Veränderung des Scher- und Kompressionsverhaltens von Ap-Horizont-Material aus Löß-Parabraunerden durch Kalkung

F. Beese, B. Meyer*** und *J. Pollehn****

* Institut für Bodenkunde und Waldernährung, Büsgenweg 2, D 3400 Göttingen-Weende; ** Institut für Bodenkunde, von-Siebold-Str. 4, D 3400 Göttingen; *** Düngekalk-Hauptgemeinschaft, Annastr. 67–71, D 5000 Köln

Herrn Prof. *Dr. Dr. h. c. F. Scheffer* zum 80. Geburtstag gewidmet

Eingegangen: 14.11.1978
In der vorliegenden Form angenommen: 30.11.1978

Zusammenfassung – Summary

Standardisierte Formlinge aus Löß-Parabraunerde-Ap-Horizontmaterial wurden ohne und mit einem in 2 Stufen gesteigerten Kalkzusatz bei 3 Feuchtestufen Scher- und Kompressionstests bei steigender Normalspannung unterzogen. Die Kalkung bewirkte generell insbesondere eine Erhöhung des Anfangsscherwiderstandes und auch eine Verminderung der Kompressibilität. Diese Gefügestabilisierende Wirkung wird auf das Flocken der Tonsubstanz an den Berührungsstellen der Schluffkörner in der Bodenmatrix zurückgeführt.

Change of shear resistance and compressibility of Ap-horizon material from loess-derived Parabraunerde

Standardized artificial bodies prepared from soil material of a loessderived parabraunerde-Ap-horizon were tested with respect to their shear resistance and compressibility. The noncalcareous material was enriched with lime (2 stepts), soil humidity changed (3 steps) and the normal pressure increased (4 steps). Liming generally caused an increased initial shear resistance and led to a lowering of compressibility. The effect of lime is interpreted as an result of flocculation of the clay particles at the points of contact between silt grains in the soil matrix. The problems of transferring those results to the field are discussed.

Problemstellung

Die $CaCO_3$-freien austauschgepufferten Ap-Horizonte von Löß-Parabraunerden bereiten bei der ackerbaulichen Nutzung aufgrund der Labilität ihrer Struktur häufig Schwierigkeiten. Sie äußern sich in Verdichtungen als Folge mechanischer Beanspruchung des Bodens im feuchten Zustand – Kompressions-, Vibrationsverdichtungen – und als Verschlämmungen durch Niederschläge. Die Neigung zu mangelnder Stabilität der Struktur liegt im wesentlichen in der Dominanz der Schluff-Fraktion in diesen Böden begründet, die das Bodengerüst, die Matrix, bildet. Die demgegenüber geringen Ton- und Humusanteile sind in diesem Gerüst

verteilt. Sie finden sich bevorzugt an den Kontaktstellen der Schluffkörner und spielen im Hinblick auf deren gegenseitige Verschiebbarkeit eine erhebliche Rolle.

Als eine der wichtigsten Maßnahmen zur Erhöhung der Strukturstabilität dient die Kalkung. Die beiden vermuteten Mechanismen der Kalkwirkung bestehen in der Flockung der Tonteilchen und damit der Erhöhung des Zerteilungswiderstandes der Ton-Aggregate an den Berührungsstellen der Schluffkörner und – bei Anreicherung von freiem Kalk – auch in der Vermörtelung der Ton-, Schluff- und Sandkörner durch umgefälltes $CaCO_3$.

Abbildung 1: Phyllosilikat-Ton in Aggregaten mit relativ kompakter „Diffluenz"-Struktur. Anhäufung an Schluff- bzw. Sandkorn-Kontakten in der Bodenmatrix. Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme D. Wamhoff. Winkelmarke 1 µm

Figure 1: Phyllosilicate clay in aggregates of relatively compact diffluent structure. Accumulated in the contact meniscus between sand or silt grains. Scanning electron microscope photo made by D. Wamhoff. Angle mark 1 µm

Abb. 1 zeigt den Ausschnitt aus einem Paket von Tonplättchen in einer für kalkfreie B_t-Horizonte typischen dichten Aggregierung. Solche Pakete liegen an den Berührungsstellen, in den Kontaktmenisken, zwischen je zwei Schluff- oder Sandkörnern vor. Bei Befeuchtung und Scherung kann dieses Aggregat in sich zergleiten. „Flockung" durch Ca-Ionen nach erfolgter Kalkung heißt innere Verfestigung und strukturelle Stabilisierung des Aggregatverbandes. Eine Strukturveränderung im Sinne eines „Flockungsgefüges" kann dagegen nur langsam eintreten. Die Literatur zur Frage Kalk und Bodenstruktur ist umfangreich und wird an dieser Stelle nur beispielsmäßig dargestellt. Folgende direkte oder indirekte Wirkungen zeigte die Kalkanwendung bei Ackerböden:

1. Erhöhung der Aggregatstabilität (*Czeratzki*, 1957, 1972; *Schachtschabel* u. *Hartge*, 1958; *Wolkewitz*, 1960) und der Adhäsion (*Wolkewitz*, 1963).

2. Erhöhung der Wasser-Infiltrationsrate (*Wichtmann*, 1972) und Stabilisierung

der durch Bearbeitung geschaffenen Sekundärporen (*Scheffer*, 1972, *Scheffer* u. *Meyer*, 1972).

3. Verringerung des Eindringwiderstandes (*Becher*, 1972).

4. Verringerung der Verdichtbarkeit (*Sommer*, et al. 1972, *Sommer* 1972) in Zusammenhang mit der Erhöhung der Kompressions- und Scherwiderstände.

Hinsichtlich des letzten Punktes bestehen jedoch keine einheitlichen Auffassungen in der Literatur. So konnten *Schaffer* (1969, 1970) und *Schaffer* u. *Mosebach* (1972) sowie *Harrach* et al. (1972) keine Wirkung des Kalks auf das Kompressions- und Scherverhalten der untersuchten Böden feststellen. Doch abgesehen von der häufig nicht klaren Deklaration des durch die Kalkung erreichten tatsächlichen „Kalkzustandes" der Testböden stützten sich letztgenannte Untersuchungen im wesentlichen auf Messungen im Felde. Sie lassen die Frage offen, ob die Nichtbeobachtung einer tatsächlich durch Kalkung bewirkten Vergrößerung der Kompressions- und Scherwiderstände nur darauf beruht, daß die durch Kalk bewirkte Gefügeänderung (Auflockerung, Porenvergröberung, Reduktion der Korn-Kontaktstellen) unter 4. überkompensiert.

Material und Methoden

Die Untersuchungen wurden mit einer homogenisierten luftgetrockneten kalkfreien Mischbodenprobe aus dem Ap-Horizont (11) einer Löß-Parabraunerde durchgeführt. Die Korngrößenverteilung findet sich in Tab. 1, die Tonmineralzusammensetzung des Mittel- und Feintons in Tab. 2 und die Ionenbelegung der Austauscher in Tab. 3.

Tabelle 1: Korngrößenzusammensetzung des Testbodens (%)
Table 1: Grain size distribution of the soil tested (%)

Sand	Schluff U				Ton T	
S	güg	güf	mU	fU	gT	m, fT
> 63 µm	63–36	36–20	20–6	6–2	2 0,6	< 0,6 µm
5,7	16,9	47,3	14,4	3,6	3,1	8,9
6		82			12	

Tabelle 2: Mineralzusammensetzung (%) der Tonfraktion < 0,6 µm ∅
Table 2: Mineral composition (%) of the clay fraction < 0,6 µm ∅

Kaolinit	Illit	Vermiculit	Montmorillonit	Chlorit
25	45	10	15	5

Tabelle 3: Kationenaustauschkapazität (KAK), Ionenbelegung der Austauscher (*Mehlich, Schachtschabel*), pH 0,1 n $CaCl_2$, Flockungsschwellenwert (mg Ca/l) und Ca-Konzentration der Gleichgewichtsbodenlösung (GBL 1:2,5) des Testbodens

Table 3: Cation exchange capacity (CEC), exchangeable cations (methods after *Mehlich, Schachtschabel*), pH 0,1 n $CaCl_2$, flocculation threshold value and Ca-concentration of soil equilibrium solution (GBL 1:2,5) of the soil tested

	mval/100 g B.	%		
			H (Ca-acetat)	4,5 mval/100 g Boden
KAK	11,4	100	pH (H_2O)	5,9
Ca^{++}	7,1	62	pH ($CaCl_2$)	5,6
Mg^{++}	0,5	6	Flockungs-Schwellenwert	6,5 mg ca/l (pH 6,5)
K^+	0,7	4	Ca (GBL)	2,0 mg Ca/l
Na^+	0,3	3		
H^+ (rechn.)	2,8	25	C	1,1 %

Die für die Untersuchung benötigten Bodenformlinge wurden aus der aus Aggregaten bestehenden Siebfraktion 0,5 – 1,0 mm des Bodenmaterials hergestellt. Vorversuche hatten ergeben, daß sich im Hinblick auf die Porenverteilung mit dieser Fraktion die homogensten Formlinge herstellen ließen.

Zur Herstellung der Formlinge wurde eine gleiche Gewichtsmenge trockener Aggregate in einen Zylinder mit dem Durchmesser der Scher- bzw. Kompressionsbuchsen des Casagrande-Gerätes gefüllt. Dieser Zylinder (vgl. Abb. 2) stand auf einer Absaugvorrichtung, mit welcher überschüssiges aus der Probe austretendes Wasser entfernt werden konnte. Anschließend wurden die Aggregate befeuchtet und dann gleichmäßig mit einem Stempel auf die gewünschte Dichte (TD 1,5 $g \cdot cm^{-3}$) gebracht. Bei einer Dichte des Festsubstanzanteils von 2,65 $g \cdot cm^{-3}$ errechnet sich ein Gesamtporenvolumen (GPV) von 43,8 Vol. %. Abbildung 3 zeigt die Ψ-Θ-Beziehung der so hergestellten Bodenformlinge. Dargestellt sind die Mittelwerte aus 6 Probenparallelen. Die Charakteristik läßt den für Lößböden typischen Verlauf erkennen. Die Streuung war sehr gering.

An Varianten wurden verglichen:

1. Drei *Kalkstufen:*

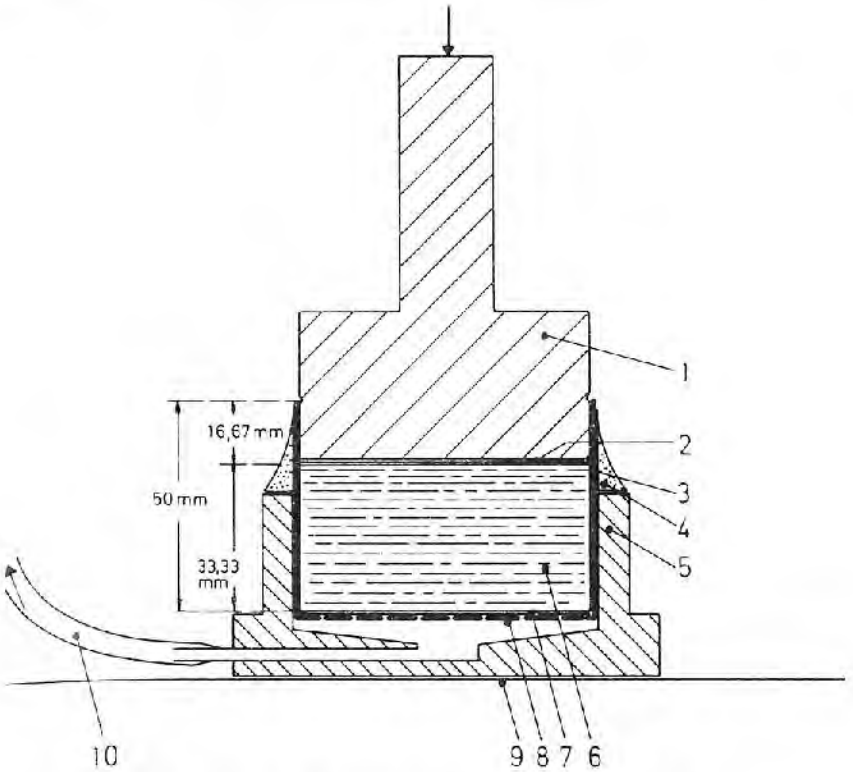
0 Ausgangsboden

1 Zugabe einer $CaCO_3$-Menge, die nach *Schachtschabel* (pH Ca-acetat) gerade zur Absättigung der Austauscher mit Ca^{++} ausreichen würde (Stufe: „Neutralisation").

2 Zugabe einer $CaCO_3$-Menge, welche neben der Absättigung der Austauscher (Stufe 2) zu einer Anreicherung von 1 % $CaCO_3$ im Boden führt (Stufe: „Kalkanreicherung").

Die benötigte Kalkmenge wurde den Aggregaten in Form von $CaCO_3$-Pulver vor dem Einfüllen in den Verdichtungszylinder beigemischt.

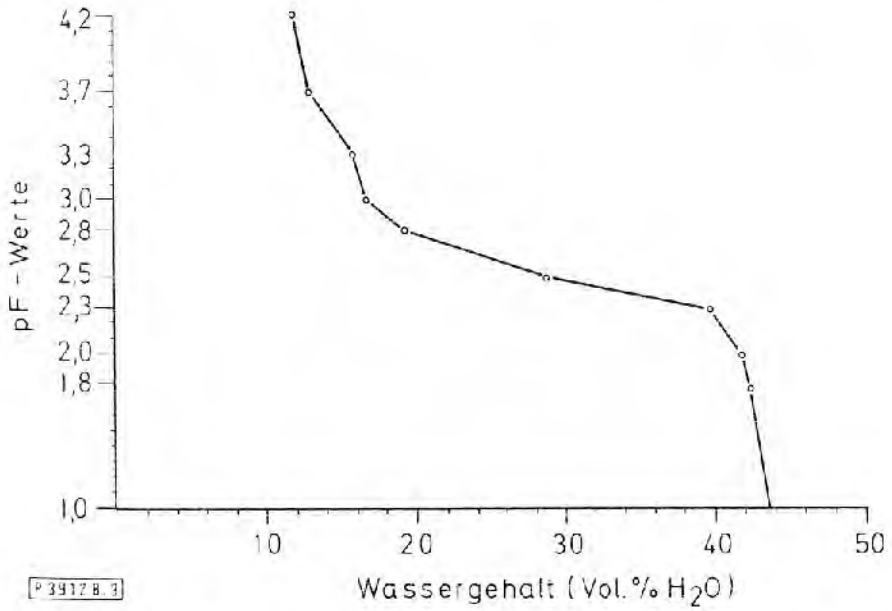
Zur Erzielung einer Vermörtelung durch $CaCO_3$-Umfällung und -Anreicherung an den Kontaktstellen war ein Wechsel von Austrocknung und Befeuchtung der Bodenformlinge nötig. Deshalb wurden diese einem dreimaligen Cyclus von Befeuchtung (ca. 0,3 bar = $3 \cdot 10^4 N \cdot m^{-2}$) und anschließender Lufttrocknung unterworfen. Um in den feuchten Phasen



1 Plastikstopfen m. Kerbe
2 Filterpapier
3 Stechzylinder
4 Dichtungsmasse
5 Plastikhülse
6 Bodenprobe
7 Filterpapier
8 poröse Platte
9 Arbeitsplatte
10 Schlauch zur Wasserstrahlpumpe

P 3917 B. 2

Abbildung 2: Gerät zur Herstellung der Formlinge für Scher- und Kompressionstests.
Figure 2: Apparatus for preparation of soil bodies shear and compression tests



P 3917 B. 3

Abbildung 3: Wassergehalts- Saugspannungs-Charakteristik der Formlinge
Figure 3: Water content/matric suction characteristic of soil bodies

eine maximale Auflösung des zugegebenen $CaCO_3$ zu erreichen, wurden die Proben jeweils 24 Stunden unter CO_2-Atmosphäre ($PCO_2 = 1$ bar $= 10^5 N \cdot m^{-2}$) gelagert.

Nach dieser Vorbehandlung wurde der gewünschte Wassergehalt eingestellt. Die Formlinge wurden dann nach Erreichen des Feuchte-Gleichgewichtszustandes in den Scher- bzw. Kompressionsapparat eingesetzt.

2. Jede der Kalkstufen wurde bei drei Wassergehalten untersucht:

Wassergehaltsstufe:

1 13 Vol.% H_2O entspr. 6 bar ($6 \cdot 10^5 N \cdot m^{-2}$) Saugspannung.
2 20 Vol.% H_2O entspr. 0,6 bar ($6 \cdot 10^4 N \cdot m^{-2}$) Saugspannung.
3 30 Vol.% H_2O entspr. 0,3 bar ($3 \cdot 10^4 N \cdot m^{-2}$) Saugspannung.

3. Als Normalspannungen wurden bei den Scher- und Kompressionsuntersuchungen angelegt:

Laststufe:

1 0,5 bar $= 5 \cdot 10^4 N \cdot m^{-2}$
2 1,0 bar $= 1 \cdot 10^5 N \cdot m^{-2}$
3 2,0 bar $= 2 \cdot 10^5 N \cdot m^{-2}$
4 3,0 bar $= 3 \cdot 10^5 N \cdot m^{-2}$

Zur Sicherung der Ergebnisse wurden alle Untersuchungen mit drei Wiederholungen durchgeführt. Zur Durchführung der Versuchsreihe wurden 180 Bodenformlinge benötigt, da beim Kompressionsversuch auf die Kalkstufe 1 verzichtet wurde.

Scherversuche: Die Kohäsion c und der Winkel der inneren Reibung g wurden bei behinderter Seitenausdehnung in einem Schergerät nach *Casagrande* bestimmt. Dabei war die Möglichkeit für eine Entwässerung der Probe gegeben, die jedoch wegen der vorgegebenen relativ geringen Wassergehalte nicht eintrat. Die Höhe (h) der runden Scherbuchse betrug 30 mm, der Durchmesser (d) 71,4 mm, die Querschnittsfläche 40 cm^2, das Verhältnis d : h somit 2,38 : 1.

Nach Belastung des Formlings wurde dessen Konsolidierung abgewartet – einen Vorgang, der nach 30 min soweit abgeschlossen war, daß danach keine wesentlichen Änderungen der einzelnen Meßgrößen mehr festzustellen waren. Bei der nachfolgenden Scherung wurde die Scherspannung an der Bruchgrenze (τB) und an der Gleitgrenze (τG) gemessen.

Kompressionsversuche: Das Verdichtungsverhalten der Formlinge wurde bei denselben Laststufen in einem Kompressions-Durchlässigkeits-Apparat (KD-Apparatur) nach *Casagrande* untersucht, ebenfalls mit behinderter Seitenausdehnung und Möglichkeit der Entwässerung. Bei d = 71,4 mm und h = 14 mm war das geforderte Verhältnis von > 5 : 1 erfüllt. Die Zeit-Setzungskurven wurden über 24 h verfolgt.

Das gebrauchte Probenmaterial wurde gesammelt und auf pH und Kationenbelegung hin untersucht.

Ergebnisse und Diskussion

Tab. 4 zeigt, daß der angestrebte Ionenbelegungszustand weitgehend erreicht wurde. Die Ca-Gehalte der Gleichgewichtsbodenlösung der beiden gekalkten Varianten überschreiten den Flockungsschwellenwert (5).

Tabelle 4: pH-Werte und Anteile der Austauschionen der Bodenformlinge nach Kalkzusatz und Ausführung der mechanischen Tests
Table 4: pH-values and portions of exchangeable cations in the soil bodies after addition of lime and performance of mechanical tests

		Kalkstufe 0	Kalkustufe 1	Kalkstufe 2
pH 0,1 n $CaCl_2$		5,6	7,1	7,3
H_2O		5,9	7,0	7,4
Ca^{++}	mval	7,1	10,2	10,5
Mg^{++}	—	0,5	0,4	0,3
K^+	100 g	0,7	0,5	0,3
Na^+	Boden	0,3	0,3	0,3
H^+		2,8/4,5	–	–
Ca (GBL) mg		2	13	44
$CaCO_3$ (%)		–	–	0,9/1,1

Scherversuch

Die Scherlinie läßt sich nach dem Coulombschen Gesetz innerhalb der üblichen Normalspannungen genügend genau durch eine Gerade beschreiben.

$$\tau = c + (\delta - pw)\,\mathrm{tg}\,\varrho \qquad (1)$$

In Gleichung 1 bedeuten (Dimension: $= 10^5 N \cdot m^{-2}$): τ Scherspannung, c wirksame Kohäsion, δ gesamte Normalspannung, pw Porenwasserdruck, ϱ Winkel der inneren Reibung. Der Porenwasserdruck pw blieb bei allen angewendeten Belastungen im Bereich negativer Werte. Diese Werte wurden nicht gemessen und bei der Berechnung vernachlässigt indem $\delta = \delta'$ (wirksame Normalspannung) gesetzt wurde. Aus Gleichung (1) wird

$$\tau = c + \delta' \mathrm{tg}\,\varrho \qquad (2)$$

In Tabelle 5 sind die zur Lösung der Gleichung 2 für den Scherwiderstand an der Bruchgrenze ermittelten Größen zusammengestellt. Mit zunehmendem Wassergehalt nimmt die Kohäsion geringfügig ab. Das gilt für alle drei Kalkstufen. – Innerhalb aller Wassergehaltsstufen läßt sich eine leichte Abnahme der Kohäsion mit zunehmendem Kalkgehalt verzeichnen, doch wird bei zunehmendem Wassergehalt der Einfluß der Kalkung geringer.

Die Winkel der inneren Reibung zeigen ebenfalls eine Abnahme mit zunehmendem Wassergehalt. Die Abnahme von der unteren zur mittleren Wassergehaltsstufe ist jedoch nur gering. Innerhalb der einzelnen Wassergehaltsstufen wächst der Winkel mit der Kalkzugabe, doch ist die Zunahme von Kalkstufe 1 nach 2 nur gering. Für den Scherwiderstand an der Gleitgrenze (Tab. 6) ergibt sich ein ähnliches Bild, wenn auch hier die Werte für Kohäsion und Reibungswinkel insgesamt kleiner sind.

Tabelle 5: Messungen des Scherwiderstandes (Bruchgrenze) (Größen der Gleichung (2))
Table 5: Shear strength measurements at failure resistance maximum (factors of equation (2)

Wassergehaltsstufe	1 (13 Vol %)			2 (20 Vol %)			3 (30 Vol %)		
Kalkstufe	0	1	2	0	1	2	0	1	2
Anzahl der Proben	12	10	12	11	12	12	12	12	11
Kohäsion c ($\cdot 10^{-3}$)	373	362	348	355	352	344	341	339	331
Reibungswinkel ρ	30° 40′	33° 35′	34° 13′	30°53′	33° 35′	33° 21′	26° 45′	29° 31′	29° 07′
tg ρ ($\cdot 10^{-3}$)	592	664	680	598	651	658	504	566	557
Standardabweichung von tg ρ ($\cdot 10^{-3}$) ±	31	5	12	23	19	11	13	17	16
Korrelationskoeff. ($\cdot 10^{-3}$)	987	1000	998	994	996	999	997	995	996

Die hohen Korrelationskoeffizienten entsprechen der bekannten Feststellung, daß die Funktion $\tau = f(\sigma')$ eine Gerade darstellt. Die Zugabe von Kalk zum Bodenmaterial hat somit besonders zu einer Vergrößerung des Winkels der inneren Reibung bei der Scherung, also an der Bruchgrenze geführt, wohingegen der Gleitwiderstand weniger beeinflußt worden ist. Die Änderung trat bereits bei einer Aufkalkung des Bodens bis zum Neutralpunkt ein. Die darüberhinausgehende $CaCO_3$-Zufuhr zeigte keine zusätzliche Wirkung. Die Ursache dafür mag in dem Umstand liegen, daß die gewünschte „Vermörtelung" auf Kalkungsstufe 2 offenbar infolge zu kurzer Behandlungszeit noch nicht eingetreten war.

Kompressionsversuch

Bei diesem Versuch wurden nur die Kalkungsstufen 0 und 2 miteinander verglichen. Bei allen untersuchten Varianten und Belastungen machte die Sofortsetzung den größten Anteil an der Gesamtsetzung aus. Als „Sofortsetzung" wurde der Setzungsbetrag bezeichnet, der unmittelbar nach der Belastung erzielt und bei der ersten Ablesung nach 0,1 min festgestellt wurde. Sie betrug im Mittel aller Untersuchungen 78 % des Setzungsbetrages, der nach 24 Std. erreicht wurde.

Trägt man die nach der Sofortsetzung weiter ablaufende Setzung gegen den natürlichen Logarithmus der Zeit (min) auf, so ergibt sich in allen Fällen eine Gerade. Deren allgemeine Form lautet für $t > 0{,}1$

$$s = a + b \cdot \ln t \qquad (3)$$

Dabei bedeuten s den Setzungsbetrag in 1/100 mm, a den Setzungsbetrag nach 0,1 Minuten und b die Steigung der Geraden. Die prozentuale Setzung nach 24 Std. wird als s' bezeichnet.

In Tab. 7 sind die Größen a und b der Gleichung (3) mit ihrem mittleren Fehler dargestellt, gewonnen aus den Kompressionsversuchen mit dreifacher Wiederholung.

In nahezu allen Fällen sind die Werte a für die Sofortsetzung bei der gekalkten Variante geringer als bei der ungekalkten. Die b-Werte zeigen die gleiche Tendenz. Wie aus den mittleren Fehlern zu ersehen ist, lassen sich die geringen Unterschiede oft nicht sichern. Zur Absicherung des Kalkeinflusses auf die Kompressibilität des Bodens unter statischer Belastung müßte die Anzahl der Wiederholungen weiter erhöht werden.

Zur Veranschaulichung der bei diesem Versuch erkennbaren Differenz ist in der Abbildung 4 die Endsetzung s' (24 h) der beiden Kalkvarianten in Abhängigkeit von der Belastung dargestellt. Die mit zunehmendem Wassergehalt ansteigende Setzung ist deutlich. Bei den gekalkten Proben steigt der für die höchste Belastung geltende Wert s' von 9,6 % bei der trockenen auf 11,5 % bei der feuchten Probe an. Die entsprechenden Werte für die ungekalkte Probe betragen 10,5 % bzw. 12,5 %. Somit beträgt der maximale Setzungsunterschied zwischen den beiden Kalkungsstufen ca. 1 %.

Tabelle 6: Messungen des Scherwiderstandes (Gleitgrenze)
Table 6: Shear strength measurements at sliding line

Wassergehaltsstufe	1 (13 Vol %)			2 (20 Vol %)			3 (30 Vol %)		
Kalkstufe	0	1	2	0	1	2	0	1	2
Anzahl der Proben	12	10	12	11	12	12	12	12	11
Kohäsion c ($\cdot 10^{-3}$)	170	205	178	258	220	229	271	208	267
Reibungswinkel ρ	29° 07′	31° 28′	32° 05′	27° 15′	30° 32′	30° 27′	22° 15′	26° 53′	25° 41′
tg ρ ($\cdot 10^{-3}$)	557	612	627	515	590	588	409	507	481
Standardabweichung von tg ρ ($\cdot 10^{-3}$) ±	28	8	8	19	13	14	13	18	20
Korrelationskoeff. ($\cdot 10^{-3}$)	988	999	999	993	998	997	995	994	991

Tabelle 7: Kompressibilitätsmessungen: Sofortsetzung a und Steigung der Geraden b „Langzeitsetzung = f (ln Zeit)"

Table 7: Measurements of compressibility: rapid settling a and slope of straight line b „long term settling" = f (ln time)

Wassergehaltsstufe (Vol %)	Normal-Spannung (bar = 10^5 Nm^{-2})	Ohne Kalk (Stufe 0)				Mit Kalk (Stufe 2)			
		a ($\cdot 10^{-2}$)	ma ($\cdot 10^{-3}$)	b ($\cdot 10^{-3}$)	mb ($\cdot 10^{-3}$)	a ($\cdot 10^{-2}$)	ma ($\cdot 10^{-3}$)	b ($\cdot 10^{-3}$)	mb ($\cdot 10^{-3}$)
	0,5	474	418	132	19	428	406	99	18
1	1,0	715	857	254	25	717	884	156	24
(13 %)	2,0	1051	1089	287	38	1003	969	188	35
	3,0	1207	1393	375	47	1109	986	331	41
	0,5	453	512	189	38	437	490	155	29
2	1,0	841	1001	342	36	843	998	246	39
(20 %)	2,0	1189	1012	331	49	1099	1293	276	43
	3,0	1307	1567	375	51	1271	1423	397	46
	0,5	523	703	243	38	515	554	199	31
3	1,0	986	1098	253	42	961	998	232	39
(30 %)	2,0	1310	1627	320	51	1376	1654	239	43
	3,0	1459	1731	386	52	1374	1587	353	50

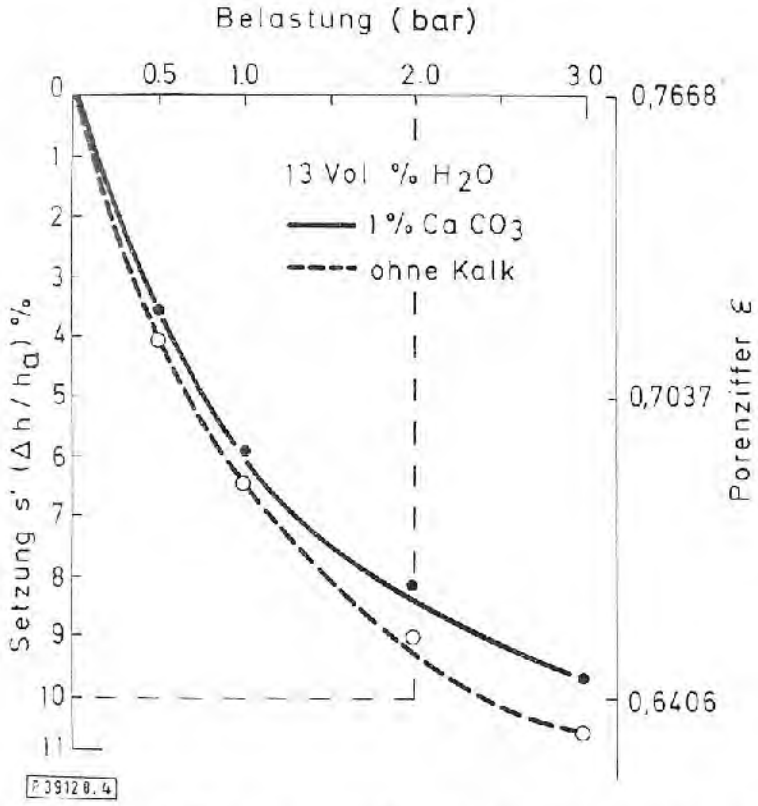


Abbildung 4: Endsetzung s' (24 h) in Abhängigkeit von der Normalspannung, Wassergehaltsstufen 1, 2 und 3

Figure 4: s' (24 h) in dependence on normal pressure, level of water content 1, 2, and 3

Die Abbildungen geben auch an, wie die Porenziffer ε, das Verhältnis zwischen dem Porenvolumen und dem Festvolumen, abnimmt. Bei einer TrD der Festsubstanz von 2,65 betrug ε in allen Fällen vor der Kompression 0,7668. Für die

Beurteilung der Kompression des Bodens durch Bearbeitungsmaßnahmen, die an unterschiedlich porenhaltigem Bodenmaterial ansetzen, empfiehlt sich ε als brauchbarer Vergleichsmaßstab.

Sowohl im Hinblick auf das Scherverhalten wie auch das Kompressionsverhalten zeigten die standardisierten Bodenformlinge, daß auch bei Schluffböden mit geringem Tongehalt eine Kalkzufuhr eine Stabilisierung des Gefüges bewirkte. Die Flockung der Tonteilchen an den Berührungsstellen der Schluffkörner führt vermutlich zu einer Bildung von festeren Aggregaten, die beim Scheren nicht mehr in sich plättchenförmig zergleiten, sondern als „Körner" durch „interlocking" einen erhöhten Verformungs-Anfangswiderstand verursachen.

Daß eine Steigerung der Kalkzufuhr auf 1 % des Bodens zu keiner deutlichen Erhöhung des Scherwiderstandes führte, ist wohl auf das Nichterreichen der angestrebten Vermörtelung zurückzuführen.

Der Umstand, daß die hier festgestellten Wirkungen unter Feldbedingungen nicht immer feststellbar sind, liegt wohl in folgendem begründet:

1. Die Wassergehalte der zu vergleichenden Meßparzellen sind nicht immer gleich, eine Folge der durch Kalkung veränderten Porung.

2. Die strukturstabilisierende Wirkung des Kalks bewirkt u.a. eine Vermehrung und Vergrößerung der Poren und kompensiert dadurch, d.h. verkleinert infolge Verminderung der Kontaktpunkte, den höheren Scher- und Kompressionswiderstand innerhalb der Matrix. Wenn z.B. ein Boden mit größerem GPV dieselben Widerstände wie ein stärker verdichteter Boden zeigt, so ist darin ebenfalls eine Gefügestabilisierung zu erkennen.

Literatur

Becher, H.H. (1972): Haben $CaCO_3$ und austauschbare Kationen einen Einfluß auf den Eindringwiderstand? Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. **15**, 11 – 116

Czeratzki, W. (1957): Untersuchungen über Krümelstabilität an einem Kalkversuch. Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenk. **78**, 121 – 135

Czeratzki, W. (1972): Die Beeinflussung von Aggregatstabilität, Plastizität und Wasserbindung bei der Bodenstabilisierung durch mittlere und hohe Gaben von Kalkhydrat. Z. Acker- u. Pflanzenbau **133**, 45 – 54

Czeratzki, W. (1972): Der Einfluß hoher Gaben von Kalkhydrat auf Plastizität, Krümelstabilität und Wasseraufnahme des Bodens. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. **15**, 73 – 75

Gebhardt, H. (1968): Flockungsverhalten definierter Tonsuspensionen aus Lagerstätten und Böden I. Flockungsschwellenwerte und Flockungsvolumen. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. **8**, 177 – 185

Harrach, T., G. Werner u. *A. Wourtsakis* (1972): Wirkungen des Kalkes auf Gefügeeigenschaften einer Parabraunerde in einem Polyfaktoriellen Tiefenbearbeitungs- und Kalkversuch. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. **15**, 107 – 110

Schachtschabel, P., u. *K. Hartge* (1958): Die Verbesserung der Strukturstabilität von Ackerböden durch eine Kalkung. Z. Pflanzenernähr. Düng. Bodenkd. **83**, 193–202

Schaffer, G. (1969): Einfluß der Kalkung auf verschiedene Bodeneigenschaften. Z. Kulturtechn. u. Flurberei. **10**, 301–312

Schaffer, G. (1970): Einfluß des Kalkes auf das Bodengefüge. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. **11**, 71–74

Schaffer, G., u. *D. Mosebach* (1972): Einfluß des Kalkes auf das Bodengefüge. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. **15**, 77–83

Scheffer, K., u. *B. Meyer* (1970): Zielsetzungen und Anlage eines Tiefumbruchversuches an einer grundwasserfreien Löß-Parabraunerde in Süd-Niedersachsen. Göttinger Bodenkundl. Ber. **16**, 1–8

Scheffer, K. (1972): Parameter und Jahresgang der Strukturwirkung meliorativer Kalkung von Löß-Parabraunerde-Ap-Horizonten. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. **15**, 85–93

Scheffer, K., u. *B. Meyer* (1972): Strukturwirkungen meliorativer Kalkungen in Ap-Horizonten von Löß-Parabraunerden (Porenverteilungsmessungen). Landw. Forschg., Sonderh. **28/I**, 324–339

Sommer, C., *K. Stoinev* u. *H.-J. Altemüller* (1972): Das Verhalten vier verschiedener Modellböden unter vertikaler Belastung. Landbauforschg. Völkenrode **22**, 45–56

Sommer, C. (1972): Modellversuche über den Einfluß hoher Kalkgaben auf die Verformung und Verdichtbarkeit eines Bodens. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. **15**, 65–72

Wichtmann, H. (1972): Der Einfluß des Kalkes auf die Infiltrationskapazität eines Schlufflehmbodens. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. **15**, 117–126

Wolkewitz, H. (1960): Untersuchungen über die Auswirkungen der Kationenbelegung auf die physikalischen Eigenschaften eines Mineralbodens. Z. Kulturtechnik u. Flurberein. **1**, 162–179

Wolkewitz, H. (1963): Die Bedeutung der Adhäsion für die Gefügeausbildung des Bodens. Mit. Dtsch. Bodenkundl. Ges. **1**, 221–228

[P 3912 B]