der Dichte des Bodens, Labormethoden, Vornorm 1972                                 |
| DIN 18 125, Bl. 2 | Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung der Dichte des Bodens, Feldmethoden, Vornorm 1975                                  |
| DIN 55 302, Bl. 1 | Statistische Auswertungsverfahren - Häufigkeitsverteilung, Mittelwert und Streuung; Grundbegriffe und allgemeine Rechenverfahren, 1970 |

---

ICASP = Intern. Conf. on Applications of  
Statistics and Probability to  
Soil and Structural Engineering