

Herrn Professor Henning L28

GA16

Mit freundlichen Grüßen
vom Verfasser überreicht.

**DIE PHYSIKALISCHEN EIGENSCHAFTEN VON BÖDEN, IHRE METHODISCHE
ERFASSUNG UND IHRE VERÄNDERUNG DURCH VERSCHIEDENE FAKTOREN,
DARGESTELLT AN MODELLSUBSTANZEN**

**Von der Fakultät für Landbau
der
Technischen Universität Berlin
zur Verleihung
der**

VENIA LEGENDI

**für das Lehrgebiet Kulturtechnik
genehmigte Habilitationsschrift**

**von
Diplom-Landwirt Dr. Hermann Wolkewitz**

Berlin-Charlottenburg, den 13. Juni 1964

Mr. [Name] [Address]
[City] [State] [Zip]

Berichterstatter:

Professor Dr. C. Husemann

Professor Dr. H. H. Baetge

**Meinem hochverehrten Lehrer
Herrn Prof. Dr. C. Husemann
zum 65. Geburtstag gewidmet**

Inhaltsübersicht

	Seite
1. Einleitung	3
2. Das Material, Versuchsanstellung	10
3. pF-Untersuchungen	17
4. Die Plastizität	22
4.1. Die Ausrollgrenze	28
4.2. Die Fließgrenze	34
4.3. Die Plastizitätszahl	41
5. Die Adhäsion	42
6. Die Aggregatbildung (Teilchen $< 2 \mu$ in Wasser)	57
7. Die Quellung und Schrumpfung	64
8. Die Ribbildung	78
9. Das Sedimentvolumen	96
10. Die Gefügestabilität	103
11. Die Wasserdurchlässigkeit (k_f)	118
12. Die Kapillarität	125
13. Zusammenfassung	138
14. Schrifttum	150

Die physikalischen Eigenschaften von Böden, ihre methodische Erfassung und ihre Veränderung durch verschiedene Faktoren, dargestellt an Modells-substanzen.

1. Einleitung

Das "landeskulturelle Grundproblem im Sinne der Agrarstrukturverbesserung ist die Schaffung eines möglichst gesunden, natürlichen und wirtschaftlichen Standortes für die landwirtschaftlichen Betriebe" (51). Die Grundlage eines gesunden Standortes ist der Boden.

"Die Verbesserung meliorationsbedürftiger Standorte durch landeskulturelle Maßnahmen gestaltet nach den vorliegenden Erfordernissen das Bodenprofil und seine Wachstumsbedingungen bis zu jeweils zweckmäßiger Tiefe um" (52). FAUSER schreibt in der Einleitung zu seinem Buch "Kulturtechnische Bodenverbesserungen": "Unter kulturtechnischen Bodenverbesserungen (Meliorationen) verstehen wir alle jene technischen Maßnahmen, die auf eine dauernde Verbesserung und Ertragssteigerung des landwirtschaftlich genutzten oder zur landwirtschaftlichen Benützung in Aussicht genommenen Grund und Bodens oder auf die dauernde Erleichterung seiner Bewirtschaftung abzielen" (34). Sowohl die normale Bearbeitung der Bodenoberfläche, als auch die Düngung zur Ernährung der Pflanze als rein landwirtschaftliche Maßnahme mit nur vorübergehender Wirkung sind nicht als kulturtechnische Maßnahme zu verstehen. Die nachhaltige Meliorationskalkung aber und die Bearbeitung unterhalb der Bodenkrume fallen demnach in das Gebiet der Kulturtechnik. Diese nachhaltigen Einwirkungen auf den Boden verändern vorwiegend dessen physikalische Eigenschaften.

HUSEMANN stellt fest, daß zwar der Ausgangspunkt der kulturtechnischen Standortsuntersuchung die Beschreibung des

Bodens darstellt, daß aber der rein statischen Auffassung (was ist oder wie ist der Boden zur Zeit zu beurteilen) die dynamische Auffassung (was soll und kann daraus werden, also welche Maßnahmen sind zur Veränderung zu ergreifen, wie reagiert der Boden darauf und welche Vorteile können diese erbringen) folgen muß (52, 53).

Um besonders die letzte Frage beantworten zu können, müssen Grundlagen erarbeitet werden, aus denen Voraussagen über den zu erwartenden Erfolg von Meliorationsmaßnahmen abgeleitet werden können. Dazu sind sowohl praktische Erfahrungen, als auch Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung zu sammeln, untersuchungsmäßig festzulegen, zu koordinieren, um schließlich ein Beurteilungsschema aufstellen zu können.

Die Untersuchungsverfahren werden in den Normen DIN 4220 (29) und DIN 4222 (30) vereinheitlicht, damit die Untersuchungsergebnisse verschiedener Untersuchungsstellen reproduzierbar sind und in ein Beurteilungsschema eingepaßt werden können. (Es ist bekannt, daß Ergebnisse allein durch unterschiedliche Verfahren um 100 % und mehr differieren können). Besonders wichtig ist eine Vereinheitlichung von Methoden und die Schaffung eines Beurteilungsschemas in diesem Sinne für die Bodenkartierung und deren Auswertung für die Planung und Durchführung kulturtechnischer Maßnahmen. Die so erfaßten Eigenschaften können in der untersten Kategorie der Bodensystematik - der Form - (78) ihren Niederschlag finden. Nebenbei sei bemerkt, daß für Meliorationen, besonders zum Erkennen der Ursachen von Bodenschäden und zur Auswahl der Maßnahmen, die zu deren Beseitigung notwendig sind, vorwiegend die Bodenformen erforderlich sind, während die höheren Kategorien der Bodensystematik zur Erkennung der Bodenschäden unentbehrlich sind. Für kulturtechnische Zwecke wäre sogar noch eine weitere Kategorie erwünscht, in der die wesentlichen physikalischen Eigenschaften der einzelnen Schichten und Horizonte mit genauer Angabe der Lage im Profil festgelegt werden könnten. (Diese Angaben sind z.B.

für Dränabstandsbestimmungen erforderlich). Großflächige Kartierungen können diese letzte Kategorie verständlicherweise nicht berücksichtigen.

Ziel dieser Arbeit ist es, zunächst auf dem Wege der Grundlagenforschung, die Aussagekraft verschiedener Methoden für physikalische Eigenschaften von Böden zu prüfen, um geeignete Verfahren zur Beurteilung auswählen zu können; weiterhin die Bedeutung einzelner Komponenten - wie Kationenbelegung und Korngrößenverteilung - auf das physikalische Verhalten der Böden zu studieren, um beurteilen zu können, ob und auf welchen Böden Meliorationsmaßnahmen durch Veränderung dieser Komponenten (wie z.B. bei der Besandung, durch Tiefkultur oder der meliorativen Tiefenkalkung zur Veränderung der Kationenbelegung) einen Erfolg erwarten lassen und wie groß dieser gegebenenfalls sein wird. Hierüber werden oft unterschiedliche Ansichten vertreten (54). Auch die Wechselbeziehungen verschiedener physikalischer Eigenschaften im Boden sollen beobachtet werden. Schließlich soll versucht werden anhand von Zahlenmaterial Vorschläge für Grenzwerte zur Einstufung der Böden

nach den physikalischen Eigenschaften besonders auch im Hinblick auf die Neuerstellung der DIN 4220 Blatt 5 (29), oder auch zur Eingliederung in die Form der Bodensystematik zu liefern.

Um exakte Ergebnisse zu erhalten, mußte mit sehr gut definiertem Material gearbeitet werden. Aus dieser Forderung ergab sich die Notwendigkeit Modellsubstanzen zu verwenden, obwohl wir uns des Mangels dieser Versuchsanstellung bewußt waren. Die Fehler schienen uns insofern nicht zu groß, da die kulturtechnische Betrachtung des Bodens vorwiegend unterhalb der biologisch tätigen Krume erfolgt. Allerdings müssen wir in Kauf nehmen, daß das natürliche Gefüge zerstört ist. Diese Arbeit ist als Grundlagenarbeit anzusehen und die hier erzielten Ergebnisse sind noch weitgehend mit den Erfahrungen aus der Praxis zu vergleichen, wenn auch versucht wurde, dies nach Möglichkeit anhand vorliegender Unterlagen schon zu tun.

Gute physikalische Eigenschaften wie z.B. ausreichende Durchlüftung, optimale Wasserhaltefähigkeit, Wasserdurchlässigkeit, Bearbeitungsmöglichkeit u.a. kennzeichnen den für das Pflanzenwachstum günstigen Standort. Alle diese Eigenschaften gehen als Summeneffekt in den Begriff "Bodengefüge" ein. Dieses Bodengefüge ist durch die räumliche Anordnung der festen Bodenbestandteile bestimmt (93). Der Einfluß von äußeren und inneren Faktoren zieht eine ständige Veränderung des Gefüges nach sich und läßt die Dynamik im Boden erkennen. Zum Verständnis der im Verlauf der Arbeit abzuleitenden Schlußfolgerungen sollen einige Grundlagen kurz erläutert werden.

Sind - wie es bei der Ausbildung eines guten Gefüges der Fall ist - die Einzelteilchen zu Aggregaten oder Gefüge-

elementen zusammengeschlossen, so führte man früher häufig als alleinige Ursache dieser Zusammenballungen die Flockung der Teilchen an. Der Vorgang der Flockung ist von der Kolloidchemie her bekannt und häufig diskutiert. Voraussetzung für eine Flockung in diesem Sinne ist, daß elektrisch geladene Teilchen in einer Suspension aufgeschwemmt sind, in der sie infolge der Brownschen Molekularbewegung oszillieren. Die gleichgerichtete Ladung bewirkt, daß sich die Teilchen voneinander abstoßen. Eine stabile Suspension ist die Folge. Werden zu der Suspension jedoch entgegengesetzt geladene Ionen gegeben, so werden diese infolge des Ionenaustauschvermögens an der Oberfläche der Teilchen sorbiert, wodurch deren Potential vermindert wird. Treffen nun Teilchen mit einer verminderten Oberflächenladung aufeinander, so werden bei genügend geringem Abstand die van der Waalschen Kräfte wirksam und die Teilchen werden aneinandergebunden.

Im Boden werden die Teilchen der Tonfraktion wegen ihres kolloidchemischen Verhaltens zu den Kolloiden gezählt. Tonminerale sind als Schichtminerale aus den Bausteinen der Kieselsäuretetraeder und Aluminiumoktaeder aufgebaut. Die Bindung der Tetraeder- mit den Oktaederschichten erfolgt über O und OH Gruppen. Je nach der Anzahl der an dem Aufbau eines Tonminerals beteiligten Schichten unterscheidet man die Zweischichtminerale (Kaolingrouppe) oder die Dreischichtminerale (Montmorillonit oder bei Einlagerung von K-Ionen Illit). Die Ladungen der Minerale entstehen durch freie Valenzen an den Vernetzungspunkten der Minerale oder bei Austausch der in den Tetraedern bzw. Oktaedern eingeschlossenen Ionen durch Ionen niederer Wertigkeit. Aus diesem Aufbau geht hervor, daß die Ladungen hauptsächlich an Ecken und Kanten der Minerale auftreten und vorwiegend negativ sind. Die Tonteilchen haben das Bestreben ihre überschüssigen Ladungen abzusättigen und sorbieren deshalb aus der sie umgebenden Lösung Kationen. Es entsteht so die von MATTSON (72) beschriebene diffuse Doppelschicht, bei der

die innere Schicht die elektronegative Oberfläche der Teilchen, die äußere Schicht die elektropositive Zone der sorbierten Kationen darstellt. In wässrigen Lösungen wird das Wasser, das als Dipol aus den zwei positiv geladenen H-Ionen und einem negativ geladenen O-Ion besteht, orientiert, also mit den H-Ionen zur negativen Oberfläche der Teilchen angelagert. Auch die sorbierten Kationen haben in der wässrigen Lösung eine Hydrathülle, die dann aber mit den O-Ionen zu dem positiv geladenen Kation orientiert sind. Die Hydratation der Kationen ist abhängig von der Valenz und dem Durchmesser der Kationen. (Tab. 8)

Der Eintausch der Kationen erfolgt in Abhängigkeit von der wirksamen Ladung. So tauschen die zweiwertigen Ionen stärker ein als die einwertigen. Je stärker der Eintausch, (die Kationen werden dann dichter angelagert) umso größer ist die Potentialerniedrigung, umso größer ist die Fähigkeit der Teilchen, sich aneinander anzulagern und auszuflocken. VERWEY und OVERBEEK (107) zeigen, daß die Auswirkung der 1 : 2 : 3 wertigen Kationen wie $1 : (1/2)^6 : (1/3)^6$ ist, aber mit sinkendem Potential wie $1 : (1/2)^2 : (1/3)^2$. JENNY und REITEMEIER untersuchten die Flockungswerte verschiedener Kationen für einen Putnam Ton (Tab. 1). (Unter Flockungswert wird die zur Ausflockung erforderliche Menge an Kationen verstanden).

Tab. 1 Flockungswerte von Putnam Ton
(JENNY und REITEMEIER) (zit. in 61)

Kation	Li	Na	K	NH ₄ OH	Cs	H	Mg	Ca
Flockungswert	16,95	9,64	5,09	3,20	2,74	0,23	0,45	0,36

Einen großen Einfluß auf den Flockungswert hat der pH-Wert. Das durch die Wasserstoffionen in Al-Silikaten freigesetzte Aluminium wird sorptiv gebunden. Der hohe Flockungswert des 3-wertigen Aluminiums führt dann zur Koagulation. DEMOLON und BASTISSE (26) haben in einem Beispiel der

Einfluß des pH-Wertes auf den Flockungswert demonstriert.

Tab. 2 Einfluß des pH-Wertes auf den Flockungswert
(DEMOLON und BASTISSE (26))

Flockungs- wert in me/L	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	8,75	9,0	9,5	10,0/pH
NaCl	11	14	23	50	87	127	149	143	127	113
KCl	5	8	20	53	71	70		69		68
CaCl ₂	1	1	1		1				1	

Neben der Auswirkung der Kationen auf die Flockung hat auch die Korngröße und die Art der Tonminerale einen Einfluß. Weiterhin wirkt die Konzentration der Außenlösung je nach vorliegenden Dissoziationsverhältnissen der sorbierten Ionen auf den Flockungsvorgang ein. Grundsätzlich kann durch jedes Ion eine Flockung hervorgerufen werden. Die geringe Eintauschintensität der einwertigen Ionen kann auch als große Dissoziation der Ionen in die Außenlösung aufgefaßt werden. Es bildet sich dort folglich eine Ionenhülle mit großem Radius, in die durch osmotische Bindung Wasser eingelagert werden kann. Als Folge von diesem vergrößerten Radius, können sich die Teilchen nicht auf den für die Wirksamkeit der van der Waal'schen Kräfte erforderlichen Abstand nähern. Eine Flockung dieses Systems ist nicht möglich. Wird jedoch die Konzentration der Außenlösung mit einwertigen Ionen so stark erhöht, daß die sogenannte Schwarmwasserhülle durch osmotischen Zug in die Außenlösung verkleinert wird, so können sich die Teilchen auf den wirksamen Abstand der van der Waal'schen Kräfte nähern, und auch ein solches System kann dann ausflocken.

Die Ausflockung kann aber nur in den Aufschwemmungen der Sedimente (See- oder Flußwasser) von Bedeutung sein (61). MATTSON(72) (zit. in 39) unterscheidet zwischen der oben

beschriebenen Ausflockung und der Aggregation (nach DIN 4220 Gefügeausbildung) (29), die in den Böden eine Rolle spielt. Er weist darauf hin, daß bei der Flockung vorwiegend elektrokinetische Kräfte wirksam sind, während die Aggregatbindung den Kohäsionskräften zugeschrieben wird. Folgenden Versuch führt er als Beweis dafür an. Bringt man einen Brocken Bentonit in eine NaCl-Lösung mit einer Konzentration, die oberhalb des Flockungswertes liegt, so werden die Teilchen stark quellen, die Oberfläche wird zerfließen, aber die Teilchen diffundieren nicht in die überstehende Lösung. Setzt man aber einen gleichen Bentonitbrocken in eine Salzkonzentration, die geringer als zur Flockung erforderlich ist, so diffundieren die einzelnen Teilchen in die Flüssigkeit. Es entsteht eine Suspension. Beide Fälle bezeichnet er als Desaggregation, aber nur den letzteren als Entflockung.

Auf die Vorgänge der Gefügebindung wird im weiteren Verlauf der Arbeit noch eingegangen.

2. Das Material, Versuchsanstellung

Als Ausgangsmaterial für unsere Untersuchungen verwendeten wir einen Marschboden aus Hatzum im Rheiderland am Unterlauf der Ems. Die Proben stammen aus dem Schürf des in dem Beiheft zur geologisch-bodenkundlichen Karte 1 : 5 000 Blatt Hatzum vom Juni 1960 aufgeführten Profiles 6. Dieser Boden wird von dem Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung als typische Knickbrackmarsch angesprochen und erhält die Bezeichnung KnB 6 IV bzw. KnB 7 V. Die genaue Beschreibung des Bodenprofiles kann aus dem Beiheft zur geologisch-bodenkundlichen Karte (13) entnommen werden. Um den Humusgehalt möglichst niedrig zu halten, entnahmen

wir das Material - insgesamt 3 Ztr. - aus einer Tiefe von 30 - 40 cm. Die Analyseergebnisse sind aus der Tabelle 3 zu entnehmen.

Tab. 3 Analysendaten des Ausgangsmaterials
(Hatzum Profil 6, 30 - 50 cm)

1) Korngrößenverteilung in % (71)

Ton	Schluff			Sand		
	fein	mittel	grob	fein	mittel	grob
T	fU	mU	gU	fS	mS	gS
$< 2 \mu$	$2-6 \mu$	$6-20 \mu$	$20-60 \mu$	$60-200 \mu$	$200-600 \mu$	$600-2000 \mu$
46,4	9,4	22,3	18,6	1,5	1,6	0,2

2) Humusgehalt in % : 1,0 (100)

3) Hygroskopizität in % : 13,8 (77)

4) Benetzungswärme in cal/g Boden: 6,6 (55)

5) Austauschkapazität (AK) und Kationenbelegung (75)

a) in mval/100 g Boden

AK	Summe der Kationen	Ca	Mg	K	Na	H
27,6	30,3	6,4	14,2	0,8	2,9	6,0

b) in % der Summe der Kationen

	Ca	Mg	K	Na	H
Ca/ Mg = 0,4	21,2	46,8	2,6	9,6	19,7

Nach der Röntgenanalyse handelt es sich vorwiegend um Quarz in der Gesamtsubstanz, während in der Tonsubstanz Illit vorherrscht.

Dieses Material verwendeten wir sowohl unbehandelt, als auch nach Aufladung mit 5 verschiedenen Kationen und Fraktionierung in die Korngrößengruppen.

Zur Aufladung mörserten wir die Substanzen schwach und

mischten^{x)} sie gut durch. Nachdem ein Teil des Materials ohne weitere Behandlung entnommen wurde (dieser Teil wird Boden genannt), dekantierten wir den Rest solange mit 0,04 n HCl, bis in der überstehenden Lösung keine Ca-Ionen mehr nachgewiesen werden konnten und dialysierten dann zur Cl-Freiheit. Nun wurde die Substanz bei 30 °C getrocknet, leicht gemörsert, gut durchgemischt und etwa 1/5 als H-Boden entnommen. Die restlichen 4 Teile behandelten wir jeweils mit 0,1 n Lösungen von CaCl₂, MgCl₂, KCl und NaCl bis zur H-Freiheit und dialysierten dann ebenfalls bis zur Cl-Freiheit. Nachdem alle Proben bei 30 °C getrocknet und leicht gemörsert waren, standen sie zur Untersuchung zur Verfügung. Sie werden Ca-Mg-K-Na- und H-Boden (reine Böden) genannt, obwohl trotz 12-monatiger Behandlung nur 80 - 90 % der Austauschkapazität jeweils von diesen Kationen belegt werden konnten (Tab. 5). Die Behandlungszeit war für alle Böden gleich. Es zeigt sich, daß unter diesen Bedingungen die H-Ionen sehr schwer auszutauschen sind. So ist in allen Fällen noch ein Anteil von mehr als 10 % H-Ionen vorhanden.

Dies drückt sich im pH-Wert aus (Tab. 5). Während im Ton die mit Ca-Ionen belegte Probe (Nr. 1, Tab. 5) sowohl in Wasser, als auch in KCl die höchsten Werte hat, ist im Boden der pH-Wert der mit K-Ionen belegten Substanz (Nr. 20) am höchsten. Während in KCl sowohl im Boden als auch im Ton die mit Mg belegten Substanzen (Nr. 19, 3) an 3. Stelle liegen, ist bei der Messung des pH-Wertes in H₂O die mit Na belegte Substanz (Nr. 4 u. 21) an 3. Stelle. Die in H₂O gemessenen Werte laufen mit dem Anteil an H-Ionen nach MEHLICH (97) parallel.

Auch der Austausch von Mg war nur unvollkommen. Aus Tab. 5 ist zu erkennen, daß nach dieser langen Behandlungszeit immer noch 2,5 % - 5 % des Komplexes mit Mg-Ionen belegt war. Besonders hoch war der Mg-Anteil im H-Boden.

x) Das Mischen der Proben erfolgte in einer Mischmaschine, die uns von der Degebo - der an dieser Stelle herzlichst gedankt werden soll - freundlicher Weise überlassen wurde.

Weiterhin isolierten wir die verschiedenen Korngrößengruppen (Ton $< 2 \mu$, Feinschluff $2 - 6 \mu$, Mittelschluff $6 - 20 \mu$, Grobschluff $20 - 60 \mu$, Feinsand $60 - 200 \mu$, Mittelsand $200 - 600 \mu$, Grobsand $600 - 2000 \mu$) aus dem Material. Die Fraktionierung in die einzelnen Korngrößengruppen erfolgte aus Suspensionen in $0,01 \text{ n NH}_4\text{OH}$. Dieses Dispergierungsmittel verwendeten wir an Stelle des sonst üblichen Natriumpyrophosphates, um unkontrollierbare Veränderungen am Komplex durch die Phosphationen zu verhindern. Das NH_4 -Ion läßt die geringsten Veränderungen erwarten, da es sehr leicht wieder austauscht. Weil wir für die Untersuchungen große Substanzmengen benötigen, erfolgte das Ausschlämmen in 200 l -Gefäßen. Die Proben entnahmen wir nach den nach STOKES berechneten Zeiten aus den entsprechenden Tiefen. Allein die Gewinnung von 30 kg Ton erforderte etwa 8 Monate.

Den Ton wandelten wir anschließend mit HCl bzw. CaCl_2 , MgCl_2 , KCl , NaCl entsprechend dem beim Boden beschriebenen Verfahren in H-Ton, Ca-Ton, Mg-Ton und Na-Ton um und verwendeten ihn dann entsprechend weiter.

Die gröberen Fraktionen, den fU, mU und den gU entnahmen wir ebenfalls aus den Suspensionen nach den entsprechenden Fallzeiten nach STOKES. Die Sande erhielten wir durch Naßsiegung. Sehr zeitraubend war die Reinigung der Schluffe von den jeweils feineren Substanzen.

Alles Material mörserten wir nach der Trocknung leicht und prüften dann die Vollständigkeit der Belegung bzw. der Fraktionierung (Tab. 5).

Da nicht alle Fraktionen in ausreichendem Umfange in dem Boden vorhanden waren, mußten der Grobschluff und der Feinsand aus einem anderen Marschboden (Geversdorf) gewonnen werden. Grobsand wird in Marschböden nur selten gefunden. Aus diesem Grunde verwendeten wir das unter den Marschböden anstehende diluviale Material.

Bei der Überprüfung des AK-wertes dieser größeren Fraktionen stellten wir teils sehr abweichende Werte von den erwarteten fest (Tab. 4). So hatte z.B. der Feinschluff Lübke-Koog eine Austauschkapazität (AK) von 14 mval und der Feinsand Lübke-Koog eine AK von 6 mval.

Mikroskopische Untersuchungen ergaben, daß die Körner von Eisenrinden überzogen waren. Aus diesem Grunde wurden der mS und der gS nochmals mit 1 n HCl behandelt und anschließend mit destilliertem Wasser ausgewaschen. In welchem Umfang die AK von größeren Substanzen durch Verunreinigung mit Fe- bzw. Humus-Rinden beeinflußt werden kann, geht aus der Tab. 4 hervor.

Tab. 4 AK größerer Substanzen vor und nach entsprechender Behandlung, Auswirkung von Verunreinigung auf den AK-Wert grober Substanz

Fraktion	AK in mval			
	ohne Behdl.	0,1 n HCl	1 n HCl	300°C gegl.
fU Lübke-Koog	14,0	3,75	15,4	6,7
fU Kaolin	1,6	1,4	1,8	1,5
mU Geversdorf	3,2	1,4	2,2	
gU Geversdorf	1,2	0,6	0,6	
gU Hatzum	0,8		0,6	1,0
fS Hatzum		10,8	6,5	6,5
fS Lübke-Koog	6,3	3,3	2,8	3,2
fS Geversdorf	2,1	1,6	1,5	1,6
mS Havel		0,6	0,6	0,6
gS Havel		1,0	0,8	0,8

Aus diesen rein dargestellten Substanzen (Ca- Mg- K- Na- und H-Boden bzw. Ton) und (T, fU, mU, gU, fS, mS, gS) stellten wir durch entsprechende Vermischung die einzelnen Versuchsglieder her (Tab. 5).

Dem Thema entsprechend wurden die Versuche in 2 große Gruppen eingeteilt. Die 1. Gruppe mit den Proben Nr. 1 - 25, 66 - 70 hat bei konstanter Korngröße eine unterschiedliche Kationenbelegung, während die Glieder der 2. Gruppe Nr. 26 - 65 bei konstanter Kationenbelegung sich wesentlich in der Korngrößenverteilung unterscheiden. Alle Proben sind mit lfd. Nr. versehen (Tab. 5) und werden dementsprechend im Verlauf der Arbeit bezeichnet. Die Nr. 1 - 5 stellen die reinen Tone dar (Ca- Mg- K- Na- H-Ton). Die Kationengemische der Tone erhalten die Nr. 8 - 17 und 66 - 70. Bei diesen Mischungen waren wir zunächst davon ausgegangen möglichst in den Bereichen der Kationenbelegung unserer Böden zu bleiben (Nr. 8 - 17), stellten dann aber fest, daß zur Klärung einiger Fragen noch zusätzliche Mischungen aufgenommen werden mußten (Nr. 66 - 70).

Die reinen Böden sind mit den Nr. 18 - 22, die Kationemischungen der Böden mit den Nr. 23 - 25 bezeichnet. Die reinen Korngrößen (fU, mU, gU, fS, mS, gS) erhalten die Nr. 26 - 31 und die entsprechenden Gemische die Nr. 32 - 48. Die Nr. 49 - 65 sind für die Mischungen der größeren Fraktionen (ohne Ton) vorgesehen.

Diese Proben sind mit 15 unterschiedlichen physikalischen Methoden untersucht worden. Dabei soll die Plastizitäts-, die Adhäsions-, die Quellungs- und die Reißbilduntersuchung unter anderem vorwiegend die Neigung des Materials zur Gefügeausbildung von schweren Böden in Einzelkorngefüge bei Wasserentzug charakterisieren (Absonderungsgefüge) bzw. Faktoren beurteilen, die sich in dieser Richtung auswirken können.

Die Messung der Aggregatbildung und des Flockungswertes soll ebenfalls in dieser Richtung betrachtet werden. In sedimentogenen Böden besonders in der Knickmarsch wird der Sedimentationsdichte eine große Bedeutung beigemessen. Diese Untersuchungen werden über das Sedimentvolumen durchgeführt.

Aussagen über die Gefügestabilität sollen durch die Naßsiegung gemacht werden. Die aus der Gefügeausbildung resultierenden für das Pflanzenwachstum wesentlichen Faktoren wie kapillare Steighöhe, Benetzungsfähigkeit, Wasserbindungsintensität und Wasserdurchlässigkeit werden mit den Methoden nach ENSLIN, kapillarer Steighöhenmessung, pF - und k_p -Untersuchungen charakterisiert.

Alle Methoden werden zunächst einzeln behandelt, dabei die Auswirkung der Kationen und der Korngrößen geprüft und schließlich der Aussagewert verschiedener Untersuchungsmethoden miteinander verglichen.

3. pF -Untersuchungen

Die physikalischen Eigenschaften in Böden sind eng mit deren Wassergehalt verknüpft. Bekannt ist die Tatsache, daß ein leichter Boden mit wenig Wasser einen erheblich feuchteren Eindruck macht, als ein schwerer Boden mit viel Wasser. Bringt man die physikalischen Eigenschaften von Böden mit dem absoluten Wassergehalt in Verbindung, so ist demnach keine vergleichbare Grundlage gegeben.

Vielmehr wird das physikalische Verhalten der Böden von der Bindungsintensität des Wassers beeinflusst. Das festgebundene Wasser vermittelt einen Eindruck von Trockenheit. Je geringer die Bindungsintensität des Wassers, umso feuchter wirkt der Boden, um schließlich im freien Zustand (ungebundenes Wasser) naß zu erscheinen.

Wie weitgehend sich diese Zusammenhänge auswirken, geht aus den folgenden Kapiteln hervor.

Weiterhin muß die Betrachtung der physikalischen Eigenschaften von Böden in kulturtechnischer Sicht weitgehend mit den natürlichen Bedingungen in Zusammenhang gebracht werden. So hat ein Tonboden das Vermögen 50 - 80 % Wasser gegen die Schwerkraft zurückzuhalten, während ein Sandboden nur 5 - 10 % Wasser entsprechend halten kann; oder ein Tonboden wirkt bei 25 % Wasser trocken, während ein Sandboden bei der gleichen Feuchte schon so naß ist, daß er zerfließt.

Zur Beurteilung der physikalischen Eigenschaften muß deshalb der Wassergehalt zu Grunde gelegt werden, der in der Natur im Boden vorliegt. Da dieser Wassergehalt weitgehend von der Bindungsintensität abhängt, muß diese vorwiegend in unsere Betrachtung einbezogen werden. Es ist nicht sinnvoll z.B. die Schrumpfung eines Sandbodens bei einem Wassergehalt von 30 % messen zu wollen, da dieser hohe Wassergehalt in der Natur nur selten vorkommt, andererseits wäre es nicht empfehlenswert in einem Tonboden eine Schrumpfung bei diesem geringen Wassergehalt feststellen zu wollen.

Unter pF-Wert versteht man den Wassergehalt in Gewichts- oder Volumenprozenten, den ein Boden gegenüber einem Saugdruck - ausgedrückt im Logarithmus cm Wassersäule - noch hält. Neuere Bestrebungen sind zu erkennen, die den Druck auch in cm Wassersäule oder in at oder in bar ausdrücken wollen. Wir verwenden in dieser Arbeit den pF-Wert.

Methodisch geht man zur Bestimmung des pF-Wertes so vor, daß eine mit Wasser gesättigte Bodenprobe einer Saugspannung ausgesetzt wird, durch die alles mit geringerer Intensität gebundene Wasser entfernt wird.

Besonders in den unteren Druckbereichen werden unterschiedliche Methoden verwendet, wie Unterdruckverfahren, Überdruckverfahren und Unterdruckverfahren erzeugt durch eine

Wassersäule, die in direktem Kontakt mit der Probe steht. Die Ergebnisse dieser Verfahren differieren nur gering (117). Wir haben das von uns weiter entwickelte Unterdruckverfahren mit Quecksilberventil verwendet (116). Nach dieser Methode erfolgen die Untersuchungen bis pF 2,18 entsprechend 0,15 at. Bis zu einem Druck von pF 4,2 (15 at) arbeiteten wir mit dem Drucktopf (116) und die höheren Spannungsbereiche erreichten wir durch Dampfspannungsausgleich mit Schwefelsäure unterschiedlicher Konzentration (117).

Für jede einzelne Probe wurde eine pF-Kurve aufgestellt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 aufgeführt und für die Proben Nr. 1 - 5, 18 - 22 und 26 - 31 in den Abbildungen 1a - 1c dargestellt. Es ergibt sich eine Abhängigkeit der Wasserbindung von den Kationen besonders in den unteren Bindungsbereichen. Sehr hoch ist die Wasserbindung in den reinen Proben (Nr. 1 - 5 u. 18 - 22) durch das Na-Ion, während das H-Ion die geringste Wasserbindung bewirkt. Hier beeinflussen sowohl das Bodengefüge, als auch die Dissoziation der Kationen in Verbindung mit dem osmotischen Zug die Ergebnisse. Nach den geringeren Feuchtebereichen zu wird die Dissoziation und damit die Auswirkung der Kationenbelegung geringer.

In den Kationengemischen ist lediglich eine geringe negative Korrelation des Ca-Gehaltes zum pF-Wert 1,48 und 2,18 gegeben mit $r = -0,28$ $n = 51$ $y = 47,31 - 0,18 x$. Das besagt, daß mit zunehmendem Ca-Gehalt der Wassergehalt bei gleicher Bindungsintensität abnimmt.

Die Korngrößenwirkung ist für alle Feuchtebereiche gegeben (112, 116). Besonders deutlich ist die Abhängigkeit der Bindungsintensität von dem Tongehalt, die für alle pF-Bereiche hochsignifikant ist. x)

x) Die Berechnungen der Korrelationen und Regressionen erfolgte nach Mudra (82). Die Signifikanz wurde nach den Signifikanzschwellen beurteilt.

30	1,4	1,3	1,2	0,5	1,20	0,93	0,48	0,20	0,20	0,052
31	1,5	0,7	0,7	0,7	0,73	0,3	0,3	0,19	0,16	0,044
32	64,20	60,5	59,42	58,84	53,32		20,21	10,81		3,56
33	58,98	54,69	54,40	53,72	38,44		18,13	11,71		3,23
34	57,69	53,43	51,59	49,74	31,38		18,50	13,58		3,14
35	56,63	53,67	48,49	44,33	31,57		17,43	12,40		3,13
36	46,94	41,59	39,33	38,37	29,33		17,14	11,54		3,16
37	48,00	42,27	39,48	37,52	27,65		16,28	10,32		3,02
38	48,01	47,14	46,16	45,47	28,93		11,28	7,58		4,15
39	48,12	40,41	40,27	39,78	23,26		7,46	5,10		1,48
40	45,32	43,19	40,79	31,21	19,95		10,55	6,28		1,72
41	43,05	41,25	34,84	24,53	15,41		8,36	6,09		1,73
42	23,06	19,90	17,16	14,41	9,09		3,67	2,86		0,70
43	19,02	16,59	14,63	12,82	7,93		3,22	2,74		0,75
44	53,52	50,33	48,68	48,30	39,72		16,07	10,97		2,96
45	28,10	26,77	26,05	25,57	21,67		5,91	4,30		1,23
46	62,81	61,03	57,55	56,45	45,04		20,70	15,14		3,04
47	53,27	49,20	48,25	44,18	36,14		15,56	11,35		2,73
48	49,86	45,85	44,37	43,23	31,45		14,05	10,01		2,36
49										
50										
51										
52										
53										
56	103,92	99,03	94,71	84,80	63,00			22,87		
67	109,40	108,20	97,60	91,28	63,97			22,92		
68	112,21	111,88	102,63	96,93	65,31			23,74		
69	113,49	110,39	98,91	94,45	65,55			23,01		
70	117,73	110,85	106,13	99,60	66,43			23,72		

Abb. 1a pF-Kurven der
Proben 1 - 5
reine Tone

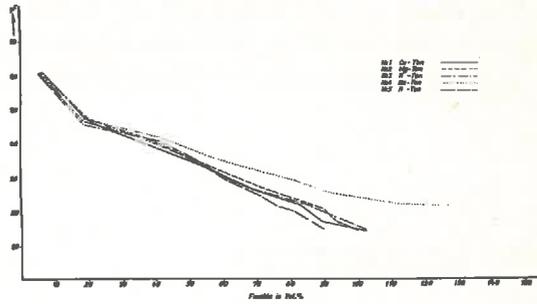


Abb. 1b pF-Kurven der
Proben 18-22
reine Böden

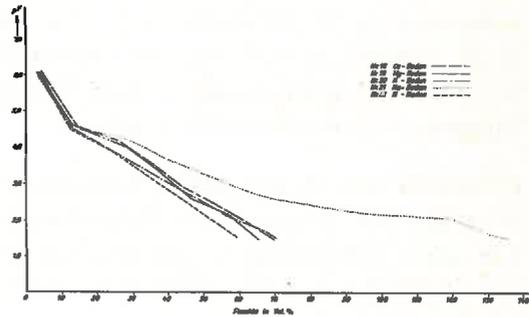
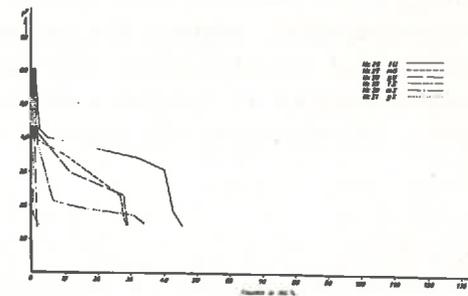


Abb. 1c pF-Kurven der
Proben 26-31
reine Korn-
größen



So errechneten wir für pF 1,48 $r = + 0,97$ $n = 22$
 $y = -9,35 + 0,89 x$; für pF 2,18 $r = + 0,96$ $n = 22$
 $y = -5,48 + 0,99 x$; für pF 3,00 $r = + 0,94$ $n = 22$
 $y = -4,99 + 1,37 x$ und für pF 4,20 $r = + 0,98$ $n = 17$
 $y = +1,48 + 2,37 x$. Mit zunehmendem Tongehalt nimmt folglich der Wassergehalt bei gleicher Bindungsintensität zu.

4. Die Plastizität

Die Plastizität ist eine Oberflächenerscheinung, die eng mit den die Bodenteilchen umgebenden Wasserhäutchen zusammenhängt (27). Sie wird im allgemeinen definiert als die Fähigkeit eines Stoffes unter der Einwirkung von Kräften bleibende Verformungen ohne Zerstörung des inneren Zusammenhaltes zu erfahren (67). Aus dieser Definition ist unter anderem abzuleiten, daß neben der Verschiebbarkeit der Teilchen gegeneinander auch die Kohäsion bei diesem Vorgang eine Rolle spielen muß.

ATTERBERG hat in der Einleitung zu seiner Arbeit "Die Plastizität der Böden" diese Verformbarkeit mit Recht - neben der zähen Konsistenz im nassen und der Festigkeit im trocknen Zustand - als die kennzeichnendste Eigenschaft der Tone bezeichnet (6).

Ihre Bedeutung liegt nicht nur auf dem Gebiet der keramischen Verarbeitung der Tone, sondern sie ist auch für die Gefügeausbildung im Boden gegeben. Nach DIN 4220 (29) unterscheiden wir zwischen Einzelkorngefüge, Kohärentgefüge und Aggregatgefüge. Während die beiden ersten Gefügearten vorwiegend auf leichten Böden eine Rolle spielen, kommt das Aggregatgefüge in humosen A-Horizonten fast aller Bodenarten, den mittleren und schweren Bodenarten und auch

in Tonanreicherungshorizonten vor (63). MÜCKENHAUSEN faßt unter Aggregatgefüge alle makroskopischen Gefügeformen, die durch Zusammenballungen oder Schwundvorgänge (Absonderungsgefüge) der Bodenmasse auf natürlichem Wege entstehen, zusammen (80). Diese Schwund- bzw. Zusammenballungsvorgänge sind stets mit Verschiebungen der Einzelteilchen gegeneinander verbunden. Das aus diesem Geschehen hervorgehende Ergebnis der Aggregatbildung ist eng mit der Plastizität verknüpft. Auf diese Zusammenhänge weist auch KURON hin (67).

Zur Messung der Plastizität versuchte man das Ausmaß zu bestimmen, bis zu welchem die Teilchen unter der Anwendung einer Kraft verschoben werden können ohne zu zerreißen (6). Dazu wurde der mit Wasser versetzte Ton zu einem zylindrischen Strang ausgewalzt und dieser entweder gebogen oder zu einer Spirale gedreht. Je kleiner der Krümmungsradius war, ohne daß der Strang zerriß, umso plastischer war der Boden. Andere Verfahren beruhten darauf, daß der mit Wasser versetzte Ton zu Kugeln oder zu Zylindern geformt wurde. Diese preßte man bis auf ein bestimmtes Maß zusammen. Zeigten sich dann noch keine Risse, so wurde der Ton als plastisch bezeichnet. Weitere Verfahren versuchen die Plastizität über die Kohäsion des Materials zu messen, indem sie entweder aus einer Düse Tonfäden solange auspresen bis sie durch ihr eigenes Gewicht zerreißen, oder es wird die zum Zerreißen erforderliche Kraft gemessen.

Der Plastizitätsprüfer nach PFEFFERKORN (86) arbeitet nach folgendem Prinzip. Ein zylindrischer Prüfkörper bestimmter Abmessung wird bei verschiedenen Wassergehalten der Probe durch einmaligen Schlag eines Fallstempels von festgelegtem Gewicht deformiert. Die Plastizitätszahl ist der Wassergehalt in Gew. %, bei dem der Prüfkörper eine Zusammendrückung auf 30 % seiner Anfangshöhe erfährt.

LINSEIS (69) versucht mit Hilfe seines Plastizitätsmess-

gerätes sowohl die zur Verformung erforderliche Kraft - die er Scherkraft nennt - als auch die Kohäsion zu messen. Als Scherkraft bezeichnet er die Kraft, die notwendig ist, um die Masse aus einer sich verjüngenden Düse mit einer Öffnung von 1 cm^2 herauszupressen. Als Maß dient der für den Preßvorgang erforderliche Druck in kg/cm^2 . Die Kohäsion wird durch die Kraft in kg/cm^2 ausgedrückt, die erforderlich ist, um den aus der Düse ausgetretenen Massestrang zu zerreißen. Die Plastizität ist vom Wassergehalt abhängig. Nach LINSEIS ist es umständlich, Proben mit genauem Wassergehalt anzusetzen. Der Scherwiderstand und die Zerreißfestigkeit werden deshalb bei mindestens 3 verschiedenen Wassergehalten gemessen und in einem Koordinatensystem mit der Zerreißfestigkeit als Ordinate und dem Scherwiderstand als Abszisse aufgetragen. So ergibt sich für jeden Wassergehalt ein bestimmter Punkt. Alle Punkte untereinander verbunden zeigen die Kennlinie der Masse. Genauer werden die Ergebnisse jedoch, wenn man den jeweiligen Wassergehalt mit erfaßt, wie dies auch SCHARREER und U.HOFFMANN getan haben (92).

Zur Untersuchung der Plastizität mit dem von CZERATZKI (25) gebrauchten Plastographen von BRABENDER wird die zu untersuchende Substanz in einem Gefäß mit einem Knetter durchgeknetet. Gemessen wird der Widerstand, den die Substanz dem Knetvorgang entgegensetzt.

Andere Verfahren arbeiten mit dem plastischen Fließen, bei dem die zu untersuchende Substanz mit einer bestimmten Kraft durch eine Düse gepreßt wird. Gemessen wird die erforderliche Kraft und das Volumen des Fließens. Beide Werte gegeneinander aufgetragen ergeben in den meisten Fällen eine Gerade (Abb. 2), die nach unten hin abbiegt. Verlängert man die Gerade CB zum Punkt D, so erhält man den in der Literatur häufig aufgeführten YIELD POINT (12).

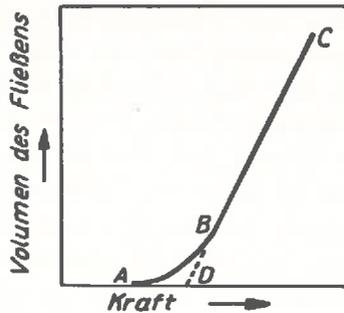


Abb. 2 Messung des plastischen Fließens

ATTERBERG beschriftet einen anderen Weg zur Bestimmung der Plastizität. Er bestimmt den Feuchtebereich, in dem ein Boden plastisch ist. In Abhängigkeit von der Feuchte stellt er 6 Stufen der Konsistenz auf (7):

1. Düninflüssige Konsistenzform. Die Masse ist so leichtflüssig wie Wasser.
2. Dickflüssige Konsistenzform. Die Masse ist lose, breiartig (nordische Fließlehme).
3. Zähflüssige Konsistenzform. Die Konsistenz der Masse ist steif, breiartig, klebrig. In dünner Schicht fließt die Masse nicht, während mächtigere Schichten zu fließen beginnen.
4. Plastische Konsistenzform. Die Masse ist weich und teigförmig. Tonstückchen lassen sich zu Drähten ausrollen. Die Masse fließt hier nur unter Anwendung eines Druckes und nur solange der Druck andauert.
5. Klebende plastische Konsistenzform.
6. Zäh plastische Konsistenzform.

Als wesentlich hat ATTERBERG besonders 2 Grenzen herausgestellt, mit denen er die Plastizität begrenzt. Der untere Wert wird durch die Ausrollgrenze dargestellt, während die Begrenzung der Plastizität zur flüssigen Phase hin mit Hilfe der Fließgrenze bestimmt wird.

Beide Methoden sind genormt und in DIN 4016 Blatt 3 (Entwurf) (28) festgelegt. Die Ausrollgrenze wird dadurch bestimmt, daß ein mit Wasser angesetzter zu einer 3 mm dicken Rolle ausgerollter Boden so lange auf einer wasseraufsaugenden Unterlage zusammengeknetet und wieder gerollt wird, bis das Wasser so weit entzogen ist, daß es die Rolle nicht mehr zusammenhält. Der Wassergehalt bei diesem Zustand in Gew. % entspricht der Ausrollgrenze. Die Methode ist sehr einfach und die Ergebnisse lassen sich überraschend gut reproduzieren. In unseren Versuchen war der Fehler nie größer als 1 % in dem Bereich von 20 - 30 % Wasser.

Die Fließgrenze ist als der Wassergehalt in Gew. % definiert, bei dem eine mit einem genormten Furchenzieher in den nassen Boden gezogene Rinne nach 25 Schlägen auf eine Strecke von 10 mm zusammenfließt. Dazu wird der nasse Boden in eine Schale, die auf einer Nockenwelle sitzt gegeben und mit einer Furche versehen. Durch Drehen an einer Kurbel wird die Schale so lange genau 10 mm angehoben und dann fallengelassen (Schlag) bis sich die Furche auf 10 mm geschlossen hat. Auch hier waren die Ergebnisse gut reproduzierbar. Die Differenz zwischen den beiden Plastizitätsgrenzen wird Plastizitätszahl genannt.

Betrachtet man die Plastizität in ihrer Auswirkung auf die Bodengefügeausbildung (Quellung und Schrumpfung), so ist in erster Linie der Feuchtebereich des plastischen Zustandes interessant (S. 83). In dieser Beziehung ist dagegen das Ausmaß der Verschiebungsmöglichkeit der Teilchen von sekundärer Bedeutung. Da auch für die Beurteilung des Erfolges der Bodenbearbeitung (Schmierohle) die Kenntnis des Feuchtebereiches der Plastizität wichtig ist, haben wir für diese Bestimmung die ATTERBERG'schen Konsistenzgrenzen gewählt.

Will man die Plastizität theoretisch erläutern, so muß man von den Oberflächeneigenschaften der Bodenkolloide aus-

gehen (12). Treffend können die Vorgänge nach der Filmtheorie erklärt werden.

Alle Tonteilchen sind mit einer Wasserhülle umgeben. Die innersten an dem Tonteilchen angelagerten Wassermoleküle sind sehr fest gebunden (orientiert). Bei höherer Feuchte nimmt mit zunehmendem Abstand dieser Moleküle von den Teilchen die Bindungsintensität ab (37). Wenn genügend Wasser vorhanden ist, fließen die Wasserhüllen nebeneinanderliegender Teilchen ineinander über und bilden einen ringförmigen Meniskus (Abb. 4, 6), der die Teilchen aneinanderzieht. Bei geringmächtigen Hydrathüllen ist die Kohäsion durch diesen Meniskenzug derart groß, daß die Teilchen in fester Konsistenz verharren. Ein Verschieben der festgebundenen, verdichteten Wassermoleküle ist dann nicht möglich. Folglich zerbricht die Substanz bei größerem Kraftaufwand. Ist dagegen die Hydrathülle genügend dick, so werden die Wassermoleküle beweglich und ermöglichen dadurch eine Verschiebung der Teilchen gegeneinander. Bei einer bestimmten Feuchte wird die Ausrollgrenze (untere Plastizitätsgrenze) erreicht. Durch weitere Zugabe von Wasser wird die Wasserhülle und damit der Abstand von den Teilchen so groß, daß die Schwerkraft die Kraft des Meniskus und die Adhäsion der Wassermoleküle übertrifft. Wir sind dann im Feuchtebereich der oberen Plastizitätsgrenze, der Fließgrenze, bei der der Boden zerfließt.

ATTERBERG (6) hat die Abhängigkeit der Plastizität von der Korngröße und der Kornform schon früh beschrieben. Er stellte fest, daß mit zunehmender Korngröße die Plastizitätszahl abnahm und daß plättchenförmige Teilchen eine größere Plastizität aufweisen als runde. Die Bedeutung der Größe der wirksamen Oberfläche und der Zahl der Berührungspunkte geht aus dieser Tatsache hervor.

BAVER (12) studierte wie sich die Zugabe verschiedener Kationen zu Böden auf deren Plastizität auswirkt und fand,

daß Na die Grenzen der Plastizität vermindert aber die Plastizitätszahl erhöht. Adsorbierte K-Ionen vermindern beide Plastizitätsgrenzen und die Plastizitätszahl. In ungesättigten Böden wird die Plastizität durch H-Ionen erhöht. Ca- und Mg-Ionen erhöhen die Plastizitätszahl, setzen jedoch beide Grenzen herab. Humus erhöht beide Plastizitätsgrenzen. Diese Ergebnisse können wir nur z.T. bestätigen. Es muß aber betont werden, daß wir jeweils mit umgeladenen Substanzen arbeiteten, während BAYER die Kationen zusätzlich zu den im Boden vorhandenen Ionen gab.

4.1. Ausrollgrenze

Die Untersuchungen wurden entsprechend DIN 4016 (28) durchgeführt. Betrachtet man zunächst die Ergebnisse der Ausrollgrenze (Tab. 7) der reinen Tone (Nr. 1 - 5), also der Proben, die jeweils nur mit einem Kation belegt sind (Tab. 5), so kann man erkennen, daß die Werte beim Ca-Ton (Nr. 1) und Mg-Ton (Nr. 2) mit 41,7 bzw. 41,5 % relativ niedrig liegen, während bei dem Na-Ton (Nr. 4) mit 46,5 % der höchste Wert erreicht wird. K-Ton (Nr. 3) liegt mit 43,5 % noch recht hoch, es folgt der H-Ton (Nr. 5) mit 42,9 %. Diese Wirkung der Kationen auf die Ausrollgrenze der Tone hängt von deren Fähigkeit ab die Kolloide auszuflocken. Nach der Filmtheorie lagert sich, wie schon gesagt, zunächst ein Wasserfilm, der je nach Wassergehalt mehr oder weniger stark ausgeprägt ist, an die Oberfläche der Teilchen. Ist die Substanz ausgeflockt, so kann wegen des geringen Abstandes der Teilchen innerhalb der Flocken weniger Wasser an der Oberfläche der Primärteilchen angelagert werden. Die Aggregate als Gesamtheit (Sekundärteilchen) werden ebenfalls von einem Wasserfilm überzogen. Dieser Wasserfilm der Sekundärteilchen ist für das plastische Verhalten der Substanz

Tab. 7 Ergebnisse der Fließgrenze-, Ausrollgrenz- und Plastizitätszahlbestimmung

Nr.	Fließgr.		Ausrollgr.		Plastizitätszahl Wassergeh. %
	Wassergeh. %	pF	Wassergeh. %	pF	
1	115,0	1,2	41,7	3,8	73,3
2	111,2	1,1	41,5	3,9	69,7
3	94,4	1,8	43,5	4,1	50,9
4	123,6	2,2	46,5	4,0	77,1
5	94,2	1,3	42,9	4,1	51,3
8	113,5	1,0			
9	111,9				
10	104,3	1,8			
11	100,8	1,8			
12	101,4	1,6			
13	100,9	1,2			
14	101,7				
15	101,2				
16	95,4	1,6			
17	98,1	1,3			
18	79,3		26,1	4,1	53,2
19	76,9		25,5	4,1	51,4
20	52,4	2,4	27,8	3,9	24,6
21	86,7	2,4	26,7	4,2	60,0
22	59,5	1,4	31,2	3,5	28,3
23	73,2	1,3			
24	74,1	1,1			
25	72,0	1,4			
26	44,3	1,4			
27	31,2				
28	31,7				
29	32,2	1,6			
30	23,2				
31	22,3				
32	58,0	2,3	26,3	3,9	31,7
33	52,6	2,3	21,9	3,9	30,7
34	57,4	1,5	20,8	4,0	36,8
35	58,1	1,4	21,3	3,9	36,6
36	63,8		20,6	3,9	43,2
37	48,0	1,5	17,7	4,1	30,3
38	36,6	2,6	21,7	3,5	14,9
39	33,1	2,5	23,4	3,0	9,7
40	39,8	2,0	19,9	3,0	19,9
41	35,2	2,0	22,3	2,4	12,9
42	21,7	1,6	15,1	2,1	6,6
43	18,7	1,5	12,3	2,3	6,4
44	50,0	1,8	21,7	3,9	28,3
45	26,3	1,8	13,9	3,6	12,4
46	61,8	1,6	25,1	4,0	36,7
47	51,8	1,6	19,8	4,0	32,0
48	43,9	1,9	17,1	4,0	26,8
66	95,5	2,0			
67	95,4	2,0			
68	99,2	2,0			
69	96,2	2,0			
70	100,0	2,1			

entsprechend der Filmtheorie ausschlaggebend. Nach ATTERBERG (6) nimmt mit zunehmender Korngröße (hier Sekundärteilchen) der Wassergehalt der Ausrollgrenze ab. Demnach muß in geflockten Substanzen die Ausrollgrenze tiefer liegen. Daß die Kolloide der H-, Ca-, Mg-Tone tatsächlich erheblich stärker koaguliert sind als die des K- und Na-Tones, geht aus den Ergebnissen der Untersuchung auf Teilchen $< 2 \mu$ in Wasser hervor (Tab. 10).

Im Boden liegen die Verhältnisse umgekehrt (Tab. 7, Nr. 18-22). Hier hat der H-Boden (Nr. 22) mit 31,2 % den höchsten Wassergehalt bei der Ausrollgrenze, obwohl er entsprechend der Untersuchung auf Teilchen $< 2 \mu$ in Wasser (Tab. 10) am stärksten koaguliert ist. Der stark dispergierte Na-Boden (Nr. 21) dagegen erreicht schon bei 26,7 % die Ausrollgrenze. Der K-Boden (Nr. 20) liegt bei 27,8 %, es folgen Ca-Boden (Nr. 18) mit 26,1 % und Mg-Boden (Nr. 19) mit 25,5 %.

Hier ist die Deutung ebenfalls auf Grund der Filmtheorie in Verbindung mit der unterschiedlichen Flockungsmöglichkeit der Kationen und der Hydratation möglich. Im Boden sind sowohl die oberflächenaktiven Kolloide als auch die oberflächeninaktiven Sandkörner (um beide Extreme aufzuführen) vorhanden. Die stark dispergierten Kolloide des Na-Bodens können sich an den groben Sandkörnern auf Grund der Wassermenisken nach der Filmtheorie anlagern. (Im Gegensatz dazu stehen die reinen Kolloide der Tone, bei denen sich infolge der gleichgerichteten elektrischen Ladung die Teilchen gegenseitig abstoßen.) Dadurch wird ein Teil der Oberflächen dieser an den groben Sandkörnern angelagerten Teilchen - bei der relativ geringen Feuchte der Ausrollgrenze - für das Wasser nicht mehr zugänglich (Abb. 3a). Die Sandteilchen sind in diesem Falle in ihrer Wirkung mit groben Teilchen, allerdings (durch diesen Belag) mit aktiver Oberfläche zu vergleichen, bei denen wenig Wasser zur entsprechenden Ausbildung der Menisken für die Aus-

rollgrenze erforderlich ist. Dies wird etwas durch die starke Hydratationsneigung der Na-Kolloide kompensiert.

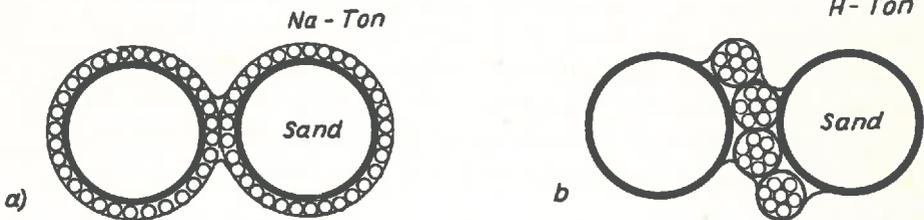


Abb. 3 Modell der Filmtheorie a) in dispergierter Substanz
b) in koagulierter Substanz

Bei den koagulierten Kolloiden ist eine derartige Anlagerung der Aggregate nach der Filmtheorie nicht möglich. Hier müssen die Aggregate die Funktion des Bindemittels übernehmen. Diese Aggregate binden sich untereinander durch Menisken. Eine größere Menge Wasser ist in diesem Fall zur Erreichung der Ausrollgrenze erforderlich (Abb. 3b).

Die Auswirkung der Korngrößenverteilung auf die Ausrollgrenze ist aus der Tabelle 7 zu ersehen.

Zunächst sollen die Ergebnisse der Proben Nr. 32 - 37, bei denen der Tongehalt etwa bei 45 % liegt, während jeweils bei der höheren Nr. - von 32 anfangend - der Rest aus einer größeren Kornfraktion zugemischt wurde (Tab. 5), betrachtet werden. Man erkennt, daß die Probe Nr. 32 (mit Feinschluff) relativ viel Wasser 26,3 % zur Erreichung der Ausrollgrenze benötigt, während die Proben Nr. 33 - 36 (Mittelschluff, Feinsand, Mittelsand) bei erheblich niedrigeren Wassergehalten die Ausrollgrenze erreicht haben. Die Wassergehalte dieser Proben schwanken bei der Ausrollgrenze zwischen 20,6 % und 21,9 % und unterscheiden sich demnach untereinander kaum. Die um 5 % höheren Werte der Probe 32 können mit der höheren Wasserbindungsintensität in diesem

Feuchtebereich infolge des Feinschluffanteiles begründet werden (Tab. 6). Die Beimengung von Grobsand (Nr. 37) läßt den erforderlichen Wassergehalt noch weiter bis auf 17,7 % sinken. Dieses Absinken ist mit der geringeren Wasserbindungsintensität der Probe 37 alleine nicht erklärt (Tab. 6). Sicher liegt hier ein ähnlicher Effekt der Anlagerung von Primärteilchen an die Sandkörner vor, wie er in der Abb. 3a dargestellt ist, der in Verbindung mit dem größeren Durchmesser des Sandes den Wassergehalt sinken läßt.

Betrachtet man nun die Auswirkung der unterschiedlichen Korngrößen auf alle untersuchten Proben (Nr. 18 - 48), so läßt sich eine hoch signifikante positive Korrelation zum Tongehalt feststellen $r = + 0,61$ $n = 31$ $Y = 0,23 + 1,52 x$. Mit zunehmendem Tongehalt nimmt demnach der Wert der Ausrollgrenze zu. BALLENEGGER (8) hat an unveränderten ungarischen Böden ebenfalls Bestimmungen der Ausrollgrenze durchgeführt und mit den entsprechenden Tongehalten angegeben. Diese Werte stimmen mit denen von uns an Modellböden gefundenen überein.

Zu anderen Korngrößengruppen besteht keine gesicherte Abhängigkeit. Da der Wassergehalt im Boden im wesentlichen eine Funktion der Wasserhaltefähigkeit ist, ist es vor allem interessant bei welcher Wasserbindungsintensität der Boden die untere Plastizitätsgrenze erreicht (S. 29). Aus Tab. 7 ist zu erkennen, daß bei einem Tongehalt von über 40 % die Ausrollgrenze in allen Fällen bei einem pF-Wert von 3,9 - 4,2 liegt, um bei geringerem Tongehalt zu einer kleineren Saugspannung abzusinken. 20 % Ton z.B. hat eine Ausrollgrenze bei pF 2,4 und über 10 % Ton eine solche bei pF 2,18, also der Feldkapazität. Daraus geht hervor, daß Böden mit über 40 % Ton erst im Bereich des Welkepunktes ihre Plastizität verlieren, während leichte Böden schon bei der Feldkapazität nicht mehr plastisch sind. Dies ist, wie noch gezeigt wird, für die Ausbildung des Gefüges von Bedeutung, besonders da ein Zerfallen des Bodens in Gefüge-

elemente vorwiegend im nicht plastischen Zustand eintritt.

Die Auswirkung der Ionen auf den pF-Wert der unteren Plastizitätsgrenze ist gering (Werte liegen bei pF 4,0). Lediglich im H-Böden wird die Bindungsintensität auf pF 3,5 abgesenkt. Interessant ist in diesem Zusammenhang, daß der Tongehalt (Natriumpyrophosphat) durch die Einwirkung des H-Iones trotz gleichem Ausgangsmaterial ebenfalls gegenüber den mit anderen Kationen behandelten Böden um 8 - 10 % geringer ist. Wir haben es hier also mit Sekundärteilchen zu tun, die in ihrer Auswirkung wie gröbere Primärteilchen wirken.

Da die Feuchte der leichten Böden in der Natur nur selten die Feldkapazität übersteigt, ist aus dem oben Gesagten abzuleiten, daß in diesen Böden unter natürlichen Verhältnissen eine plastische Verschiebung der Teilchen nur selten zu erwarten ist. Wenn ein solcher Boden in diesem Feuchtebereich noch ausreichend schrumpfungsfähig ist (die Nr. 41 z.B. hat bei dem, der Ausrollgrenze entsprechenden Wassergehalt von 22 %, noch ein Schrumpfvormögen von etwa 12 %) (Tab. 12), so muß sich wegen der geringen Plastizität ein schnelles feines Reißen der Rißbilder zeigen. Wie später gezeigt wird, ist dies auch der Fall.

Ist das Schrumpfvormögen dagegen bei Feuchtegehalten unter der Ausrollgrenze gering, so wird auch kein Zerfall in Gefügeelemente erfolgen (Rißbilder Nr. 39, 42, 43, 45, bei denen die Volumenschrumpfung im Bereich der Ausrollgrenze kleiner als 10 % ist zeigen keine Rißbildung) (Tab. 16).

Der Aussagewert der Bestimmung der Ausrollgrenze wird deutlich, wenn man ihn mit den Ergebnissen anderer Untersuchungsmethoden an denselben Böden vergleicht. Wir haben dies getan und dabei festgestellt, daß besonders zu den Methoden, die die Bindung im Boden charakterisieren, gute

Beziehungen bestehen. Zur Adhäsion ausgedrückt in % Wasser bei 50 g/cm^2 ergibt sich eine hochsignifikante positive Korrelation von $r = + 0,88$ bei $n = 30$ $y = -12,83 + 2,37 x$. Ebenfalls bestehen hochsignifikante positive Korrelationen zur Fließgrenze von $r = + 0,90$ bei $n = 30$ $y = 7,23 + 0,30 x$ und zur Plastizitätszahl $r = + 0,79$ bei $n = 30$ $y = 12,45 + 0,37 x$. Auch zu den Teilchen $< 2 \mu$ (in Wasser) ($r = + 0,66$ $n = 30$ $y = 20,47 + 0,35 x$) und zur Gefügestabilität ($r = + 0,60$ $n = 30$ $y = 18,70 + 32,80 x$) sind die Korrelationen hochsignifikant positiv. Eine weitere hochsignifikante positive Korrelation ist zur Volumenschrumpfung bei pF 2,18 ($r = + 0,75$ $n = 30$ $y = 1,50 + 1,38 x$) gegeben.

4.2. Fließgrenze

Die Untersuchungen erfolgten nach DIN 4016 (28). Während die Bedeutung der Ausrollgrenze vorwiegend auf dem Gebiet der Gefügeausbildung (Zerfall in Gefügeelemente bei der Quellung und Schrumpfung) liegt, ist die Fließgrenze als obere Plastizitätsgrenze wichtig für die Beurteilung der Gefügestabilität gegenüber Wasser.

Bei der Betrachtung der Auswirkung der Kationen auf die Fließgrenze soll wiederum zunächst von den reinen Tonen bzw. Böden (Nr. 1 - 5 und 18 - 22) ausgegangen werden. Man kann in scheinbarer Abweichung zu den in der Literatur bekannten Ergebnissen (12, 27) unschwer erkennen (Tab. 7), daß sowohl im Ton als auch im Boden die mit Na (Nr. 4, 21) belegten Teilchen bei weitem den höchsten Wassergehalt zur Erreichung der Fließgrenze (123,6 % bzw. 86 %) benötigen. Die gleichen Ergebnisse erzielten wir früher bei einem anderen Boden (112). Ca- und Mg-Tone (Nr. 1, 2) und -Böden (Nr. 18, 19) liegen mit ihrer Fließgrenze unter sich etwa

gleich. Sie benötigen für die Tone einen Wassergehalt von 115 % bzw. 111 % und die entsprechend belegten Böden einen solchen von 79 % bzw. 77 %. Sehr niedrig liegen die Werte der K- (Nr. 3) und H-Tone (Nr. 5) mit je 94 % und der K- (Nr. 20) und H-Böden (Nr. 22) mit 52 % bzw. 59 %. Auch diese beiden Werte ähneln sich.

Drückt man den Feuchtegehalt bei der Fließgrenze im pF-Wert aus, so sieht man (Tab. 7), daß dieser im Ca-Ton (Nr. 1) bei pF 1,2, im Mg-Ton (Nr. 2) bei pF 1,1 und im H-Ton (Nr. 5) bei pF 1,3 liegt. K-Ton (Nr. 3) hat mit pF 1,8 eine erheblich höhere Saugspannung und schließlich erreicht der Na-Ton (Nr. 4) schon bei der Feldkapazität (pF 2,18) die Fließgrenze. In den Böden liegen die Verhältnisse ähnlich. Ca- (Nr. 18) und Mg-Böden (Nr. 19) haben die Fließgrenze erst bei dem pF-Wert = 0 erreicht, H-Boden (Nr. 22) bei pF 1,4 und K- (Nr. 20) und Na-Boden (Nr. 21) dagegen schon bei pF 2,4.

Wir müssen diese Ergebnisse mit der Dissoziation der Ionen bzw. mit den Hydrathüllen der Komplexe in Verbindung bringen. K^+ und Na^+ dissoziieren weit in die Außenlösung (Tab. 8). Die mit diesen Ionen belegten Substanzen haben also in den höheren Feuchtebereichen (z.B. bei pF 1,5) eine Hydrathülle mit größerem Durchmesser als die mit den gering dissoziierenden zwertigen Ionen und dem H-Ion belegten (Abb. 4).

Tab. 8 Ionendurchmesser in Å (nach GOLDSCHMIDT), Hydratationszahlen in Molekülen Wasser je Ion (nach ULICH) und Dissoziation der adsorbierten Ionen (nach JENNY und REITEMEYER).

Ion	Ionendurchmesser	Hydratationszahl	Dissoziation der adsorbierten Ionen
Na	1,96	4	66,5
K	2,66	2,5	48,7
Mg	1,56	9-13	31,3
Ca	2,12	8-10	28,8
H	0,7	4	14,5

Je größer nun der Durchmesser der Hydrathülle ist (geringe Krümmung des Meniskus), umso weniger fest ist nach dem Kapillaritätsgesetz die Wasserbindung. Beim Na-Ton ist die Hydrathülle schon bei der Feldkapazität so groß, daß die Kraft des Meniskus nicht mehr ausreicht die Teilchen aneinander zu binden. Beim Ca- und Mg-Ton trifft dies erst bei völliger Wassersättigung zu.

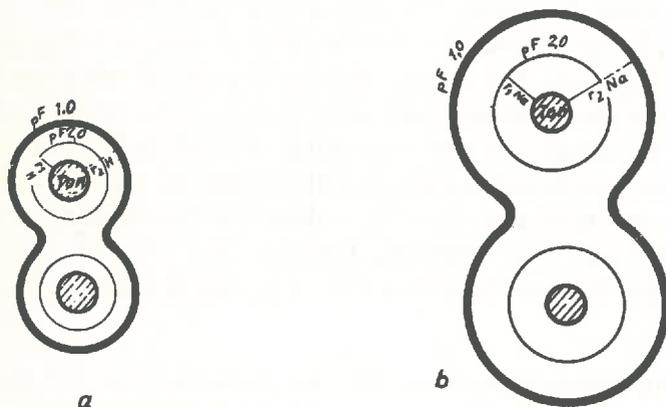


Abb. 4 Schematische Darstellung der Auswirkung unterschiedlicher Durchmesser der Hydrathüllen auf die Meniskenbildung als Erklärung der unterschiedlichen Auswirkung der Kationenbelegung bei gleichem pF-Wert. a) = H-Ton b) = Na-Ton
 r_2 = Dicke der Hydrat-
schicht bei pF 1,0
 r_1 = Dicke der Hydrat-
schicht bei pF 2,0

Aus diesem ist zu folgern, daß bei hoher Na- (etwa über 5 % Na) und K-Belegung in Böden und in Tonen (Proben Nr. 4, 20, 21, 66 - 70) schon im Feuchtebereich der Feldkapazität der Boden bzw. Ton zerfließt und demnach ein stabiles Gefüge nicht ausbilden kann. Dies stimmt mit Erfahrungen der Praxis überein.

Eine recht hohe positive Korrelation ergibt sich bei den Proben 8 - 17 und 66 - 70 zwischen dem Ca-Ion und der Fließgrenze mit $r = +0,85$ bei $n = 20$ $y = -141,14 + 1,74 x$, während mit Mg eine hochsignifikante negative Korrelation besteht ($r = -0,72$ $n = 20$ $y = 160,31 - 1,21 x$). K-Ionen sind besonders bei der Einschaltung der Proben 66 - 70 sichtbar negativ korreliert, wenn das Ergebnis auch nicht signifikant ist. Na zeigt eine signifikante negative Korrelation $r = -0,52$ $n = 20$ $y = 147,00 - 0,14 x$. Ebenso korreliert H signifikant negativ $r = -0,53$ $n = 20$ $y = 62,12 - 0,40 x$. Aus der negativen Korrelation des Natriums läßt sich in Übereinstimmung mit den in der Literatur bekannten Werten ableiten, daß bei einer Mischbelegung mit anderen Kationen tatsächlich die Erhöhung des Na den Wassergehalt der Fließgrenze herabsetzt, während Ca mit seinem positiven Korrelationskoeffizienten diese heraufsetzt. Zur Klärung dieser Frage haben wir noch einen zusätzlichen Versuch durchgeführt. Zu dem Ca-Boden (Nr. 18) mischten wir $0,3\% \text{ NaCO}_3$. Die Fließgrenze wurde gegenüber dem der Probe Nr. 18 von $79,3\%$ auf $74,9\%$ herabgesetzt. Dies stimmt mit den Ergebnissen von BAVER und auch mit den Angaben der keramischen Industrie (12) überein. Die Auswirkung der H-Ionen dagegen steht im Gegensatz zu BAVER, da in unseren Versuchen bei steigenden Wasserstoffmengen der Wert der Fließgrenze sinkt. Die negative Korrelation des Mg-Iones deutet daraufhin, daß durch dieses Ion die Substanzen schon bei geringem Wassergehalt zerfließen.

Im großen und ganzen kann man feststellen, daß im Bereich der in unseren Böden auftretenden Schwankungen der Kationenbelegung (nicht die Extremwerte) diese nur geringe Auswirkungen auf die Fließgrenze haben. Als Ausnahme kann man das Na-Ion ansehen. In landwirtschaftlicher Sicht sollte vor allem die Fließgrenze im pF-Wert ausgedrückt werden, um den Aussagewert zu erhöhen.

Bei der Betrachtung der reinen Korngrößen (Nr. 26 - 31, Tau. 7) fällt auf, daß die Fließgrenze des Tones (94,4 %) zu der des Feinschluffes (44,3 %) erheblich abnimmt, selbst wenn man den Ton mit der niedrigsten Fließgrenze (H-Ton Nr. 5) herausgreift. Die Fließgrenze des Mittelschluffes, des Grobschluffes und des Feinsandes liegen mit 31 - 32 % noch erheblich tiefer, sind unter sich aber in etwa gleich. Ein deutliches Absinken der Fließgrenze der unter sich wieder sehr ähnlichen Mittelsande und Grobsande (22 - 23 %) ist zu erkennen. Dies war zu erwarten. Zu beachten ist, daß der Mittelschluff, der Grobschluff und der Feinsand allem Anschein nach in eine Gruppe gehören. Dies entspricht auch den Ergebnissen der Ausrollgrenze. Der Mittelsand und der Grobsand dagegen bilden eine andere Gruppe.

Sehr stark positiv ist bei den Proben Nr. 18 - 48 die Fließgrenze mit dem Tongehalt korreliert ($r = +0,88$ $n = 62$ $y = -14,99 + 0,95 x$). Zum Feinschluff liegt keine Korrelation vor, obwohl eine positive Tendenz zu erkennen ist. Faßt man jedoch den Ton und den Feinschluff zusammen, so kann man immer noch eine hochsignifikante positive Korrelation zur Fließgrenze mit $r = +0,85$ $n = 62$ erkennen. Der Mittelschluff hat keine Signifikanz, wenn die Tendenz auch negativ ist. Der Grobschluff dagegen zeigt eine hochsignifikante negative Korrelation bei den Proben 32 - 48 von $r = -0,73$ bei $n = 34$ $y = 17,34 - 0,064 x$. Auch Feinsand, Mittelsand und Grobsand sind signifikant bis hochsignifikant negativ korreliert. Die von BALLENEGGER (8) an unveränderten ungarischen Böden gemessenen Fließgrenzwerte in Abhängigkeit vom Tongehalt - auf die wir schon bei der Besprechung der Ausrollgrenze hingewiesen haben -, sind gut in unsere Ergebnisse einzugliedern. In der Abbildung 5 sind die Einzelwerte von BALLENEGGER in die nach unseren Ergebnissen berechneten Regressionsgerade der Fließgrenze zum Tongehalt eingezeichnet. Hier ist eine gute Übereinstimmung von Untersuchungen an Modellsubstanzen mit denen an Naturböden zu erkennen.

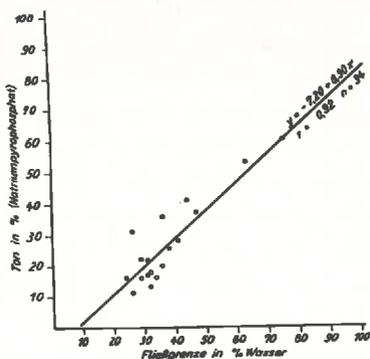


Abb. 5 . Abhängigkeit der Fließgrenze vom Tongehalt (berechnete Gerade) mit Werten von BALLENEGGER
O = Werte von BALLENEGGER

Die pF-Werte der Fließgrenze liegen in tonfreien Proben (Nr. 26 - 31, Tab. 7) sehr niedrig. Die Proben haben also diesen Zustand bei einem relativ hohen Wassergehalt. Im Zusammenhang mit dem bei der Auswirkung der Kationen (S. 36) Gesagten würde dies auf eine hohe Gefügestabilität (gegen Zerschlämmen) der Substanzen ohne Ton hindeuten. Das trifft selbstverständlich nicht zu. Die Erklärung der scheinbaren Widersprüche ist in der unterschiedlichen Oberflächenaktivität der Substanzen zu finden. Da besonders bei den groben Teilchen die Wasserbindung als Porenwinkelwasser erfolgt, ist der pF-Wert zur Beurteilung der Hydratation (Bildung der Wasserhülle um die Teilchen) nicht geeignet, obwohl der Wassergehalt bei pF 1,48 von 90 - 100 % im Ton auf 45 % im Feinschluff, etwa 30 % im Mittelschluff, Grobschluff und Feinsand und auf 1 % im Mittelsand und Grobsand absinkt.

Besser werden die Verhältnisse durch die Austauschkapazität charakterisiert. Während der Ton eine AK von etwa 35 mval hat, ist sie im Feinschluff nur noch 5 mval, im Mittelschluff 3 mval und im Grobschluff bis zum Feinsand nur noch 2 mval. Daraus ist die bekannte Tatsache abzuleiten,

daß bei den groben Substanzen nur wenig Wasser als Hydratwasser vorliegen kann. Bei den groben Substanzen ist demnach die Dicke der Hydratschicht (des gebundenen Wassers) sehr gering und reicht nicht aus, um als "Schmiermittel" die Reibung zwischen den Teilchen soweit zu mindern, daß sie gegeneinander verschoben werden können, während dies die dicken (gebundenen) Hydratschichten der Kolloide ohne weiteres ermöglichen. Erst wenn bei den groben Teilchen genügend (ungebundenen) Wasser zur Verfügung steht, ist das "Schmiermittel" ausreichend und die Verschiebung möglich. Wenn also das oberflächenaktive Material fehlt, darf der pF-Wert der Fließgrenze nicht als Maß für die Gefügestabilität verwendet werden. Die Kornform der groben Teilchen spielt hier ebenfalls eine große Rolle.

In Substanzen mit ausreichendem Kolloidgehalt (Nr. 1 - 25; 32 - 48; 66 - 70) dagegen ist die Wirkung des gebundenen Wassers als Schmiermittel gegeben. Nach dem Siebtauchverfahren (S. 113, Tab. 21) konnten an Proben mit weniger als 2,5 % Na, oder weniger als 45 % Ca bzw. Mg, oder weniger als 25 % H oder mit einem Mittel- bzw. Grobsandanteil unter 45 % erst dann stabile Aggregate gefunden werden, wenn der pF-Wert der Fließgrenze unter 1,4 lag. Bei Proben mit einem Na-Anteil über 2,5 % lag dieser Grenzwert bei pF 2,0, während Proben mit hohem Ca-, Mg- und H-Anteil, ebenso solche mit einem hohen Sandanteil diesen Grenzwert bei pF 1,0 haben. Daraus geht hervor, daß Proben mit einem Na-Gehalt von mehr als 2,5 % schon dann keine stabilen Aggregate erhalten können, wenn die Fließgrenze bei der Feldkapazität liegt. Sandböden mit mehr als 45 % Mittel- bzw. Feinsand, Böden mit mehr als 45 % Ca bzw. Mg und mehr als 25 % H sind stabil, wenn die Fließgrenze bei pF 1,0 liegt, während die übrigen Böden ihre Stabilität erst verlieren, wenn dieser Wert bei pF 1,4 liegt. Vergleicht man die Ergebnisse anderer Untersuchungsmethoden mit denen der Fließgrenze, so lassen sich teils sehr gute Korrelationen besonders mit den Methoden erkennen, die im engen Zusammenhang mit der

Aggregatsbindung gebracht werden können. Zur Admision ausgedrückt in % Wasser bei einer Bindung von 50 g/cm² (S. 54) ergibt sich eine sehr hoch signifikante Korrelation von $r = +0,90$ bei $n = 45$ $y = -7,48 + 0,91 x$, zur Gefügestabilität eine solche von $r = +0,70$ bei $n = 45$ $y = 46,08 + 97,10 x$. Auch zu dem Anteil an Feilichen 2 in Wasser besteht eine positive Korrelation von $r = +0,87$ $n = 45$ $y = 15,13 + 4,40 x$. Auch zur Volumenschrumpfung ist die Korrelation mit $r = +0,87$ $n = 40$ $y = 7,15 + 0,46 x$ hochsignifikant.

4.3. Plastizitätszahl

Die Ergebnisse der Plastizitätszahl sind deutlich abhängig von der Kationenbelegung. In Übereinstimmung mit BAVER (12) hatte das Na-Ion die größte Wirkung auf die Erhöhung der Plastizitätszahl (Tab. 7). Es folgen Ca und Mg; K liegt in allen Fällen an letzter Stelle. Im Gegensatz zu BAVER ist allerdings die Plastizitätszahl der mit H belegten Proben (Nr. 5 und 22) sehr niedrig (Tab. 7).

Eine Bestimmung der Plastizitätszahl in den Gemischen konnte wegen Materialmangels nicht durchgeführt werden.

Sehr deutliche Beziehungen bestehen wieder zwischen der Plastizitätszahl und dem Ton (in Natriumpyrophosphat) $r = +0,94$ $n = 31$ $y = 2,69 + 1,23 x$. Auch in diese Ergebnisse sind die Ergebnisse von BALLENEGGER gut einzugliedern. Zu anderen Korngrößen sind keine signifikanten Beziehungen vorhanden.

Eine Korrelation zu den Methoden, die vorwiegend die Bindung im Boden charakterisieren und darüberhinaus vom Tongehalt abhängig sind, zeigt sich hier ebenfalls wie bei der

Ausroll- und der Fließgrenze. Und zwar:

zur Adhäsion bei 50 g/cm ²	r=+0,96	n=30	y= 4,57+1,21x
zur Fließgrenze	r=+0,98	n=30	y=12,46+1,37x
zur Ausrollgrenze	r=+0,79	n=30	y=12,46+0,37x
zum Ton in wasser	r=+0,78	n=30	y=-2,62+0,23x
zur Gefügestabilität	r=+0,59	n=30	y= 0,094+0,005x
zur Volumenschrumpfung	r=+0,83	n=30	y= 5,45+0,91x

Die Bedeutung der Korngrößenbestimmung und besonders die des Tongehaltes in Natriumpyrophosphat ist aus diesen Ergebnissen zu ersehen.

5. Die Adhäsion

Physikalisch versteht man unter der Adhäsion eine Erscheinungsform der Molekularkräfte, die bewirkt, daß Moleküle verschiedener Stoffe aneinander haften bleiben, während man den durch Molekularkräfte eines Stoffes bewirkten Zusammenhalt der Moleküle Kohäsion nennt (36).

In der Bodenmechanik wird die Bindung zwischen den Bodenteilchen mit Kohäsion bezeichnet, während das Anhaften des Bodens an einem Gegenstand zum Beispiel an einer Spundwand Adhäsion genannt wird (102). BAYER (12) unterscheidet scharf zwischen der Adhäsion, unter der er die Bindung der flüssigen Phase an die feste Phase versteht - also das Haften des Wassers an den festen Bodenteilchen oder auch an Objekten, die in direkten Kontakt mit dem Boden gebracht werden - und der Kohäsion, unter der er den inneren Zusammenhalt der Wassermoleküle versteht, die als Brücke dienend in nassen Böden die Bodenteilchen miteinander verbinden. Streng genommen entspricht lediglich die Bindung der Wassermoleküle der physikalischen Definition der Kohäsion, während die Bindung zwischen den Bodenteilchen unter dieser Voraus-

setzung ein Vorgang der Adhäsion ist. Demnach bezeichnet weder Kohäsion noch Adhäsion die Bindung innerhalb des Bodens korrekt und erschöpfend, sondern beide Vorgänge sind hier mit im Spiel und wirken in gleicher Richtung. Auch SCHUMACHER (zit. in 56) fand, daß für diesen Vorgang der Ausdruck Kohäsion nicht passend sei und verwandte deshalb den Ausdruck Kohärenz, der später vereinfacht und in Kohärenz umgewandelt wurde. Daß auch in der Bodenmechanik gewisse Bedenken gegen den Ausdruck Kohäsion für die Bindung innerhalb des Bodens bestehen, geht daraus hervor, daß SCHULTZE-MUHS diesen durch Haftfestigkeit ersetzen (96).

Wir wollen uns in dieser Arbeit an die in der Bodenkunde gebräuchlichen Begriffe halten und demnach die Bindung innerhalb des Bodens Kohäsion und das Haften des Bodens an einem Gegenstand Adhäsion nennen. (Sieht man dann jedoch die Bindung von der Filmtheorie aus an, so muß man sich den Boden einschließlich Wasser als Einheit denken).

Die Bedeutung der Kohäsion für landwirtschaftlich genutzte Böden sah man in der Beurteilung ihrer Bearbeitbarkeit und in der Beurteilung des Eindringwiderstandes gegen Pflanzenwurzeln. Dementsprechend war auch die Methodik aufgebaut. So erfolgte die Messung über die Ermittlung des Eindringwiderstandes eines Körpers, z.B. einer Nadel in den Boden oder über die Kraft, die erforderlich ist, um den zu einem Stab geformten Boden zu zerbrechen. Eine weitere früher häufig gebrauchte Methode ist die Messung des Widerstandes, den eine zu einem Würfel oder zu einer Kugel geformte Probe dem Zerdrücken entgegensetzt. HABERLAND (zit. in 85) führte den Begriff der relativen Festigkeit ein, unter dem er den Widerstand gegen Bruch versteht. Demgegenüber stellt er die absolute Festigkeit, womit er die Festigkeit gegenüber Druck meint. Auch die Messung der Kraft, die erforderlich ist um einen, unter bestimmten Bedingungen angefertigten Bodenstrang zu zerreißen, diente der Ermittlung der Kohäsion. Die Methode KURON-HANNEMANN-HOMRIGHAUSEN (66, 50)

bestimmt die Bruchfestigkeit mit dem Schlagpendel. Im gewachsenen Boden arbeitet SCHAFFER (91), der die Kohäsion durch Messung des Abscherwiderstandes erfasst. Er bestimmt den mechanischen Widerstand, der erforderlich ist, um einen Bodenkern von 5 cm Durchmesser und 10 cm Höhe vom umgebenden Boden abzuscheren. SOGUSLAWSKI, LÖNZ und HANNEMANN arbeiten mit der Rammsonde ebenfalls im gewachsenen Boden (37, 44).

Andere Wege zur Bestimmung der Kohäsion schlägt die Bodenmechanik ein, wenn sie diese Kraft durch den Scherwiderstand im Laboratorium ermittelt. Zur Messung wird das Material in einen Apparat gebracht, der oben und unten durch eine Glasfilterplatte abgeschlossen ist. Nun wird die Probe einem definierten vertikalen Druck (Normalspannung) ausgesetzt, bei dem eine diesem Druck entsprechende Menge Wasser aus dem Boden gepreßt wird. Wenn der Wassergehalt der Probe konstant geworden ist, wird horizontal die Scherkraft gemessen. Diese Untersuchungen werden bei verschiedenen vertikalen Drucken und damit verschiedenen Wassergehalten durchgeführt. Trägt man die Werte graphisch gegen den Wassergehalt auf, so kommt man zu einer Geraden mit dem Winkel (φ) der Scherfestigkeit. Aus diesem Ergebnis wird die Kohäsion nach folgender Formel berechnet:

$$\tau_s = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi$$

τ_s = Scherfestigkeit in kg/cm^2

c = Kohäsion (scheinbare) in kg/cm^2

σ = totale Normalspannung

$\operatorname{tg} \varphi$ = Tangens des Winkels der Scherfestigkeit

K = empirischer Faktor

c_0 = Kohäsion (wahre)

$$\tau_s = c + \frac{\sigma_I + \sigma_{II}}{2} K + \sigma \operatorname{tg} \varphi$$

Die Berechnung der wahren Kohäsion erfolgt nach der Gleichung:

$$C_0 = C + \frac{\sigma I + \sigma_{III}}{2} K$$

Schon frühzeitig erkannte SCHÜBLER die Beziehungen zwischen der Korngröße und der Kohäsion. ATTERBERG stellte Abhängigkeiten von der Bodenfeuchte fest, arbeitete aber, da nach seiner Meinung das Ansetzen bei einer bestimmten Feuchte schwierig ist, mit der Feuchte "0", also mit der bei 105 °C getrockneten Probe. HABERLANDT kommt bei seinen Versuchen zur Bestimmung der Abhängigkeit der Kohäsion von der Feuchte zu dem Schluß, daß mit abnehmender Feuchte die Kohärenz steigt. PUCHNER erweitert die Versuche mit verschieden körnigem Material und konnte nachweisen, daß diese Feststellungen von HABERLANDT nur für tonige Böden Gültigkeit besitzt. In Sandböden zeigt es sich, daß die Kohäsion bei mittlerer Feuchte am höchsten ist, um dann nach oben bzw. nach unten wieder abzusinken. Eingehender untersuchte JOHANNSEN (56) die Abhängigkeit der Kohäsion von der Feuchte. Wenn er die Feuchte gegen die Kohäsion auftrug, so stellte er bei allen Kurven fest, daß von einem bestimmten Feuchtegehalt an die Kurven einen Knick zeigten. Der Lage dieses Knicks, die für die unterschiedlichen Böden verschieden ist, mißt er eine große Bedeutung bei. Gleichzeitig stellte er fest, daß bei diesem Knick in der Kurve ein typischer Farbumschlag in der Probe auftritt, den er mit dem Austritt des Wassers aus den Poren erklärt. Während bei tonigen Böden die Kurve oberhalb des Knickes, also bei geringerer Feuchte stark zunahm, nahm sie unterhalb, also bei größerer Feuchte nur langsam ab. BAVER (12) weist darauf hin, daß bei diesem Punkt ein Umschlag in der Bindungsart, bei dem feuchteren Boden eine Bindung über die Kapillarkräfte und unterhalb dieses Punktes eine solche durch Molekularkräfte stattfindet. Darauf deutet auch hin, daß die Kohäsion ober-

halb des Knickes, bei geringerer Feuchte in Tonböden sehr stark zunimmt, während sie bei den Sanden nur in sehr geringem Maße ansteigt.

Eigene Versuche

Das Ziel dieser Messungen war es zunächst das Verhalten von Böden bei der Gefügebildung über die Quellung und die Schrumpfung zu studieren und weiterhin Aussagen über Bindungsverhältnisse innerhalb der Gefügeelemente zu erhalten. Wir sind bei unseren Messungen so vorgegangen, daß wir eine Quarzkugel in Bodenproben verschiedener Feuchte einpreßten und die Kraft maßen, die erforderlich war, um diese wieder aus der Bodenmasse zu reißen. (Da wir uns mit unseren Messungen in dem feuchteren Bereich der Bindung befinden (S. 50) und unsere Methode entsprechend aufgebaut ist, werden unsere Messungen Adhäsion genannt, beinhalten aber das Gleiche wie die Kohäsion in feuchten Böden, deren Bindung auch mit der Filmtheorie erklärt wird).

Die Grundlage des Untersuchungsverfahrens ist die Filmtheorie, die HAINES (43) aus der Oberflächenspannung der Wasserhäutchen in nassen Böden abgeleitet hat. Seine theoretischen Erwägungen beziehen sich auf die sogenannten idealen Böden, die aus Kugeln von gleichen Dimensionen bestehen.

Bei niedrigem Feuchtegehalt umgibt das "häutchenförmige" Wasser die Berührungspunkte der Bodenteilchen ringförmig und bildet somit einen Meniskus aus, der die Teilchen aneinander zieht (Abb. 6). Die Summen dieser Anziehungskräfte der Menisken entsprechen der Bindungskraft im Boden.

Nach HAINES (43) berechnet sich der negative Druck innerhalb des Meniskus (Abb. 6):

$$p = \sigma \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad \text{bzw.} \quad \sigma \frac{(r_2 - r_1)}{r_1 \cdot r_2}$$

Die Spannung des Meniskus infolge des im Inneren der Flüssigkeit auftretenden negativen Druckes beträgt

$$\tilde{\pi} r_2^2 \sigma \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

FISCHER (35) wies nach, daß die gesamte Spannung in dem Wasserhäutchen der Summe des Druckes unter dem Meniskus und der von der Grenzflächenspannung zwischen Wasser und Luft verursachten Spannung entspricht. Diese Grenzflächenspannung ist gleich

$$2 \tilde{\pi} r_2 \sigma$$

Die Formel für den gesamten Druck lautet demnach:

$$F = r_2^2 \sigma \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + 2 \tilde{\pi} r_2 \sigma$$

Die in diesen Formeln verwandten Symbole bedeuten:

- p = Druck unterhalb des Meniskus
- r₁ = Krümmungsradius des Meniskus (s. Abb. 6)
- r₂ = Krümmungsradius des Meniskus (s. Abb. 6)
- σ = Oberflächenspannung der Flüssigkeit
- F = Gesamtspannung im Meniskus

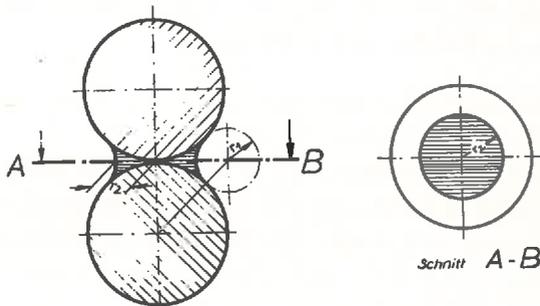


Abb. 6 Modell zur Kohäsion nach HAINES

In der Methode soll die Quarzkugel, deren Oberfläche etwas aufgeraut ist, das Modell grober Teilchen (Sand) darstellen, die durch die feinen Teilchen des Bodens (Ton) miteinander "verklebt" werden (s. Abb. 7).

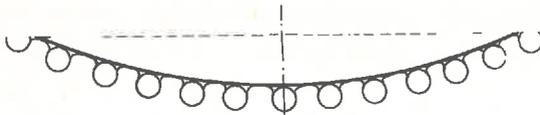


Abb. 7 Modell zur Anwendung der Theorie von HAINES auf die Adhäsionsmessungen

Wir glauben, bei dieser Versuchsanstellung die Bindungsverhältnisse nachgeahmt zu haben.

Das Prinzip der Messung allerdings in anderer Sicht (Ankleben des Materials an Arbeitsgeräten) wurde von SCHACHBASIAN schon 1890 (90) beschrieben. Unsere Apparatur wurde in Anlehnung an PANKOW (84) gebaut. Als wesentliche Änderung wurde ein Meßkörper neu entwickelt.

Als Meßgeräte bauten wir eine einfache Waage um (Abb. 8) (112, 115). An dem einen Waagebalken [1]^x) ist eine Vorrichtung [2] angebracht, in der ein Becherglas sicher aufgestellt werden kann. An dem anderen Waagebalken [3] ist der Meßkörper, die unter festgelegten Bedingungen aufgeraute Quarzkugel [4], mit einem Baumwollfaden befestigt.

x) Die in eckigen Klammern stehenden Zahlen beziehen sich auf die Zahlen in Abb. 8

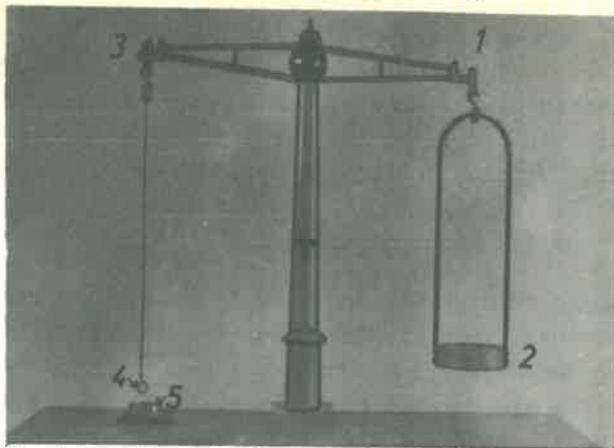


Abb. 8 Apparatur zur Messung der Adhäsion

Die Quarzkugel hat einen durch den Normschliff festgelegten Durchmesser von 18 mm. Der zu untersuchende Boden wird mit einem genau definierten Wassergehalt angesetzt und zur gleichmäßigen Verteilung des Wassers in einem geschlossenen Exsikkator 24 Stunden über Wasser aufbewahrt. Eventuelle Gewichtszu- bzw. Gewichtsabnahmen sind zu korrigieren. (Der genaue Wassergehalt wird vor und nach der Messung in einer Parallelprobe bestimmt). Dann wird der Boden unter Anwendung eines gleichmäßigen Druckes fest in den am Boden der Waage befestigten Behälter eingepreßt und dabei seine Oberfläche mit dem Nickelspatel sorgfältig glatt gestrichen. Man drückt dann den Meßkörper genau senkrecht (ohne zu verkanten) bis zu einer durch die Schablone [5] begrenzten Tiefe in das zu untersuchende Material ein. Durch diese Schablone ist sowohl der Druck, als auch die Tiefe des Eindrückens festgelegt. Nun füllt man sofort in das in der Vorrichtung [2] befindliche Becherglas solange Wasser oder Quecksilber ein, bis durch dessen Gewicht der Meßkörper aus der Bodenmasse gerissen wird. Dabei ist zu beachten, daß das Einfüllen der Gewichtssubstanzen immer gleichmäßig und aus gleicher Höhe erfolgt. Das Gewicht des verbrauchten Wassers bzw. Quecksilbers entspricht der Adhäsionskraft, die auf eine Fläche von 1 cm^2 umgerechnet wird. Angegeben wird die Adhäsion in g/cm^2 .

Die Eigenart der Methode ergab, daß die Messungen nur bei einem Feuchtegehalt größer als pF 4,0 durchgeführt werden konnten. Wir vermuten, daß die Werte in dem unteren - also feuchteren - Bereich des Knicks der Kohäsionskurven von JOHANNSEN (S. 46) lagen. Dies ist der Bereich, den BAVER (12) der Kapillarspannung zumißt.

Die Messungen führten wir an allen Proben mit 20 Parallelen bei mindestens 3 verschiedenen Feuchtegehalten durch. Bei den reinen Tonen (Nr. 1 - 5) und den reinen Böden (Nr. 18 - 22) erfolgten die Untersuchungen bei sehr vielen unterschiedlichen Feuchtegehalten. Die Berechnungen der Ergebnisse (Abhängigkeit der Adhäsion von der Bodenfeuchte) ergaben in allen Fällen negative Korrelationskoeffizienten, die höher als $r = -0,90$ bei $n =$ mindestens 60 lagen. In Abbildung 9 sind als Beispiel die Regressionsgeraden der Nr. 1 - 5 dargestellt. (Die zu den Geraden gezeichneten Signaturen entsprechen den Mittelwerten von 20 Messungen und sollen die gute Reproduzierbarkeit der Methode demonstrieren). Die erwartete Abnahme der Adhäsion mit zunehmender Bodenfeuchte konnte also bestätigt werden. Sie war

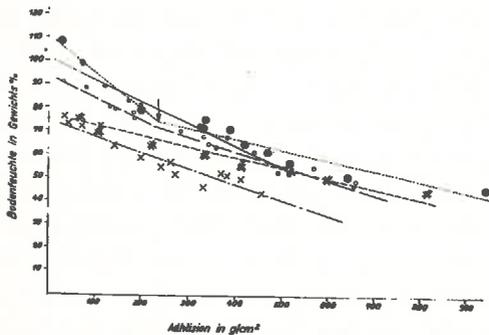


Abb. 9 Abhängigkeit der Adhäsion in g/cm^2 von der Bodenfeuchte in Gewichtsprozenten. Die Signaturen entsprechen den Mittelwerten von 20 Messungen

Nr. 1	—————	Ca - Ton	•••	$r = -0,97$	$n = 180$	$y = 99,93 - 0,0896 x$
Nr. 2	-----	Mg - Ton	o o o	$r = -0,93$	$n = 236$	$y = 83,15 - 0,0579 x$
Nr. 3	-----	K - Ton	* * *	$r = -0,97$	$n = 130$	$y = 75,40 - 0,0403 x$
Nr. 4	Na - Ton	© © ©	$r = -0,92$	$n = 121$	$y = 88,81 - 0,0509 x$
Nr. 5	-----	H - Ton	x x x	$r = -0,94$	$n = 206$	$y = 74,20 - 0,0660 x$

innerhalb der gemessenen Bereiche linear. Nur die Kurven der Mg- und der Na-Tone zeigen zur höheren Feuchte einen Knick. Die Ergebnisse liegen für Tone in den aus der Literatur für die Kohäsion bekannten Bereichen von 10 - 1000 g/cm². Dies bestärkt uns in der Meinung, daß die Adhäsion (in diesem Sinne) als identisch mit der Kohäsion angesehen werden kann.

Zur Auswertung der Adhäsionsmessungen griffen wir zunächst aus den berechneten Kurven der Adhäsion in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte (Beispiel in Abb. 9) die Wassergehalte jeder Probe bei der Adhäsion 50 g/cm² ab. Diese Werte sind in der Tabelle 9 zusammengefaßt.

Die reinen Proben des Tones (Nr. 1 - 5) und des Bodens (Nr. 18 - 22) lassen einen großen Einfluß der Kationen auf die Feuchte bei der Adhäsion = 50 g/cm² erkennen (Tab. 9). Na-Ton (Nr. 4) liegt mit 103 % Wasser erheblich über dem Wassergehalt der übrigen Proben. Ca- und Mg-Ton folgen mit 96 % (Nr. 1) und 89 % (Nr. 2), K- und H-Ton haben mit 73 % (Nr. 3) und 71 % (Nr. 5) bei weitem die niedrigsten Werte. Die gleiche Tendenz ist auch im Boden zu erkennen. Der Na-Boden (Nr. 21) hat mit 68 % den höchsten Wert, es folgen Ca (Nr. 18) mit 58 % und Mg (Nr. 19) mit 56 %. H-Boden (Nr. 22) steht allerdings hier mit 50 % noch höher als der K-Boden (Nr. 20) mit 42 % Wasser. Diese Ergebnisse sind in ihrer Tendenz durchaus mit denen der Fließgrenze zu vergleichen und können demnach genau wie dort mit der Filmtheorie erklärt werden (S. 36). Der Einfluß der Kationen ist bei den reinen Substanzen so stark, daß der Na-Boden fast die gleiche Feuchte der Adhäsion bei 50 g/cm² hat wie der H-Ton. Es ergibt sich also, daß die reinen Na-Proben bei gleichem Wassergehalt die höchsten Bindungskräfte besitzen. Trotz dieser starken Auswirkung bei den reinen Substanzen läßt sich bei den Kationengemischen nach dieser Betrachtungsart keine Abhängigkeit von den einzelnen Kationen erkennen.

Tab. 9 Ergebnisse der Adhäsionsmessungen

Nr.	Adhäsion 50 Wassergeh. in %	g/cm^2 pF	Adhäsion bei pF 1,8 in g/cm^2	Adhäsion bei pF 2,18 in g/cm^2	Adhäsion bei pF 3,0 in g/cm^2
1	96	1,5	120	195	425
2	89	2,1	20	85	370
3	73	2,5	0	5	385
4	103	2,4	0	0	210
5	71	2,5	0	40	205
8	89	1,7	100	190	485
9	85	1,9	75	145	465
10	87	1,9	40	170	450
11	85	2,0	0	150	360
12	88	1,8	40	165	305
13	83	2,1	40	100	380
14	80	2,1	20	40	350
15	81	2,1	20	95	360
16	91	1,8	50	135	320
17	93	1,6	90	140	315
18	58	2,0	20	80	270
19	56	2,2	0	40	250
20	42	2,9	0	0	75
21	68	2,6	0	0	190
22	50	2,2	5	50	190
23	61	1,9	85	105	260
24	61	1,8	75	115	270
25	61	1,9	70	125	280
32	53	3,0	0	0	50
33	46	2,6	0	0	135
34	47	2,3	0	30	195
35	48	2,0	5	95	235
36	41	1,8	55	95	250
37	35	2,4	0	0	245
38	29	2,8	0	0	50
39	24	3,0	0	0	55
40	27	2,5	0	30	80
41	20	2,6	0	30	70
42	--	--	0	0	0
43	--	--	0	35	20
44	45	2,5	0	5	110
45	18	3,3	0	0	30
46	55	2,2	3	49	160
47	43	2,3	10	40	93
48	38	2,5	0	5	120
66	83		0	48	358
67	84		0	17	288
68	85		0	0	353
69	85		0	13	323
70	86		0	5	375

Drückt man den Wassergehalt bei der Adhäsion 50 g/cm^2 im pF-Wert aus, so erkennt man, daß die scheinbar günstige Wirkung des Na-Iones nicht gegeben ist. Dies entspricht auch den praktischen Erfahrungen, so haben K- und Na-Proben schon bei pF 2,5 im Ton (Nr. 3 und Nr. 4) und bei pF 2,9 (Nr. 20) bzw. 2,6 (Nr. 21) im Boden diesen geringen Adhäsionswert erlangt (folglich sind die Bindungskräfte im Feuchtebereich unterhalb der Feldkapazität schon sehr gering geworden), während dies bei dem Ca-Ton (Nr. 1) erst bei pF 1,5 der Fall ist. Erstaunlich ist die hohe Wasserbindung des H-Tones (Nr. 5) bei diesem Adhäsionswert mit pF 2,5. Im Boden liegt das H-Ion allerdings mit pF 2,2 (Nr. 22) im gleichen Bereich wie Ca und Mg (Nr. 18 und 19).

Deutlich ist die Abhängigkeit des Wassergehaltes bei der Adhäsion = 50 g/cm^2 von der Korngrößenverteilung. Bei den Nr. 32 - 37 (45 % Ton + Teilchen jeweils einer größeren Fraktion, Tab. 4) erkennt man, daß die Beimischung von Feinschluff (Nr. 32) den Wassergehalt von 80 - 90 % im Ton bis auf 53 % absinken läßt (Tab. 9). Mittelschluff, Grobschluff und Feinsand (Nr. 33 - 35) ergeben ähnlich wie auch bei der Fließgrenze (S. 38) unter sich fast gleiche Werte von 46 % - 48 %. Zum Mittelsand ist ein weiteres Absinken der Werte auf 41 % und zum Grobsand auf 35 % zu erkennen. Die Abhängigkeit vom Tongehalt ist sehr hoch positiv und konnte mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = +0,97$ $n = 45$ berechnet werden. Die Regression folgt der Gleichung $y = -0,13 + 1,01 x$. Zum Feinschluff besteht eine hochsignifikante negative Korrelation von $r = -0,89$ $n = 28$. Die Regressionsgleichung errechnet sich als $y = 29,58 - 0,32 x$. Auch zum Mittelschluff ($r = -0,38$ $n = 40$ $y = 23,87 - 0,21 x$) und zum Grobschluff ($r = -0,39$ $n = 45$ $y = 18,16 - 0,12 x$) ist eine negative Korrelation gegeben. Zum Mittel- und Grobsand dagegen besteht bei unseren Versuchen keine Abhängigkeit. Auch bei diesen Proben haben wir den Wassergehalt im pF-Wert ausgedrückt. Dabei ergibt sich, daß in der Beimischung von Feinschluff zu

45 % Ton der pF-Wert bei der Bindung von 50 g/cm² sehr hoch (pF 3,0) ist. Bis zum Mittelsand (Nr. 36) ist deutlich ein Abfallen dieses Wertes zu erkennen (pF 1,8), um zum Grobsand wieder etwas anzusteigen (pF 2,4). Diese Ergebnisse entsprechen gut denjenigen der Fließgrenzuntersuchung (Tab. 7).

Da die Feuchte im Boden unter natürlichen Bedingungen in erster Linie von deren Bindungsintensität (pF-Wert) beeinflusst wird, haben wir auch die Abhängigkeit der Adhäsion in g/cm² von dem pF-Wert zusammengefaßt und dargestellt (Tab. 9). Dazu haben wir aus der Feuchte/Adhäsionskurve (Beispiel Abb. 9) verschiedene Punkte herausgegriffen und aus der Feuchte/pF-Kurve (Abb. 1) die entsprechenden pF-Werte ermittelt. Wir konnten so eine Kurve der Abhängigkeit in g/cm² vom pF-Wert aufstellen.

In der Tabelle 9 sind die Adhäsionswerte bei pF 1,8, pF 2,18 (Feldkapazität) und pF 3,0 dargestellt.

Sehen wir uns zunächst wieder die reinen Proben (Nr. 1 - 5 u. 18 - 22) an, so ergibt sich ein sehr interessantes Ergebnis, wenn man die Adhäsion bei pF 1,8, also bei einer sehr geringen Wasserbindung betrachtet. Der Ca-Ton (Nr. 1) zeigt noch eine Adhäsion von 120 g/cm², während sie beim Mg-Ton (Nr. 2) nur noch 20 g/cm² beträgt. Die K-, Na- und H-Tone (Nr. 3, 4, 5) haben in diesem Bereich keine Adhäsion mehr. Im Boden liegen die Verhältnisse ähnlich. Der Ca-Boden (Nr. 18) hat eine Adhäsion von 20 g/cm², beim Mg- (Nr. 19), K- (Nr. 20) und Na-Boden (Nr. 21) dagegen liegt sie bei 0. Der H-Boden (Nr. 22) allerdings hat noch eine Adhäsion von 5 g/cm². Betrachten wir die Verhältnisse bei dem pF-Wert 2,18, also bei der Feldkapazität, so sind alle Werte angestiegen. Erstaunlich hoch liegt der Wert des Ca-Tones (Nr. 1) bei 195 g/cm², der des Mg-Tones (Nr. 2) bei 85 g/cm² und der des H-Tones (Nr. 5) bei 40 g/cm². K-Ton (Nr. 3) liegt bei 5 g/cm² und der Na-Ton (Nr. 4) hat noch den Wert 0 g/cm². Die Verhältnisse im Ton entsprechen denen der Böden. Ca-Boden (Nr. 18) bei 80 g, Mg-Boden

(Nr. 19) mit 40 g, H-Boden (Nr. 22) bei 50 g; Na-Boden (Nr. 21) und K-Boden (Nr. 20) haben auch hier keine Adhäsion. Das bedeutet, daß Ca-, Mg- und H-Substanzen bei der Felukapazität noch ein stabiles Gefüge infolge von "Verklebung" durch die Tonteilchen besitzen können, während die mit K und Na belegten Substanzen keine innere Bindung und damit keine Gefügestabilität haben. Dies konnte durch die Gefügestabilitätsmessung (Tab. 21) bestätigt werden. Bei den Mischproben der Nr. 8 - 17 unter Einbeziehung der Nr. 1 - 5 konnte eine hochsignifikante Korrelation des Ca zur Adhäsion in allen 3 verrechneten Bindungsbereichen festgestellt werden. Die Ergebnisse lagen bei pF 1,8 $r = +0,77$ $n = 15$ $y = 63,72 + 0,49 x$, bei pF 2,18 $r = +0,81$ $n = 15$ $y = 119,09 + 0,29 x$ und bei pF 3,0 $r = +0,64$ $n = 15$ $y = 261,9 + 0,19 x$. In den unteren Saugbereichen hatten alle anderen Kationen keine signifikante Korrelation, allerdings zeigte sich für Mg eine positive Tendenz, während sie für Na, K und H negativ war. Bei dem pF 3,0 ergeben sich für Na mit $r = -0,52$ $n = 15$ $y = 129,89 - 0,12 x$, und für H mit $r = -0,59$ bei $n = 15$ $y = 235,98 - 0,14 x$ signifikante negative Korrelationen. Daraus geht hervor, daß lediglich die Ca-Ionen einen gesicherten positiven Einfluß auf die Adhäsion ausüben, während Na-Ionen und H-Ionen (im Gemisch im Gegensatz zur reinen Belegung) die Adhäsion vermindern. Die Auswirkung der anderen Kationen ist - allerdings nur in unseren Beobachtungs- und Belegungsbereichen und für die von uns verwendeten Tonminerale - ohne Bedeutung, wenn sich auch Mg leicht positiv, K dagegen leicht negativ auszuwirken scheinen. Hier zeigt sich, daß die Kräfte, die die Flockung bewirken, nicht mit den Adhäsionskräften identisch sind, da H die stärkste Flockung, aber die geringste Adhäsion hervorruft.

Sinkt der Tongehalt unter 40 % ab, so haben fast alle Proben bei pF 1,8 keine Adhäsion mehr. Nur die Probe 36 zeigt einen merkbaren Wert von 55 g/cm^2 . Diese Probe unterscheidet sich von den übrigen durch den besonders hohen Mittel-

sandanteil von 47 %. Die Ergebnisse der Gefügestabilitätsmessung zeigen für diese Probe ebenfalls bei weitem die besten Werte (Tab. 21) und können somit dieses Ergebnis bestätigen. Bei pF 2,18 ergibt sich für die Beimischung von FU (Nr. 32) zu 45 % Ton und mU (Nr. 33) keine Adhäsion, während die Zumischung von Grobschluff (Nr. 34), Feinsand (Nr. 35) und Mittelsand (Nr. 36) die Adhäsion auf 30 g/cm^2 (Nr. 34) und 95 g/cm^2 (Nr. 35, 36) ansteigen lassen. Bei der Berechnung der Korrelation der Korngrößenverteilung zur Adhäsion, müssen wir uns auf die pF-Werte 3,0 beschränken, da in den unteren Bereichen zu häufig der Wert 0 auftritt. Zum Tongehalt besteht eine positive signifikante Korrelation von $r = +0,52$ $n = 17$ $y = 39,66 + 0,81 x$, während zu den anderen Korngrößen keine Signifikanz besteht, obwohl Feinschluff und Mittelschluff negativ, der Mittelsand sich dagegen positiv auszuwirken scheint. Aus diesen Ergebnissen ist also zu erkennen, daß mit zunehmendem Tongehalt die Stabilität der Aggregate zunimmt, die Beimengung von Feinschluff und Mittelschluff die Klebewirkung der Substanz dagegen vermindert.

Des weiteren haben wir die verschiedenen Untersuchungsmethoden zu den Adhäsionsmessungen in Beziehung gesetzt und dabei zum Teil sehr hohe Abhängigkeiten finden können. Zunächst soll wieder die Adhäsion ausgedrückt in Feuchteprozenten bei der Adhäsion 50 g/cm^2 besprochen werden. Faßt man alle untersuchten Proben in einer Gruppe zusammen, also die Nr. 1 - 70, so zeigt sich eine sehr hoch signifikante positive Korrelation zu den Werten der Gefügestabilität mit $r = +0,67$ bei $n = 45$ $y = -2,31 + 0,045 x$. Daraus geht hervor, daß die Adhäsionsmessung - in dieser Richtung ausgewertet - geeignet ist, Aussagen über die Gefügestabilität zu machen. Die Beziehungen zu dem Gehalt an Teilchen $< 2\mu$ in Wasser (Aggregatstabilität) sind erheblich geringer, aber noch mit $r = +0,46$ bei $n = 45$ $y = 5,56 + 0,22 x$ hochsignifikant gesichert. Das bedeutet also, daß mit zu-

nehmender Adhäsion die Ausbildung der Aggregate abnimmt. Zu den gleichen Ergebnissen kommen wir auch bei den Flockungsuntersuchungen, bei denen eine positive Korrelation von $r = +0,49$ bei $n = 23$ $y = 8,47 + 0,65 x$, zu erkennen ist. Sehr hoch korrelieren die Ausrollgrenze $r = +0,88$ $n = 30$ $y = -12,83 + 2,37 x$, die Fließgrenze $r = +0,98$ bei $n = 45$ $y = -7,48 + 0,91 x$ und die Plastizitätszahl mit $r = +0,96$ bei $n = 30$ $y = 4,57 + 1,21 x$. Zur linearen Schrumpfung ergibt sich bei den Proben 1 - 45 ebenfalls eine sehr hohe Signifikanz ($r = +0,90$ bei $n = 36$ $y = 9,95 + 0,52 x$). Das Sedimentvolumen zeigt bei den Proben Nr. 1 - 17 und 66 - 70 eine Signifikanz von $r = +0,49$ $n = 20$ $y = -4,26 + 0,12 x$. Nimmt man die Adhäsion bei pF 2,18, so ändern sich diese Korrelationen nur unwesentlich. Zur Gefügestabilität allerdings ist die Korrelation mit $r = +0,75$ bei $n = 45$ $y = -6,06 + 217,80 x$ noch gestiegen.

6. Die Aggregatbildung (Teilchen $< 2\mu$ bei der Dispergierung in Wasser)

Bei dem Versuch die Aggregation im Sinne der Koagulation im Boden zu erfassen, haben wir die Methode der Korngrößenbestimmung in Wasser verwendet. Zur Unterscheidung von der in Natriumpyrophosphat dispergierten Tonfraktion werden hier die in Wasser dispergierten entsprechenden Kolloide "Teilchen $< 2\mu$ " genannt werden. Bei dieser Dispergierung in Wasser wird vorausgesetzt, daß in dem sorgfältig gemörserten Material alle Gefügeelemente zerstört werden. Die in der Suspension im Unterschied zu der Natriumpyrophosphatbehandlung verminderte Anzahl an Teilchen $< 2\mu$ wird auf eine Koagulation zurückgeführt, da eine Kohäsion im Sinne der Filmtheorie (S. 27) unwahrscheinlich ist. Je höher also der Anteil an Teilchen $< 2\mu$ in Wasser ist (bei gleichem

Tongehalt), umso stärker ist die Dispergierung, bzw. umso geringer ist die Aggregatbildung oder die Koagulation.

Methodisch gingen wir dabei so vor, daß 10 g Boden mit 250 ml destilliertem Wasser eine Stunde geschüttelt und dann quantitativ in einen 1000 ml Schlämmzylinder überführt wurden. Nach Auffüllen mit dest. Wasser auf 1000 ml wurden die Teilchen bei einer Temperatur von 20 °C der Sedimentation überlassen. Nach der aus dem STOKES'schen Fallgesetz ermittelten Zeit entnahmen wir aus der entsprechenden Tiefe 10 ml der Suspension mit dem KÖHN'schen Pipettapparat und verfahren weiter nach der Vorschrift nach KÖHN (48).

Die stärkste Aggregation nach dieser Methode, also die Werte mit dem geringsten Anteil an Teilchen $< 2\mu$ hat der H-Ton (Nr. 5), der bei einem Tongehalt von 85 % in Natriumpyrophosphat nur einen Anteil an Teilchen $< 2\mu$ von 17,6 % hat, während das Absinken im Mg-Ton (Nr. 2) nur auf 22,6 % erfolgt. Ca-Ton (Nr. 1) folgt mit einem Anteil an Teilchen $< 2\mu$ von 25,9 %. Der K-Ton (Nr. 3) liegt mit 43,3 % sehr hoch im Gehalt an Teilchen $< 2\mu$ und der Na-Ton (Nr. 4) schließlich zeigt mit 84,3 % eine fast vollständige Dispergierung. Im Boden, also bei einem Tonanteil (in Natriumpyrophosphat) von etwa 55 % wirkt sich das H-Ion ebenfalls am stärksten koagulierend aus. Der H-Boden (Nr. 22) hat einen Gehalt an Teilchen $< 2\mu$ von 8,2 %. Die Unterschiede zu den anderen Kationen sind aber hier erheblich geringer als im Ton (Nr. 1 - 5). So hat der Ca-Boden (Nr. 18) einen Anteil von 9,1 %, es folgt der K-Boden (Nr. 20) mit 10,5 %. Der Mg-Boden (Nr. 19) liegt mit geringem Abstand an vorletzter Stelle (11,0 %), während, wie zu erwarten war, das Na-Ion - charakterisiert durch einen Gehalt an Teilchen $< 2\mu$ von 53,9 % - wieder eine starke Dispergierung hervorruft (Nr. 21).

Betrachtet man die reinen Proben (Nr. 1 - 5) und die Proben der Kationengemische (Nr. 8 - 17), so zeigt sich eine sehr

Tab. 10 Ergebnisse der Aggregatanalyse
(Teilchen $< 2 \mu$, Gefügefaktor, Flockung)

Nr.	Teilchen % < 2μ in Wasser	Gefügefaktor	Flockungswert Relativwert (Skalenwerte) n. 3 Min.
1	25,9	71,0	36
2	22,6	74,7	29
3	43,3	52,8	92
4	84,3	8,3	96
5	17,6	79,9	20
8	17,6	81,7	74
9	17,5	80,7	71
10	16,7	81,1	73
11	17,5	80,3	64
12	17,1	81,0	65
13	16,1	82,0	58
14	14,1	83,8	54
15	14,6	83,7	56
16	21,3	76,2	85
17	18,2	79,7	81
18	9,1	83,6	44
19	11,0	79,7	38
20	10,5	71,5	52
21	53,9	0,4	86
22	8,2	85,4	25
23	13,1	76,8	46
24	11,8	78,8	41
25	12,1	78,2	47
32	11,0	75,9	
33	10,6	76,0	
34	9,6	79,0	
35	9,3	78,9	
36	13,0	71,0	
37	19,1	54,2	
38	5,6	79,0	
39	3,8	77,9	
40	5,7	84,0	
41	4,7	77,5	
42	3,9	56,2	
43	3,8	60,4	
44	10,6	73,4	
45	5,1	61,7	
46	11,0	77,7	
47	9,0	76,5	
48	7,9	76,5	
66	23,2	74,2	61
67	30,6	65,7	73
68	40,2	55,1	71
69	41,3	53,3	79
70	50,5	43,7	81

hohe lineare positive Korrelation zwischen dem Na-Ion und den Teilchen $< 2 \mu$. Der Korrelationskoeffizient liegt für das Na-Ion bei $r = +0,94$ $n = 30$ $y = -18,33 + 1,01 x$. Ca und Mg zeigen signifikante negative Korrelationen mit Faktoren für Ca $r = -0,42$ $n = 30$ $y = 43,00 - 0,51 x$ für Mg $r = -0,43$ $n = 30$ $y = 41,56 - 0,51 x$. Die Auswirkung des K-Ions ist nicht gesichert. Eine ebenfalls nicht gesicherte schwach negative Korrelation des H-Ions läßt sich erkennen. Die Koagulation wird folglich in den Gemischen durch das Ca- und das Mg-Ion gefördert, während Na-Ionen und im geringen Ausmaß K- und H-Ion dispergierend wirken. Diese Art der Betrachtung der Teilchen $< 2 \mu$ als Ausdruck für die Aggregatbildung ist nur bei konstantem Tongehalt möglich und liefert auch nur relativ Werte. Soll jedoch auch die Auswirkung der Kationen bei den Proben mit unterschiedlicher Korngrößenverteilung untersucht werden, so muß dies an Hand des Gefügefaktors von VAGELER und ALTEN (104) getan werden, der nach der Formel

$$G = \frac{T - t}{T} \cdot 100$$

G = Gefügefaktor

T = Tongehalt (stark dispergiert)

t = Anteil an Teilchen $< 2 \mu$ (dispergiert in Wasser)

errechnet wird. Je größer die Zahl, umso mehr ist der Boden aggregiert. Wir haben diesen Faktor für jede einzelne Probe berechnet. Sehr deutlich zeigt sich auch hier die stark flockende Wirkung des H-Ions. Sowohl beim H-Ton (Nr. 5) als auch beim H-Boden (Nr. 22) sind die höchsten Werte errechnet worden (Tab. 10). Im Ton 79,9 und im Boden 85,4. Gefolgt werden diese Werte vom Ca-Ton (Nr. 1) mit 71,0 und vom Ca-Boden (Nr. 18) mit 83,6. Diesen wiederum folgen der Mg-Boden (Nr. 19) mit 79,7 und der Mg-Ton (Nr. 2) mit 74,7, der K-Ton (Nr. 3) hat nur 52,5, während im K-Boden (Nr. 20) der Wert immerhin bei 71,5 liegt. Sehr starke Dispergierung weist auch hier wieder der Na-Ton (Nr. 4) mit 8,3 und der

Na-Boden (Nr. 21) sogar mit nur 0,4 auf.

Hier besteht eine hochsignifikante negative Korrelation des Na-Ions zum Gefügefaktor mit $r = -0,92$ bei $n = 15$ $y = 73,39 - 0,92 x$ und eine signifikante positive Korrelation zum Ca-Ion mit $r = +0,56$ bei $n = 15$ $y = -22,82 + 0,74 x$. Zu Mg ist die Beziehung nicht gesichert, zeigt aber positive Tendenz, während sie zum K- und H-Ion nicht gesichert negativ ist. Das Ergebnis ist in dem gleichen Sinne zu deuten wie bei der Untersuchung auf Teilchen $< 2\mu$. (Die Korrelationen müssen entgegengesetzte Vorzeichen haben). Zur Korngrößenverteilung bestehen lediglich zum Feinsand und zum Grobsand mit $r = -0,57$ bei $n = 15$ bzw. $r = -0,48$ bei $n = 15$ signifikante negative Korrelationen. Zum Tongehalt erkennt man eine positive Tendenz, die aber nicht gesichert ist.

Vergleicht man die Ergebnisse der Messungen des Anteiles an Teilchen $< 2\mu$ mit denen nach anderen Untersuchungsverfahren, so kann man teilweise recht hohe Korrelationen feststellen. Zur Flockung ist die Korrelation positiv hochsignifikant (für die Nr. 1 - 25) mit $r = +0,61$ bei $n = 23$ $y = 41,41 + 0,77 x$. Es zeigt sich dabei aber, daß die reinen Substanzen im Ton (Nr. 1 - 5) von den Proben der Kationengemische und der Böden (Nr. 8 - 25) abweichen aber etwa die gleiche Steigung der Geraden besitzen. Die Geraden laufen also parallel und liegen nur bei den Proben 1 - 5 im Schnittpunkt mit der y-Achse etwas niedriger. Von diesen allgemeinen Geraden weichen der Na-Ton (Nr. 4) und der Na-Boden (Nr. 21) erheblich ab. Die Ergebnisse der Gefügestabilitätsuntersuchung zeigten ebenfalls eine starke Korrelation zum Anteil an Teilchen $< 2\mu$. Allerdings ergeben sich hier zwei Kurven, die etwa senkrecht aufeinander stehen und in sich gut korreliert sind. Bei einem Na-Anteil von weniger als 6 % ist die Korrelation hochsignifikant positiv mit $r = +0,79$ $n = 37$ $y = 5,92 + 20,00 x$ (die Werte mit unterschiedlicher Korngrößenverteilung lassen sich

auch gut in diese Gerade einbauen), während bei den Proben mit einem Na-Anteil von über 6 % eine hochsignifikante negative Korrelation von $r = -0,83$ bei $n = 8$ $y = 78,98 - 157,50 x$ vorliegt. Das bedeutet, bei hohem Na-Anteil nimmt mit steigendem Gehalt an Teilchen $< 2 \mu$ die Gefügestabilität ab, während sie bei geringem Na-Anteil zunimmt (Abb.10).

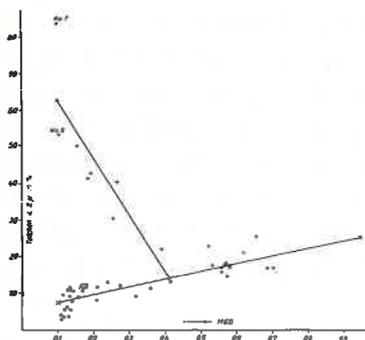


Abb. 10 Abhängigkeit der Ergebnisse der Untersuchung auf Teilchen $< 2 \mu$ (in Wasser) auf die Ergebnisse der Gefügestabilitätsmessung durch NaB-siebung. o = Teilchen mit Na-Anteil $< 6 \%$
+ = Teilchen mit Na-Anteil $> 6 \%$

In die negative Kurve gliedern sich auch die mit mehr als 40 % K belegten Proben ein, selbst wenn der Na-Anteil kleiner als 6 % ist. Zum Gefügefaktor besteht eine sehr hoch signifikante Korrelation mit $r = -0,80$ bei $n = 45$ $y = 86,87 - 0,89 x$. Hochsignifikant positiv dagegen korrelieren die Ausrollgrenze ($r = 0,66$ bei $n = 30$ $y = +20,47 + 0,35 x$) und die Fließgrenze ($r = +0,87$ bei $n = 36$ $y = 15,13 + 4,48 x$). In beiden Fällen weichen die Werte für den K-Ton (Nr. 3) und Na-Ton (Nr. 4) und Na-Boden (Nr. 2) erheblich ab. Die Fließ- und Ausrollgrenze liegen jeweils sehr viel niedriger als der Anteil an Teilchen 2 erwarten läßt. Hierin liegt wahrscheinlich auch die in der Keramik bekannte Erfahrung begründet, nach der Na-Ionen den Wassergehalt der Fließgrenze senken. Bei Ausschaltung

der reinen K- und Na-Werte besteht eine hohe Korrelation zur Plastizitätszahl von $r = +0,78$ bei $n = 27$ $y = 2,82 + 0,23 x$. Zur Adhäsion beim pF-Wert 2,18 zeigt sich insofern eine Beziehung, als bei einem Anteil von weniger als 30 % an Teilchen z dieser Wert = 0 wird. Weitere Regressionen bestehen zur Volumenschrumpfung $y = 7,36 - 0,18x + 0,0081 x^2$, und eine besonders hohe positive zum Sedimentvolumen mit $r = +0,96$ $n = 20$ $y = 3,29 + 0,10 x$. Diese beiden Ergebnisse waren zu erwarten, da der Tongehalt hier vorwiegend Einfluß besitzt. Auch zur Wasseraufnahmegeschwindigkeit besteht eine hochsignifikante positive Korrelation $r = +0,84$ $n = 40$ $y = 7,64 + 0,062 x$.

Flockung

Es bestand der Wunsch etwas über den zeitlichen Verlauf der Aggregatbildung zu erfahren. Da dies mittels der Schlämmanalyse schwierig durchzuführen ist, wurde versucht, diese Aussage kolorimetrisch über die Aufhellung der Suspension zu machen. Leider brachte die Auswirkung der Zeit auf den Flockungsvorgang keine erkennbaren auswertbaren Ergebnisse. Weil aber die gefundenen Werte den durch die Bestimmung in Wasser gefundenen entsprechen, sei kurz auf die Methode und deren Durchführung eingegangen.

Es wurden 30 mg der zu untersuchenden Substanz in 10 ml destilliertem Wasser angesetzt, gut durchgeschüttelt und der Sedimentation überlassen. Der Grad der Dispergierung wurde auf Grund der Aufhellung der Suspension festgestellt. Gemessen wurde die Lichtdurchlässigkeit in dem Kolorimeter nach LANGE Modell V. Die Angaben erfolgen in Skalenteilen und sind nur relativ zu bewerten. Die Ergebnisse wurden auf den Wert des H-Tones (Nr. 5) als Standard geeicht, um

bei späteren Versuchen wieder in den gleichen Bereich zu kommen. Je höher die Skalenzahl, umso größer ist die Absorption der Strahlen, umso geringer ist die Koagulation bzw. Aggregation. Bei der Gegenüberstellung der Werte der Flockung zu den Ergebnissen der Teilchen $< 2\mu$ zeigt sich, daß lediglich die Tongemische bei der Flockung in höheren Bereichen liegen und eine feinere Differenzierung erkennen lassen. Das K-Ion bewirkt eine hochsignifikante positive Korrelation von $r = +0,53$ $n = 30$ $y = -28,46 + 0,50 x$, Na ist mit $r = +0,43$ $n = 30$ $y = -17,37 + 0,37 x$ signifikant und H negativ mit $r = -0,56$ $n = 30$ $y = 55,40 - 0,49 x$. Alle anderen Ergebnisse entsprachen den bereits gefundenen, so zeigen die hohen Na-Werte der Nr. 66 - 70 wieder, daß etwa ab 6 % Natrium eine andere Kurve gültig wird.

7. Quellung und Schrumpfung

Die Gefügedynamik eines kolloidreichen Bodens wird wesentlich durch sein Quellungs- und Schrumpfvormögen beeinflusst (65). Allgemein kann man die Quellung als die Vergrößerung des Volumens einer Substanz unter Anlagerung von Flüssigkeiten definieren. Im Boden wird diese Flüssigkeit ein mit mehr oder weniger Salzen angereichertes Wasser sein. KATZ (59) versteht unter der Quellung die Anlagerung von Wasser an eine feste Phase, die dadurch ihr Volumen vergrößert, ohne die Homogenität zu verlieren. Die Kohäsionskräfte werden bei diesem Vorgang zwar vermindert, verlieren ihre Wirksamkeit aber nicht. Infolge der vorwiegend negativen Ladung der Bodenkolloide kann die Anlagerung des Wassers direkt an der Oberfläche der Teilchen erfolgen. Die polaren Wassermoleküle werden mit ihren H-Ionen zu der negativen Ladung der Teilchen orientiert. Mit zunehmender Entfernung der Wassermoleküle von der Teilchen-

oberfläche nimmt diese Orientierung ab, um dann allmählich in das freie Wasser überzugehen. Die Hydrathüllen der sorbierten Kationen, deren Ausbildung von der Wertigkeit und dem Durchmesser der Ionen abhängen, tragen ebenfalls zur Quellung bei. Bei geringer Eintauschintensität dissoziieren die Kationen weit in die Außenlösung. Innerhalb des Schwarmionenbelages wird dann durch osmotischen Zug Wasser eingelagert. Dies kann besonders im Falle der Belegung mit Na-Ionen erhebliche Quellungerscheinungen verursachen. Die Anlagerung des Wassers kann bei aufweitbaren Tonmineralen (93) auch innerkristallin erfolgen. Das Wasser dringt dabei zwischen die Kristallgitterschichten und treibt diese auseinander. Das ist nur möglich, solange die Saugkraft zwischen den Gitterschichten größer als deren Bindung durch die Nebenvalenzkräfte ist. BLACKMOR and MILLER (14) konnten zeigen, daß die Quellungsdrucke zwischen den Schichtpaketen mindestens 50 at betragen können. Mit zunehmender Anlagerung von Wasser wird dessen Schichtdicke größer und damit nimmt die Wasserbindungsintensität ab. Die innerkristalline Quellung ist beendet, wenn die Wasserbindungsintensität geringer geworden ist als die Nebenvalenzkräfte. Diese Kräfteverhältnisse werden erheblich von den an den Teilchen sorbierten Kationen beeinflußt. Hervorzuheben ist die Wirkung des K-Ions, das wegen seines dem Gitterabstand entsprechenden Durchmessers die Aufweitung des Gitters vermindern kann (93). Das auch in unseren Versuchen oft abweichende Verhalten der mit K belegten Substanzen erklären wir uns mit dieser Tatsache. Den Nachweis der innerkristallinen Quellung kann man durch Veränderungen der Basisinterferenz im Röntgendiagramm bei unterschiedlichen Wassergehalten der Tonminerale führen. Die innerkristalline Quellung geht meist anisodimensional vor sich, während die äußere Quellung und die Quellung organischer Kolloide vorwiegend isodimensional verläuft. Die Quellung ist stets mit einer Verminderung des Gesamtvolumens verbunden. Werden z.B. zu 2 ml Boden 2 ml Wasser gegeben, so wird das

Gesamtvolumen bei quellfähigen Substanzen nicht 4 ml, sondern etwas weniger sein (12). Dieses Weniger wird durch die Verdichtung des Wassers am Komplex erklärt (14). MATTSON (73) machte die Beobachtung, daß ein K-Ton, der aus einer Suspension bis zum Gel entwässert wird und dann wieder unter Wasser gesetzt wurde, beträchtlich quillt. Ist die Entwässerung aber erheblich weiter erfolgt, so wird die Quellfähigkeit stark vermindert. BAVER und WINTERKORN (11) zeigen, daß Li- und Na- gesättigte Tone nach der Austrocknung fast ebensoviel Wasser sorbieren, als wenn sie direkt aus der Suspension untersucht wurden. Anders verhalten sich K-gesättigte Böden, die etwa nur 1/8 und Ca- und Mg-Böden, die nach starkem Austrocknen 1/5 des Wassers der nicht ausgetrockneten Substanz wieder aufnehmen können. Aus diesen Versuchen leitet GARDNER (38) ab, daß die elektrischen Kräfte, die die Flockung bewirken, nicht in der Lage sind die plättchenförmigen Teilchen in eine kompakte Anordnung zu bringen, sondern daß zusätzliche mechanische Kräfte erforderlich sind.

KUNTZE (65) mißt dem Quellungsdruck eine besondere Bedeutung für die Kennzeichnung hydrologischer Eigenschaften der Marschböden bei und sieht darin ein "wesentliches Merkmal zu deren struktureller und damit meliorativer Unterscheidung". Er gibt für Marschböden Quellungsdrucke zwischen 0 und 6 kg/cm² an. Besonders hoch liegt der Quellungsdruck bei der innerkristallinen Quellung (93). Erhöhend auf den Quellungsdruck wirken sich die Zunahme der inneren Oberfläche, bzw. die Art der Tonminerale, stark hydratisierter Ionenbelag und relativ große Lagerungsdichte aus (65). Dagegen machen sich besonders Eisenoxyde und organische Substanzen, wenn sie die Oberflächen der Teilchen bedecken, quellungsmindernd bemerkbar (93). Am stärksten ist die mit der Quellung verbundene Vergrößerung des Porenvolumens in den oberen Bodenschichten, während die Quellung in tieferen Schichten durch die Auflast des Bodens

zu einer Verdichtung und damit zu einer Verringerung der Wasserdurchlässigkeit führen kann (65, 93). Diese "Verstopfung" der Poren kann einen Wasserstau im Boden verursachen, durch den das Bodengefüge zerstört wird.

Der Quellungsvorgang ist stets mit einer Wärmeentwicklung, der Quellungswärme, verbunden. Der Zusammenhang zwischen der Korngrößenverteilung und der Quellung ist offensichtlich. Nach ATTERBERG (5) können im Boden nur Teilchen mit einem Durchmesser $< 0,01$ mm quellen. TRACUK (103) stellt die Abhängigkeit der Quellung von der Korngröße fest (Tab. 11).

Tab. 11 Quellung der Bodenteilchen von verschiedener Größe nach TRACUK (27)

	Teilchengröße Durchmesser in mm						
	0,5- 0,25	0,25- 0,10	0,10- 0,05	0,05- 0,01	0,01- 0,005	0,005- 0,001	
Prozentuales Ausmaß der Quellung im Verhältnis z. ursprüngl. Volumen	0	5	6	16	105	160	406

Da aber bei unterschiedlichen Bodenkolloiden gleicher Größe die Quellung zwischen 4 % und 150 % schwanken können, ist diese Abhängigkeit nicht zu verallgemeinern. MATTSO (74) weist eine Korrelation zwischen der Austauschkapazität und der Quellung nach. ANDERSON (3) studierte den Einfluß der Kationen und stellte fest, daß die Kationen die Quellung in der lyotropen Reihe (Na- K- Ca- Mg- H) beeinflussen. Die Anionenwirkung und die der Ionen aus der Außenlösung können mit dem Gesetz nach DONNAN erklärt werden (74).

Verliert ein gequollener Boden soviel Wasser, daß sein Volumen vermindert wird, so wird dieser Vorgang Schrumpfung

genannt. Dabei werden die Teilchen durch die Kohäsion der Wassermoleküle (Filmtheorie S. 27) aneinander gezogen. Die Volumenminderung der Bodensubstanz verläuft solange dem Wasserverlust parallel bis die Teilchen nicht mehr durch Wasserhüllen getrennt sind und aneinander stoßen. Bei weiterem Wasserverlust ist der Volumenschwund des Bodens erheblich geringer (42). Dies wird Restschrumpfung genannt. GUIDICI (40) stellte eine lineare Abhängigkeit der Schrumpfung von der Teilchengröße fest. Die Schrumpfung kann je nach Plastizitätsverhältnissen und Quellungsgrad und Isotropie zur Verdichtung des Bodens (bei hoher Plastizität), zur Auflockerung durch Rissebildung oder zur Verkrustung führen. Diese Verhältnisse werden in dem Abschnitt Rißbildung noch eingehend diskutiert.

Eigene Versuche

Von besonderem Interesse für die Gefügeausbildung ist das Schrumpfungsvermögen des Bodens. Aus diesem Grunde sollen auch hier zunächst die Ergebnisse der Schrumpfungsuntersuchungen besprochen werden.

Die Messungen erfolgten entsprechend der Versuchsanstellung VAGELER und ALTEN (48) mit einigen Abänderungen (113) über die lineare Schrumpfung. Um die Volumenschrumpfung berechnen zu können, wurde auch die vertikale Schrumpfung gemessen.

Da das Ausmaß der Schrumpfung wesentlich vom Quellungszustand und damit dem Wassergehalt abhängt, wurde der Boden, um diese Abhängigkeit feststellen zu können, bei unterschiedlicher Feuchte angesetzt. Die mit den entsprechenden Wassergehalten angesetzte Probe wurde zur gleichmäßigen Verteilung des Wassers gut mit einem Spatel durchgearbeitet

und unter Vermeidung von Luftblasen portionsweise in runde Aluminiumschälchen mit einem Durchmesser von 3 cm und einer Höhe von 1 cm eingefüllt (die Innenwände des Schälchens wurden vorher zur Vermeidung von Adhäsion gut eingefettet) und nachdem das Gewicht festgestellt war, der Trocknung überlassen. Gemessen wurde sowohl die horizontale, als auch die vertikale Schrumpfung mit einem Meßmikroskop, wobei das Ergebnis jeder einzelnen Probe den Mittelwert von 5 verschiedenen Messungen darstellt. Die Volumenschrumpfung wurde berechnet. Jede Probe setzten wir mit 2 Parallelen bei mindestens 4 verschiedenen Feuchtegehalten an und zwar die Nr. 1 - 17 bei etwa 40 %, 60 %, 80 % und 90 - 100 %, und die Nr. 18 - 25 bei 30 %, 40 %, 60 % und 80 % (Tab. 12). Für jede Probe wurde die Regression der Quellung zur Feuchte berechnet. Die Korrelation ist bei allen Proben ohne Ausnahme mit $r = +0,98 - +0,99$ hoch signifikant. Trägt man die berechneten Geraden auf, so stellt man bei Betrachtung der Volumenschrumpfung der reinen Tonproben (Nr. 1 - 5) fest, daß die Kurven von Ca (Nr. 1) und Na (Nr. 4) parallel verlaufen, während die Kurven des Mg-Tones (Nr. 2) und des K-Tones (Nr. 3) unter sich parallel aber abweichend zu den anderen Kurven liegen. Die Kurve des H-Tones (Nr. 5) liegt noch etwas flacher.

Bei den reinen Böden dagegen laufen die Kurven der Ca-, Mg-, Na- und H-Proben etwa parallel, während die des K-erheblich abweicht (Abb. 11). Aus dem Verlauf dieser Geraden kann entnommen werden, daß im Ton H- und K-Belegung (Nr. 5 u. 3) die geringste Schrumpfung je Feuchteeinheit bewirken, es folgen Na, Mg (Nr. 4 u. 2), während durch die Ca-Belegung (Nr. 1) die größte Volumenabnahme erfolgt. Im Boden zeigt ebenfalls die H-Belegung (Nr. 22) die geringste Volumenabnahme. Es folgen Na- (Nr. 21), Ca- und Mg- (Nr. 18 u. 19).

Tab. 12 Volumenschrumpfung in Abhängigkeit von der Feuchte und vom pF-Wert
 2,18 bzw. 3,0 F = Feuchte in %, S = Vol.Schrumpfung in %
 h/v = Schrumpfung horizontal : Schrumpfung vertikal. 100 bei pF 1,6

Nr.	F	S	F	S	F	S	F	S	pF 2,18	pF 3,0	h/v-100
1	40,2	29,6	60,3	44,3	80,8	50,6	97,6	59,9	55,0	41,8	68,4
2	38,9	27,3	58,0	41,7	77,2	50,1	95,2	59,2	57,2	43,2	68,9
3	40,4	25,6	59,7	41,5	78,5	49,5	96,7	56,2	52,2	38,0	50,3
4	42,5	28,5	60,5	40,1	80,0	40,6	98,6	55,3	70,0	47,3	53,5
5	39,6	23,3	59,0	39,5	75,3	47,8	96,7	57,6	48,2	38,4	65,4
8	39,5	27,7	59,4	41,9	78,4	51,3	97,2	59,7	51,3	40,0	62,9
9	39,6	29,3	59,3	43,0	77,7	52,0	97,3	59,0	49,9	40,3	58,9
10	40,0	29,3	59,8	39,9	78,9	51,0	98,7	56,9	49,1	39,6	55,8
11	39,9	29,5	59,8	42,2	79,1	51,2	97,7	57,4	49,5	40,3	57,2
12	40,1	27,2	60,2	41,4	80,2	50,4	98,8	59,9	48,8	39,6	62,3
13	39,2	27,6	58,1	40,4	78,0	51,5	97,6	56,9	49,8	39,8	66,4
14	38,3	26,6	57,8	41,0	78,2	49,7	96,4	56,9	50,4	39,0	65,3
15	38,6	24,8	44,9	36,9	59,2	41,0	77,9	50,6	49,8	38,6	64,8
16	38,5	26,2	47,2	38,8	57,9	40,1	78,0	51,0	52,2	41,6	62,0
17	41,4	27,6	46,2	32,7	58,2	42,5	78,2	50,9	50,8	40,0	63,7
18	30,5	24,2	44,9	36,9	59,7	46,0	79,5	55,3	42,6	33,4	65,1
19	32,8	27,0	47,1	38,8	61,3	47,1	80,2	55,5	41,6	28,8	63,0
20	31,3	20,7	46,2	32,7	60,7	45,2	80,7	--	41,6	33,4	41,8
21	32,0	24,4	46,6	36,5	61,2	44,7	81,5	51,6	75,0	39,8	54,2
22	32,1	20,2	46,6	30,7	60,6	41,2	79,0	51,0	37,1	27,5	62,5
23	29,4	21,4	44,5	34,7	58,9	43,6	77,4	53,1	42,6	31,0	57,3
24	29,3	20,5	44,4	34,4	58,7	43,3	78,5	52,9	41,2	30,1	56,2
25	29,4	21,6	44,2	35,7	58,0	43,5	77,7	53,6	42,8	30,8	61,4
26	30,3	--	40,5	11,3	--	--	--	--	11,5	--	--
27	17,0	--	27,0	1,0	32,6	1,4	--	--	1,0	--	--
28	9,7	--	30,7	6,0	--	--	--	--	6,3	--	--
29	31,5	--	59,0	7,7	--	--	--	--	--	--	--
30	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
31	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
32	39,2	25,1	49,4	28,5	57,3	39,2	--	--	39,8	35,1	52,6
33	29,3	18,8	39,2	29,0	48,6	35,7	--	--	40,3	27,3	65,7
34	39,0	32,3	47,2	37,4	56,5	45,5	--	--	39,6	27,9	70,7
35	39,9	33,2	48,2	37,4	57,6	42,3	--	--	35,2	29,8	89,4
36	38,6	28,2	47,3	36,5	56,3	40,4	--	--	29,2	23,6	88,0
37	29,6	18,3	36,7	24,8	47,0	33,3	--	--	25,4	16,8	90,0
38	20,0	--	24,8	11,3	29,7	18,0	34,4	19,7	30,1	15,0	88,4
39	24,4	--	29,2	15,2	34,4	18,9	--	--	21,3	11,2	15,4
40	24,4	13,2	29,3	18,1	38,3	24,6	--	--	19,5	9,0	75,5
41	19,5	4,1	24,1	12,9	29,0	14,9	33,3	19,7	12,4	0,8	51,6
42	13,7	--	17,3	6,9	23,5	11,7	--	--	4,8	0,4	35,0
43	13,3	2,9	17,1	8,7	22,9	12,8	--	--	2,9	--	27,0
44	30,2	21,7	39,5	31,5	47,8	37,4	--	--	38,1	31,0	75,5
45	14,2	--	18,1	9,0	24,3	15,5	28,2	15,9	15,3	12,1	48,0
46	38,8	32,6	48,4	41,5	58,0	45,1	--	--	45,2	36,3	58,5
47	29,4	23,3	39,5	32,6	48,4	41,1	--	--	37,8	29,5	68,8
48	29,6	22,6	34,7	27,9	38,9	32,7	42,9	34,8	34,2	24,8	65,2
66	--	--	61,6	42,7	81,2	54,0	--	--	56,0	43,5	--
67	40,5	28,1	60,7	42,6	80,1	52,0	97,9	55,3	54,9	43,5	--
68	40,4	28,1	59,4	41,0	79,6	52,8	97,2	57,5	57,5	44,0	--
69	40,3	29,5	60,5	41,4	79,0	48,3	98,3	61,0	57,5	43,5	--
70	40,2	25,9	60,1	39,3	78,5	49,5	98,2	58,5	59,5	42,0	--

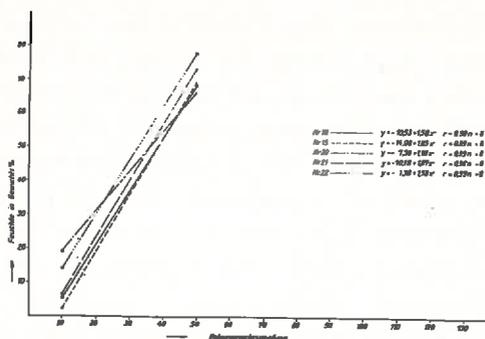


Abb. 11 Abhängigkeit der Volumenschrumpfung von der Bodenfeuchte

Da die Kurven sich schneiden, muß zur Beurteilung der Reihenfolge der Auswirkung der Kationen zwischen einer solchen im trocknen Bereich und einer im feuchten Bereich unterschieden werden (Tab. 13).

Tab. 13 Auswirkung der Kationen in den reinen Proben (Nr. 1 - 5, 18 - 22) auf die Volumenschrumpfung

Boden trocken (30 % (Gew.) Feuchte)		pF	Boden naß (80 % (Gew.) Feuchte)		pF
K	19,4% Vol.Schr.	3,7	Na	54 Vol.Schr.	2,5
H	19,9% " "	3,6	Mg	56,9% " "	0
Na	24,2% " "	4,1	Ca	57,2% " "	0
Ca	25,8% " "	3,9	H	51,8% " "	0
Mg	26,8% " "	3,8	K	61,3% " "	0
Ton trocken (35% (Gew.) Feuchte)		pF	Ton naß (120% (Gew.) Feuchte)		pF
H	22,1% Vol.Schr.	4,2	Na	68,4% Vol.Schr.	2,2
K	24,04% " "	4,2	Ca	71,8% " "	0
Mg	26,5% " "	4,2	K	72,0% " "	0
Na	25,5% " "	4,2	H	75,2% " "	0
Ca	28,0% " "	4,2	Mg	74,5% " "	0

Das Wasser wird in Abhängigkeit von seiner Bindungsintensität im Boden festgehalten. Aus diesem Grund ist es wesentlich und auch von praktischer Bedeutung, die Volumenschrumpfung von diesem Gesichtspunkt aus zu betrachten. Wir haben unter Benutzung der entsprechenden pF-Kurve für jede einzelne Probe eine Kurve der linearen Schrumpfung in Abhängigkeit vom pF-Wert aufgestellt. Aus dieser Kurve griffen wir die Schrumpfungswerte ab, die ein Boden erreicht, wenn er vom pF-Wert 2,18 (Feldkapazität) bzw. 3,0 aus bis zur Lufttrockenheit austrocknet. Betrachtet man nun die Volumenschrumpfungswerte bei Feldkapazität (pF 2,18) der Proben 1 - 5 u. 18 - 22, so erkennt man einen hohen Wert der Na-Proben, sowohl im Boden (Nr. 21) als auch im Ton (Nr. 4), wobei auffällt, daß der Wert im Boden mit 75 % Volumenschrumpfung noch um 5 % höher liegt als der im Ton mit 70 %. Ca-, Mg- und K- unterscheiden sich in der Schrumpfung beim Boden (Nr. 18 - 20) mit 41,6 % - 42,6 % nur minimal. Deutlich geringer als alle anderen reinen Tone (Nr. 1 - 4) liegt der H-Ton (Nr. 5) mit 48 %. Ca- (Nr. 1) und Mg- (Nr. 2) sind mit 55 - 57 % ziemlich gleich. Bei der Betrachtung der Nummern 1 - 17 zeigt sich eine hochsignifikante positive Korrelation zum Na- mit $r = +0,89$ bei $n = 15$ $y = -157,73 + 3,14 x$. Alle anderen Kationen haben eine nicht gesicherte negative Korrelation. Ähnliche Verhältnisse bestehen auch bei pF 3,0, bei dem das Na- mit $r = +0,82$ bei $n = 15$ $y = 273,99 + 6,91 x$ hoch signifikant gesichert ist, während auch hier alle anderen Kationen eine negative nicht gesicherte Korrelation aufweisen. Es ergibt sich also, daß mit steigendem Anteil an Na- auch das Ausmaß der Schrumpfung ansteigt.

Zu dem Tongehalt besteht bei den Proben Nr. 32 - 48 eine hochsignifikante positive lineare Regression. Für den pF-Wert 2,18 errechneten wir die Korrelation mit $r = +0,88$ bei $n = 17$ $y = 6,69 + 0,95 x$ und für den pF-Wert 3,0 eine solche mit $r = +0,87$ bei $n = 17$ $y = 13,56 + 1,00 x$.

Schaltet man in diese Betrachtung die Proben mit den Nr. 1 - 25 ein, so zeigt sich, daß von einem Tongehalt von mehr als 50 % an die Werte von dieser linearen Kurve (der Proben 32 - 48) abweichen. Sehr gut läßt sich die Abhängigkeit durch die quadratische Gleichung $y = 23,26 - 0,64 x + 0,039 x^2$ erläutern.

Von dieser Kurve weichen nur noch die Proben mit hohem Anteil an Feinsand (mehr als 60 %) bzw. Mittelsand oder Grobsand (mehr als 45 %) zur negativen Seite hin geringfügig ab. Zur positiven Seite ergeben sich Abweichungen, wenn der Tongehalt dividiert durch den Gehalt an Feinschluff + Grobschluff einen Wert kleiner als 0,5 ergibt. Ebenfalls bewirken sehr hohe Na-Anteile (> 80 %) eine positive Abweichung.

Die gröberen Fraktionen lassen vom Feinschluff bis zum Grobschluff eine schwach positive, allerdings nicht signifikante Korrelation erkennen. Ab Feinsand wird dann die Korrelation negativ. Sie ist für den Feinsand (pF 3,0) mit $r = 0,49$ bei $n = 17$ $y = 34,57 - 0,91 x$ gesichert, während der Einfluß aller anderen Korngrößen nicht signifikant ist. Die Korrelationen nehmen sowohl im positiven als auch im negativen Teil mit zunehmender Korngröße ab.

Bei dieser Versuchsanstellung ist eine deutliche Anisotropie in der Schrumpfung zu erkennen. Das Ausmaß der vertikalen Schrumpfung übertrifft teils erheblich das der horizontalen (Tab. 12). Mit zunehmender Feuchte werden diese Differenzen größer. So beträgt im Bereich pF 4 die horizontale Schrumpfung etwa 80 % der vertikalen Schrumpfung, während sie im Bereich von pF 2 etwa 60 - 70 % ausmacht. Noch größer sind die Unterschiede bei allen Proben mit einem Tongehalt unter 25 %, bei denen die horizontale Schrumpfung etwa nur 20 - 30 % der vertikalen Schrumpfung beträgt. Die gleiche Wirkung hat auch ein Anteil an K- von mehr als 75 % und von H- mit mehr als 90 %. Diese relative

Erhöhung der vertikalen Schrumpfung ist gleichzeitig mit einer Verminderung der Plastizitätszahl und der Fließgrenze verbunden. Als Grenzwert für die Erhöhung der Anisotropie läßt sich eine Plastizitätszahl < 14 erkennen.

Ein größerer Anteil an Na-Ionen scheint die Anisotropie ebenfalls zu erhöhen. In gleicher Richtung wirkt auch ein hoher Anteil an gröberen Fraktionen (größer als f_{50}). Als Grund für diese anisotrope Schrumpfung kann hier nicht die innerkristalline Quellung angeführt werden, da mit Abnahme des Tongehaltes die Anisotropie zu und nicht wie dann zu erwarten wäre, abnimmt. Wir führen vielmehr diese Erscheinung bei sandreichen Substanzen auf ein mechanisches Zusammensacken der Substanz zurück. Dieses "Zusammensacken" wird mit einer Verdichtung des Bodens verbunden sein. Im anderen Falle, wenn nämlich die horizontale Schrumpfung einen größeren Anteil an der Gesamtschrumpfung besitzt, wird sich diese Volumenminderung durch Zerreißen des Bodens (Rissebildung) auswirken. In den mit Na-Ionen belegten Tonen wird durch die hohe Plastizität eine Verschiebung der Teilchen gegeneinander ermöglicht. Dadurch kommt die vertikale Schrumpfung bevorzugt zum Ausdruck.

Vergleicht man nun die Ergebnisse der linearen Schrumpfung bei $p_F 2,18$ mit denen nach anderen Untersuchungsverfahren, so kann man zu allen hier angewendeten Methoden eine mehr oder weniger signifikante positive Korrelation erkennen. Eine hochsignifikante positive Korrelation mit $r = +0,64$ bei $n = 40$ besteht zu dem Anteil an Teilchen $< 2 \mu$. Die reinen Proben mit K (Nr. 3 u. 20) und Na (Nr. 4 u. 21) fallen aus der allgemeinen Regression heraus und drücken den Korrelationswert ebenso wie alle Proben mit einem Tongehalt unter 40 % (Nr. 38 - 45 u. 47 - 48). Die Korrelationen zu anderen Methoden sind aus folgender Zusammenstellung zu ersehen. Dabei ist zu beachten, daß fast in allen Fällen die K- und die Na-Ionen beträchtlich aus den Regres-

sionen herausfallen. Besonders trifft dies für die Gefügestabilität zu. Regressionen und Korrelationen der Volumenschrumpfung bei p_F 2,18 zu anderen Methoden:

zu: Teilchen $< 2 \mu$	$r=+0,64$	$n=40$	$y=29,81+ 0,67x$
Flockung	$r=+0,58$	$n=23$	$y=36,68+ 0,23x$
Ausrollgrenze	$r=+0,75$	$n=30$	$y= 1,50+ 1,38x$
Fließgrenze	$r=+0,87$	$n=40$	$y= 7,15+ 0,46x$
Plastizitätszahl	$r=+0,83$	$n=30$	$y= 5,45+ 0,91x$
Adhäsion bei 50 g/cm^2	$r=+0,90$	$n=36$	$y=13,39+ 0,45x$
Sedimentvolumen	$r=+0,89$	$n=20$	$y=38,03+ 0,25x$
Wasseraufnahme-Geschwindigkeit	$r=+0,77$	$n=22$	$y=34,11+10,90x$
Gefügestabilität	$r=+0,49$	$n=39$	$y=29,64+34,20x$

Alle Korrelationen sind demnach hochsignifikant.

Den Quellungsdruck konnten wir wegen Materialmangels nur an den reinen Proben (Nr. 18 - 22), nach der Methode KUNTZE (65) ^{x)} untersuchen. Die Messungen erfolgten bei einer dem p_F -Wert 3,0 entsprechenden Ausgangsfeuchte, da diese Feuchte, wie später noch gezeigt wird, für die Ribbildungen von Bedeutung ist.

Die mit Wasser im Stechzylinder gesättigten Proben wurden bis zu der dem p_F -Wert 3 entsprechenden Feuchte entwässert. Dann wurden die Proben entsprechend der Vorschrift aus dem Stechzylinder entfernt, gewogen, das Volumen im Luftdruckpyknometer bestimmt, mit einer Weichfiltermanschette umgeben und in den Quelldruckapparat (Abb. 12) eingesetzt. Die Messungen wurden nach 48 Stunden abgebrochen.

Der Apparat besteht aus zwei Teilen, dem Unterteil mit konisch erweitertem Innenraum zur Aufnahme der Probe und dem Oberteil mit konisch verengtem Innenraum, der durch eine 0,3 mm starke Gummimembrane abgeschlossen ist.

x) Die Messungen verdanke ich dem freundlichen Entgegenkommen von Herrn Dr. KUNTZE, dem auf diesem Wege herzlich gedankt sei.

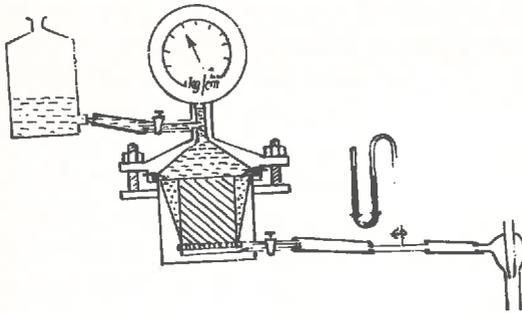


Abb. 12 Quellungsdruckapparat nach KUNTZE (65)

Der Raum zwischen der Probe und der Wandung im Unterteil ist mit Sand oder Glasperlen ausgefüllt. Das konische Ober-
teil oberhalb der Gummimembran ist mit Wasser gefüllt und hat Anschluß an ein Druckmanometer. Im unteren Teil ist
eine Glasfilterplatte angebracht, durch die das für die
Quellung der Probe erforderliche Wasser eingeleitet wer-
den kann. Der Quelldruck wird an dem Manometer in kg/cm^2
abgelesen. Nach Beendigung der Messung wurde die Endfeuch-
te gemessen. Die Ergebnisse sind aus der Tabelle 14 zu er-
sehen.

Die pF-Untersuchungen in Tab. 14 wurden nach einer etwas
abgeänderten Methode durchgeführt. Um den Anschluß an die
sonstigen in der Arbeit aufgeführten pF-Werte zu erhalten,
sind die mit unserer Apparatur gefundenen Werte in Klammern
zugesetzt. Wie aus der Spalte maximale Quellung zu
ersehen ist, war nach 48 Stunden das dem pF-Wert 2,2 -
2,7 entsprechende Wasser aufgenommen worden.

Tab. 14 Ergebnisse der Quellschichtdruckmessungen nach KUNTZE der Proben 19 - 22

Nr. Ka- tion	Trocken- subst.	Wassergehalt bei		in Vol %	pF	in Vol %	pF	Quellschichtdruck		Berech- nung aus der Wasser- bindungs- intensität	Wasser- aufnahme in ml/ 100 g Boden
		max. Quellung	Beginn des Versuches					absolut	umge- rechnet auf 100 g Ton		
19	Mg	73,2	0,89	72,9	(2,7)	67,2	(2,9)	0,300	0,41	0,29	10,7
20	K	72,3	0,94	74,2	(2,5)	65,6	(2,8)	0,255	0,35	0,31	11,7
21	Na	53,4	0,71	96,6	(2,6)	78,6	(3,0)	0,260	0,49	0,60	22,1
22	H	81,1	1,04	75,8	(2,2)	59,0	(3,0)	0,345	0,40	0,84	23,4

Der Wassergehalt des H-Tones liegt bei pF 2,2 und ist somit am höchsten. Dies ist mit der besseren Steiggeschwindigkeit (S. 130) zu erklären. Der hohe absolute Quellungsdruck ist sowohl durch die hohe Einwaage als auch durch das schnelle Eindringen des Wassers bedingt. Die relativ große Wasseraufnahme des Na-Tones trotz der geringen Steiggeschwindigkeit ist durch eine erheblich geringere Einwaage verständlich. Die Quellungsdrucke liegen umgerechnet auf 100 g Ton bei $0,35 \text{ kg/cm}^2$ für den K-Boden (Nr. 20), $0,40 \text{ kg/cm}^2$ für den H-Boden (Nr. 22), $0,41 \text{ kg/cm}^2$ für den Mg-Boden (Nr. 19) und $0,49 \text{ kg/cm}^2$ für den Na-Boden (Nr. 21). KUNTZE errechnet noch aus der Differenz der Gewichtszunahme - Volumenzunahme das Quellvermögen, das sich bei Na-Boden zu 0,45, Mg-Boden zu -0,10, K-Boden zu -0,70 und H-Boden zu -0,85 ergibt. Eine positive Zahl besagt, daß die Volumenzunahme geringer ist als die Gewichtszunahme. Im anderen Fall nimmt das Volumen der Substanz mehr zu als dessen Gewichtszunahme entspricht. Die auf 100 g Ton umgerechneten Quellungsdrucke sind sicherlich erheblich durch die Lagerungsdichte (Raumgewicht) beeinflußt. Wir haben aus dem Unterschied der Bindungsintensität zu Beginn des Versuches und auch zu Ende des Versuches die Druckdifferenz ausgerechnet und in kg/cm^2 mit aufgeführt. Diese Werte liegen teils erheblich höher als die gemessenen. Dies ist einzusehen, da bei der Messung nach KUNTZE ein Teil der Substanz in die Hohlräume hineinquillt und im Gegensatz zu der Berechnung nicht mit erfaßt wird.

8. Rißbildung

Die Austrocknung kolloidreicher Böden ist häufig mit der Ausbildung eines Rißsystems verbunden. Bekannt sind die teils sehr tiefgreifenden Risse in Marschböden. Durch diese

Schrumpfrisse kann der Boden in mehr oder minder große Aggregate aufgeteilt werden. Ein ähnlicher Erfolg wird bei der Frosteinwirkung auf den Boden beobachtet. HÄUSLER (41) berichtet, daß solche Risse auch bei der Befeuchtung von Beton auftraten. Diesen Vorgang nennt er Synerese. BÄVLER (12) erklärt das Zerbrechen (Zerreißen) von "Klumpen" durch Befeuchtung mit dem ungleichmäßigen Eindringen von Wasser und damit einem ungleichmäßigen Quellen der Substanz. Wiederholte Quellungen und Schrumpfungen führen auf diesem Wege zur Gefügeausbildung.

Die Ausbildung der Gefügeaggregate ist visuell gut zu erkennen und ist die Grundlage der Gefügesystematik, in der die Gefügeelemente nach dem Längenverhältnis ihrer Achsen, der Ausprägung der Ecken und Kanten sowie der Größe der Elemente eingegliedert werden. Die russische Schule von NIKOFFOROF (83) hat die erste Systematik dieser Art aufgestellt. Diese ist von der amerikanischen Bodenkartierung fast unverändert übernommen worden. MÜCKENHAUSEN, KOEPF und ALTEMÜLLER haben auf dieser Grundlage eine Systematik des Gefüges für deutsche Böden aufgestellt (79). Sie unterscheiden darin zwischen dem Einzelkorngefüge, bei dem grobe Teilchen lose nebeneinander liegen ohne durch ein Bindemittel miteinander verbunden zu sein; dem Kohärentgefüge, das durch eine zusammenhaftende, nicht gegliederte Bodenmasse, deren Körner durch Kolloidsubstanz gleichmäßig, jedoch mehr oder weniger stark miteinander verklebt sind, gekennzeichnet ist (30); und dem Aggregatgefüge, das eine große Mannigfaltigkeit der Ausbildungsformen umfaßt. Eine Gruppe des Aggregatgefüges ist das Absonderungsgefüge, das besonders in kolloidreichen Böden durch Quellung und Schrumpfung oder durch die Einwirkung des Frostes (also durch die Ribbildung) entstehen kann.

EHRENBERG (32) berichtet von einem Versuch, in dem festgestellt wurde, daß ein durch Wasserzugabe gequollener Bodenkörper nach dem Austrocknen zur Ausgangsfeuchte ein größeres

Volumen besitzt als vor dieser Behandlung. Die Erklärung dafür ist in einer Verschiebung der Teilchen zu suchen, die zu einer Auflockerung des Gefüges führte. Zu einem ähnlichen Ergebnis kam CZERATZKI (zit. in 57) bei der kinemato-graphischen Beobachtung der Trocknung eines Bodenschlickers. Er fand, daß die durch Austrocknung entstandenen Risse bei Befeuchtung sich wieder schlossen. Eine zweite Austrocknung führte zu einer Erweiterung und Vertiefung der gleichen schon beim ersten Schrumpfen entstandenen Risse. EHRENBERG (32) beschreibt ebenfalls diesen Vorgang und führt ihn darauf zurück, daß an den Rändern dieser Risse durch Einschlammungen bevorzugt kolloides Material oder auch kolloide "Klebmasse" abgelagert wird. Dadurch entstehen Schwächezentren, die zu dem bevorzugten Reißen alter schon vorgebildeter Risse führen. Auch SCHILLER (94) konnte in seinen Versuchen ähnliche Feststellungen machen.

Das Zerreißen der Bodensubstanz erfolgte sowohl in horizontaler - es entsteht plattiges Gefüge - als auch in vertikaler Richtung - es entsteht z.B. polyedrisches bzw. primatisches Gefüge. Je dichter das bei der Schrumpfung entstandene Rißsystem ist, um so kleiner werden die durch diesen Vorgang abgetrennten Gefügeelemente, um so günstiger ist bis zu einem Grenzwert das daraus gebildete Bodengefüge zu bewerten. Um diese Verhältnisse untersuchungsmäßig erfassen zu können wurde die Rißbildmethode entwickelt (113, 114). In unseren Versuchen konnte nachgewiesen werden, daß in Abhängigkeit von der Kationenbelegung, der Beimengung von Eisen, Humus oder Krillium gut definierte unterschiedliche Rißbilder auftraten. Da die Durchführung der Methodenvorschrift zur Erzielung auswertbarer Ergebnisse sehr genau eingehalten werden muß, soll sie nochmals aufgeführt werden.

25 g des zu untersuchenden Bodens (3 Parallelen) werden in einer Petrischale (Durchmesser 14 cm) tropfenweise unter ständigem Umrühren derart mit Wasser versetzt, daß ein

dünnflüssiger Schlicker entsteht (bei schlechter Benetzung zunächst im Vakuum mit einem Teil des erforderlichen Wassers ansetzen ohne umzurühren). Die Wassergabe muß so bemessen sein, daß beim Verrühren gerade ein entzerrtes Spiegelbild zu erkennen ist. Eine zu große Wassermenge ist unbedingt zu vermeiden. Der erforderliche Wassergehalt ist mit einiger Übung gut zu erkennen. Die so angesetzten Proben bleiben über Nacht im Vakuum stehen. Am nächsten Tag wird dann der Wassergehalt wie oben überprüft und eventuell ergänzt. Von diesem Schlicker wird eine genau 7 g lufttrockenem Boden entsprechende Menge auf die vorher gut entfetteten (Azeton) Glasscheiben gegeben. Die plangeschliffenen, polierten Glasplatten haben einen Durchmesser von 10 cm und sind mit einem Gummiring zur Verhinderung des Herablaufens des Schlickers versehen. Die Glasplatten mit dem Schlicker werden dann gut horizontal (Wasserwaage Empfindlichkeit 0,15) aufgestellt und in einem vor Luftzug geschützten, nicht ganz geschlossenen Holzkasten der Trocknung überlassen. Anschließend werden die Bilder fotografiert.

Wenn diese Methodenvorschrift, besonders die angegebene Einwaage sehr genau beachtet wird, ergeben sich je nach Art der Probe charakteristische gut reproduzierbare Rißbilder, die in die Riß Typen eingestuft werden können (113, 114). Wir unterscheiden nach der Form der Risse, Ausbildung der Rißwandungen und der Form der "Inseln" 4 Typen.

Typ 0 Ohne Rißbildung.

Typ I Ein System fein verästelter, kurzer, schmaler Risse, die unregelmäßig verzweigt sind und am Ende spitz zulaufen, ist zu erkennen. Ihre Ränder sind gezackt und unregelmäßig. Die durch die Risse voneinander getrennten Einzelgebilde, die mit "Inseln" bezeichnet werden, sind mehr oder weniger abgerundet. Sie sind durch kleine Risse oft wieder in

sich gespalten. Längere zusammenhängende Risse sind kaum zu beobachten (s. Abb. 13a).

Typ II Ein System regelmäßiger, lang durchgehender, glattwandiger Risse kennzeichnet diesen Typ. Lediglich die allerfeinsten Risse gehen an den Enden spitz zu. Häufig laufen breite Risse parallel zueinander und sind unter sich wieder durch parallel verlaufende Risse verbunden. Die Form der Inseln ist kantig (s. Abb. 13b u. 16a).

Typ III Hier sind nur wenige sehr breite, glattwandige Risse, die am Ende meist spitz zulaufen, zu erkennen (s. Abb. 13c).

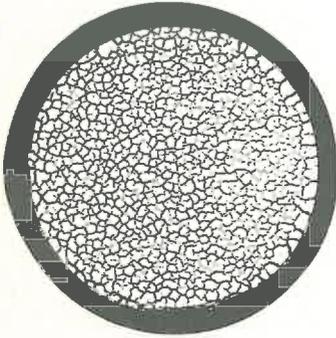


Abb. 13a Rißbild Typ I

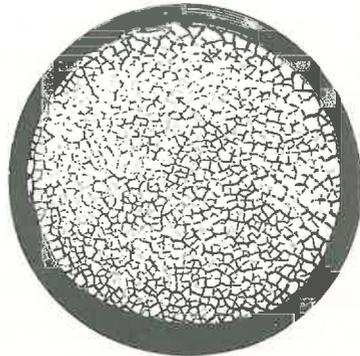


Abb. 13b Rißbild Typ II



Abb. 13c Rißbild Typ III

Die Ausbildung des Rißsystems ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Wesentlichen Einfluß üben das Schrumpfvormögen, die Plastizität, die Adhäsion, die Kohäsion und der Orientierungsgrad der Teilchen aus. Diese stehen in Wechselbeziehungen zueinander (113).

Die Auswertung der Rißbilder erfolgt nach dem Rißtyp, der Rißzahl, zu deren Bestimmung die Anzahl der Risse auf 4 verschiedenen in einem Winkel von 45° zueinander stehenden Durchmessern (Hilfslinien) festgestellt werden, und der Rißbreite, unter der die Breite der Risse verstanden wird, die bei der Zählung die Hilfslinien schneiden (Meßgenauigkeit = 0,1 mm). Um Rißzahl und Rißbreite in einer Zahl ausdrücken zu können, haben wir für jede Probe alle Risse mit einer Breite $< 0,2$ mm in einer Gruppe zusammengefaßt und diese Zahl durch die Anzahl der gesamten Risse dividiert. KOEPP (62) konnte bei seinen Versuchen die Brauchbarkeit der Methode nachweisen. Allerdings ging er bei der Auswertung von anderen Gesichtspunkten aus, er wollte in der Hauptsache das Ausmaß der Schrumpfung bestimmen. Diesem Zweck entsprechend war eine größere Einwaage verwendet worden. CURRINI-GALLETTI konnte mit der Rißbildmethode einen engen Zusammenhang zwischen dem Volumen der Risse und dem Schrumpfen im Boden nachweisen. Sie setzten zu diesem Zweck 40 g lufttrockenen, gesiebten Boden mit heißem Wasser an, verrührten die Substanz zu einem Brei, gaben sie in Schalen mit einem Durchmesser von 9 cm und ließen sie bei Zimmertemperatur eintrocknen. Die entstandenen Rißbilder wurden fotografisch fixiert und das Volumen der Risse durch Einfüllen von feinkörnigen Samen gemessen (20, 21). (Die Beurteilung nach dem Rißtyp ist bei einer geringen Einwaage besser durchzuführen).

Versuchsergebnisse

Zur Klärung der Vorgänge, die zur Ausbildung der 3 Riß-typen führen, filmten wir den Austrocknungsverlauf von Proben, die dem Rißtyp I (Probe Nr. 5), dem Rißtyp II (Probe Nr. 2) und dem Rißtyp III (Probe Nr. 4) entsprachen. Die Aufnahmen erfolgten in Zeitlupe (1 Bild/30 sec) mit einer 8 mm Kamera. Zum Vergleich waren die 3 Proben nebeneinander gestellt. In einem Parallelversuch bestimmten wir für jede uns wichtig erscheinende Phase den entsprechenden Wassergehalt. Deutlich war bei allen Bildern der Eintritt der Luft in die Poren durch Aufhellen der Substanz zu erkennen. Diesem Vorgang ging bei allen Proben eine starke Dunkelfärbung voraus. Diese dunkle Stelle bildete sich meist in der Mitte der Platte zunächst punktförmig aus und erweiterte sich radial. Im Zentrum dieser nun kreisförmigen Fläche zeigte sich dann die schon beschriebene Aufhellung, während die dunkle Fläche als Ring vor dieser Aufhellung zum Rand der Probe abwanderte. Dieser Vorgang kann folgendermaßen erklärt werden:

Jedes mit einer Hydratschicht umgebene Teilchen (auch Pseudokörner) ist bei der zunächst hohen "Rißbildfeuchte" durch freies Wasser von den anderen Teilchen getrennt. Im Verlaufe der Trocknung vermindert sich das Wasser und damit der Abstand der Teilchen voneinander, bis sich die fest gebundenen Hydratschichten berühren und ineinander "überfließen". Es bildet sich dabei ein Meniskus aus, der mit erheblicher Kraft die Teilchen aneinander zieht. Durch den dabei entstehenden Druck wird das in dem Hohlraum zwischen den Teilchen befindliche ungebundene Wasser herausgepreßt. Die Substanz erscheint dann dunkel (Abb. 14). Dieses Wasser verdunstet schnell und läßt die Luft in die Poren eintreten, wodurch die Hellfärbung auftritt.

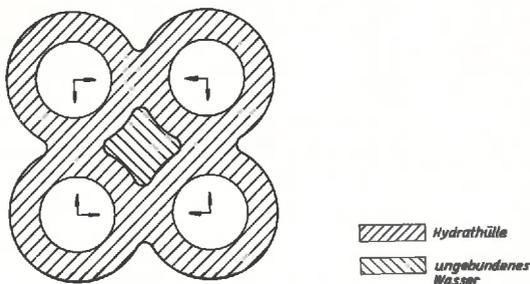


Abb. 14 Entstehung der Dunkelfärbung bei der Abtrocknung eines Schlickers (Schematische Darstellung)

Die Ausbildung des voll ausgeprägten verzweigten Rißsystems erfolgte bei dem Rißtyp I (Abb. 13a) plötzlich, bevor in der Substanz Veränderungen zu erkennen waren. Dies ereignete sich demnach schon vor der Dunkelfärbung also im relativ nassen Zustand. Im Verlaufe der weiteren Abtrocknung veränderte sich das Rißbild und damit die Rißbreite nicht mehr. Das Reißen der Probe des Types II erfolgte ebenfalls im nassen Zustand vor der Verfärbung. Hier war die Entwicklung der Risse langsamer und eine, zwar geringe Zunahme der Rißbreiten im weiteren Trocknungsverlauf zu erkennen. Im Gegensatz zu diesen Proben rissen die des Types III nur im Bereich der Aufhellung, also nachdem Luft in das System eingedrungen war. Die Risse folgten dem dunklen Ring nach, traten aber in keinem Falle in diesen ein. Während des weiteren Abtrocknens konnte eine nicht unerhebliche Verbreiterung der Risse beobachtet werden. Weitere Aufschlüsse über die Entstehung und Bedeutung der Rißstypen ergab die Betrachtung der physikalischen Kennwerte in Abhängigkeit von der bei Rißbeginn vorliegenden Bodenfeuchte (Tab. 15).

Tab. 15 Physikalische Kennwerte bei der dem Rißbeginn entsprechenden Feuchte

Probe Nr.	RiB-typ	RiBbildung bei pF-Wert	Vol.-Schrumpf. bei der Feuchte zu Beginn des Reißens	Adhäsion	Ausrollgr. (pF-Wert)	Höhe der Inseln in mm	RiBzahl
5	I	3,2	36 %	260	3,9	1,68	168
1	II	3,3	40 %	490	3,8	0,87	144
4	III	4,4	20 %	580	4,0	0,44	20

So konnte festgestellt werden, daß das Aufreißen des Types I bei einem pF-Wert von 3,2 erfolgte, dasjenige des Types II bei pF 3,3 und schließlich zeigte der Typ III erst bei pF 4,4 seine Risse. Die diesen Feuchten entsprechenden Volumenschrumpfungen betragen beim Typ I 36 %, bei Typ II 40 % und bei Typ III 20 % (Tab. 15). Wie weiter unten noch ausgeführt wird, tritt bei Proben mit einer Schrumpfung unter 25 % keine Rißbildung auf. Demnach ist besonders die bei dem Typ III im Verlauf weiterer Austrocknung beobachtete Verbreitung der Risse nicht als eine Folge der Volumenverminderung anzusehen.

Die im Rißbild des Types I (Abb. 13a) erkennbaren unregelmäßig ausgebildeten Risse mit den gezackten Wandungen deuten daraufhin, daß diese Substanz ohne größere Spannungen in verschiedene Inseln "zerfällt". In gleicher Richtung sind auch die Tatsachen zu werten, daß der Zerfall im plastischen Bereich auftritt (Ausrollgrenze liegt bei pF 3,9), daß die Adhäsion bei Rißbeginn nur 260 g/cm² beträgt und daß die Rißzahl mit 168 Rissen sehr hoch liegt.

Nimmt die Kohäsion und damit die Spannung in der Masse zu, so beginnt das Zerreißen an einem durch irgendwelche Umstände gebildeten Schwächezentrum und schreitet von dort ausgehend fort. Im Gegensatz zu dem "Zerfall" (Typ I)

tritt dann ein "Aufspalten" ein. Der Vorgang ist mit dem Aufspalten von Holz zu vergleichen.

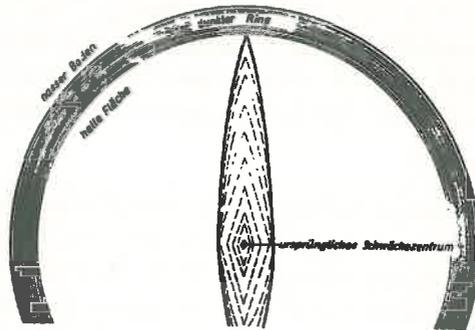


Abb. 15 Entstehung der Aufspaltung im RiBstyp III (schematische Darstellung)

Gekennzeichnet ist ein solches System durch glatte RiBwandungen und einen lang durchgehenden Verlauf der Risse. Dies ist bei dem Typ II der Fall (Abb. 13b). Die erheblich höhere Adhäsion von 490 g/cm^2 bestätigt die im Vergleich zu dem Typ I höhere Spannung des Systems, obwohl auch hier das Zerreißen noch im plastischen Zustand erfolgte (Ausrollgrenze $p_F 3,8$). Ebenfalls weist die gegenüber dem Typ I geringere RiBzahl von 144 Rissen auf eine höhere Kohäsion hin.

In dem Typ III sind diese Verhältnisse noch verschärft zu beobachten. Nur sehr wenige, dafür aber sehr breite Risse mit glatten Wandungen sind zu erkennen. Die noch wesentlich höhere Adhäsion von 580 g/cm^2 bestätigt die hohen Spannungen in dieser Masse. Erst bei Lufteintritt in die Poren reicht das Schwächezentrum als Ausgangspunkt für die RiBbildung aus. Das Aufspalten erfolgt nur in der hellen, also lufteerfüllten Fläche. Eine plastische Verschiebung ist bei RiBbeginn nicht mehr gegeben (Ausrollgrenze $p_F 4,0$). Be-

sonders die geringere Rißzahl von 20 ist ein Ausdruck für die hohe Kohäsion in der Substanz.

Somit kann der Typ II als Zwischenstufe zwischen den beiden Extremen (Typ I, Typ III) aufgefaßt werden. Die hohe Anzahl der Schwächezentren als Ausgang für die Rißbildung und das Zerreißen im noch plastischen Zustand gibt den Anschluß an den Typ I, das Aufspalten einen solchen zum Typ III.

Die Größe der Spannungen, die durch das Verhältnis der Kohäsion zu der Adhäsion in Verbindung mit der Plastizität bei der Schrumpfung hervorgerufen wird und die Teilchen gegeneinander verschiebt, muß sich in der Höhe der "Inseln" bemerkbar machen (113, 114). Bei geringen Spannungen ist die horizontale und die vertikale Schrumpfung nicht sehr verschieden. Bei hohen Spannungen dagegen muß die vertikale Schrumpfung diejenige in horizontaler Richtung erheblich übertreffen, da einer seitlichen Verschiebung der Teilchen (bei hoher Adhäsion an der Glasscheibe) ein Widerstand entgegengesetzt wird, eine Schrumpfung in vertikaler Richtung aber ohne Schwierigkeiten erfolgen kann. Die Messungen ergaben für den Typ I, also bei der geringsten Spannung eine "Inselhöhe" von 1,68 mm. Die Höhe im Typ II wurde mit 0,87 mm gemessen und im Typ III erreichte die Höhe nur 0,44 mm (bei gleicher Einwaage). Diese Ergebnisse bestätigen die unterschiedlichen Spannungsverhältnisse und die unterschiedliche plastische Verschiebung innerhalb der Systeme.

Übertrifft in tonreichen Böden die vertikale Schrumpfung erheblich diejenige in horizontaler Richtung, so muß mit diesem Vorgang ein plastisches Verschieben und damit eine Orientierung der Teilchen einhergehen (S. 73). Dies wird zu einer Verfestigung (Erhöhung der Kohäsion) und damit auch zu einer Verdichtung der Inseln führen. Im extremen Falle (Typ III) wird diese Verdichtung so groß, daß sich im Boden nachteilige Auswirkungen auf den (geringen) Zerfall

in Gefügeelemente, sowie eine zu dichte Lagerung innerhalb der Gefügeelemente, deren Folge eine Undurchlässigkeit für Luft und Wasser sein kann, ergeben.

KACINSKIJ bezeichnet dicht gelagerte Aggregate mit einem Gesamtporenvolumen von 30 - 40 % als für den Ackerbau schädlich (58). Im Falle sehr dünner Schichten wie z.B. Toneinschlammungen oder filmähnlichen Belägen auf gröberen Bestandteilen (Humus oder Eisengelen) können praktisch irreversible Anlagerungen entstehen, die auch bei stärkerer Austrocknung keine Risse zeigen und - wenn sie die Teilchen völlig umhüllen - deren Eigenschaften vollständig verändern (S. 14).

Bei dem anderen Extrem, dem Typ I zerfällt die Substanz, ohne daß eine wesentliche plastische Verschiebung der Teilchen vorausgegangen ist. Die Kohäsion der Masse erfährt in diesem Falle nur eine geringe zusätzliche Erhöhung durch eine Orientierung der Teilchen. Die Folge ist eine im Vergleich zu dem Typ III geringere Kohäsion und eine geringe Stabilität der auf diesem Wege gebildeten Gefügeelemente ist zu erwarten. Die Ausbildung des optimalen Gefüges ist bei dem Typ II zu erwarten. Dabei ist eine Annäherung an den Typ I günstiger zu bewerten als eine solche an den Typ III.

In der Tabelle 16 ist die Einstufung der Rißbilder aller untersuchten Proben in die Rißtypen dargestellt. Eine feinere Differenzierung erreichten wir noch dadurch, daß wir einige Zwischentypen einschalteten.

So zeigt der Rißtyp 0 keine Risse, während im Typ Ik die Risse nur sehr schwach ausgebildet sind. Die Typenbezeichnung I/II soll darauf hinweisen, daß es sich um einen Übergang vom Typ I zum Typ II handelt. Die jeweils vorne stehende Zahl ergibt den Haupttyp. Sinngemäß sind die anderen Zahlenkombinationen zu verstehen.

Tab. 16 Einstufung der Ribbbilder der Proben 1 - 70 in den RiStyp

Nr.-Typ	RiBbr. 1+2 aller Risse	RiBzahl	Vol.-Schrumpf. % bei pF 2,18	Adhäsion bei pF 3,0	Ton in %
39 0	---	---	21,3	55	17,2
42 0	---	---	4,8	0	8,9
43 0	---	---	2,9	20	9,6
45 0	---	---	15,3	30	13,3
				0-55 ^x	8,9-17,3 ^x
35 Ik	92,6	85	35,2	235	44,1
34 Ik	95,4	120	39,6	195	45,7
37 Ik	97,2	163	25,4	245	41,7
36 Ik	96,8	189	29,2	250	45,8
38 Ik	---	---	30,1	50	26,7
40 Ik	---	---	19,5	80	35,6
41	92,6-97,2 ^x	85-189 ^x	12,4	70	20,9
			12,4-39,6 ^x	70-250 ^x	20,9-45,6 ^x
47 I	99,0	101	37,8	93	38,3
48 I	97,4	116	34,2	120	33,6
20 I	96,3	120	41,6	75	36,8
22 I	99,5	141	37,1	190	46,3
5 I	89,1	168	48,2	205	87,4
			34,2-48,2 ^x	75-205 ^x	33,6-87,4 ^x (46,4)
23 I/II	98,8	118	42,6	260	56,6
18 I/II	97,8	123	42,6	270	55,6
24 I/II	98,1	137	41,2	270	55,8
67 I/II	80,0	150	---	288	82,2
25 I/II	95,1	123	42,8	280	55,6
19 I/II	91,1	101	41,6	250	54,2
			41,6-42,8 ^x	250-288 ^x	54,2-89,2 ^x (56,6)
1 II	63,1	134	55,0	425	89,3
2 II	49,6	144	57,2	370	89,2
11 II	58,6	145	49,5	360	88,7
10 II	69,7	150	49,1	450	88,2
16 II	71,0	150	52,2	320	89,7
17 II	78,7	162	50,8	315	89,6
15 II	52,9	151	49,8	360	89,7
9 II	68,8	153	49,9	465	89,7
12 II	70,3	157	48,8	305	89,9
3 II	63,9	155	52,2	385	91,8
14 II	69,3	162	50,4	350	87,3
66 II	73,0	166	---	358	89,8
13 II	58,4	167	49,8	380	89,4
8 II	69,6	119	51,3	485	90,7
			49,8-57,2 ^x	305-485 ^x	87,3-91,8 ^x
21 III	91,	14	75,0	190	54,1
4 III	34,6	20	70,0	205	91,9
			70,0-75,0 ^x	190-205 ^x	54,1-91,9 ^x
44 III/I	64,3	88	38,1	110	39,9
68 III/I	78,0	111	---	353	89,5
69 III/I	80,0	123	---	323	88,5
70 III/I	79,9	50	50-123 ^x	375	89,7
			64,3-80,0 ^x	110-375 ^x	39,9(88,5)-89,7 ^x
46 I/III	48,0	76	45,2	160	49,4
32 I/III	96,7	90	39,8	50	45,7
19 I/III	91,1	101	41,6	250	54,2
33 I/III	96,7	101	76-101 ^x	135	44,2
			40,3	50-250 ^x	44,2-49,4 ^x
			31,8-45,2 ^x		

x = Extremwerte einer Gruppe, die in Klammern gesetzten Zahlen werden bei Ausschaltung von "Ausreißern" erhalten.

Gleichzeitig sind in der Tab. 16 noch die für die Ausbildung des Rißbildes charakteristischen Faktoren mit angegeben. Die Angabe der Ausrollgrenze fehlt in dieser Zusammenstellung, da für die Proben 6 - 17, 66 - 70 keine Untersuchungen vorliegen. Sie können soweit vorhanden aus Tab. 7 entnommen werden.

Aus der Tabelle 16 läßt sich ableiten, daß alle Proben mit einem Tongehalt unter 20 % und mit einer Volumenschrumpfung bei pF 2,18 unter 20 % zu dem Typ 0 gehören, also keine Rißbildung zeigen. Sehr feine, zahlreiche Risse werden durch den Typ Ik dargestellt. Bei einigen Bildern dieses Types (Nr. 40, 41) war die Ausbildung der Risse so schwach, daß eine Auszählung nicht erfolgen konnte. Der Tongehalt dieser Bilder (Nr. 40, 41) schwankt zwischen 20 und 35 %, während die Volumenschrumpfung derjenigen des Types 0 entspricht, also unter 20 % liegt. Die Probe 38 konnte ebenfalls nicht ausgezählt werden, obwohl die Rißbildung deutlich war, da sie sich stark entmischt hatte. Aufgrund dieser Untersuchungen legen wir die Grenze zwischen einem Boden, der durch Quellung bzw. Schrumpfung ein Absonderungsgefüge ausbilden kann und einem solchen ohne diese Fähigkeit bei etwa 20 % Ton bzw. 20 % Volumenschrumpfung beim pF-Wert 2,18.

Bei den reinen Proben (Nr. 1 - 5 u. 18 - 22) ist deutlich die Auswirkung der Kationen auf den Rißtyp zu erkennen. Als Prototyp für den Typ I kann das H-Ion angesehen werden (Abb. 13a) (Nr. 5); für den Typ II das Ca-Ion (Abb. 13b) (Nr. 1) und für den Typ III das Na-Ion (Abb. 13c) (Nr. 4).

Zur endgültigen Beurteilung wie stark sich die Kationen in ihren Gemischen auf die Ausbildung des Rißtypes auswirken, reicht das hier untersuchte Material noch nicht aus.

Aus den Arbeitsgraphiken sind aber einige Tendenzen zu erkennen. Um auch innerhalb des Rißtypes eine quantitative Abstufung vornehmen zu können, soll als Charakteristik

die Zahl der Rißbreiten 1 + 2 mm in Prozent der Gesamtrisse angegeben werden. Es ergibt sich, daß mit zunehmendem Anteil an Ca-Ionen im Typ II und im Typ III die Zahl der kleinen Risse abnimmt, während im Typ I keine Auswirkung der Ca-Ionen vorzuliegen scheint. Eine Erhöhung der Kohäsion in den Typen II und III wäre daraus abzuleiten. Dies entspricht der positiven Korrelation des Ca-Anteils zur Adhäsion (S. 55). Durch das Mg-Ion wird im Typ II der Anteil an kleinen Rissen erhöht, während im Typ III eine Abnahme der kleinen Rißbreiten zu erfolgen scheint. Die Auswirkung durch das Mg-Ion ist aber nicht so stark ausgeprägt wie bei dem Ca-Ion (vgl. auch die geringe Korrelation bei der Adhäsion S. 55). Das K-Ion zeigt im Typ II und im Typ III einen Anstieg der kleinen Risse, während das Na-Ion im Typ II einen Anstieg der kleinen Risse, im Typ III dagegen einen deutlichen Abfall derselben erkennen läßt. Das H-Ion bewirkt in dem Typ III eine deutliche Zunahme der kleinen Risse.

Aus diesen Tendenzen ist abzuleiten, daß das Ca-Ion infolge seiner die Kohäsion erhöhenden Wirkung (geringere Rißzahlen 1 + 2) als positiv für die Gefügeausbildung im Typ II angesehen werden kann, während besonders das H-Ion im Typ III durch Verminderung der Kohäsion (höhere Rißzahlen 1 + 2) eine Gefügeverbesserung erreicht. Vielleicht ist die günstige Wirkung einer Gips-Düngung auf die Gefügeverbesserung von Alkali-Böden darauf zurückzuführen, daß zwischenzeitlich H-Ionen frei werden und dann kohäsionsvermindernd in oben angegebenem Sinne wirken. Diese Frage, die besondere Bedeutung für aride Gebiete besitzt, wird noch geprüft.

Auch die Auswertung bezüglich der Auswirkung der Korngrößenverteilung ist zunächst nur in der Tendenz möglich. Während im Typ I der Tonanteil allgemein niedrig unter 45 % liegt, (Tab. 17), - eine Ausnahme bildet der H-Ton - liegt er im Typ II bzw. I/II in allen Fällen über 50 % - etwa 90 %. Im

Typ III sind die gleichen Tonanteile zu beobachten. Eine Auswertung bezüglich der Rißbreiten in den Rißtypen ergab als Tendenz, daß durch die Zunahme des Tones im Typ I die Anzahl feiner Risse abnahm, während sie im Typ III eine Zunahme bewirkte. Durch den Mittelschluff scheint eine Zunahme der feinen Risse bei dem Typ III zu erfolgen. Auch das Abschlämbare bewirkte im Typ III eine Zunahme der Rißbreiten 1 + 2.

Aus den bisher vorliegenden Untersuchungsergebnissen lassen sich einige Grenzwerte physikalischer Messungen zur Einstufung in die Rißtypen geben. Diese sind in der Tab. 17 zusammengestellt.

Es zeigt sich, daß verschiedene physikalische Eigenschaften sehr gut im Rißtyp zum Ausdruck kommen. Besonders gut spricht die Adhäsionsmessung an.

Weitere Versuche über die Ausbildung des Rißtypes ergaben, daß durch Frosteinwirkung eine Umwandlung des Types II in den Typ I erfolgen kann. Dazu hatten wir verschiedene Tone und Böden unterschiedlicher Herkunft, die einwandfrei dem Typ II zuzuordnen waren, zunächst unter normalen Bedingungen entsprechend der Rißbildmethode eintrocknen lassen. Wir erhielten, wie zu erwarten war, ein Bild des Types II (Abb. 16a). Nun feuchteten wir die Substanz auf der Glasplatte entsprechend der "Rißbildfeuchte" an und ließen dann die Probe langsam von der Zimmertemperatur bis minus 15 °C ausfrieren (Abb. 16b). Aus Bild 16c ist die Umwandlung der Rißtypen an einem Boden Geversdorf (dunkle Zone) zu erkennen. Es ist durch die Einwirkung des Frostes der Typ I entstanden. Wie oben schon beschrieben hat die nach dem Typ I entwickelte Gefügebildung nur eine geringe Stabilität. Dies trifft auch für die in der Natur durch Frosteinwirkung entwickelten Gefügeaggregate in den meisten Fällen zu. Aus diesem letzten Versuch und den Ergeb-

Tab. 17 Charakteristik des RiBtypes aufgrund physikalischer Messungen.
Die Zahlen stellen gemessene Extremwerte dar (siehe Tab. 16).

RiBtyp	Ton in %	Adhäsion in g/cm ² bei pF 2,18	Vol.Schrumpf. in Vol % bei pF 3,0	Teilchen < 2 μ in Wasser	RiBzahl	Anteile der RiBbr. 1+2 in % aller RiBse
0	0-17	0-55	0-21	4-5	---	---
Ik	20-45	70-250	12-40	5-20	85-189	95-97
I	33-45	75-205	35-50	8-17	100-170	90-100
I/II	54-56	250-290	41-43	9-31	100-150	80-100
II	87-92	300-485	49-57	14-43	120-170	50-79
III	55-92	190-205	70-75	50-85	14-20	9-35
III/I	40-89	110-375		11-50	50-123	64-80
I/III	44-50	50-250	32-45	11	75-100	48-97

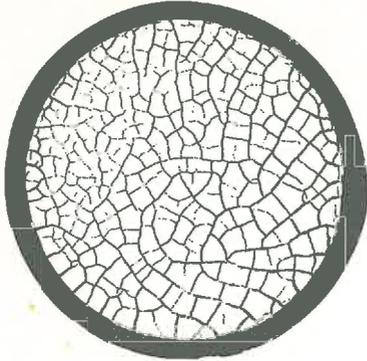


Abb. 16a:
Rißbild des Types II
ohne Frosteinwirkung



Abb. 16b:
Bild 16a bei -15°C

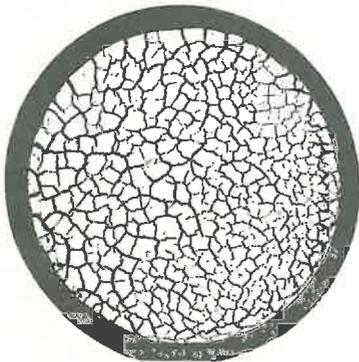


Abb. 16c:
Rißbild des Types II
(Abb. 16a) nach einer
Frosteinwirkung ent-
steht der Typ I

nissen der Aggregatuntersuchung (S. 57) kann geschlossen werden, daß die Ausbildung des Types I in erster Linie auf die Bildung von Mikroaggregaten zurückzuführen ist, deren Kohäsion untereinander als "Pseudokörner" gering ist.

9. Sedimentvolumen

Für die Bildung der Böden in Flußauen, Marschen und teilweise auch an Hangfüßen in hängigem oder gebirgigem Gebiet spielt die fluviatile Verlagerung der Sedimente eine Rolle.

Im stark bewegten Wasser findet bevorzugt eine Ablagerung der größeren Teilchen im langsam bewegten Wasser dagegen eine solche der feineren Substanzen statt. Bekannte Beispiele sind in den Marschen die sandreichen Böden in See-
deichnähe und die feinkörnigen in der Nähe des Binnendeiches. Während die Lagerung der Teilchen in dem bewegten Wasser vorwiegend von der Bewegungsintensität des Wassers, der Korngröße des Materials und dem Oberflächenbewuchs abhängen, ist die Lagerung der feinsten Teilchen im unbewegten Wasser neben den oben genannten Faktoren noch erheblich von kolloidchemischen Bedingungen beeinflusst. Eine hohe Beladung mit Mg-Ionen soll zu einem gegenüber der Ca-Beladung geringeren Sedimentvolumen und damit zu einer dichteren Lagerung der Kolloide führen (81, 98). Da eine dichte Ablagerung des Ausgangsmaterials aus der Suspension den Abzug des Wassers und damit die Entquellung und Entsalzung weitgehend verhindert, wird dies mit als Ursache für das ungünstige physikalische Verhalten besonders in Marschböden angesehen (81, 98). Eine weitere ungünstige Auswirkung des geringen Sedimentvolumens besteht darin, daß die Schrumpfungsmöglichkeit eines schon zu Beginn dicht abgelagerten

Materials erheblich geringer ist und damit die Ausbildung eines Absonderungsgefüges durch die Rißbildung erschwert wird.

Zur Klärung der Auswirkung der Kationen auf das Sedimentvolumen haben wir folgende Versuche durchgeführt. 2 g Boden wurden mit 23 ml destilliertem Wasser versetzt und im Sedimentröhrchen der ungestörten Sedimentation überlassen. Gemessen wurde die Höhe des als Absatz deutlich gekennzeichneten Materials und die Höhe des Koagels, das als schleimige Schicht gut zu unterscheiden war. Diese Messungen erfolgten sowohl in destilliertem Wasser ohne Zusatz, als auch nach Zusatz von HCl in verschiedenen Mengen bzw. in Salzlösungen (Lsg.) verschiedener Zusammensetzung und Konzentration (Tab. 18). Weiterhin ermittelten wir die zur Flockung erforderliche Mindestmenge an n/10 HCl bzw. Lsg. in ml (Schwellenwert) (99) und das dabei beobachtete Sedimentvolumen (Tab. 19).

Die Versuche im destillierten Wasser, also ohne Zusatz, zeigen, daß die mit Na belegten Substanzen im Ton (Nr. 4) bei weitem das höchste Sedimentvolumen haben (5,8 cm). Im Boden dagegen (Nr. 21) flockte die Substanz im destillierten Wasser nicht aus. Der gemessene Wert von 2,0 cm entspricht also nur dem Absatz des groben Materials und ist nicht als eine Folge der unterschiedlichen Aggregation zu deuten. Während im Ton (Nr. 4) eine, allerdings geringe Aggregation vorliegt, wie durch den Gefügefaktor von 8,3 (Tab. 10) nachgewiesen werden kann, ist der Na-Boden (Nr. 21) fast vollständig dispergiert (Gefügefaktor 0,4). Die unterschiedlichen Ergebnisse in den Sedimentvolumen sind also hier nicht als unterschiedliche Sedimentdichte, sondern als unterschiedliche Dispergierung zu deuten. Im Vergleich zu den mit anderen Kationen belegten Tönen (Nr. 1, 2, 5) mit 3,7 - 3,9 cm liegt der Na-Ton (Nr. 4) mit 5,8 cm sehr hoch. Dies ist auf die hohe Hydratation des Na-Komplexes zurückzuführen. K-Ton (Nr. 3) ergibt mit

Tab. 18 Zusammensetzung der als Lsg. bezeichneten
Lösungen zur Ausflockung

Nr.	ml n/10 CaCl ₂	ml n/10 MgCl ₂	ml n/10 KCl	ml n/10 NaCl	ml n/10 HCl
1	5,0	---	---	---	---
2	---	5,0	---	---	---
3	---	---	5,0	---	---
4	---	---	---	5,0	---
5	---	---	---	---	5,0
8	3,92	0,83	0,20	0,05	---
9	2,92	1,83	0,20	0,05	---
10	2,17	2,58	0,20	0,05	---
11	2,42	1,83	0,05	0,20	0,50
12	2,42	1,83	0,10	0,15	0,50
13	2,42	1,83	0,20	0,05	0,50
14	1,92	1,83	0,20	0,05	1,00
15	2,92	0,83	0,20	0,05	1,00
16	1,92	2,58	0,10	0,40	---
17	1,92	2,58	0,40	0,10	---
18	5,00	---	---	---	---
19	---	5,00	---	---	---
20	---	---	5,00	---	---
21	---	---	---	5,00	---
22	---	---	---	---	5,00
23	3,92	0,83	0,20	0,05	---
24	2,92	1,83	0,20	0,05	---
25	2,17	2,58	0,20	0,05	---
66	1,00	2,00	0,25	0,75	1,00
67	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
68	1,00	1,00	0,50	1,50	1,00
69	1,00	1,00	1,50	1,50	---
70	1,00	1,00	0,75	2,25	---

Tab. 19 Sedimentvolumen bei Zusatz von 5 ml n/10 HCl bzw. 5 ml Lsg; Schwellenwert in n/10 HCl bzw. Lsg.
 Die in Klammern gesetzten Zahlen entsprechen dem Sedimentvolumen nach Zugabe von 0,1 ml n/10 HCl
 zu den für den Schwellenwert erforderlichen ml

Nr.	Sedimentvolumen in cm (Lsg)		Schwellen- wert in ml Lsg		Sedimentvolumen in cm (HCl)		Schwellenwert in ml n/10 HCl	
	ohne Zusatz	5 ml Lsg	ohne Zusatz	5 ml Lsg	ohne Zusatz	5 ml HCl	ohne Zusatz	5 ml HCl
1	3,9	5,2	0,6	1,0	5,0	1,8	9,5	0,3
2	3,9	5,0	0,5	4,0	4,6	1,2	4,0	0,3
3	4,4	6,9	1,2	2,8	6,0	1,3	19,5	0,5
4	5,8	12,5	1,7	2,8	11,7	1,4	10,5	0,8
5	3,7	4,5	0,4	4,0	4,3	1,1	3,5	0,3
8	3,8	5,5	1,0	3,7	5,7	2,2	14,5	0,3
9	3,9	5,2	1,0	4,8	5,8	2,0	17,5	0,3
10	3,9	5,2	1,0	5,1	5,1	1,8	15,5	0,3
11	3,9	5,3	1,0	5,6	6,2	1,7	17,0	0,4
12	3,9	5,3	1,0	5,0	6,2	1,8	20,5	0,3
13	3,6	4,9	1,0	4,4	4,9	1,5	9,5	0,3
14	3,6	4,8	1,0	4,4	4,8	1,5	10,0	0,3
15	3,7	4,8	1,0	3,2	4,7	1,5	12,0	0,3
16	3,9	5,4	1,0	1,4	6,0	1,7	20,0	0,3
17	3,7	5,1	1,0	4,1	5,0	1,6	18,5	0,3
18	2,9	3,5	0,6	2,6	3,5	1,5	12,5	0,3
19	2,9	3,6	0,6	3,7	3,5	1,4	3,4	0,3
20	2,9	2,8	0,8	2,3	3,6	1,1	13,0	0,7
21	2,0	24,5	1,7	1,4	23,2	1,4	24,0	1,2
22	2,6	2,8	0,4	1,5	2,6	1,1	2,7	0,3
23	2,9	3,6	1,0	2,3	3,7	1,2	3,2	0,3
24	2,9	3,8	1,0	2,3	3,7	1,2	3,2	0,3
25	2,9	3,9	1,0	2,6	3,7	1,2	3,2	0,3
66	3,9	5,7	1,0	2,4	6,1	1,1	17,0	0,5
67	3,9	6,3	1,0	2,0	7,0	1,2	17,5	1,0
68	4,0	7,1	1,0	1,8	7,6	1,0	18,2	0,5
69	4,0	7,4	2,0	1,7	8,6	1,0	20,0	0,5
70	4,0	7,6	2,0	2,2	9,7	1,0	21,5	0,5

4,4 cm noch ein recht hohes Sedimentvolumen. Auch hier ist die stärkere Hydratation durch die Dissoziation der K-Ionen als Grund anzuführen. Die hohe Korrelation des Sedimentvolumens zu dem Gefügefaktor, also die Abhängigkeit von der Aggregation, kommt ebenfalls bei den Proben Nr. 8 - 17 zum Ausdruck, wie noch gezeigt wird.

Betrachtet man das Sedimentvolumen bei dem Schwellenwert, so sind deutliche Unterschiede zwischen der n/10 HCl und dem Lsg. zu erkennen. Da hier in allen Fällen eine Koagulation vorliegt, scheidet der Unterschied in der Aggregation aus.

Während bei der Anwendung des Lsg. im Ton Mg-, K-, und Na- (Nr. 2, 3, 4) etwa unter sich gleiche, recht hohe Werte von 21 - 25 cm ergeben, liegt Ca- (Nr. 1) mit 12,4 cm viel niedriger. Der H-Ton (Nr. 5) weicht mit nur 4,0 cm erheblich ab. Beim Boden zeigt sich das Sedimentvolumen der Ca-Substanzen (Nr. 18) ebenfalls mit 16,5 cm niedriger als Mg- (Nr. 19) mit 19,8 cm, K- (Nr. 20) mit 24,4 cm und Na- (Nr. 21) mit 25,3. Die H-Substanz (Nr. 22) hat auch hier das geringste Sedimentvolumen mit 12,0 cm.

In dem Versuch mit n/10 HCl fällt als großer Unterschied zu dem Sedimentvolumen bei Lsg. auf, daß der Wert für Mg- sowohl im Ton (Nr. 2) mit 4,0, als auch im Boden (Nr. 19) mit 3,4 cm sehr niedrig liegt und zwar nur gering über dem der H-Substanzen (Ton Nr. 5 mit 3,5 cm, Boden Nr. 18 mit 2,7 cm). Die mit Ca- belegten Proben sind im Ton (Nr. 1) mit 9,5 und im Boden (Nr. 18) mit 12,5 cm erheblich höher, unterscheiden sich im Ton kaum von Na- (Nr. 4) mit 10,5 cm und im Boden von K- (Nr. 20) mit 13,0 cm.

Es zeigt sich also, daß bei der Anwendung von n/10 HCl die Sedimentvolumen der Mg-Substanzen erheblich unter dem der Ca-Substanzen liegen. Setzt man jedoch sowohl bei Ca- und K-Ton (Nr. 1 u. 3) als auch bei Ca- und K-Boden (Nr. 18 u. 20) nur 0,1 ml n/10 HCl zu, so nimmt das Volumen

dieser Substanzen sofort erheblich ab. Die Ergebnisse von Ca-, Mg-, K- und H- sind dann etwa gleich. Bei allen anderen Proben ergab eine geringfügige Zugabe keine Änderungen. Die großen Unterschiede beim Schwellenwert können auf die geringere Eintauschintensität des Mg-Iones zurückgeführt werden. Nach Tab. 8 hat das Mg-Ion mit 31,3 eine, wenn auch geringe, höhere Dissoziation als das Ca-Ion mit 28,8.

Die relativ geringe Beladung unserer Substanzen mit Mg-Ionen (Mg- zu 79,7 % Ca- zu 35,5 % und K- zu 93,3 %) weisen ebenfalls darauf hin (Tab. 5). Dementsprechend wäre es denkbar, daß die H-Ionen bzw. die sorptiv gebundenen freigesetzten Al-Ionen die Mg-Ionen vom Komplex verdrängen. Damit wäre eine geringere Hydratation und ein geringeres Sedimentvolumen erklärt. Ebenfalls wäre eine Deutung für das unterschiedliche Verhalten der Lsg.-Versuche gegeben.

Um eine einheitliche Konzentration für die Beurteilung des Sedimentvolumens zu haben, gaben wir in einem weiteren Versuch zu allen Proben die gleiche Menge an n/10 HCl bzw. Lsg. Wir haben dazu je eine Reihe mit 1,2 ml und 5,0 ml angesetzt. Die Tendenzen in beiden Reihen unterschieden sich kaum, so daß hier nur die Reihe mit 5,0 ml besprochen werden soll.

Betrachtet man zunächst die Auswirkung der Kationen bei den reinen Proben (Nr. 1 - 5) auf das Sedimentvolumen, so kann man unschwer erkennen (Tab. 19), daß durch das Na-Ion (Nr. 4) bei weitem das höchste Sedimentvolumen beobachtet wird. (11,7 cm bei HCl und 12,5 cm bei Lsg.). Das nächsthöhere Sedimentvolumen verursachte das K-Ion (Nr. 3) mit 6,0 cm bei HCl und 6,9 cm bei Lsg. Diese Werte liegen erheblich über denen der restlichen Ionen. Ca- (Nr. 1) 5,0 cm bei HCl und 5,2 cm bei Lsg. Mg- (Nr. 2) 4,6 bzw. 5,0 und H- (Nr. 5) 4,3 bzw. 4,5 cm.

Die Reihenfolge ist also

Na K Ca Mg H

Zieht man die Kationengemische der Tone, also die Proben 8 - 17 und 66 - 70, mit in die Betrachtung ein, so zeigt sich eine sehr hohe positive Korrelation des Sedimentvolumens bei Zusatz von 5 ml n/10 HCl in Abhängigkeit vom Na-Ion mit $r = +0,93$ bei $n = 20$ $y = -46,87 + 9,06 x$. Ca-, Mg-, H-Ionen erweisen sich in dieser Beziehung als nicht signifikant negativ, K-Ionen sind nicht signifikant positiv. Beim Zusatz von Lsg.-Mitteln ist das Ergebnis ähnlich. Na- ist mit $r = +0,96$ bei $n = 20$ $y = -48,98 + 9,81 x$ hochsignifikant. Deutlich ist jedoch aus diesen Zahlen selbst bei der geringen Sicherung der Werte zu erkennen, daß nur Na- und K- das Sedimentvolumen positiv beeinflussen, während bei Zugabe von Ca-, Mg- und H- das Sedimentvolumen abnimmt. Die größte negative Auswirkung im Gemisch hat das Mg-Ion. Es kann also gefolgert werden, daß das Mg-Ion eine Verminderung des Sedimentvolumens bewirkt, wenn auch der Effekt unseres Erachtens besonders im Vergleich zum Ca-Ion nicht so groß sein kann, daß daraus Dichtlagerung mit nachfolgender Undurchlässigkeit des Bodens abzuleiten wäre. Eine Klärung dieser Frage etwa über den kf-Wert kann nicht erfolgen, da methodische Schwierigkeiten für das dann erforderliche Einschlämmen bestehen. In der Tab. 19 sind auch die für die Flockung erforderlichen ml n/10 HCL bzw. Lsg. aufgeführt. Es zeigt sich, daß zum Schwellenwert gleiche Mengen an HCl für Ca-, Mg- und H- sowohl im Boden als auch im Ton erforderlich sind. (Für die Nr. 1, 2, 5 und 18, 19, 22 jeweils 0,3 ml). Für K-Ton (Nr. 3) und K-Boden (Nr. 20) sind 0,5 bzw. 0,7 ml erforderlich, der Na-Ton (Nr. 4) und der Na-Boden (Nr. 21) dagegen flocken erst bei 0,8 bzw. 1,2 ml aus. Bei Lsg. sind die Unterschiede etwas größer. H-Ton und H-Boden (Nr. 5 bzw. 22) ergeben mit 0,4 ml die niedrigsten Werte, es folgen Mg- mit 0,5 im Ton (Nr. 2) und im Boden mit 0,6 ml.

In der gleichen Größenordnung liegen auch die Werte für Ca- mit 0,6 im Ton (Nr. 1) und Boden (Nr. 18). K- hat im Ton (Nr. 3) mit 1,2 ml schon einen hohen Wert erreicht, der im Boden (Nr. 20) mit 0,8 ml etwas niedriger liegt. Die größte Konzentration verlangt das Na-Ion zur Ausflockung, sowohl im Ton (Nr. 4) als auch im Boden (Nr. 21) mit jeweils 1,7 ml.

Vergleicht man wiederum die Ergebnisse der Untersuchungen anderer Methoden mit denen des Sedimentvolumens, so findet man teils recht hohe Korrelationen. Während die Methoden, die die Plastizität ausdrücken, nicht mit den Ergebnissen des Sedimentvolumens korrelieren, zeigt sich ein großer Zusammenhang zu den Methoden, die die Gefügestabilität charakterisieren. Im einzelnen sind folgende Methoden signifikant korreliert.

Sedimentationsvolumen in 5 ml HCl zu:

Rißbildung	$r=-0,89$	$n=20$	$y=250-1,89x$
Gefügefaktor	$r=-0,91$	$n=20$	$y=12,61-0,91x$
Flockung	$r=+0,63$	$n=20$	$y=24 +0,69x$
Gefügestabilität	$r=-0,74$	$n=20$	$y=9,08-6,06x$
Adhäsion pF 2,18	$r=-0,53$	$n=20$	$y=212-2,07x$
Vol.Schrumpfung pF 2,18	$r=+0,82$	$n=20$	$y=38+0,25 x$
Enslin	$r=+0,91$	$n=15$	$y=4,72+0,007x$
Teilchen 2	$r=+0,91$	$n=20$	$y=3,53+0,099x$

10. Gefügestabilität

Das Bodengefüge wird durch die Lagerung der festen Teilchen zueinander bestimmt (92). Die Beurteilung erstreckt sich dabei zumeist auf eine Beschreibung der zur Zeit der Untersuchung äußerlich erkennbaren Formen der Gefügeelemente und deren Lagerung zueinander (S. 79) (29). Durch den Einfluß

klimatischer und biologischer Faktoren, sowie durch Kulturmaßnahmen ist das Gefüge ständigen Änderungen unterworfen. Diese können zu seiner Zerstörung führen. Zur vollständigen Charakterisierung ist deshalb ergänzend eine Angabe über seine Beständigkeit gegenüber diesen Auswirkungen erforderlich.

Die Stabilität des Bodengefüges wird vorwiegend an seinem Verhalten gegenüber Wasser geprüft, da dieses als Niederschlag oder bei Überschwemmungen besonders stark zur Zerschlämmung und damit zur Zerstörung des Gefüges beiträgt.

Grundsätzlich kann man 4 verschiedene Verfahren der Gefügestabilitätsbestimmung unterscheiden, die in ihren Ergebnissen je nach den entsprechenden Vorbehandlungen weit abweichende Ergebnisse erzielen können.

Bei der visuellen Methode werden die aus dem lufttrockenen Boden durch Siebung auf eine bestimmte Korngröße (z.B. 2 - 3 mm) isolierten Gefügeelemente in eine Schale gegeben und mit Wasser überstaut. In Abhängigkeit von der Stabilität der Aggregate werden diese mehr oder weniger zerfallen. Nach einer bestimmten Zeit (meist 10 Min.) werden die noch stabilen Elemente ausgezählt. Die Gefügestabilität wird dann nach einem entsprechenden Schema beurteilt (4,99). Diese Methoden haben einen qualitativen Charakter, können aber einen orientierenden Einblick geben.

Das Prinzip der Durchflußmethoden beruht auf der Messung der Durchflußgeschwindigkeit von Wasser durch eine Bodensäule oder durch eine Säule von Gefügeelementen (4, 18). Die Gefügezerstörung wird durch die Verringerung der Durchlaufgeschwindigkeit charakterisiert. Diese Durchflußmethode soll nach FADEEV-VILJAMS (zit. in 18) besonders gut die Stabilitätsverhältnisse ausdrücken, da sie den natürlichen Verhältnissen der Durchsickerung des Wassers entspricht und zum anderen auch die physikalischen Auswirkungen der Gefügezerstörung wie z.B. die Wasserdurchlässigkeit kenn-

zeichnet. Schwächen der Methoden bestehen darin, daß die Wasserdurchlässigkeit nicht nur durch die Gefügeausbildung, sondern auch durch die Korngrößenverteilung beeinflußt wird. Absolute Vergleiche der Gefügestabilität von Böden verschiedener Korngrößen lassen sich deshalb nicht durchführen (27). Weiterhin ist die Durchflußmenge erheblich von der Homogenität der Einfüllung der Probe in das Untersuchungsgefäß abhängig. Schon geringe Unterschiede in der Lagerung der Gefügeelemente können zu erheblichen Differenzen in der Durchflußgeschwindigkeit führen. Eine große Anzahl von Parallelen ist für die Sicherung der Ergebnisse erforderlich. Diese Methoden sind als indirekte Verfahren anzusehen.

Bei den Berechnungsmethoden wird die Beständigkeit des Gefüges gegenüber fallenden Tropfen geprüft. Dazu werden Krümel definierter Größe auf ein Sieb gebracht und einem gleichmäßigen Tropfenfall (Regen) ausgesetzt. Die Fallhöhe, die Größe der Tropfen und die Durchlaufgeschwindigkeit des Wassers durch die Kapillaren des Regners sind dabei festgelegt. Der Anteil, der nach einer bestimmten Berechnungszeit auf den Sieben noch vorhandenen Aggregate in Prozent der Gesamteinwaage ist der Maßstab für die Stabilität des Gefüges. Schwierigkeiten bei diesem Verfahren bestehen besonders in der Erzeugung der definierten Wassertropfen. Da die Reproduzierbarkeit dieser Methode nicht sehr hoch ist (18), muß mit vielen Parallelen gearbeitet werden. KOEPF konnte mit seinen Verfahren bessere Ergebnisse erzielen (64).

Nach dem Naßsiebverfahren werden die Gefügeelemente bestimmter Größe nach entsprechender Vorbehandlung auf das oberste Sieb eines Siebsatzes unterschiedlicher Maschenweite gebracht und unter Wasser bewegt. Nach Abschluß des Versuches werden die auf den einzelnen Sieben zurückgebliebenen Gefügeelemente gewogen und der Anteil in den einzelnen Größengruppen in % der Einwaage berechnet. Je höher der Anteil

an groben Elementen ist, umso stabiler wird das Gefüge beurteilt.

Nach eingehender Überprüfung dieser Methoden entschlossen wir uns, die Gefügestabilität durch Naßsiebung zu bestimmen.

Die Ergebnisse der Gefügestabilitätsmessungen hängen erheblich von der Art der Vorbehandlung der Substanzen ab (18). Betrachtet man wie SEKERA (99) die Wirkung des Aufpralles eines Wassertropfens auf einen trockenen Krümel von 1 - 3 mm, so kann man erkennen, daß (bei bestimmten Krümeln) durch die Schlagwirkung diese nicht beschädigt werden. Das Wasser dringt in den Krümel ein. Darauf beginnt dieser zu quellen und es bilden sich Risse aus. Deutlich sichtbar wird das Austreten von Luftblasen, das besonders in kolloidreichen, trockenen Böden zu explosionsartiger Zerstörung des Krümelns führen kann. Die starke Bindungsintensität des Wassers kommt hier zum Ausdruck. Wird dieser Versuch im Vakuum oder an nassen Proben durchgeführt, so ist die Wirkung der austretenden Luft nicht zu erkennen. Auch eine langsame Anfeuchtung des trockenen Krümelns von unten, also eine kapillare Wassersättigung, bei der die Luft allmählich nach oben vor dem eindringenden Wasser entweichen kann, verhindert dieses Zersprengen der Krümel. Die Bedeutung des Wassergehaltes vor der Untersuchung und der Art der Befuchtung wird durch dieses Beispiel deutlich. Es ergibt sich, daß die Gefügestabilität mit höherem Ausgangswassergehalt zunimmt. Es konnte nachgewiesen werden, daß die Krümel, die mit einer dem pF 2 - 3 entsprechenden Feuchte angesetzt werden, erheblich stabiler sind, als solche bei einem pF -Wert von > 4 (27). Auch die Art und Schnelligkeit der Trocknung, die Trocknungstemperatur, Dauer der Lagerung der Proben vor der Untersuchung und andere beeinflussen das Ergebnis. Weiterhin wirkte sich die zur Analyse ausgewählte Krümelgröße auf das Ergebnis aus.

AKHROMEIKO (1) bezeichnet alle Krümel über 1 mm als Makro-

aggregate, während er die obere Grenze für Mikroaggregate bei 0,5 mm festsetzt. Nach seinen Untersuchungen sind Makroaggregate viel lockerer und weniger wasserbeständig als Mikroaggregate. Er zeigt, daß grobe Aggregate aus einer Vereinigung mehrerer kleiner Aggregate bestehen. Zwischen den kleinen Krümeln, die ein Makroaggregat bilden, ist die Bindung lockerer als zwischen den Mikroaggregaten, die einen kleineren Krümel aufbauen.

DIGLERIA, KLIMES-SZMIK DVORACSEK (27) untersuchten den Einfluß verschiedener Vorbehandlungen auf die Stabilität des Gefüges, wobei sie neben der Auswirkung der Befeuchtung vor der Untersuchung auch die Folgen einer mechanischen Beanspruchung vor der Analyse prüften. Um ein anschauliches Bild von dem Beständigkeitsgrad der Gefügeelemente zu erhalten, führten sie folgende Behandlungen vor der eigentlichen Untersuchung durch (Tab. 20).

Tab. 20 Unterschiedliche Behandlungen zur Prüfung des Beständigkeitsgrades von Gefügeelementen (31)

1. Naßsiegung ohne Vorbehandlung
2. Einstündiges Einweichen in Wasser
3. 24-stündiges Einweichen in Wasser
4. Zehnmaliges Wenden eines mit Wasser gefüllten und luftblasenfreien Zylinders
5. Einstündiges Einweichen und dann Wenden
6. 24-stündiges Einweichen und dann Wenden
7. 24-stündiges Einweichen mit je einer Wendung pro Stunde während eines Zeitraumes von neun Stunden
8. 1/2-stündiges Schütteln eines vollständig gefüllten STOHMANN-Kolbens bei 40 Umdrehungen/Min. im Schüttelapparat
9. Wie Behandlung 8, jedoch in einem nur zur Hälfte mit Wasser gefüllten STOHMANN-Kolben

Zur Untersuchung wurden folgende Böden herangezogen:

1. Schwarzerde (natürlicher Vegetationsbestand)
2. Schwarzerde (natürlicher Vegetationsbestand, parkähnlich)
3. Schwarzerde (Kulturböden, Ackerkrume)
4. Schwarzerde Kulturböden (Schicht 20 - 40 cm)
5. Übergangs-Szikkboden (minderwertiger Teil)
6. Übergangs-Szikkboden (besserer Teil)
7. Humusarmer Waldboden
8. Lockerer, wenig szikhaltiger Boden mit hohem Karbonatgehalt

Die Ergebnisse sind aus Abb. 17 zu ersehen.

KACINSKIJ (57) unterscheidet wasserbeständige poröse Krümel und nicht poröse Krümel, die er Pseudoaggregate nennt. Diese Pseudoaggregate zeichnen sich häufig durch große Wasserstabilität aus, sind aber vom ackerbaulichen Standpunkt aus wertlos (27). Ihre hohe Wasserstabilität beruht auf der schlechten Wasserdurchlässigkeit infolge des geringen Porenvolumens in das Innere des Gefügeelementes.

KEGL (60) konnte eine negative Korrelation zwischen Krümelporosität und relativer Wasserbeständigkeit der Krümel feststellen (Abb. 18).

Bei Berührung mit Wasser quillt die Oberfläche der Teilchen auf und mindert dadurch noch die Wasserdurchlässigkeit. Durch die verschiedenen Vorbehandlungen, besonders die mechanische Einwirkung werden die Pseudoaggregate angegriffen und zerfallen dann stärker als die bei schonender Behandlung geringer stabilen echten porösen Krümel.

Deutlich wird dies in Abb. 17. Der Boden 5, also der minderwertige Teil des Übergangs-Szikkbodens läßt im Gegensatz zu den anderen Böden einen sehr starken Abfall der Gefügestabilität durch die Behandlungen 8 und 9, also das Schüttern erkennen.

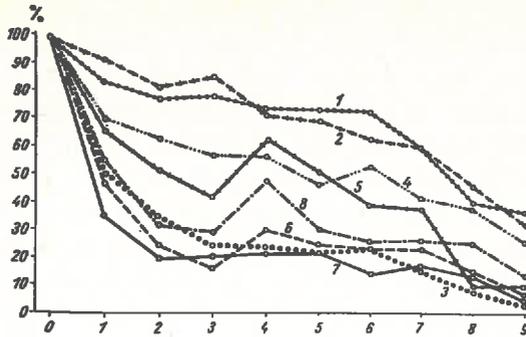


Abb. 17 Auswirkung unterschiedlicher Vorbehandlungen zur Siebtauchuntersuchung (nach DVORACZEK) (31)
(Erklärung siehe Text)

Eine Unterscheidung zwischen echten, porösen Krümeln und Pseudoaggregaten wird auch durch die Bestimmung der "Qualifikationsprozentzahl" (27) erreicht. Diese Zahl errechnet sich aus den Werten der Ergebnisse nach der Behandlung 9 dividiert durch die Ergebnisse nach der Behandlung 5 (Tab. 20). Das Ergebnis wird mit 100 multipliziert. Je niedriger diese Zahl ist, umso mehr Pseudoaggregate sind vorhanden.

Eigene Untersuchungen

Die für die Herstellung der hier zur Untersuchung gelangenden Proben erforderliche Vorbehandlung - wie die Fraktionierung in die einzelnen Korngrößengruppen und die Umladung mit Kationen - schließt die Gewinnung von natürlichen Gefügeelementen aus. Wir gingen deshalb zu deren Herstellung so vor, daß 50 bzw. 100 g der zu untersuchenden Substanz unter langsamer Zugabe von Wasser gut durchgemischt wurden, wobei zu dem lufttrockenen Material soviel Wasser

zugegeben wurde, daß - ähnlich der Herstellung der Ribbilder - der mit einem Glasstab verrührte Schlicker gerade ein entzerrtes Spiegelbild ergab. Dieser Schlicker wurde über Nacht zur besseren Verteilung des Wassers stehen gelassen und dann im Ventilatortrockenschrank bei 30 °C eingetrocknet. Nach Gewichtskonstanz wurde der Substanz wieder soviel Wasser zugesetzt, daß ihre Feuchte 50 % der Ausrollgrenze entsprach (Tab. 7). Bei dieser Feuchte wurden die Proben mit einer Bodenmühle entsprechender Mahlfeinheit so zerkleinert, daß die dadurch erhaltenen Gefügeteilchen eine Größe von etwa 3 mm hatten. Diese wurden zwischen den Sieben von 3 und 2 mm trocken abgesiebt und dann gleich der Untersuchung unterworfen. Die Gefüßegröße beträgt demnach 2 - 3 mm.

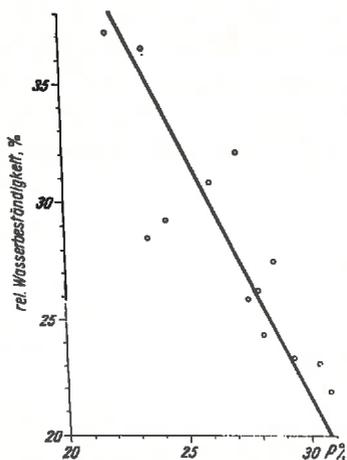


Abb. 18 Abhängigkeit der relativen Wasserbeständigkeit der Bodenkrümel von der Krümelporosität.
Nach KEGL (60)

Zur Naßsiegung hatten wir uns eine mit Motor angetriebene waagenähnliche Apparatur gebaut (Abb. 19), die es ermöglicht 2 Siebsätze unter gleichen definierten Bedingungen in dem in gläsernen Filtrierstutzen befindlichen Wasser auf und ab zu bewegen. Die Apparatur war so eingestellt, daß die Hubhöhe der Siebe 2,5 cm und die Sintauchfrequenz 38 Hübe in der Minute betrug.

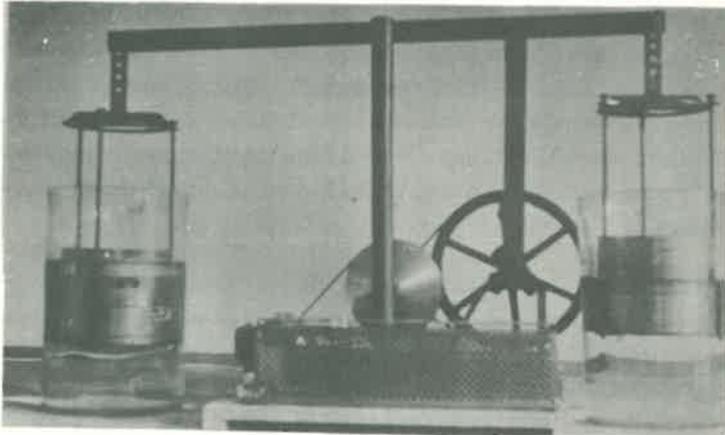


Abb. 19 Apparatur zur Bestimmung der Krümelstabilität (Naßsiegung)

Der für die Untersuchung verwendete Siebsatz bestand aus 3 Sieben mit Maschenweiten von 1,0 mm, 0,6 mm und 0,2 mm. Die Höhe der Wasseroberfläche in den Filtrierstutzen war so bemessen, daß die Siebe und die Krümel bei ihrer höchsten Stellung mit ihrer Siebfläche voll unter Wasser tauchten. Beim Einsetzen der Siebsätze ist darauf zu achten, daß sich keine Luftblasen unterhalb des untersten Siebes bilden. Die Siebzeit betrug immer 10 Minuten. Vor der Untersuchung wurden die Krümel durch Aufsprühen von Wasser vorsichtig befeuchtet. Die sprengende Wirkung der austretenden Luft unterblieb. Nach der Naßsiegung wurden die auf den einzelnen Sieben noch verbliebenen Gefügeelemente trocken gewogen und in Prozent der trockenen Einwaage berechnet. Grobe Einzelteilchen (Sandkörner) wurden entsprechend berücksichtigt.

Die ersten Untersuchungen, die mit Leitungswasser durchgeführt wurden, ergaben keine befriedigenden Ergebnisse. Besonders störend machte sich die schon von KACINSKIJ (57) beschriebene hohe scheinbare Stabilität der verdichteten Aggregate (Pseudoaggregate) infolge geringer Porosität und Quellungserscheinungen an der Oberfläche bemerkbar. Es zeigte sich, daß die mit Ca- beladenen Substanzen sehr hohe Stabilität aufwiesen. Die auf den Sieben verbliebenen Gefügeelemente waren aber deutlich gequollen. Führt man diesen Versuch jedoch in destilliertem Wasser durch, so war diese Erscheinung verschwunden und die Ergebnisse entsprachen den tatsächlichen Verhältnissen. Für diese Arbeit wurde deshalb zur Bestimmung der Gefügestabilität nur destilliertes Wasser verwendet.

Eine Gegenüberstellung der Anteile der einzelnen verschiedenen Aggregatgrößen bei den unterschiedlichen Proben ergab kein auswertbares Ergebnis. Wir berechneten deshalb den mittleren gewogenen Krümeldurchmesser (MGD) nach BAVEL (9). Die Ermittlung des MGD erfolgte auf graphischem Wege. Da zu wurden die Gewichte der Rückstände auf den einzelnen Sieben als Summenkurven aufgetragen und dann die Fläche mit einem Polarplanimeter ausgemessen und unter Berücksichtigung des Maßstabes die MGD-Werte daraus berechnet. Je höher der Wert des MGD, umso stabiler ist das Gefüge.

Erfasst man die Ergebnisse der reinen Proben (Tab. 21), so zeigt es sich, daß sowohl im Ton durch Ca- (Nr. 1) mit MGD 0,66 und Mg- (Nr. 2) mit MGD 0,69 als auch im Boden durch Ca- (Nr. 18) mit 0,33 und Mg- (Nr. 19) mit 0,36 die stabilsten Gefügeelemente erhalten werden. Diese Werte liegen im Ton und im Boden sehr dicht beieinander, wenn auch die Werte des Mg- jeweils geringfügig höher sind. Sonderbarerweise schwankten die Ergebnisse im Mg-Ton (Nr. 19) im Gegensatz zu allen anderen Proben erheblich. Erst eine große Zahl von Parallelen konnte dort gesicherte Werte erbringen. Der Maximalwert lag bei 1,18, der niedrigste bei 0,68. Einen Grund

für das abweichende Verhalten dieser Probe konnten wir nicht finden. In den mit H- belegten Substanzen fanden wir im Ton (Nr. 5) nur einen Wert von 0,56 und im Boden (Nr. 22) einen solchen von 0,21. Im Vergleich zu Ca- und Mg- sind diese Werte erheblich niedriger, das Gefüge ist also weniger stabil. Die einwertigen Kationen ergaben bei weitem das instabilste Gefüge. So im Ton K- (Nr. 3) 0,20 und Na- (Nr. 4) 0,10 und im Boden K- (Nr. 20) 0,17 und Na- (Nr. 21) 0,10. Wie ungünstig die Verhältnisse durch den Zerfall der mit Na- und K- gesättigten Proben sind, kann aus der Feststellung von VILJAMS (108) entnommen werden, der fand, daß bei 25 % an Aggregaten mit einem Durchmesser kleiner als 0,25 mm das Gefüge eines krümeligen Bodens als schlecht beurteilt werden muß.

Tab. 21 Ergebnisse der Gefügestabilitätsmessungen

Nr.	MGD	Nr.	MGD	Nr.	MGD
1	0,66	18	0,33	39	0,13
2	0,69	19	0,36	40	0,12
3	0,20	20	0,17	41	0,11
4	0,10	21	0,10	42	0,12
5	0,56	22	0,21	43	0,18
8	0,54	23	0,41	44	0,13
9	0,58	24	0,21	45	0,14
10	0,69	25	0,27	46	0,14
11	0,57	32	0,14	47	0,16
12	0,70	33	0,14	48	0,14
13	0,56	34	0,11	66	0,39
14	0,41	35	0,14	67	0,25
15	0,58	36	0,24	68	0,27
16	0,62	37	----	69	0,19
17	0,57	38	0,13	70	0,16

Betrachtet man die Kationengemische der Tone, also die Proben Nr. 8 - 17, so erkennt man deutlich eine positive Auswirkung des Mg-Ions, das auch bei Einschluß der Proben Nr. 1 - 5 mit $r = +0,75$ bei $n = 30$ $y = -8,16 + 66,00 x$ hochsignifikant positiv korreliert, während die Wirkung

der Ca-Ionen zwar positiv, aber nicht signifikant ist. Daß das Mg-Ion stabilere Aggregate erzeugt als das Ca-Ion, geht auch aus dem kontinuierlichen Ansteigen der MGD-Werte der Proben Nr. 8 - 17 hervor. Dieses Ansteigen geht parallel mit dem Ansteigen der Mg-Ionen und dem Abstieg der Ca-Ionen. So hat die Probe 8 bei einem Ca/Mg-Verhältnis von 4,3 einen MGD von 0,54, die Probe 9 bei einem Ca/Mg-Verhältnis von 1,6 einen MGD von 0,58 und die Probe 10 bei einem Ca/Mg-Verhältnis von 0,68 einen MGD von 0,69. In diesen Proben sind K-, Na- und H-Ionen weitgehend konstant gehalten worden. Die Wirkung des Na-Ions ist mit $r = -0,54$ bei $n = 30$ $y = 30,91 - 43,33 x$ hochsignifikant negativ. Diese negative Auswirkung läßt sich auch an dem Sinken des MGD bei höherem Na-Anteil bei der Nr. 11 (3,2 % Na; MGD = 0,57) gegenüber dem höheren MGD bei der Nr. 12 (2,4 % Na; MGD = 0,70) bei jeweils gleichem Ca-, Mg- und H-Gehalt deutlich erkennen. Noch deutlicher tritt diese negative Auswirkung des Na- bei den Proben Nr. 66 - 70, die mit zunehmendem Na-Anteil von 10 - 32 % die MGD-Werte von 0,39 - 0,16 kontinuierlich absinken lassen. Auch die Wirkung des K-Ions ist negativ. Sie ist mit $r = -0,44$ bei $n = 30$ $y = 29,92 - 38,41 x$ signifikant. Bei der Probe 13 ist diese Tendenz deutlich zu erkennen, bei der trotz geringem Na-Anteil (0,7 %) durch 4,1 % K- bei sonst konstanter Kationenbelegung der MGD-Wert gegenüber der Probe Nr. 12 von 0,70 auf 0,56 gesunken ist. Die negative Auswirkung des H-Ions auf den MGD läßt die Probe Nr. 14 erkennen. Hier liegt die höchste H-Belegung aller Proben der Kationengemische vor (28,5 %). Bei dieser Probe wurde der für alle Kationengemische der Tone niedrigste MGD-Wert mit 0,41 gemessen. Die negative Korrelation des H-Ions zu der Gefügestabilität ist allerdings nicht gesichert. Das Ergebnis entspricht der Ausdeutung der Ribbilder, bei denen der Typ I durch die Einwirkung des H-Ions auf die geringere Festigkeit der Gefügeelemente hinweist (S. 92). Auch die Werte der Adhäsionsmessungen lassen eine Verringerung der Gefügestabilität

durch das H-Ion erwarten (S.113). Deutlich kommt hier wieder der Unterschied zwischen der Aggregation bei der das H-Ion stark koagulierend wirkt (Tab. 10) und der Gefügestabilität, bei der die Wirkung des H-Ions negativ ist, zum Ausdruck (Tab. 21, Nr. 5 u. Nr. 22).

So deutlich die Auswirkung der Kationenbelegung auf die Gefügestabilität ist, so gering ist nach dieser Untersuchungsmethode die Auswirkung der Korngrößenverteilung bei den Proben 32 - 48, den Proben mit einem Tongehalt kleiner als 45 %. Allerdings bei Einschaltung aller Proben (Nr. 1 - 48) ist eine - zwar durch die Kationenbelegung stark gestörte - Abhängigkeit des MGD vom Tongehalt zu erkennen. Diese liegt also lediglich bei den Proben mit höherem Tonanteil vor. So haben die Proben mit Tongehalten unter 45 % einen MGD-Wert von 0,11 - 0,17, während er bei den Tongehalten um 55 % unter Ausschaltung der reinen Na- und K-Proben (Nr. 20 u. 21) bei 0,20 - 0,36 und bei etwa 90 % Ton bei 0,56 - 0,69 liegt. Bei den Proben über 90 % Ton fallen außer den K- und Na-Proben (Nr. 3 u. 4) noch die H-Probe (Nr. 5) heraus. Scheidet man die mit K- und Na- belegten Proben (Nr. 3, 4, 20, 21) aus, so kann man eine hochsignifikante Korrelation der Gefügestabilität zum Ton erkennen, die mit $r = +0,89$ und $n = 38$ berechnet wurde. Da diese Korrelation durch die K- und Na- gesättigten Proben gestört wird, kann gefolgert werden, daß die Wirkung der Kationen diejenige der Korngrößenverteilung überdeckt. Zu den anderen Korngrößengruppen besteht bis auf eine Ausnahme keine Korrelation. Die für den Mittelsand errechnete hochsignifikante Korrelation $r = +0,54$ $n = 34$ scheint trotz aller Sicherung unwahrscheinlich.

Versucht man nun die Korrelationen zwischen den Ergebnissen der Gefügestabilitätsmessung und anderen Methoden festzustellen, so kann man bei der Betrachtung der Aggregatstabilität (Teilchen $< 2 \mu$ in Wasser) feststellen, daß hier zwei unterschiedliche Regressionen auftreten, die

beide in sich gut korreliert sind, aber fast senkrecht aufeinander stehen (Abb. 10). Die Zusammenfassung der Nr. 1, 2, 5, 8 - 20 und 22 - 48 ergibt eine positive Gerade mit einem Korrelationsfaktor von $r = +0,79$, der bei $n = 37$ $y = 5,92 + 20,00 x$ hochsignifikant ist. Auf dieser Geraden liegen alle Proben mit einem Na-Gehalt unter 6 %, während die Proben mit höherem Na-Anteil, also die Nr. 3, 4, 21, 56 - 70 eine negative Regression haben, die mit dem Korrelationskoeffizienten $r = -0,83$ bei $n = 8$ $y = 78,98 - 157,50 x$ hochsignifikant ist. Demzufolge haben die Proben bei einem Na-Gehalt unter 6 % bei steigendem Anteil an Teilchen $< 2 \mu$ (disp. in Wasser) einen steigenden MGD-Wert, andererseits aber die Werte über 6 % Na mit steigendem Tongehalt in Wasser einen sinkenden MGD-Wert. Die Verhältnisse ergeben bei der Untersuchung des Flockungswertes ein ähnliches Bild, nur mit dem Unterschied, daß die reinen Proben des Ca-, Mg- und H-Tones (Nr. 1, 2, 5) auch mit auf der negativen Kurve liegen. Diese letzten Werte sind allerdings im unteren Bereich der negativen Geraden unterhalb des Schnittpunktes mit der positiven Geraden. Auch hier ist demnach die Trennung der beiden Kurven im oben angegebenen Sinne vorzunehmen. Zum Gefügefaktor ergibt sich eine gute positive Korrelation von $r = +0,81$ bei $n = 20$ $y = 65,95 + 7,60 x$. Auch hier sind ebenfalls die Abweichungen der mit K- und Na-belegten Proben entsprechend den schon bei den Teilchen $< 2 \mu$ diskutierten Verhältnissen festzustellen. Aus diesem Ergebnis ist zu folgern, daß, auch wenn die Aggregation, wie schon eingangs festgestellt wurde, mit der Gefügeausbildung nicht identisch ist, sie diese doch in den meisten Fällen stützt. Die Ausnahme bildet das H-Ion.

Zur Ausrollgrenze ist die Regression mit $r = +0,60$ bei $n = 30$ $y = 18,70 + 32,80 x$ hochsignifikant positiv. Die Abweichungen durch K und Na sind hier gering und können nicht einer besonderen Kurve zugeordnet werden, obwohl für die jeweils reinen Proben des Tones (Nr. 1 - 5) eine ganz schwache negative Korrelation besteht. Deutlich

erkennt man jedoch eine positive Abhängigkeit der Korrelation vom Tongehalt (in Natriumpyrophosphat). Dies war zu erwarten, da beide Methoden für sich mit dem Tongehalt positiv korrelieren.

Sehr hoch ist die Korrelation zu den Werten der Fließgrenze für die Nr. 1 - 70 mit $r = +0,70$ bei $n = 45$ $y = 46,08 + 97,10 x$. Die Abweichung der Na- und K-Ionen sind hier erst von einem Na-Gehalt größer als 15 % und einem K-Gehalt größer als 80 % an zu erkennen. Eine Auswirkung der Korngrößenverteilung zeigt sich bei Tongehalten größer 45 % darin, daß die gefundene Korrelation nur für Proben mit mehr als 45 % Ton Gültigkeit besitzt. Die Ergebnisse sind mit $r = +0,70$ bei $n = 45$ $y = 46,08 + 97,10 x$ hochsignifikant gesichert.

Die Plastizitätszahl ergibt eine hochsignifikante positive Korrelation allerdings erst von den Proben ab, deren Plastizitätszahl über 40 liegt. Auch hier weichen wieder K- und Na- in negativer Richtung ab. Die Korrelation ist mit $r = +0,59$ bei $n = 30$ $y = 0,034 + 0,0051 x$ hochsignifikant. Eine hochsignifikante positive Korrelation ist weiterhin zur Adhäsion bei pF 2,18 zu erkennen. Der Korrelationsfaktor r liegt bei $+0,75$ bei $n = 45$ $y = -6,06 + 217,80 x$. Ebenfalls hoch ist die Korrelation, wenn wir an Stelle des Adhäsionswertes bei pF 2,18 den Feuchtegehalt der Proben nehmen, der einer Adhäsion von 50 g/cm^2 entspricht. Der Korrelationskoeffizient ist mit $r = +0,67$ bei $n = 45$ $y = -2,31 + 0,045 x$ errechnet. Läßt man hier die Na- und K-Proben (Nr. 3, 4, 20, 21), die eine negative Abweichung verursachen, aus der Betrachtung heraus, so erhöht sich die Korrelation.

Es zeigt sich, daß alle Werte, die die Bindung innerhalb des Bodens charakterisieren, in sehr guter Korrelation zu den Gefügestabilitätsmessungen stehen. Mit anderen Worten, die Sicherheit der Aussage für die einzelnen Methoden ist

gut und die von uns gestellten theoretischen Voraussetzungen treffen zu.

Die Volumenschrumpfung bei p_F 2,18 zeigt in Beziehung zur Gefügestabilität ebenfalls unterschiedliche Abhängigkeiten zwischen Kationen und Korngröße. Während Na- und K-Ionen wieder eine negative Korrelation hervorrufen, wird durch die Korngrößenunterschiede der Nummern 1 - 48 eine hochsignifikante positive Korrelation erzeugt ($r = +0,49$ bei $n = 39$ $y = 29,64 + 34,20 x$). Dabei ist zu erkennen, daß die Korrelation nur für Tongehalte über 45 % gültig ist. Durch die Natriumbelegung ergibt sich eine signifikante negative Korrelation von $r = -0,63$ bei $n = 14$ $y = 63,23 - 20,00 x$. Es zeigt sich also, daß die durch höheren Tongehalt hervorgerufene stärkere Volumenschrumpfung mit einer Erhöhung der Stabilität des Gefüges verbunden ist.

Sehr hoch ist auch die Korrelation der Messungen des Sedimentvolumens mit $r = -0,80$ bei $n = 35$ berechnet. Dazu ist zu bemerken, daß diese Werte in erster Linie durch das hohe Sedimentvolumen der Proben mit hohem Na-Anteil erzielt werden. Verzichtet man auf diese Werte, so besteht keine Korrelation mehr.

11. Wasserdurchlässigkeit (kf-Werte)

Die Kenntnis der nach unten gerichteten Wasserbewegung (Versickerung) ist für die Beurteilung des Bodens besonders in landwirtschaftlicher Sicht von hervorragender Bedeutung. Dies trifft sowohl für Fragen der Bewässerung (Regenverdaulichkeit KUNTZE) als auch für die Entwässerung zu. Die Versickerung erfolgt durch Bodenporen, Trockenrisse und sonstige zusammenhängende Hohlräume.

während die Einsickerung im trocknen Boden. (abgesehen von Fällen hohen Benetzungswiderstandes) relativ schnell vor sich geht, nimmt sie mit zunehmender Feuchte ab, um dann von einer bestimmten Feuchte an in etwa konstant zu werden. Für praktische Zwecke wird gewöhnlich die Durchlässigkeit bei konstanter Versickerungsgeschwindigkeit, also in wassergesättigtem Zustand, gemessen. Die Menge des durch die Flächeneinheit sickernden Wassers wird durch die Formel von DARCY dargestellt (87). Die Formel lautet:

$$Q = k \frac{h}{l} F$$

Q = Wassermenge in ml, die in der Zeiteinheit durch den Boden fließt

F = Querschnittsfläche des Bodens in cm^2

h = Druckhöhe der Wassersäule (Differenz zwischen oberem und unteren Wasserspiegel der in der Richtung der Wasserbewegung gedachten Bodensäule) in cm (hydraulischer Gradient)

l = Länge der Bodensäule in cm

k = Durchlässigkeitsfaktor in cm/sec.

Die Bewegungsgeschwindigkeit v wird durch den Ausdruck

$v = k \frac{h}{l}$ bestimmt. Demnach kann die Formel auch $Q = v \cdot F$

geschrieben werden. Daraus errechnet sich $k = \frac{v \cdot l}{h}$

oder $k = \frac{Q \cdot l}{h \cdot F \cdot t}$.

Auf die Problematik der Wasserdurchlässigkeitsmessungen soll in diesem Zusammenhang nicht eingegangen werden.

Die Durchlässigkeit ist vorwiegend eine Funktion der Gefügeanordnung und muß deshalb an Proben in ungestörter Lagerung durchgeführt werden. Da bei der Herstellung unserer Proben, wie schon beschrieben, das natürliche Gefüge zerstört werden mußte, war es erforderlich, auch hier dieses künstlich herzustellen. Man muß bei den Modellversuchen allerdings in Kauf nehmen, daß die Ergebnisse sich von den natürlichen Verhältnissen entfernen. Der Versuch sollte

trotz dieser Bedenken durchgeführt werden, damit der Vergleich zu den anderen Methoden in unseren Versuchen gegeben ist und besonders um Ergebnisse von einheitlichem Versuchsmaterial und unter einheitlichen Versuchsbedingungen zu erhalten. Somit sind die Resultate nicht absolut zu werten, sondern es soll nur gezeigt werden, wie sich Korngrößen und Kationen auswirken können. Bei der Suche nach einem geeigneten Verfahren zur Herstellung des Gefüges sättigten wir zunächst das in einen 100 ml Stechzylinder eingefüllte Material mit Wasser und überließen es dann der Trocknung. Mehrfaches Befeuchten und Trocknen sollte das geeignete Gefüge ausbilden. Die auf diese Weise hergestellten Proben ergaben keine reproduzierbaren Wasserdurchlässigkeitswerte. Auch der Versuch das Gefüge durch Einfrieren und Wiederauftauen des Materials zu erzeugen mißlang. Wir mußten uns deshalb mit einem sehr einfachen Verfahren begnügen. Zur Durchführung der Untersuchungen wurde die Menge des Materials, die im gequollenen Zustand ein Volumen von etwa 100 ml hatte, in einen 100 ml Stechzylinder trocken eingefüllt und dort bis zur vollständigen Quellung und Durchfeuchtung 1 cm tief auf einem Sieb in Wasser gestellt. Die Durchfeuchtung wurde dann als ausreichend angesehen, wenn die Oberfläche der Probe glänzend war, das Wasser also die Oberfläche erreicht hatte. Die dazu erforderliche Zeit war bei den einzelnen Proben sehr unterschiedlich. Sodann wurden die Proben nach der Methode SCHIRMER untersucht.

Die im Stechzylinder befindliche Bodenprobe wird, nachdem die untere Fläche mit einem Leinenlappen abgedeckt ist, bis fast an den oberen Rand auf einem Glasdreieck solange in Wasser gestellt, bis an der glänzenden Oberfläche der Probe zu erkennen ist, daß sie mit Wasser voll gesättigt ist.

Es wird dann ein zweiter leerer Stechzylinder aufgesetzt und durch einen Gummiring abgedichtet. Zum Schutz gegen Verschlammung überdeckt man die Bodenoberfläche mit einer

dünnen Schicht feinen Glassandes. über dem Stechzylinder wird eine Peilnadel so eingesetzt, daß ihre Spitze 8 - 12 mm über der Bodenoberfläche der Probe steht. Nun wird soviel Wasser auf die im Wasser stehende Probe gegeben, bis die Peilnadel gerade die Flüssigkeit berührt. Dieses ist an der Meniskenbildung gut zu erkennen. Der Wasserspiegel in dem Sättigungsgefäß muß bei Berührung der Peilnadel um die Schichtdicke der Bodenprobe tiefer liegen, als der Wasserspiegel über der Probe. Der Druckgradient ist somit $h/l = 1$. Nach einer bestimmten Zeit wird die Menge des durch die Probe gelaufenen Wassers dadurch gemessen, daß soviel Wasser aus der Burette zugegeben wird, bis der Wasserspiegel wieder die Spitze der Peilnadel erreicht hat. Berechnet wird der kf-wert in cm/sec.

Entsprechend dem Verfahren der Herstellung des "Gefüges" werden bei den tonreichen Proben vorzugsweise Quellungs- und Dispergierungseffekte die Ergebnisse beeinflussen, wobei der Dispergierungseffekt in diesem Zusammenhang das Gegenteil des Flockungseffektes darstellt. Die Messungen erfolgen jeweils mit mindestens 10 Parallelen und zeigen innerhalb dieser Parallelen eine gute Übereinstimmung.

Trägt man die durch die Untersuchung erhaltenen kf-werte im negativen Logarithmus der cm/sec auf, so kann man einige Beobachtungen machen, die die Auswirkung der Kationen und der Korngrößenverteilung beleuchten. Zunächst sollen wieder die reinen Proben des Tones (Nr. 1 - 5) angesehen werden. Hier hat der Ca-Ton (Nr. 1) mit $9,4 \cdot 10^{-5}$ die größte Durchlässigkeit. Es folgt der H-Ton (Nr. 5 mit $4,5 \cdot 10^{-5}$. Mg- (Nr. 2) liegt mit $1,9 \cdot 10^{-5}$ an 3. Stelle. Die geringe Durchlässigkeit des K-Tones (Nr. 3) mit $3,9 \cdot 10^{-7}$ und Na-Tones (Nr. 4) mit $4,6 \cdot 10^{-7}$ ist auf die Dispergierung und die große Quellungsneigung zurückzuführen. Im Boden sind bei den reinen Proben (Nr. 18 - 22) die Verhältnisse etwas anders. K-Boden (Nr. 20) und H-Boden (Nr. 22) zeigen mit $2,5 \cdot 10^{-5}$ bzw. $2,6 \cdot 10^{-5}$ die höchsten

Durchlässigkeiten. Etwas niedriger liegen die Werte des Mg-Bodens (Nr. 19) mit $1,7 \cdot 10^{-5}$ und des Ca-Bodens (Nr. 18) mit $1,1 \cdot 10^{-5}$. Ob diese geringen Unterschiede tatsächlich als solche gewertet werden können, scheint unwahrscheinlich. Deutlich ist aber auch hier wieder die geringe Durchlässigkeit des Na-Bodens (Nr. 21) zu erkennen, der mit einem kf-Wert von $5,2 \cdot 10^{-7}$ weit aus dem Bereich der anderen Proben herausfällt. Die unterschiedliche Auswirkung der K-Ionen auf den kf-Wert in Ton und Boden (Nr. 3, 20) entsprechen denen der Dispergierung, die im Ton (Nr. 3) mit 43 % Teilchen $< 2 \mu$ in Wasser doppelt so hoch liegt als die der anderen Proben, während sie im Boden (Nr. 20) mit 10 % im Bereich der anderen Proben ist. Wir entnehmen daraus, daß bei dieser Herstellung der Gefügeelemente vorwiegend die Auswirkung der Flockung zum Tragen kommt.

Betrachtet man die Ergebnisse der reinen Proben (Nr. 1 - 5 u. 18 - 25) einschließlich derer der Kationengemische (Nr. 8 - 17), so ist eine hochsignifikante positive Auswirkung des Ca-Tones mit $r = +0,52$ bei $n = 150$ zu erkennen. Von dieser guten Regression weichen nur die (in der Regression mitberechneten) Ergebnisse der Proben Nr. 11 und 12 ab, die - dem Ca-Anteil entsprechend - einen zu niedrigen kf-Wert haben. Bei diesen Proben vermindert also der hohe Na-Anteil von 3,2 bzw. 2,4 % (Tab. 5) die Wasserdurchlässigkeit, die - ebenso wie bei den Proben Nr. 16 und 17 mit 5,2 % bzw. 1,5 % Na (Tab. 5) - die geringste Durchlässigkeit aufweisen (Tab. 22). Die H-Ionen-Belegung wirkt sich ebenfalls positiv auf die Durchlässigkeit der Proben 1 - 17 aus. Die Korrelation wurde mit $r = +0,19$ bei $n = 150$ signifikant berechnet, während bei diesen Proben die Auswirkung des Mg-Ions hochsignifikant negativ mit $r = -0,31$ bei $n = 150$ war. Auch bei dem Mg-Ion weichen die Proben Nr. 11 und 12 von der allgemeinen Regression ab und ergeben, dem Mg-Anteil entsprechend, zu geringe Durchlässigkeitswerte. Obwohl bei den K- und Na-Ionen die

negative Korrelation wegen des geringen Unterschiedes in der Belegung mit diesen Ionen nicht klar zu erkennen ist, kann man sie doch bei Na- mit $r = -0,26$ bei $n = 150$ hochsignifikant und bei K- mit $r = -0,25$ bei $n = 150$ ebenfalls hochsignifikant negativ berechnen. Erstaunlich ist die bei dem Tongemisch erkennbare negative Auswirkung des Mg-Iones auf den kf-Wert, die sich allerdings bei der vollen Belegung (Nr. 2 u. 19) nicht zeigt. In diesem Zusammenhang sei nochmal auf die Bedeutung, die MÜLLER dem Mg-Ion bei der Beurteilung der Marschböden zuschreibt (81) hingewiesen. Unsere Ergebnisse zeigen, daß Mg- in Mischbelegung die Wasserdurchlässigkeit vermindert.

Noch deutlicher ist die Auswirkung der reinen Korngrößen-Fractionen auf die Durchlässigkeit, wie dies besonders in den Ergebnissen der reinen Proben (Nr. 26 - 31) zum Ausdruck kommt. Die Ergebnisse des Feinschluffes liegen etwa in der Größenordnung der mit Ca-, Mg- und H-belegten Tone (Nr. 1, 2, 5) und dem der Kationengemische bei den Tonen, bei $1,9 \cdot 10^{-5}$. Der Mittelschluff zeigt schon eine geringe Verbesserung des Wertes auf $4,9 \cdot 10^{-5}$. Sehr deutlich unterscheidet sich aber der Grobschluff, der mit einem kf-Wert von $2,8 \cdot 10^{-3}$ eine viel bessere Durchlässigkeit aufweist. Etwa im gleichen Größenbereich steht der Feinsand mit einem kf-Wert von $4,3 \cdot 10^{-3}$, während Mittel und Grobsand mit $8,9 \cdot 10^{-2}$ und $7,2 \cdot 10^{-1}$ weitaus die beste Durchlässigkeit haben.

Die Zahl der Korngrößenmischung wurde für die kf-Untersuchung erheblich vergrößert, da hier auch die Mischungen der größeren Fraktionen alleine interessierten. Zunächst seien aber die schon von den anderen Versuchen her bekannten Korngrößengemische der Proben Nr. 26 - 48 besprochen. Es zeigt sich hier eine hochsignifikante negative Auswirkung des Tones auf den kf-Wert mit $r = -0,47$ bei $n = 230$. Feinschluff-Mittelsand sind bei der großen Anzahl der Parallelen auch negativ hochsignifikant errechnet. Die Werte

scheinen uns aber aufgrund der geringen r-werte von $fU = -0,22$ $mU = -0,25$; $gU = -0,30$ $fS = -0,23$; $mS = -0,14$ trotzdem nicht genügend gesichert. Aus der Arbeitsgraphik ist keine Abhängigkeit zu ersehen.

Betrachtet man nun die Proben 26 - 65, so ist die Korrelation sehr gering. Hier zeigen $fU - fS$ keine Signifikanz. Lediglich der Grobsand ist mit $r = +0,61$ bei $n = 400$ positiv korreliert.

Es ergibt sich also, daß nur die reinen Korngrößen eine erhebliche Korrelation zum kf -Wert haben, während in dem Gemisch keine Abhängigkeit besteht. Dies hängt sicher mit der unterschiedlichen Sortierung der kleineren Körner in den groberen Poren zusammen.

Zu anderen Untersuchungsmethoden bestehen folgende Korrelationen:

kf : Flockung	$r=-0,55$	$n=26$	$y=69,8-612474,0x$
lin.Schrumpfung	$r=-0,64$	$n=40$	$y=45,71-66340,2x$
Adhäsion bei 50 g	$r=-0,58$	$n=43$	$y=67,8 -108540,2x$
Gefügestabilität	$r=-0,31$	$n=43$	$y=0,344-461,2x$

Tab. 22 Ergebnisse der Durchlässigkeitsuntersuchung kf
(Mittelwerte)

1	9,4	• 10 ⁻⁵	26	1,9	• 10 ⁻⁵	49	6,7	• 10 ⁻²
2	1,9	• 10 ⁻⁵	27	4,9	• 10 ⁻⁵	50	3,2	• 10 ⁻³
3	3,9	• 10 ⁻⁷	28	2,8	• 10 ⁻³	51	1,1	• 10 ⁻³
4	4,6	• 10 ⁻⁷	29	4,3	• 10 ⁻³	52	1,1	• 10 ⁻⁴
5	4,5	• 10 ⁻⁵	30	8,9	• 10 ⁻²	53	2,4	• 10 ⁻⁵
8	2,1	• 10 ⁻⁵	31	7,2	• 10 ⁻¹	54	3,4	• 10 ⁻³
9	1,6	• 10 ⁻⁵	32	2,7	• 10 ⁻⁵	55	1,6	• 10 ⁻³
10	1,3	• 10 ⁻⁵	33	2,1	• 10 ⁻⁵	56	1,3	• 10 ⁻⁴
11	4,4	• 10 ⁻⁶	34	5,5	• 10 ⁻⁵	57	5,2	• 10 ⁻⁵
12	7,2	• 10 ⁻⁶	35	8,9	• 10 ⁻⁵	58	4,4	• 10 ⁻⁵
13	1,8	• 10 ⁻⁵	36	5,0	• 10 ⁻⁵	59	1,3	• 10 ⁻⁴
14	2,4	• 10 ⁻⁵	37	3,3	• 10 ⁻⁵	60	4,8	• 10 ⁻⁴
15	3,1	• 10 ⁻⁶	38	2,6	• 10 ⁻⁵	61	1,7	• 10 ⁻³
16	7,9	• 10 ⁻⁶	39	6,9	• 10 ⁻⁴	62	1,4	• 10 ⁻³
17	1,1	• 10 ⁻⁴	40	4,0	• 10 ⁻⁴	63	5,1	• 10 ⁻⁵
18	1,1	• 10 ⁻⁵	41	4,4	• 10 ⁻⁴	64	3,4	• 10 ⁻⁴
19	1,7	• 10 ⁻⁵	42	4,0	• 10 ⁻⁴	65	1,7	• 10 ⁻⁴
20	2,5	• 10 ⁻⁴	43	2,2	• 10 ⁻⁴	66	9,2	• 10 ⁻⁶
21	5,2	• 10 ⁻⁴	44	2,4	• 10 ⁻⁵	67	8,6	• 10 ⁻⁶
22	2,6	• 10 ⁻⁵	45	6,6	• 10 ⁻⁵	68	1,1	• 10 ⁻⁵
23	1,4	• 10 ⁻⁶	46	10,1	• 10 ⁻⁵	69	7,2	• 10 ⁻⁶
24	7,9	• 10 ⁻⁶	47	2,3	• 10 ⁻⁵	70	7,2	• 10 ⁻⁶
25	8,9	• 10 ⁻⁶	48	3,2	• 10 ⁻⁵			

12. Kapillarität

Für die Wasserversorgung der Pflanzen in grundwassernahen Böden kann der kapillare Wasserhub eine mehr oder weniger große Rolle spielen. Die Kapillarität ist eine Folge der Molekularkräfte (Kohäsion und Adhäsion). Hängt man eine enge Glasröhre (Kapillare) in Wasser, so beobachtet man, daß in Abhängigkeit von deren Durchmesser die Flüssigkeit jeweils zu einer ganz bestimmten Höhe ansteigt.

Die Steighöhe folgt in Kapillaren der Formel:

$$h = \frac{2 \sigma}{\rho \cdot r \cdot g} \text{ cm} \quad h = \frac{0,145}{r} \text{ cm} \quad \text{oder} \quad h = \frac{0,290}{d} \text{ cm}$$

Darin sind:

h = kapillare Steighöhe in cm

σ = Oberflächenspannung (für Wasser bei 20 °C =
72,6 dyn. cm⁻¹)

ξ = Dichte der Flüssigkeit in g · cm⁻³

r = Radius der Kapillare in cm

g = Erdbeschleunigung (981 cm · sec⁻²)

Für den Boden kann diese Gleichung nur angenähert gelten, da dort zylindrische Kapillaren nicht vorhanden sind.

In idealen Böden, bei denen die Einzelteilchen als gleichgroße Kugeln gedacht werden, stelle man sich ein System von stellenweise sich verengenden Hohlräumen mit gewellten Wänden (JAMINSCHKE Kette) vor (27). Maßgebend für die Steighöhe ist der Radius der zwischen den kugligen Teilchen mit dem Radius R einbeschriebenen kugligen Poren r (Abb.20).

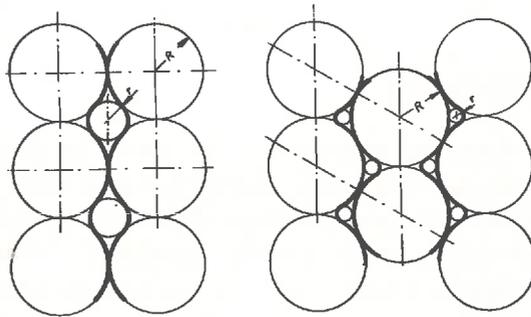


Abb. 20 Dichteste und lockerste Lagerung der Teilchen in idealen Böden, Ermittlung des für die Steighöhe wirksamen Durchmessers der Kapillaren

Diese Kugeln können in lockerster Lagerung (Abb. 20a) oder in dichtester Packung (Abb. 20b) angeordnet sein. Der Zusammenhang zwischen dem Radius R der Teilchen und dem Radius r, also dem Durchmesser des Porenraumes wird für die dichteste Lagerung mit $r = 0,155 R$ und für die lockerste Lagerung mit $r = 0,41 R$ angegeben (27). Zur Berechnung der kapillaren Steighöhe im Boden wird bei lockerster Lagerung der kugligen Teilchen demnach die Formel

$$h = \frac{0,15}{0,41 R} = 0,366 \frac{1}{R}$$

angewendet.

ZUNKER (118) leitet seine Formel zur Berechnung der Steighöhe in Böden von der durch das Wasser benetzbaren Oberfläche der Bodenteilchen, der spezifischen Oberfläche und dem spannungsfreien und luftfreien Porenvolumen ab.

Seine Formel lautet:

$$h = 0,3 a \cdot \frac{1-P}{P_{01}} \cdot U \text{ cm}$$

Darin bedeuten:

h = kapillare Steighöhe

a = Kapillaritätskonstante

P = scheinbares Volumen

P_{01} = spannungs- und luftfreies Porenvolumen

U = spezifische Oberfläche

Die nach diesen beiden Formeln berechneten Steighöhen stimmen recht gut mit den in Böden und Modells-substanzen untersuchten Verhältnissen überein, wobei die Werte der ersten Gleichung bei Korngrößen unterhalb von 0,2 mm versagten. Hier wird der kapillare Aufstieg in erster Linie von den Quellungserscheinungen beeinflusst. Diese Tatsache wird in der Gleichung ZUNKER's durch das spannungsfreie Porenvolumen berücksichtigt.

Für die Wasserversorgung der Pflanzen spielt nicht nur die kapillare Hubhöhe eine Rolle, sondern wesentlich ist auch die Nachlieferungsgeschwindigkeit für Wasser. Diese hängt erheblich von dem Porendurchmesser ab. Besonders in feinkörnigen Böden kann durch Quellungserscheinungen die Wassernachlieferung beträchtlich behindert werden.

VAGELER (104) berechnet die Steigegeschwindigkeit nach der Formel:

$$y = \frac{x \cdot s}{x + qs}$$

Darin bedeuten:

y = Steighöhe zum Zeitpunkt x

s = Endsteighöhe

q = Eine für verschiedene Böden charakteristische Konstante

Die Berechnungen nach dieser Gleichung zeigen ebenfalls brauchbare Übereinstimmungen mit den Meßergebnissen (27).

Zur Messung der kapillaren Steighöhe haben wir die entsprechende Probe lufttrocken in 1,60 m hohe Glasrohre (Durchmesser 8 mm) so eingefüllt, daß durch mehrfaches Aufstampfen eine für alle Proben gleiche Lagerungsdichte erzielt wurde. Unter den Proben befand sich jeweils eine Schicht von 5 cm Grobsand. Das Rohr wurde unten mit einem Leinwandlappen verschlossen und in einem Stopfen in einen mit Wasser voll gefüllten Erlenmeyerkolben gesetzt. Ein zweites, etwa 10 cm langes Rohr in dem Gummistopfen, war bis zu einer Marke, die in gleicher Höhe mit der Bodenunterkante im anderen Rohr stand, mit Wasser gefüllt. Das durch den Boden aufgenommene Wasser wurde ständig bis zur Marke im kleinen Rohr nachgefüllt. Dadurch war eine Überwachung der Wasseraufnahme möglich und besonders auch der Endpunkt der Wasseraufnahme gut zu erkennen. Die jeweilige Höhe des Wassers wurde aufgrund der Dunkelfärbung des Bodens ermittelt.

Die mit unseren Proben Nr. 18, 19, 21, 22 und 26 - 31 (Tab. 5) erhaltenen Ergebnisse sind aus den Abb. 21 und 22 und der Tab. 23 zu ersehen. Während die Endwerte für die Korngrößengruppen (Nr. 26 - 31) schon nach etwa 4 Tagen erreicht waren, war dies bei den mit den Kationen belegten Böden erst nach 150 Tagen der Fall.

Tab. 23 Kapillare Steighöhe und Steiggeschwindigkeit verschiedener Korngrößengruppen und Kationenbelegung in Böden

Nr.	Korngröße mm	Steighöhe in cm			Endwert	Endwert versch. Autoren (Mittelwert) (119)	Berechn. nach $h = \frac{1}{R}$ 0,366
		1 Std.	5 Std.	24 Std.			
26	0,002-0,006	3	8	---	84 ^{x)}	3000	1220-3660
27	0,006-0,02	12	36	---	116	300-1000	360-1220
28	0,02-0,06	28	70	---	130	250-300	121-366
29	0,06-0,2	35	61	---	88,5	30-100	121-36
30	0,2-0,6	10	15	---	16,2	10-30	12-36
31	0,6-2,0	12	12	---	13,0	8-10	12-3,6
<u>Kation</u>							
18	Ca	--	4,8	8,0	57,0	---	
19	Mg	--	3,2	6,5	38,0	---	
21	Na	--	0,3	0,6	7,0	---	
22	H	--	8,8	18,2	127,0	---	

x) Endwert wurde nicht erreicht

Die großen Unterschiede in der Endsteighöhe der kleineren Korngrößengruppen zwischen unseren Ergebnissen und denen anderer Autoren erklären wir uns dadurch, daß dort diese Werte errechnet wurden. Dies vermutet auch BUSCH (20). Bei den größeren Fraktionen sind die Übereinstimmungen gut. Die für die Wassernachlieferung günstigsten Verhältnisse (größte Steighöhe, größte Steiggeschwindigkeit) ergeben sich für den Grobschluff (Nr. 28).

Aus der Abb. 21 ist die sehr hohe Wassersteiggeschwindigkeit bei Grob- und Mittelsand zu erkennen. Diese Steighöhen sind aber sehr gering und unterscheiden sich kaum.

Etwas geringer ist die Steiggeschwindigkeit bei dem Feinsand und dem Grobschluff, die sich anfangs nur gering, in ihrer Endsteighöhe aber wesentlich unterscheiden. Sehr niedrig liegt die Steiggeschwindigkeit bei dem Feinschluff, bei dem die Wasserhöhe nach 5 Stunden noch erheblich unter dem Endwert des Grobsandes liegt. Der Endwert des Feinschluffes war nach 4 Tagen nicht erreicht. Auch der Mittelschluff ist durch eine geringe Steiggeschwindigkeit ausgezeichnet, der Endwert erreicht aber die beachtliche Höhe von 116 cm.

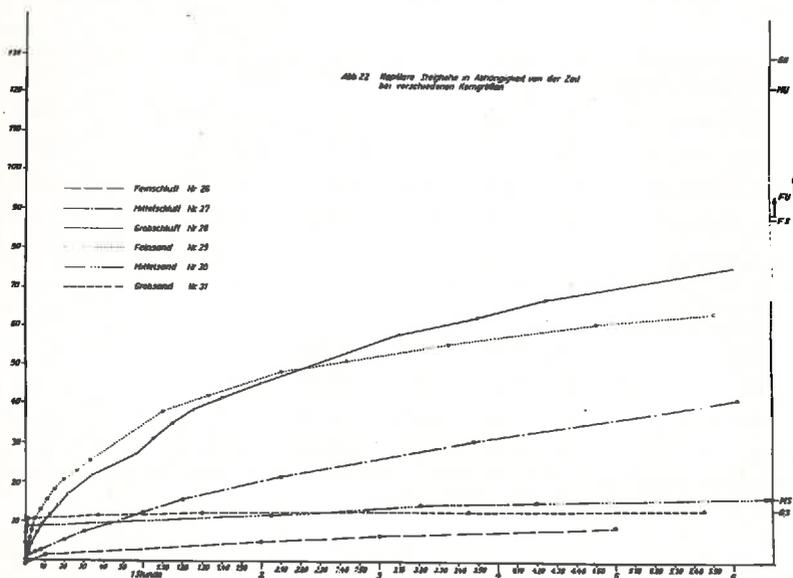


Abb. 21 Kapillare Steighöhe in Abhängigkeit von der Zeit bei verschiedenen Korngrößen

Die Auswirkung der Kationen auf die Kapillarität wird bei den Proben Nr. 18, 19, 21 und 22 dargestellt (Tab. 23, Abb.22). Hier liegt der mit H-gesättigte Boden (Nr. 22) sowohl in der

Steiggeschwindigkeit, als auch in der Steighöhe an erster Stelle; lediglich in den ersten 20 Minuten steigt das Wasser im Mg-Boden (Nr. 19) geringfügig schneller. Der Ca-Boden (Nr. 18) fällt erheblich gegenüber dem H-Boden (Nr. 22) ab, liegt aber noch über dem Mg-Boden (Nr. 19), der bei anfänglich sehr hoher Steiggeschwindigkeit in seiner Endsteighöhe um etwa 20 cm niedriger liegt. Bei weitem am niedrigsten liegen die Werte des Na-Bodens (Nr. 21), die ihren Endwert schon bei 7 cm erreicht haben.

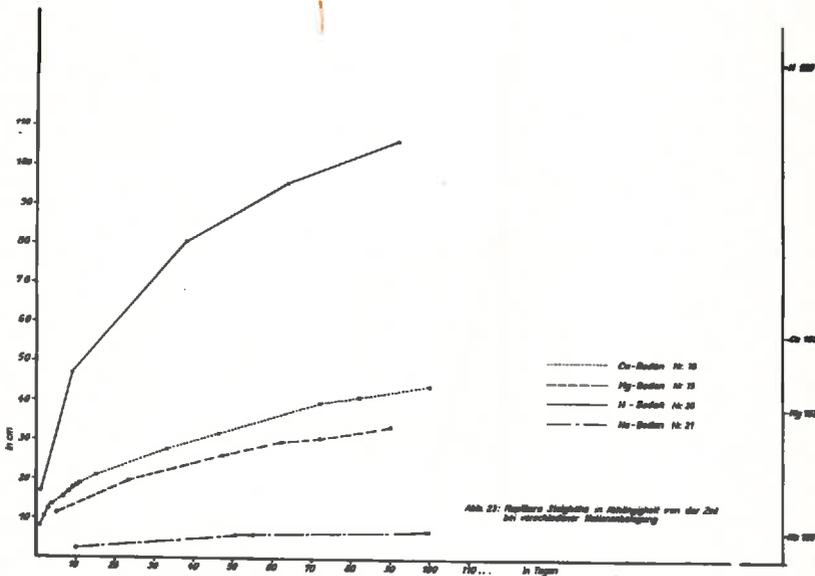


Abb. 22 Kapillare Steighöhe in Abhängigkeit von der Zeit bei verschiedener Kationenbelegung

Bei diesen Ergebnissen wird deutlich, daß die kapillare Steighöhe und Geschwindigkeit nicht nur von der Korngröße abhängen, sondern daß physikalische Eigenschaften wie Quellung und Schrumpfung erheblichen Einfluß besitzen.

Zur Klärung der Frage, ob auch die Benetzbarkeit der Bodenteilchen hier eine Rolle spielt, untersuchten wir die Proben noch in dem Gerät nach ENSLIN (33). Zunächst seien dazu noch einige Erläuterungen gegeben.

Zwischen der Flüssigkeit und der benetzten Wandung der Kapillare bildet sich der Meniskus mit dem Randwinkel φ aus (Abb. 23).

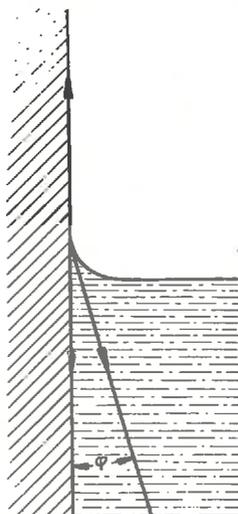


Abb. 23 Meniskusbildung in einer Kapillare
(Randwinkel φ)

Je kleiner dieser Winkel φ der benetzenden Flüssigkeit mit der festen Substanz ist, umso höher ist die Benetzungsneigung. Die Randwinkel der Bodenlösung mit den festen Bodenteilchen sind einer direkten Messung nicht zugänglich (45). HARTGE ermittelte deshalb den Randwinkel von destilliertem Wasser und von Bodenzentrifugaten mit dem Glas eines Objektträgers auf fotografischem Wege. Er setzt dabei voraus, daß die Benetzungseigenschaft des Glases der des

Bodens entspricht. Er konnte mit dieser Methode z.B. feststellen, daß eine Kalkgabe zu destilliertem Wasser den Randwinkel verkleinert, während die Randwinkel der Bodenzentrifugate mit steigender Kalkgabe zunahmen.

Auf indirektem Wege können mit der Methode ENSLIN relative Angaben über den Randwinkel gewonnen werden (45).

Die Messungen erfolgten in einem etwas abgeänderten Gerät nach ENSLIN (33). Das Gerät besteht aus einer waagrecht liegenden Glaskapillare, die durch ein U-Rohr mit einer Glasfilterplatte G_3 verbunden ist. U-Rohr und Glaskapillare sind mit Wasser gefüllt. Die zu untersuchende Bodenprobe wird auf die Glasfilterplatte gegeben und die Ansauggeschwindigkeit durch die Abnahme des Wassers in der Kapillare gemessen.

Die Benetzung des Bodens ist abhängig von der Ausgangsfeuchte des Materials. Verschiedentlich wird empfohlen mit absolut trockenem Material zu arbeiten. Wir befürchten, daß bei dieser Behandlung die Oberfläche der Bodenteilchen verändert wird (Luftadsorption) und arbeiten deshalb entweder bei Lufttrockenheit oder setzten den Boden so an, daß sein Wassergehalt einem pF-Wert von 4,2 entsprach. Die letztere Probe nannten wir feucht.

Weiterhin ist die Auflagefläche und die Lagerungsdichte des Materials für das Ergebnis von Bedeutung. Wir stellten aus diesem Grunde unter definierten Bedingungen Preßlinge her. Dazu wurde der Boden mit einer pF 4,2 entsprechenden Wassermenge angesetzt und gut durchmischt. Nachdem die Feuchtigkeit in der Probe ausgeglichen war, wurde ein bestimmtes Trockengewicht der Substanz durch Einpressen in ein 2 cm weites Glasrohr auf ein bestimmtes Volumen verdichtet. Die Probe wurde dann aus dem Glasrohr ausgestoßen und ein Stück bestimmter Höhe von dem Bodenzylinder abgeschnitten. Die so hergestellten Proben untersuchten wir. Zur Messung ermittelten wir die Zeit, die erforderlich war, um den Meniskus

in der Kapillare auf eine bestimmte Strecke zurückzuziehen. Die Menge des von dem Boden aufgenommenen Wassers war somit konstant.

Die Ergebnisse sind aus Tab. 24 zu ersehen. Für die Proben Nr. 1 - 48 erfolgte die Untersuchung an feuchten Proben (pF 4,2). Als Maß diente die Zeit, die erforderlich war, um den Meniskus 200 mm weit zurückzuziehen. Bei den Proben 1 - 25 wurde zusätzlich die Messung an lufttrockenen Proben (pF 6,1) durchgeführt und dort aber nur die Zeit für 50 mm und 100 mm Rückgang des Wassers in der Kapillare gemessen. Es ergibt sich dabei, je größer die Zahl ist, umso geringer ist die Wasseraufnahmegeschwindigkeit. Betrachtet man nun die Ergebnisse der lufttrockenen reinen Proben (bei pF 6,1) (Nr. 2 - 5) (für die Probe 1 reichte das Material nicht aus), so kann man sowohl bei 50 mm, als auch bei 100 mm erkennen, daß K- (Nr. 3) die geringste Zeit zur Wasseraufnahme benötigt. Es folgt die mit H- belegte Probe (Nr. 5) mit geringem Unterschied. Zur Mg-Probe (Nr. 2) ist die Differenz schon erheblich größer geworden. Das Na-Ion (Nr. 4) benötigt gegenüber dem K-Ion (Nr. 3) fast die doppelte Zeit.

Im Boden dagegen bewirkt das H-Ion (Nr. 22) die schnellste Wasseraufnahme. Sie unterscheidet sich erheblich von der des K-Ions (Nr. 20), das an zweiter Stelle steht. Zum Mg-Ion (Nr. 19) an dritter Stelle, ist die Differenz noch größer. Es folgt das Ca-Ion. An letzter Stelle liegt wieder das Na-Ion (Nr. 21), das mit 34,8 sec für 50 mm die 7-fache und mit 139,8 sec für 100 mm die 14-fache Zeit gegenüber dem H-Ion benötigt.

Betrachtet man die Ergebnisse der feuchten Proben (bei pF 4,2) bei 200 mm, so erkennt man, daß die mit K-belegte Probe (Nr. 3) erheblich mehr Zeit für die Wasseraufnahme benötigt, als die Ca-Probe (Nr. 1) und die Mg-Probe (Nr. 2).

Tab. 24 Ergebnisse der Untersuchungen nach ENSLIN (Aufnahmegeschwindigkeit für Wasser) bei einer Wasserentnahme von 200 mm, 100 mm bzw. 50 mm Wassersäule aus der Kapillare.

Nr.	feuchte Probe		trockene Probe	
	Zeit bei 200 mm in sec	pF	Zeit bei 50 mm in sec	Zeit bei 100 mm in sec
1	92,6	4,3		
2	93,4	4,3	13,6	31,8
3	316,0	4,3	10,4	23,5
4	968,8	4,4	19,1	49,6
5	107,8	4,3	11,0	25,0
8	54,1	4,3	10,6	24,5
9	54,7	4,3	10,9	25,0
10	50,2	4,3	14,6	29,5
11	52,7	4,3	12,9	25,4
12	52,7	4,3	11,8	27,6
13	79,0	4,2	15,9	37,7
14	71,0	4,1	15,1	36,2
15	56,2	4,1	18,2	41,5
16	91,6	4,3	24,9	58,4
17	103,0	4,3	19,6	45,4
18	73,9	4,3	11,5	24,0
19	111,2	4,3	10,0	22,2
20	416,5	4,3	7,7	16,2
21	920,1	4,4	34,8	139,8
22	85,9	4,3	5,1	10,4
23	93,0	4,4	12,8	30,2
24	94,2	4,3	13,0	31,3
25	93,2	4,3	11,3	24,7
26	21,2	3,9		
27	32,4	3,3		
28	32,3	2,9		
32	51,4	4,3		
33	61,1	4,2		
34	44,6	4,4		
35	69,9	4,2		
36	91,9	4,3		
37	81,5	4,3		
38	29,2	4,1		
39	34,9	3,8		
40	70,6	3,7		
41	43,7	3,2		
42	203,6	2,6		
43	114,9	2,5		
44	73,6	4,7		
45	95,2	3,7		
46	58,7	4,3		
47	57,9	4,1		
48	41,3	4,0		

Während diese beiden Proben (Nr. 1 u. 2) im Ton etwa gleiche Werte haben und H- (Nr. 5) eine etwas größere Zeit benötigt, erfordert die mit K- belegte Probe (Nr. 3) etwa das 3-fache der Zeit der Ca- und Mg-Proben (Nr. 1 u.2) und Na- (Nr. 4) das 10-fache. Im Boden liegen die Verhältnisse ähnlich. Die Reihenfolge ist hier Ca- (Nr. 18) H- (Nr. 22) Mg- (Nr. 19) K- (Nr. 20) und Na- (Nr. 21). Auch hier weichen die Ergebnisse von Na- und K- wieder erheblich von denen der anderen Kationen ab. Das unterschiedliche Verhalten der K-belegten Substanzen in der Wasseraufnahme bei pF 6,1 bzw. pF 4,3 wird durch Quellung erklärt, die in der trockeneren Probe noch nicht zum Ausdruck kommt. Ob auch in den trockenen Proben schon eine Quellung die Ergebnisse beeinflusst, ist schwer zu entscheiden. Im Falle des K-Ions könnte man dies verneinen, während durch das Na-Ion sicher eine Quellung erfolgt ist. Beurteilt man nun die Proben 1 - 17 in ihrer Abhängigkeit von der Kationenbelegung, so muß man zwischen der Untersuchung bei pF 4,3 und derjenigen bei 6,1 unterscheiden.

Bei einer Wasseransaugung von 50 mm aus der Kapillare ergibt sich eine Wassermenge von 0,13 ml. Dies entspricht bei Zugrundelegung einer Eindringtiefe des Wassers in den Boden von 2 mm einer Feuchtezunahme von 20 Vol %, so daß die Gesamtfeuchte für die trockene Probe (pF 6,1) der Tone dann zu 25 % errechnet wird. Geht man in die Tabelle der Schrumpfung (Tab. 13), so erkennt man, daß bei diesem Wassergehalt die Schrumpfung und damit die Quellung sehr gering ist. Die Ergebnisse scheinen demnach der Benetzung zu entsprechen. Am stärksten wird die Benetzung durch das Mg-Ion vermindert, dessen Wirkung mit $r = +0,45$ bei $n = 150$ $y = 23,2 + 0,45 x$ errechnet wurde. Die gleiche Tendenz ist durch das Ca-Ion zu erkennen, dessen Wirkung mit $r = 0,29$ $n = 150$ ebenfalls hochsignifikant ist. Die Wirkung der anderen Kationen ist nicht signifikant, obwohl bei dem H- und dem Na-Ion die gleiche, bei dem K-Ion dagegen die ent-

gegengesetzte Tendenz zu erkennen ist.

Eine Wassersäule von 200 mm ergibt bei einer Eindringtiefe des Wassers in den Boden von 2 mm eine Erhöhung des Wassergehaltes der Probe um 80 Vol %, so daß im Ton bei der trockenen Probe der Wassergehalt auf 85 % ansteigt. Diese Feuchte entspricht dem pF-Wert 2,0. In diesem Feuchtebereich ist die Quellung erheblich (Tab. 12), und die Ergebnisse werden nur durch diese beeinflußt. Geht man hier von der trockenen Probe aus, so erkennt man nicht gesicherte negative Werte des Ca-, Mg-, K- und H-Ions, während die Wirkung des Na-Ions mit $r = +0,85$ bei $n = 150$ $y = -300,19 + 23,36 x$ hochsignifikant positiv gesichert ist. Daraus ist abzuleiten, daß Na-Ionen die Quellung des Bodens erheblich fördern, während unter diesen Bedingungen der Einfluß der anderen Kationen gering ist.

Betrachtet man dagegen die Ergebnisse der feuchten Probe bei 200 mm, so sind Ca- und Mg- mit $r = -0,46$ $n = 150$ bzw. $r = -0,42$ $n = 150$, die der H-Ionen mit $r = -0,73$ $n = 150$ hochsignifikant negativ, während K-Ion mit $r = +0,17$ $n = 150$ signifikant und Na-Ion mit $r = +0,95$ $n = 150$ hochsignifikant positiv sind. Hier zeigt sich sehr deutlich, daß Ca-, Mg- und besonders H-Ionen quellungsmindernd, Na- und K-Ionen dagegen deutlich quellungssteigernd wirken.

Die Auswirkung der Korngrößenverteilung auf die Wasseraufnahmegeschwindigkeit läßt eine hochsignifikante positive Wirkung $r = +0,92$ $n = 310$ des Tones und negative Einflüsse der gröberen Fraktionen erkennen.

Zu anderen Methoden bestehen bei der feuchten Probe folgende Abhängigkeiten:

Zum Anteil an Teilchen $< 2 \mu$ $r = +0,84$ $n = 40$ $y = 7,64 + 0,062x$
Zur Adhäsion bei 50 g/cm^2 $r = -0,60$ $n = 17$ $y = 51,47 - 0,25x$

Zur Plastizitätszahl	$r=+0,44$	$n=30$	$y=30,60-0,037x$
Zur Volumenschrumpfung	$r=+0,49$	$n=40$	$y=35,95+0,034x$
Zum Sedimentvolumen	$r=+0,97$	$n=15$	$y= 4,57+0,008x$
Zum Gefügefaktor	$r=-0,91$	$n=40$	$y=83,22-0,083x$
Zu den Rißbildern	$r=-0,64$	$n=33$	$y=142,87-0,12x$

13. Zusammenfassung

1. Ziel dieser Arbeit ist es, auf dem Wege der Grundlagenforschung die Aussagekraft verschiedener Methoden für physikalische Eigenschaften von Böden zu prüfen, weiterhin die Bedeutung einzelner Komponenten wie Kationenbelegung und Korngrößenverteilung auf das physikalische Verhalten der Böden zu studieren, um beurteilen zu können, ob und auf welchen Böden Meliorationsmaßnahmen einen Erfolg erwarten lassen und wie groß dieser gegebenenfalls sein wird. Auch die Wechselbeziehungen verschiedener physikalischer Eigenschaften im Boden sollen beobachtet werden.

Untersuchungen dieser Art setzen voraus, daß alle übrigen Faktoren im Boden möglichst konstant gehalten werden. Dies ist besonders bei einem einheitlichen Ausgangsmaterial (Modellboden) gegeben, bei dem die zu untersuchenden Faktoren variiert werden können.

2. Der Fragestellung der Arbeit entsprechend stellten wir 28 Proben mit unterschiedlicher Kationenbelegung (Ca-, Mg-, K-, Na-, H-) bei konstanter Korngrößenzusammensetzung und 42 Proben verschiedener Korngrößenmischungen (T-, fU-, mU-, gU-, fS-, mS-, gS-) bei konstanter Kationenbelegung aus einer Bodenprobe her. Diese 70 Untersuchungsglieder wurden mit 15 verschiedenen Methoden untersucht. Geprüft wurde zunächst der Einfluß

der Kationen und der Korngrößenzusammensetzung auf die physikalischen Eigenschaften, weiterhin die Wechselwirkung verschiedener physikalischer Faktoren und schließlich der Aussagewert verschiedener Methoden.

Die hier gefundenen Ergebnisse müssen als Grundlagenforschung gewertet werden.

3. pF-Untersuchungen

Das physikalische Verhalten der Böden wird weitgehend von der Bindungsintensität des Wassers beeinflusst. Für jede einzelne Probe wurde eine pF-Kurve aufgestellt.

3.1. Es ergibt sich, daß in den unteren Druckbereichen die Kationenbelegung erheblich die Bindungsintensität des Wassers beeinflusst. Sehr hoch ist die Wasserbindung durch Na-, sehr gering dieselbe durch H-.

3.2. Eine starke Abhängigkeit der Bindungsintensität vom Tongehalt ist in allen Druckbereichen zu erkennen.

4. Die Plastizität

4.1. Die Ausrollgrenze

4.1.1. Die Bedeutung der Untersuchung der Ausrollgrenze liegt in der Möglichkeit eine Aussage über die Gefügeausbildung beim Aggregatgefüge zu machen. Ist das Schrumpfungsvermögen eines Bodens bei der Ausrollgrenze kleiner als 10 Vol %, so ist ein Zerfall in Aggregate nicht zu erwarten. Der Boden ist dann bezüglich der Gefügeentwicklung durch Quellung und Schrumpfung als inaktiv zu bezeichnen.

4.1.2. Die Ausrollgrenze korreliert hochsignifikant mit dem Tongehalt:

Bei Tongehalten über 40 % liegt die Ausrollgrenze bei pF 4,0

Bei Tongehalten
um 20 % liegt die Ausrollgrenze bei pF 2,4
Bei Tongehalten
um 10 % liegt die Ausrollgrenze bei pF 2,18
Somit verlieren Tonböden erst beim Welkepunkt ihre
Plastizität, Sandböden dagegen werden schon bei der
Feldkapazität unplastisch.

- 4.1.3. Die Auswirkung der Kationen auf die Ausrollgrenze ist gering. Sie ist in Tonen und Böden unterschiedlich. Eine Deutung konnte auf Grund der Filmtheorie in Verbindung mit der Koagulation gegeben werden.
- 4.1.4. Es wird vorgeschlagen für Untersuchungen in landwirtschaftlicher Sicht den Wert der Ausrollgrenze im pF-Wert anzugeben.
- 4.2. Die Fließgrenze
 - 4.2.1. Die Fließgrenze charakterisiert die obere Grenze der Plastizität. Der Boden beginnt zu zerfließen. Je höher der Wassergehalt bei dieser Grenze ist, umso günstiger ist das Bodengefüge zu beurteilen.
 - 4.2.2. Die Auswirkung der Kationen auf die Fließgrenze wird besonders deutlich, wenn diese in pF angegeben wird. Es ergibt sich, daß bei voller Ca-Belegung die Fließgrenze erst bei pF 0 erreicht ist, also wenn freies Wasser im Boden vorhanden ist. Demgegenüber ist dieser Wert bei mit Na- belegten Proben schon bei der Feldkapazität (pF 2,2) erreicht. Schon 5 % Na- am Sorptionskomplex lassen den Boden bei der Feldkapazität zerfließen. Die Auswirkung der anderen Kationen ist im Bereich der in unseren Böden üblichen Kationengemischen gering. Trotzdem läßt sich eine positive Korrelation zwischen Ca-Ion und der Fließgrenze erkennen, während alle anderen untersuchten Kationen, besonders auch das Mg-Ion, negativ korrelieren. Dies deutet auf eine ungünstige Einwirkung des Mg-Iones hin.

- 4.2.3. Die Korngrößenverteilung zeigt besonders beim Ton eine hochsignifikante positive Korrelation, während sie bei den gröberen Fraktionen negativ ist.
- 4.2.4. Zwischen der Fliegrenze (ausgedrückt in pF) und der Gefügestabilität besteht in Abhängigkeit von der Kationenbelegung und der Korngrößenverteilung folgende Beziehung:

sind in einer Probe weniger als 2,5 % Na
oder weniger als 45 % Ca
oder weniger als 45 % Mg
oder weniger als 25 % H
oder weniger als 45 % mS
oder weniger als 45 % gS

so sind nur dann wasserstabile Gefügeelemente zu erwarten, wenn der pF-Wert der Fließgrenze unter 1,4 liegt.

Liegt der Na-Anteil über 2,5 % Na, so ist dieser Grenzwert pF 2,0.

Haben Proben einen Anteil an Ca von mehr als 45 %
oder an Mg von mehr als 45 %
oder an H von mehr als 25 %
oder an mS von mehr als 45 %
oder an gS von mehr als 45 %

so liegt der Grenzwert bei pF 1,0.

4.3. Plastizitätszahl

- 4.3.1. Die Plastizitätszahl drückt den Feuchtebereich im Boden aus, in dem sich dieser plastisch verhält.
- 4.3.2. Durch Na-Ionen wird die Plastizitätszahl erhöht, H-Ionen bewirken im Gegensatz zu den in der Literatur bekannten Ergebnissen geringere Plastizitätszahlen.
- 4.3.3. Der Tongehalt ist sehr hoch positiv mit der Plastizitätszahl korreliert. Zu anderen Korngrößen sind die Beziehungen nicht gesichert.

5. Adhäsion

5.1. Die Bindung innerhalb des Bodengefüges durch die Bodenkolloide wird durch die Messung der Adhäsion beurteilt. Mit zunehmender Feuchte nimmt die Adhäsion ab.

5.2. Drückt man das Ergebnis der Messungen in % Wasser bei sehr geringer Adhäsion (50 g/cm^2) aus, so ergibt sich für die mit Na- belegte Probe die höchste Feuchte, also der günstigste Wert. Gibt man jedoch die Adhäsion in g/cm^2 bei entsprechenden pF-Werten an, so zeigen die mit Ca- belegten Proben bei weitem die günstigsten Ergebnisse. Bei dem pF-Wert 2,18 (Feldkapazität) hat der Ca-Ton z.B. eine Adhäsion von 195 g/cm^2 , der Na-Ton dagegen eine solche von 0 g/cm^2 . Die Kolloide mit hohem Na-Anteil können also bei dieser Feuchte nicht mehr als Bindemittel wirken. In dieser Betrachtungsart ist das Ca-Ion stark positiv zur Adhäsion korreliert, geringere positive Wirkung zeigen Mg- und K-Ionen, während das Na- und das H-Ion negative Tendenzen aufweisen.

5.3. Zum Tongehalt besteht eine sehr hohe positive Korrelation, während sie zu allen anderen Korngrößen-Fractionen negativ ist, sowohl bei der Betrachtung des Wassergehaltes als auch über die Bindungsintensität.

6. Aggregatbildung (Teilchen $< 2\mu$ dispergiert in Wasser), Gefügefaktor

6.1. Mit dieser Methode soll die Aggregation im Sinne der Koagulation erfaßt werden. Je kleiner der Anteil an Teilchen $< 2\mu$ in Wasser ist (bei gleichem Tongehalt), umso stärker ist die Koagulation ausgeprägt.

- 6.2. In den reinen Proben wirkt das H-Ion sehr stark flockend (geringster Anteil an Teilchen $< 2\mu$), ebenfalls bewirkt das Mg- und Ca-Ion eine Flockung, während K- und Na-Ionen eine starke Dispergierung hervorrufen. In den Kationenmischungen wirken nur Ca- und Mg-Ionen deutlich flockend, während die Substanzen durch Na-Ionen ausgesprochen dispergiert werden. Die Wirkung von K- und H- sind nicht gesichert.
- 6.3. Zum Tonanteil besteht eine positive Korrelation, während sie zu den gröbereren Fraktionen negativ ist.
- 6.4. Die Ergebnisse des Gefügefaktors entsprechen denen der Teilchen $< 2\mu$
7. Schrumpfung (Siehe auch Punkt 8)
- 7.1. Schrumpfung und Quellung spielen in der Gefügedynamik eine bedeutende Rolle. Die Ergebnisse sollten stets in Verbindung mit der Wasserbindungsintensität gesehen werden. Für die Beurteilung der Gefügeentwicklung ist das Schrumpfungsvermögen von der dem pF-Wert 2,18 entsprechenden Feuchte aus zu beurteilen.
- 7.2. Na-Ionen korrelieren hochsignifikant positiv zur Volumenschrumpfung, Ca-, Mg-, K- und H-Ionen dagegen sind in ihrer Wirkung nicht signifikant, zeigen aber eine negative Tendenz.
- 7.3. Zum Tongehalt besteht eine hochsignifikante positive Korrelation. Die Regression folgt einer quadratischen Gleichung. Von dieser Kurve weichen lediglich Proben mit einem Feinsandgehalt von mehr als 60 % oder einem Mittelsandanteil von mehr als 45 % zur negativen Seite ab. Geringfügige Abweichungen

zur positiven Seite erfolgen, wenn der Quotient $\frac{T}{fU + gU}$ kleiner als 0,5 ist oder bei Na-Gehalten höher als 80 %. Die Fraktionen Feinschluff bis Grobschluff zeigen eine nicht gesicherte positive Tendenz. Die gröberen Fraktionen sind schwach negativ korreliert.

- 7.4. Die Schrumpfung verläuft in allen Fällen anisodimensional. Die vertikale Schrumpfung ist immer größer als die horizontale. Die Anisotropie wird mit zunehmender Feuchte größer. So beträgt bei pF 4 die horizontale Schrumpfung nur 80 % von der in vertikaler Richtung, bei pF 2,0 sogar nur 60 - 70 %. Bei einem Tonanteil kleiner als 25 % erhöht sich die Anisotropie ebenso bei Proben mit einer Fließgrenze unter 14 % erheblich. In gleicher Richtung wirken auch Na- und K-Ionen. Dieses anisotrope Schrumpfen führt zu Verdichtungen. Bei geringerem Tonanteil konnte als Grund für dieses Verhalten ein Zusammensacken, bei höherer Na-Belegung eine plastische Verschiebung der Teilchen erkannt werden.

8. Rißbildung

- 8.1. Aus dem Rißbildtyp kann die Neigung eines Bodens zur Gefügeausbildung (durch wechselnde Quellung und Schrumpfung) abgeleitet werden.
- 8.2. 3 Hauptrißbildtypen, die sich in ihrer Rißentwicklung unterscheiden, werden unterschieden. Bei dem Typ I entstehen die Schrumpfungsrisse im plastischen Bereich bei großer Feuchte (pF 3,2). Die unregelmäßig ausgebildeten Risse lassen eine geringe Spannung innerhalb des Systems erkennen. Die Adhäsion bei Rißbeginn ist niedrig. Die relativ große Dicke der "Inseln" läßt erkennen, daß der

Zerfall ohne größere plastische Verschiebung der Teilchen erfolgte.

Im Typ III dagegen beginnt die Substanz erst dann zu reißen, wenn die Abtrocknung bis auf pF 4,4 erfolgte. Im Gegensatz zu dem Typ I, finden erhebliche plastische Verschiebungen der Teilchen statt, wie aus den geringen "Inselhöhen" zu ersehen ist. Die großen Spannungen innerhalb der Substanz sind an den glatten Rißwandungen zu erkennen. Auch die hohe Adhäsion bei Rißbeginn kennzeichnet die Spannung im System. Der Typ II steht zwischen diesen beiden Typen.

- 8.3. Bei Tongehalten unter 20 % treten keine Risse auf, ebenso wenn die Volumenschrumpfung bei pF 2,18 kleiner als 20 % ist. Bis zu einem Tongehalt von etwa 35 % ist die Rißausbildung sehr schwach ausgeprägt.
- 6.4. Die Auswirkung der Kationen auf die einzelnen Rißtypen ist unterschiedlich. Im Typ II und Typ III wird durch Ca-Ionen die Anzahl der kleinen Risse vermindert. Dies deutet auf eine festere Bindung hin.

Mg-Ionen erhöhen im Typ II die Zahl der kleinen Risse, während sie sie im Typ III vermindern. K-Ionen erhöhen im Typ II und III die kleinen Risse, Na-Ionen erhöhen im Typ II und vermindern sie im Typ III. Durch H-Ionen wird im Typ III die Anzahl der kleinen Risse erhöht.

Daraus kann geschlossen werden, daß Ca-Ionen im Typ II durch Kohäsionserhöhung und H-Ionen im Typ III durch Verminderung der Kohäsion gefügebessernd wirken.

- 8.5. Der Typ I tritt vorwiegend bei Tongehalten unter 45 % auf, während im Typ II und III 50 - 90 % Ton beobachtet werden. Im Typ I wird durch zunehmenden Tonanteil die Zahl der kleinen Risse vermindert, während sie im Typ III zunimmt.

9. Sedimentvolumen

9.1. Für die fluviatile Verlagerung von Sedimenten spielt das Sedimentvolumen eine Rolle.

9.2. Untersucht wurde das Sedimentvolumen sowohl in destilliertem Wasser, als auch in n/10 HCl, als auch in einer der Kationenbelegung entsprechenden Salzlösung. Weiterhin wurde in HCl und in dem Lösungsmittel der Schwellenwert ermittelt.

9.3. Na- und K-Ionen ergaben in allen Fällen sowohl das höchste Sedimentvolumen, als auch den höchsten Schwellenwert. H-Ionen hatten meist die kleinsten Werte, während Ca- und Mg-Ionen sich nur unwesentlich unterschieden.

10. Gefügestabilität

10.1. Gemessen wurde die Gefügestabilität an künstlich hergestellten Gefügeelementen im Naßsiebverfahren. Die Ergebnisse gelten für die nach dieser Art hergestellten Gefügeelemente.

10.2. Während durch das Mg-Ion die Stabilität der Gefügeelemente stark positiv beeinflusst wird, ist durch die Ca-Ionen eine zwar positive aber nicht gesicherte Korrelation zu erkennen. K- und Na-Ionen korrelieren hochsignifikant bis signifikant negativ. Die Wirkung des H-Iones zeigt eine nicht signifikante negative Tendenz.

10.3. Zum Tonanteil ist die Korrelation positiv, zu allen anderen Korngrößenfraktionen bestehen keine Abhängigkeiten.

11. Durchlässigkeit für Wasser (k_f -Wert)

- 11.1. Da die Wasserdurchlässigkeit wesentlich von der Gefügeausbildung abhängt, sind die hier gefundenen Ergebnisse mit Vorsicht zu betrachten. Dies trifft besonders für die tonreicheren Proben zu. Trotzdem sind einige interessante Beobachtungen gemacht worden.
- 11.2. Während Ca- und H-Ionen die Durchlässigkeit im positiven Sinn beeinflussen, ist die Wirkung des Mg-Iones bei der Mischbelegung hochsignifikant negativ. Ebenfalls negativ wirken, wie zu erwarten war, die Na- und die K-Ionen. In der reinen Mg-Probe entspricht die Durchlässigkeit etwa derjenigen der reinen Ca-Probe.
- 11.3. Bei der Auswirkung der Korngrößen konnte beobachtet werden, daß die Ergebnisse der reinen Feinschluff- und Mittelschluff-Proben in dem Größenbereich der Ca-, Mg- und H-Tone liegen. Schon der Grobschluff zeigt eine wesentlich höhere Wasserdurchlässigkeit. Zum Ton besteht eine hochsignifikante negative Korrelation. Zum Grobsand ist die Korrelation hochsignifikant positiv. Alle anderen Fraktionen zeigen keine Abhängigkeit.

12. Kapillarität

- 12.1. Für die Wassernachlieferung aus dem Grundwasser spielt die Kapillarität eine besondere Rolle. Entscheidend für die Wasserversorgung der Pflanze ist neben der absoluten Steighöhe besonders auch die Nachlieferungsgeschwindigkeit.

- 12.2. In dem mit H-Ionen belegten Boden wird sowohl die größte Steighöhe, als auch die größte Steiggeschwindigkeit beobachtet. Dies kann mit der stärkeren Koagulation des H-Bodens erklärt werden. Ca- und Mg-Ionen unterscheiden sich in ihrer Wirkung nicht, liegen aber erheblich niedriger. In dem Na-Boden ist durch die starke Quellung sowohl die Steighöhe, als auch die Steiggeschwindigkeit erheblich gehemmt.
- 12.3. Die Endsteighöhen der reinen Korngrößengruppen entsprechen der Erwartung, wenn auch für Feinschluff und Mittelschluff die Endwerte noch nicht erreicht wurden. Die geringe Steiggeschwindigkeit des Feinschluffes zeigt sich darin, daß nach 5 Stunden der Anstieg noch nicht 10 cm erreicht hat. Auch im Mittelschluff ist die Geschwindigkeit noch gehemmt. Während die Endsteighöhen für die gröberen Fraktionen der abgewandelten Kapillargleichung folgen, ist dies für die feineren Fraktionen nicht der Fall. Hier stört die Quellung die Ergebnisse wesentlich. Angenäherte Werte sind mit der ZUNKER'schen Gleichung zu erhalten.
- 12.4. Soll der Benetzungswiderstand mit der Apparatur von ENSLIN gemessen werden, so ist von der lufttrockenen Probe auszugehen und die Beobachtungszeit sehr kurz zu halten, damit nicht Quellungserscheinungen die Ergebnisse überdecken.
- 12.5. Nach unseren Untersuchungen konnte das Mg-, Ca-, H- und Na-Ion als benetzungsmindernd erkannt werden, während das K-Ion die Benetzungsfähigkeit fördert.
- 12.6. Im Bereich höherer Feuchte wurde durch diese Methode die positive Wirkung des Na- und des K-Iones auf die Quellung beobachtet, Ca-, Mg- und H-Ionen wirkten quellungsmindernd.

Aus den vorliegenden Untersuchungsergebnissen ist zu entnehmen, daß im Bereich der bei unseren Böden vorkommenden Kationenbelegungen das Na-Ion in allen Fällen ungünstige Bodeneigenschaften verursacht. Die gute Wirkung des Ca-Ions ist in allen Fällen zu erkennen. H-Ionen bewirken zwar eine stärkere Koagulation als alle anderen Kationen, beeinflussen aber die Gefügestabilität negativ. Die Wirkung des K-Ions ist gering. Das Mg-Ion ist in seiner Auswirkung unterschiedlich zu beurteilen. Bei reiner Mg-Belegung wirkt es in allen Fällen wie das Ca-Ion, in der Mischbelegung weicht es dagegen bei der Fließgrenzbestimmung und der k_f -Untersuchung ab und läßt dort eine negative Tendenz erkennen. Dies bestätigt die Beobachtungen in Marschböden.

Die Auswirkung der Korngrößenverteilung läßt erkennen, daß die Tonsubstanz alle Faktoren, die die Gefügebildung und die Bindung im Boden charakterisieren, günstig beeinflusst. Auf die Wasserdurchlässigkeit wirkt der Ton bei dieser Versuchsanstellung ungünstig ein. Bei dieser Beurteilung muß aber berücksichtigt werden, daß hier mit gestörtem Gefüge gearbeitet wurde.

Weiterhin ist aus vorliegender Arbeit zu erkennen, daß die Aussagekraft aller hier verwendeten Untersuchungsverfahren hoch ist. Zwischen den verschiedenen Methoden zeigen sich recht hohe Korrelationen. Für jeden Untersuchungszweck ist eine dieser Methoden zweckmäßig. Das Zusammenspiel der Bodenfaktoren kann mit ihrer Hilfe erläutert werden.

An gut definierten Proben wurden sehr viele Untersuchungsverfahren angewendet und damit alle wesentlichen Bodenfaktoren von einer gleichen Basis aus erfaßt. Die hier gemachten Erfahrungen gelten für die untersuchten Proben. In der Literatur finden sich nur wenige exakte Angaben über das physikalische Verhalten natürlich gewachsener Böden. Diese und die eignen praktischen Erfahrungen stimmen mit den Ergebnissen überein.

14. Schrifttum

1. AKHROMEIKO, A.M., 1934: Compt. Rend. Conf. Int. I Com.
(Versailles) 109
2. ALTEN, F. und KNIPPENBERG, E., 1933: Z. Pflanzenernähr.,
Düng., Bodenkunde A 31 205-208, (zit. in 48)
3. ANDERSON, M.S., 1929: J. agric. Res. (England) 38
(zit. in 27)
4. ANDRIANOW, P.I., 1947: Moskau, Die Aggregatstabilität und
ihre Bestimmungsmethoden (zit. in 18)
5. ATTERBERG, A., 1905: Chemische Zeitung (Berlin) 29
(zit. in 27)
6. ATTERBERG, A., 1911: Int. Mitt. Bodenkunde 1, 10-43
Die Plastizität der Tone.
7. ATTERBERG, A., 1912: Int.-Mitt. Bodenkunde 2, 149-189
Die Konsistenz der Böden.
8. BALLEMBERGER, R., 1915: Bericht des kgl. Ung. Geologischen
Institutes (Budapest) A magy Kir. Földtani
Intézet evi jelentése (zit. in 27)
9. van BAVEL, C.H.M., 1950: Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 14,
20-23, Mean weight diameter of soil aggregates
as a statistical index of aggregation.
10. BAVER, L.D., 1928: J. Am. Soc. Agron 20, 921-941
The relation of exchangeable cations to the
physical properties of soils.
11. BAVER, L.D. and WINTERKORN, 1935: Soil Sci., 40, 403-419
Sorption of liquids by soil colloids II.
Surface behavior in the hydration of clays.
12. BAVER, L.D., 1956: Soil Physics, Third Edition, John Wiley
and Sons, Inc., New York Chapman and Hall,
Limited, London
13. BEIHEFT zur Geolog. bodenkundl. Karte 1 : 5 000
Blatt Hatzum NLF 1958
14. BLACKMORE and MILLER, 1961: America Proc. S. 169,
Tactoid size and osmotic swelling in
calcium montmorillonite.
15. BLANK, E., 1930: Handbuch der Bodenlehre, Band VI
Die physikalische Beschaffenheit des Bodens,
Verlag Julius Springer, Berlin

16. van BLUELEN, 1898: Z. angew. Chemie, 18, 98, (zit. in 7)
17. BOGUSLAWSKI, v.K. und LENZ, K.O., 1958 und 1959:
I Mitt. Z. Acker u. Pflanzenbau 106, 245-256
II Mitt. Z. Acker u. Pflanzenbau 109, 34-48
Untersuchungen über mechan. Widerstandsmessungen mit einer Rammsonde auf Ackerböden.
18. BREBURDA, J., 1963: Gießener Abhandlungen zur Agrar- und Wirtschaftsforschung des europ. Ostens, Reihe I: Bodenphysikalische Methoden in den osteuropäischen Ländern.
19. DE BOODT, M., DE LEENHEERT, L., DON KIRKHAM 1961:
Soil Sci. 91, 138-146
Soil aggregate stability indexes and crop yields.
20. BUSCH, K.F., 1956: Wasserwirtschaft - Wassertechnik
6. Jhrg./Heft 5, 150-155
Die Kapillarität des Bodens.
21. CURINI - GALLETTI, A., 1934: Annali di Roma-Stat. Spec. Agr. di Modena
(Neue Folge) 3 (zit. in 27)
22. CURINI - GALLETTI, A., 1936: Annali di Roma-Stat. Spec. Agr. di Modena
(Neue Folge) 5 (zit. in 27)
23. CZERATZKI, W., 1957: Institut für den wissenschaftlichen Film, Film C 725/1956, Göttingen 1957.
Bodenstrukturbildung bei wechselnder Befuchtung.
24. CZERATZKI, W. und FRESE, J., 1956: VI Congr. internat. de la Sci du Sol., Paris Bd. B, 173-178
(zit. in 37)
25. CZERATZKI, W. 1961: Vortrag anl. einer Tagung der D.F.G. Gießen
26. DEMOLON, A. und BASTISSE, E., 1934: Trans. Ist Com. Int. Soc. Soil Sci., Versailles 47-64,
Sur la dispersion des colloides argileux.
27. DIGLERIA, KLIMES-SZYK, DVORACSEK, 1962: Bodenphysik und Bodenkolloidik
VEB Gustav Fischer Verlag, Jena
28. DEUTSCHE NORMEN, Fachnormenausschuß Bauwesen 1958:
DIN 4016 (Gelbdruck)

29. DEUTSCHE NORMEN, Fachnormenausschuß Wasserwesen 1963:
DIN 4220 (Vornorm)
30. DEUTSCHE NORMEN, Fachnormenausschuß Wasserwesen
DIN 4222 (in Vorbereitung)
31. DVORACSEK, M., 1953: Agrokemia es Talajtan (Budapest)
(zit. in 27)
32. EHRENBERG, P., 1922: Die Bodenkolloide, Dresden - Leipzig
33. ENSLIN, O., 1933: Chem. Fabrik, Berlin 6, 147-148
Über einen Apparat zur Messung der Flüssigkeitsaufnahme von quellbaren und porösen Stoffen und zur Charakterisierung der Benetzbarkeit.
34. FAUSER, O., 1959: Kulturtechnische Bodenverbesserungen,
Sammlung Göschen Nr. 691/692
Walter de Gruyter und Co.
35. FISHER, R.A., 1926: J. Agr. Sci. 16, 492-505
On the capillary in an ideal soil;
correction of formulas by W.B. HAINES.
36. FRANKE-STUTTGART, H., 1950: Lexikon der Physik,
Franckh'sche Verlagshandlung Stuttgart
37. FRANZ, H., 1960: Feldebodenkunde, Verlag Georg Fromme
und Co., Wien und München
38. GARDNER, R., 1945: U.S.D.A. Techn. Bull., No. 902
Some soils properties related to the
sodium salt problem in irrigated soils.
39. GRIM, R.E., 1962: Applied clay mineralogy,
Mc Graw-Hill Book Company, inc.
New York, Toronto, London
40. GUIDICI, P., 1955: Annali d. Sper. Agr. Roma
(neue Folge) 9, 1065 (zit. in 27)
41. HÄUSLER, H.E., 1951: Geologie und Bauwesen, 18, Heft 3
Eine Notiz zur Ribbildung an feuchten
Peliten.
42. HAINES, W.B., 1923: J.A. of Agr. Sci., 13, 296
The volume change associated with
variations of water content in soil.
43. HAINES, W.B., 1925: J. of Agr. Sci., 15, 529-535
Studies in the properties of soils.
II. A note on the cohesion developed by
capillary forces in an ideal soil.

44. HANNEMANN, W., 1962: Z. Acker- u. Pflanzenbau, 114, 3, 237-247
Der Bodenwiderstand in Abhängigkeit vom Bodenverband auf Lößboden der Pfalz
45. HARTGE, K., 1959: Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde, 85 (130) 214
Ursachen der Verbesserung der Struktur-
stabilität von Böden durch Kalkung.
46. HARTGE, K., 1962: Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde, 94 (139) 147-154
Die Erfassung der Kontinuität der groben Poren aus ihrem Anteil im Boden und dem Permeabilitätskoeffizienten.
47. HENIN, 1938: Theses Paris
Etude physico-chimique de la stabilité de structure des terres.
48. HERRMANN-THUN, 1955: Methodenbuch, Band I, Neumann Verlag, Radebeul u. Berlin
49. HOFFMANN, 1962: Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Neue Folge, Heft 50.
Die Anwendung hygroskopischer Salze bei der mechanischen Bodenverfestigung.
50. HORMIGHAUSEN, E., 1958: Z. Acker- u. Pflanzenbau, 105, 61-88, Untersuchung über die Aggregation von Böden und ihre Kennzeichnung durch Schlagfestigkeitsmessungen.
51. HUSEMANN, C., 1960: Z. für Kulturtechnik, Heft 3, 180-183
Ein Beispiel langjährig bewährter Organisation zur Planung und Durchführung landeskultureller Aufgaben.
52. HUSEMANN, C., 1959: Der Kulturtechniker, Juli-August, 47. Jahrgang,
Die Standortsuntersuchung und ihre Auswertung unter besonderer Berücksichtigung der meliorationsbedürftigen Marsch.
53. HUSEMANN, C., 1957/58: Wasser und Nahrung, 3, 6-10
Die kulturtechnische Beurteilungsgrundlage bei Bodenmeliorations- und Bewässerungsplanungen.
54. HUSEMANN, C., WOLKEWITZ, H., PAHLKE, K., 1962: Z. für Kulturtechnik, 4, 226-246
Untersuchungen über die Auswirkung der Untergrundlockerung und -düngung auf ton- und schluffreichen Marschböden.

55. JANAKT, H., 1934: Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde A 19, 281-309
untersuchungen über die Benetzungswärme des Bodens.
56. JOHANSEN, 1914: Int. Mitt. Bodenkunde, 4, 418
Die Konsistenzgrenzen der Mineralböden.
57. KACINSKIJ, N.A., VADJUNINA, Z.A., 1950: Moskau
Versuch einer physikalischen Bodenkennzeichnung am Beispiel des Zentral-Urals.
(zit. in 18)
58. KACINSKIJ, N.A., OSIN, D.D., DOLGOPOLOVA, N.N.,
1937: Moskau 17 (zit. in 27)
59. KATZ, 1933: Trans. Faraday Soc. 29, 279-300
The laws of swelling.
60. KÄGL, L., MTA 1954: Agrártud. Oszt. Közl (Budapest) 3
(zit. in 27)
61. KOENIGS, F.F.R., 1961: Dissertation Wageningen.
The mechanical stability of clay soils as influenced by the moisture conditions and some other factors.
62. KOEPF, H., 1960: Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde, 89, 159-170
Zur Strukturbildung verschiedener Böden durch Schrumpfung.
63. KOEPF, H., 1963: Z. für Kulturtechnik und Flurbereinigung, 4, 93-101
Die Kennzeichnung des Bodengefüges im Felde.
64. KOEPF, H., 1956: Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde, 74
Apparatur zur Bestimmung der Krümelbeständigkeit.
65. KUNTZE, H., 1962: Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde, 96 (141) 97-105
Die Messung des Quellungsdruckes von Marschböden.
66. KURON, H., HANNEMANN, W., 1948: Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde, 40 (85)
Der Einfluß des Kalkes auf die mechanischen Eigenschaften der Bodenkolloide.

67. KURON, H., 1948: Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde, 42 (87) Heft 2, 140-148
Die Frage der Plastizität der Böden und ihrer praktischen Bedeutung.
68. DE LEEUW, L., 1959: Landwirtsch. Forsch., Sonderheft 12, 41-49
Praktische Probleme und Feldversuche über die Verbesserung der Bodenstruktur und ihre Beurteilung im Felde.
69. LINSEIS, 1954: Sprechsaal für Keramik, Glas, Emaille, 87, Nr. 9
Beitrag zur Messung der Verarbeitungseigenschaften von keramischen Massen und Rohstoffen.
70. LOMTADSE, W.D., 1955: Bodenphysikalisches Praktikum
VEB Verlag Technik, Berlin
71. LÜTTMER, J. und JUNG, J., 1955: Notizblatt Hess. Landesamt f. Bodenforschung, Wiesbaden 83, 282-291
Über die Eignung des Natriumpyrophosphates zur Dispergierung bei der mechanischen Bodenanalyse.
72. MATTSON, S., 1929: Soil Sci. 28
The laws of soil colloidal behavior.
73. MATTSON, S., 1939: Soil Sci. 32, 343-365
Laws of soil colloidal behavior VI Amphoter behavior.
74. MATTSON, S., 1932: Soil Sci. (Baltimore) 33, 301
(zit. in 27)
75. MEHLICH, A., 1948: Soil Sci. 6, 429-445
Determination of cation and anion exchange properties of soils.
76. METHODENBUCH 1955: Band I, Die Untersuchung von Böden
Herrmann, R., Thun, R., Knickmann, E.
77. MITSCHERLICH, E.A., 1955: Bodenkunde
Max Niemeyer Verlag, Halle/Saale
78. MÜCKENHAUSEN, E., 1962: Entstehung, Eigenschaften und Systematik der Böden der Bundesrepublik Deutschland
DLG Verlag, Frankfurt/M.

79. MÜCKENHAUSEN, E., 1962: Z. für Kulturtechnik, 3. Jahrgang, S. 321
Grundsätzliches zum Aufbau des Bodens und dessen Beurteilung im Felde.
eine Einführung.
80. MÜCKENHAUSEN, E., 1963: Z. für Kulturtechnik u. Flurbereinigung, 2, 102-114
Form, Entstehung und Funktion des Bodengefüges.
81. MÜLLER, W., 1954: Dissertation Gießen
Untersuchungen über die Bildung und die Eigenschaften von Knickschichten in Marschböden.
82. MUDRA, A., 1958: Statistische Methoden für Landwirtschaftliche Versuche.
Paul Paray, Berlin und Hamburg
83. NIKIFFOROF, 1941: Soil Sci. 52 (zit. in 37)
84. PANKOW, A.M., 1934: Pedology Leningrad
Die Vorwaage von Schopper als kombinierter Apparat zur Bestimmung der Klebrigkeit und Härte der Ober- und Unterböden.
85. PUCHNER, 1913: Int. Mitt. für Bodenkunde
Vergleichende Untersuchungen über die Kohäszenz verschiedener Bodenarten.
86. PFEFFERKORN, 1942: Ziegelwelt, 73, S. 243
Zur Kenntnis der Plastizität der Tone und Kaoline.
87. RAMSAUER, B., 1952: Mitteilungen aus dem Bundesversuchsinstitut für Kulturtechnik und Technische Bodenkunde Petzenkirchen
Nr. 8, Selbstverlag.
Die vereinfachte Behandlung der Strömungsprobleme bei Entwässerungen durch Dränung und offene Gräben nach Hooghoudt.
88. RUSSELL, E.W., 1934: Phil. Trans. 233 A, 361
The interaction of clay with water and organic liquids as measured by specific volume changes and its relation to the phenomena of crumb formation in soils.
89. RUSSELL, J.C., 1928: Am. Soil Survey Assoc. Bull 9
Variations in the B horizon.

90. SCHACHBASSIAN, 1890: Forschung auf dem Gebiete der Agrikultur-physik, 13, S. 193
91. SCHAFFER, A., 1961: Arbeiten der Landwirtschaftlichen Hochschule Hohenheim
Veränderungen der Bodenstruktur als Folge ackerbaulicher Maßnahmen.
92. SCHARRER u. HOFFMANN, 1958: Bericht Deutsche Keramik Gesellschaft
Untersuchungen über die Plastizität der Tone und Kaoline.
93. SCHEFFER u. SCHACHTSCHABEL, 1960: Lehrbuch der Agrikulturchemie und Bodenkunde
I. Teil Bodenkunde
Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart
94. SCHILLER, H., 1953-55: Landwirtschaftlich-chemische Bundesversuchsanstalt Linz
Tätigkeitsbericht, S. 98
Die jahreszeitliche Verschlammungsneigung von zwei Böden aus dem oberösterreichischen Molassegebiet.
95. SCHÜBLER, O., 1838: Grundsätze der Kulturchemie, 2, 72 (zit. in 15)
96. SCHULTZE-MUHS, 1950: Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten
Springer Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg
97. SCHUMACHER, W., 1864: Die Physik des Bodens in ihrer theoretischen und praktischen Beziehung zur Landwirtschaft - Berlin
98. SCHUYLENBORGH, van J., en VEENENBOS, J.S., 1951: Landb. Tijdschr. 63 ste J. Nr. 11, 709
Over de invloed van magnesium op de structuur van sedimenten.
99. SEKERA und BRUNNER, A., 1943: Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde, 29, 169-212
Beiträge zur Methodik der Gareforschung.
100. SPRINGER, U., 1955: Handbuch der landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethoden.
Neumann Verlag, Radebeul und Berlin
101. TERZAGHI, C., 1926: Pub. Roads 7, 153-162
Simplified soil tests for subgrads and their physical significance.

102. TERZAGHI, C., JELINEK, 1954: Theoretische Bodenmechanik
Springer Verlag, Berlin, Göttingen,
Heidelberg
103. TRACUK, 1938: (zit. in 27)
104. VAGELER, P. u. ALTEN, F., 1931: Z. Pflanzen-
ernährung A 22, 46
Böden des Nil und Gash III
105. VAGELER, P., 1932: Der Kationen- und Wasserhaushalt
des Mineralbodens.
Berlin, Verlag Julius Springer
106. VEENENBOS, J.S., 1950: Versl. Landb. Onderz. 55/12
De Bodengesteldheid van het gebied tussen
Lemmeren Blokzijl in het randgebied van
de Nord-Ost-Polder.
107. VERWEY and OVERBEEK, 1948: Elsevier Amsterdam
Theory of the stability of lyophobic
colloids.
108. VILJAMS, R.V., Talajtan (zit. in 27)
109. WHITE, W.A., 1955: Ph. D. thesis University of Illinois
Water sorption properties of homoionic
110. WICHTMANN, H., 1955: Z. Pflanzenernähr., Düng., Boden-
kunde, 71, S. 232
Untersuchungen zur Frage der Aggregatsbin-
dekräfte in lufttrockenen Bodenkrümeln.
111. WOLF, K.L., 1957: Physik und Chemie der Grenzflächen.
Springer Verlag, Berlin, Göttingen,
Heidelberg
112. WOLKEWITZ, H., 1960: Z. für Kulturtechnik, S. 162-179
Untersuchungen über die Auswirkung der
Kationenbelegung auf die physikalischen
Eigenschaften eines Mineralbodens.
113. WOLKEWITZ, H., 1953: Dissertation, Gießen
Über nichtbiologische Faktoren der Struk-
turbildung von Böden. Die Bröckelung von
feuchten Bodenkolloiden beim Trocknen.
114. WOLKEWITZ, H., 1958: Z. Pflanzenernähr., Düng.,
Bodenkunde, 82, 17-33
Rißbilder trocknender Tone und ihre
Deutung.

115. WOLKEWITZ, H., 1963: Vortrag anl. der Bodenkundlichen Tagung in Würzburg 1963
Die Bedeutung der Adhäsion für die Gefügebildung des Bodens. (im Druck)
116. WOLKEWITZ, H., 1959: Der Kulturtechniker
47, Juli/August, 37-50
Die Weiterentwicklung des Verfahrens der pF-Untersuchung zur Feststellung der Bindungsintensität im Boden.
117. WOLKEWITZ, H., 1962: Z. für Kulturtechnik, 3, 143-146
Methode zur Bestimmung der Bindungsintensität des Wassers im Boden - Diskussion der Kennwerte.
118. ZUNKER, F., 1930: Handbuch der Bodenlehre, Band VI, herausgegeben von E. Blank
Die physikalische Beschaffenheit des Bodens.
Verlag Julius Springer, Berlin

Anlage

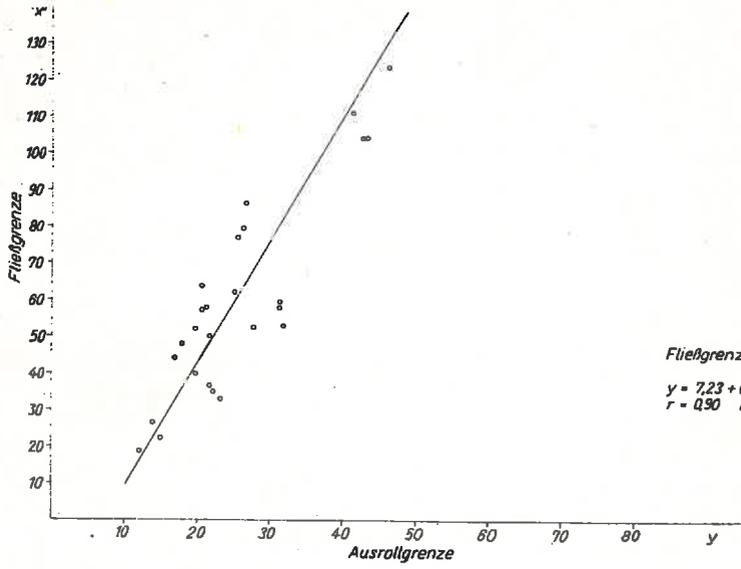
Darstellung des Vergleiches der Ergebnisse
verschiedener Untersuchungsmethoden.

Aufgenommen sind nur die hochsignifikanten bzw. signifikanten Ergebnisse.

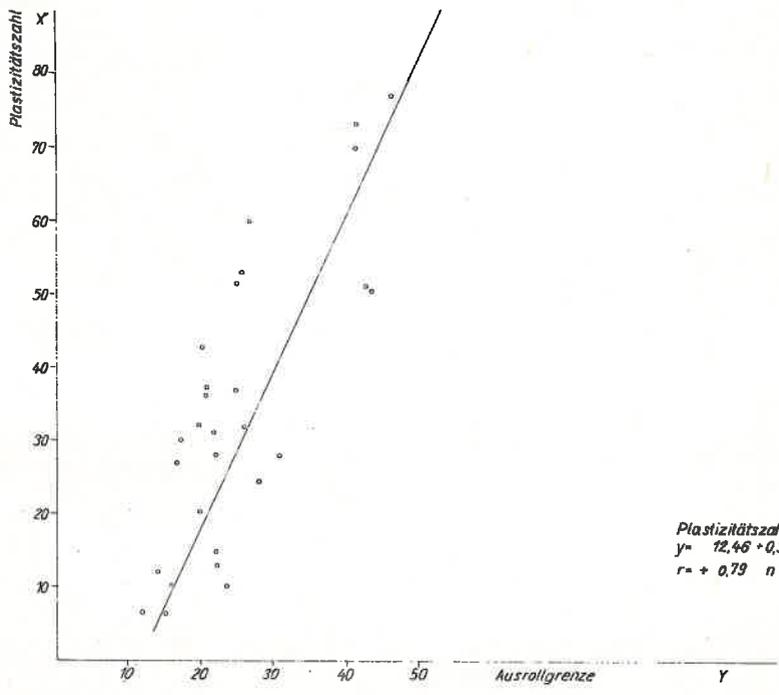
Aus der Übersichtstabelle ist die Nr. der gewünschten Grafik zu entnehmen. Abweichende Ergebnisse sind durch besondere Symbole gekennzeichnet. Die jeweilige Proben Nr. ist zur Erklärung angegeben. Weitere Erklärungen siehe Text der Arbeit.

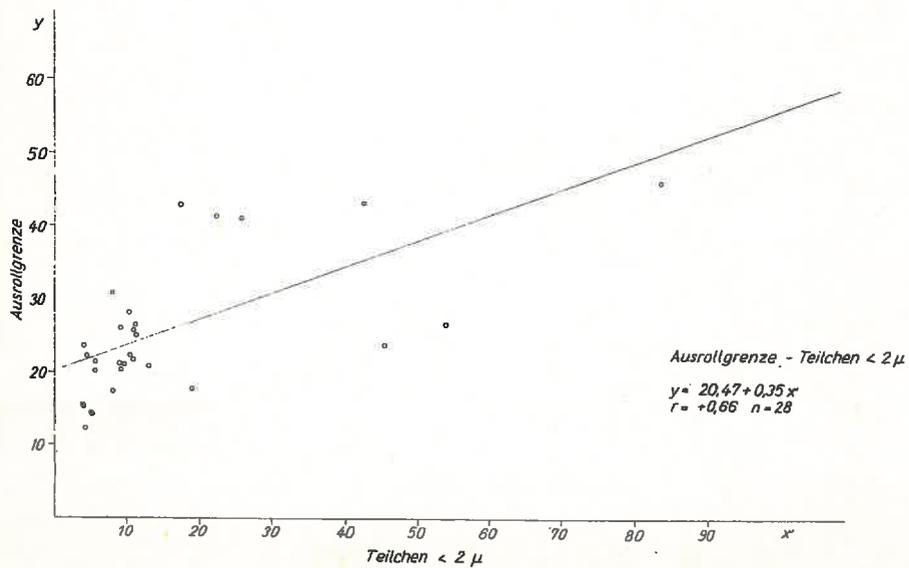
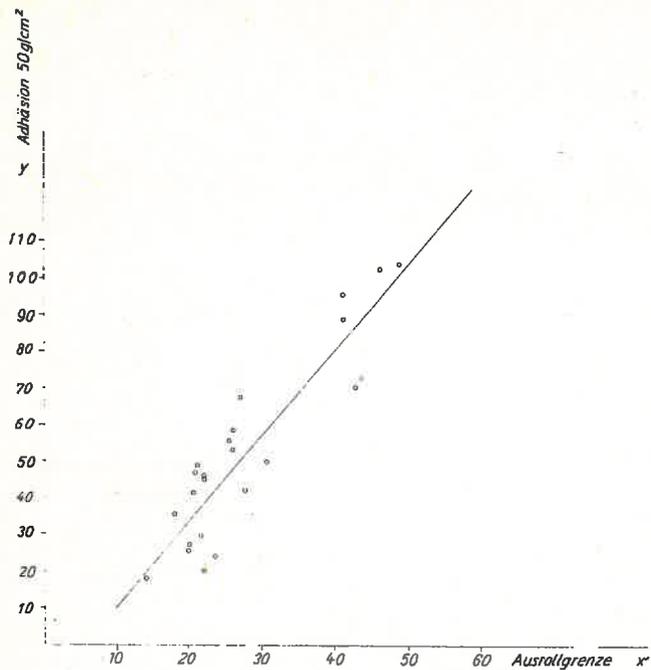
Ausrollgrenze											
Fließgrenze									1		
Plastizitätszahl									2		
Adhäsion							13	7	3		
Teilchen $< 2 \mu$						17	14	8	4		
Gefügefaktor						22	18	9			
Flockung						23					
Volumenschrumpfung					28	24	19	15	10	5	
Rißbildung							20		11		
Sedimentvolumen			30			27	25				
Gefügestabilität		31		29			26	21	16	12	6

Nr. 1

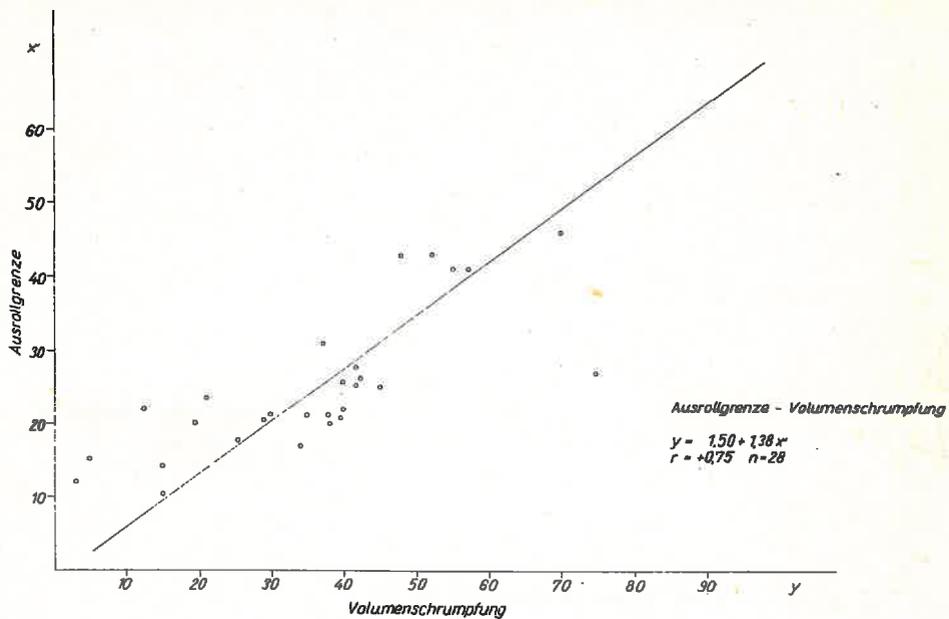


Nr. 2

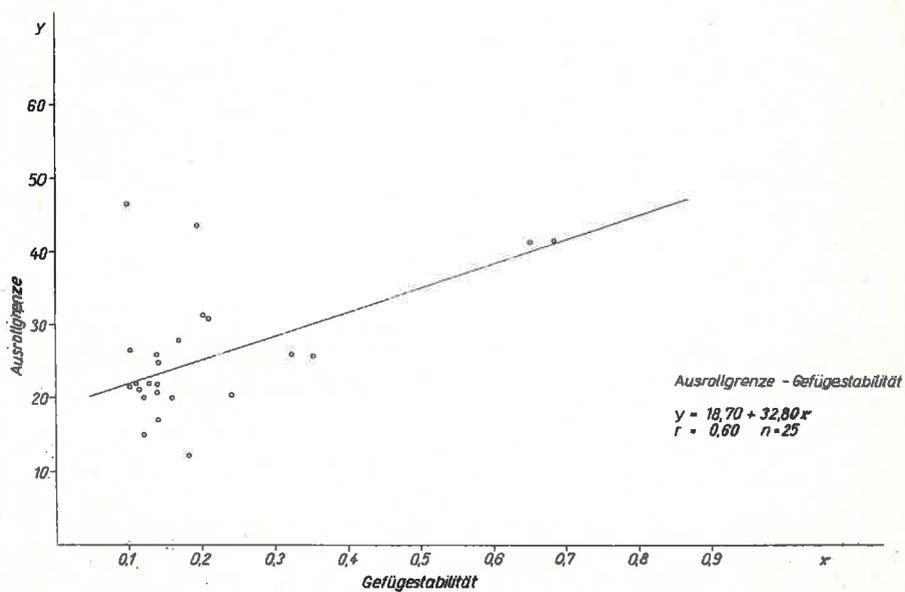


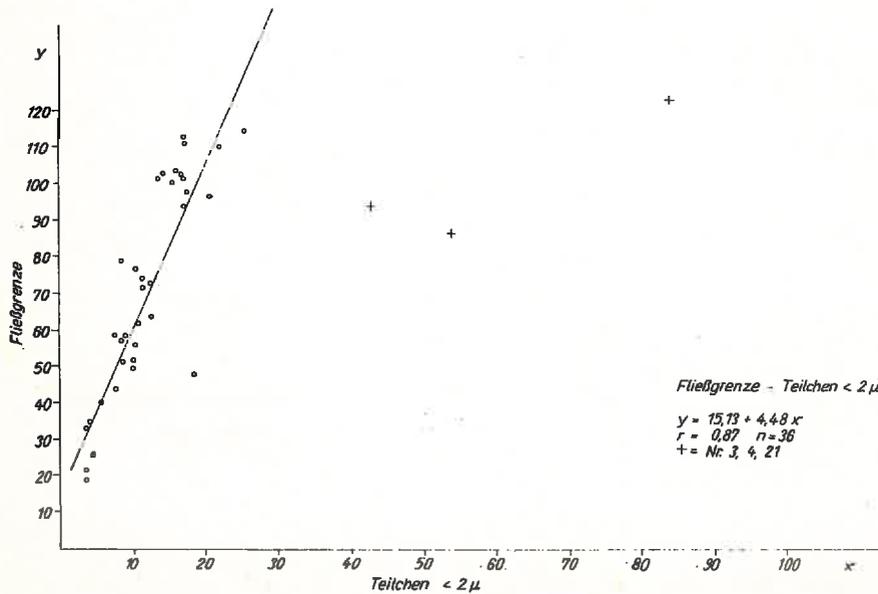
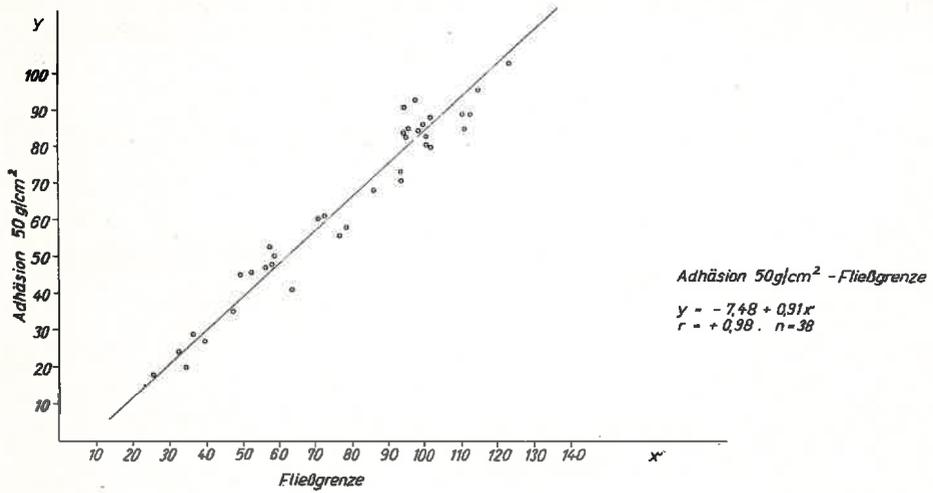


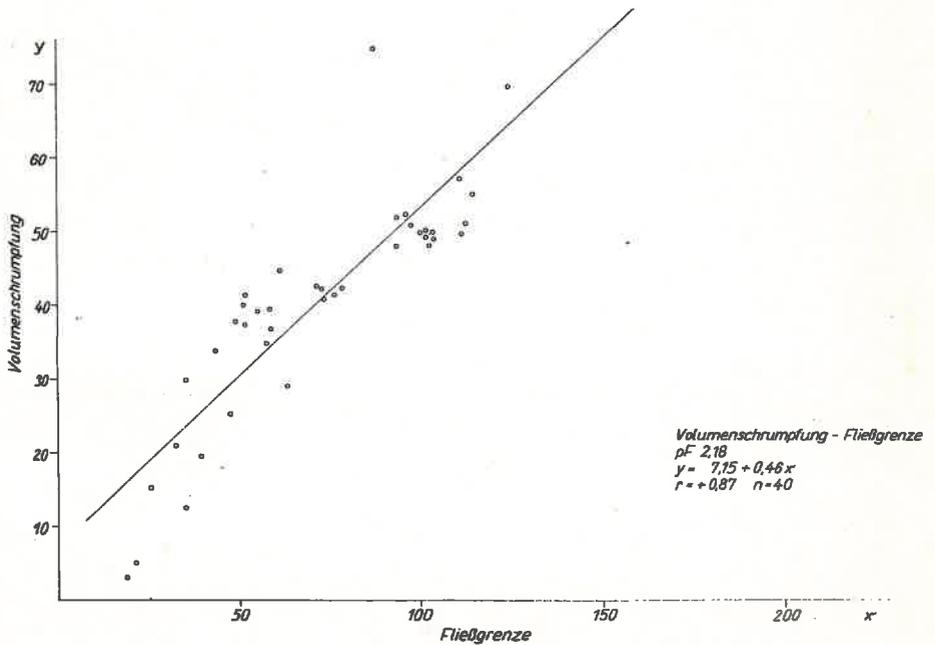
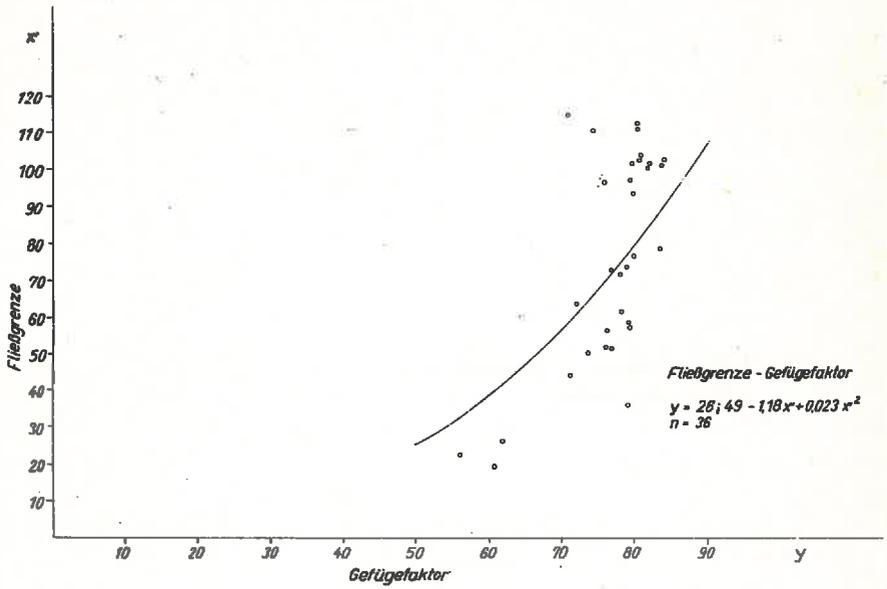
Nr.5

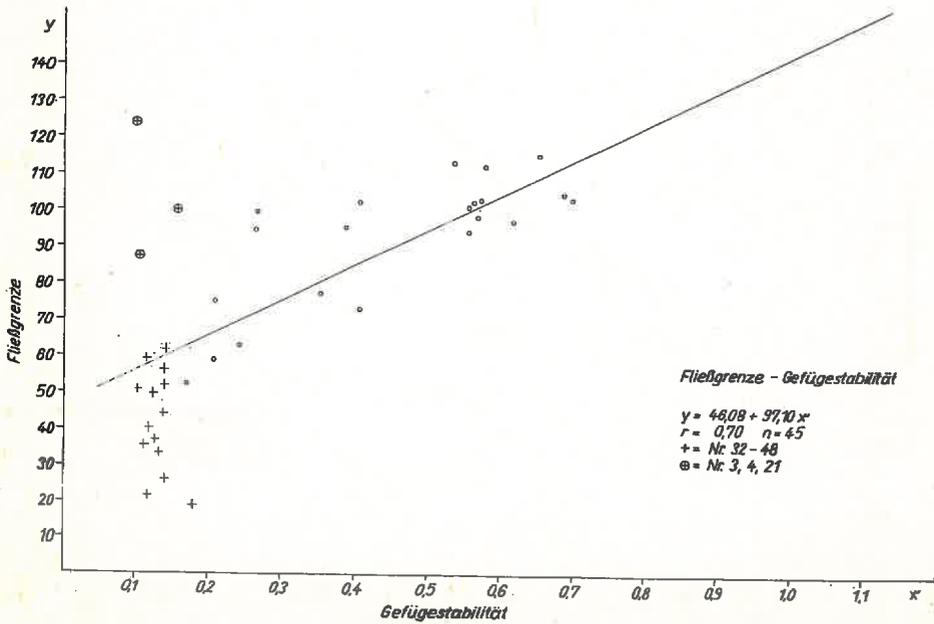
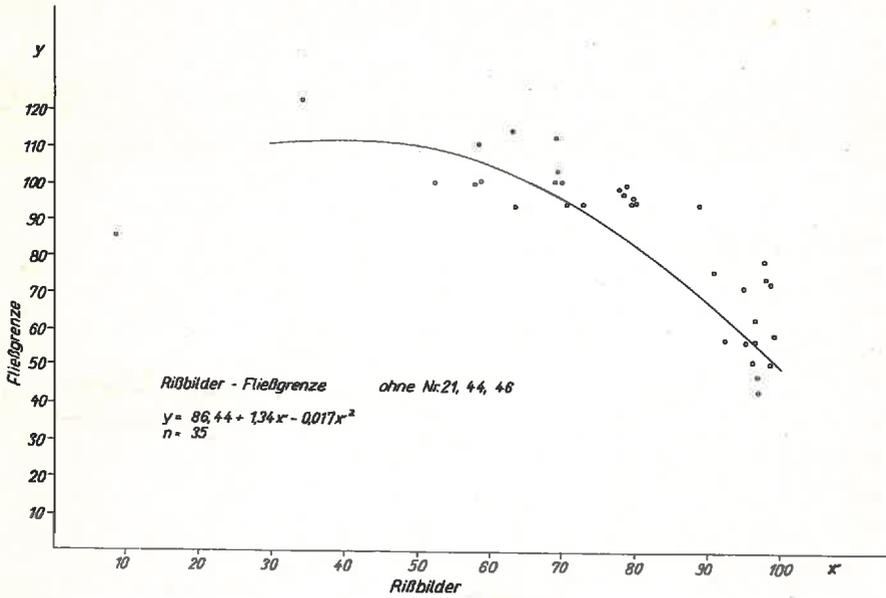


Nr.6

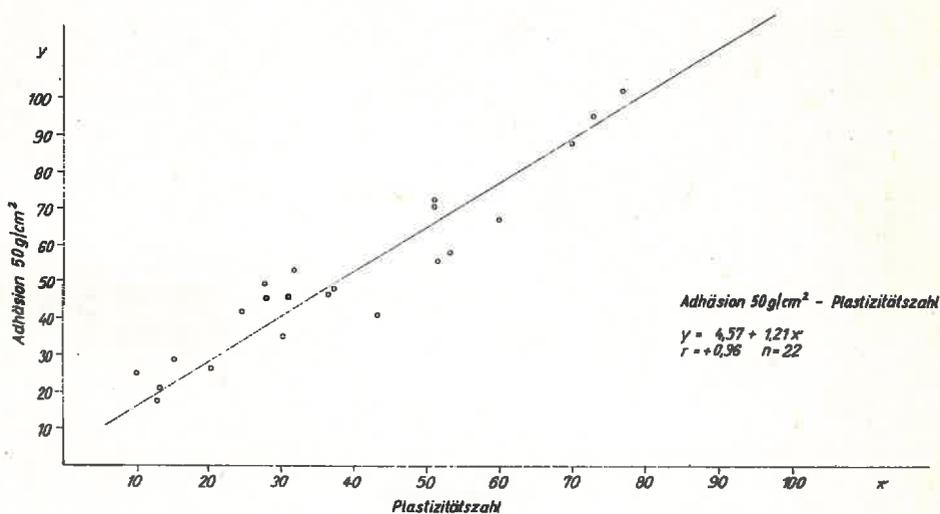




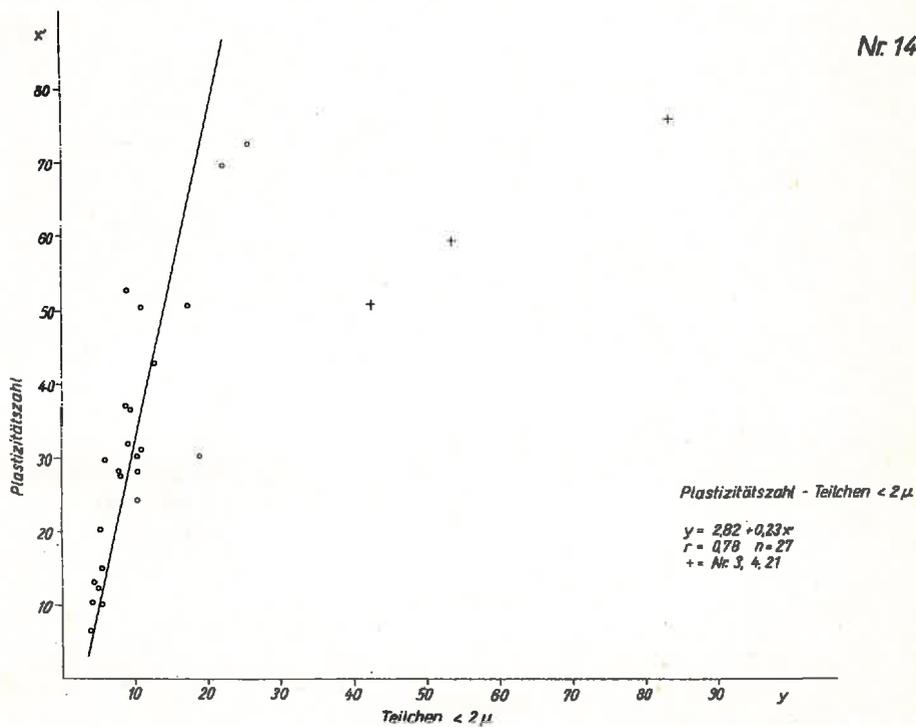


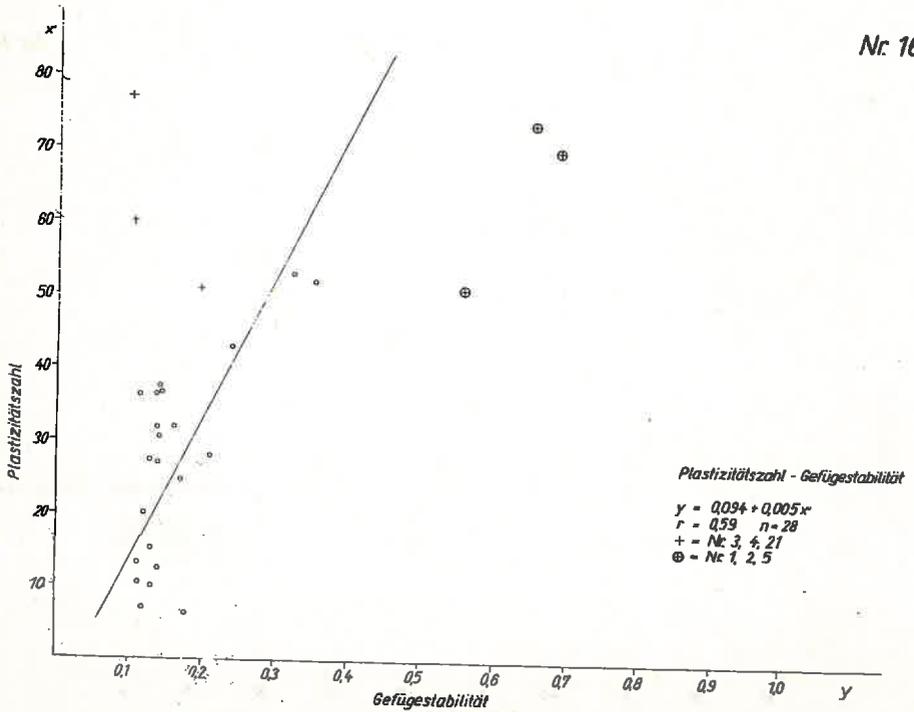
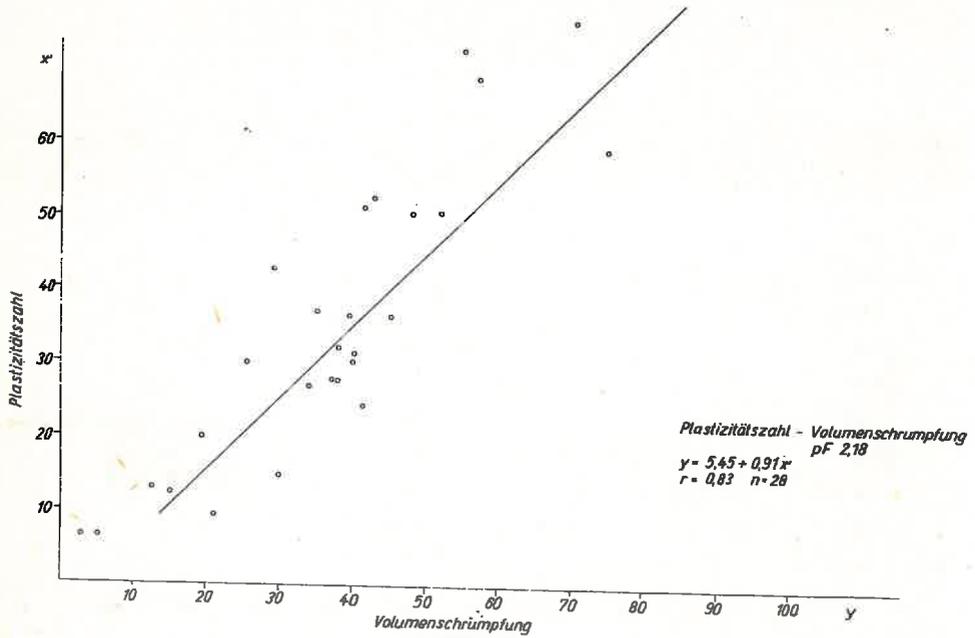


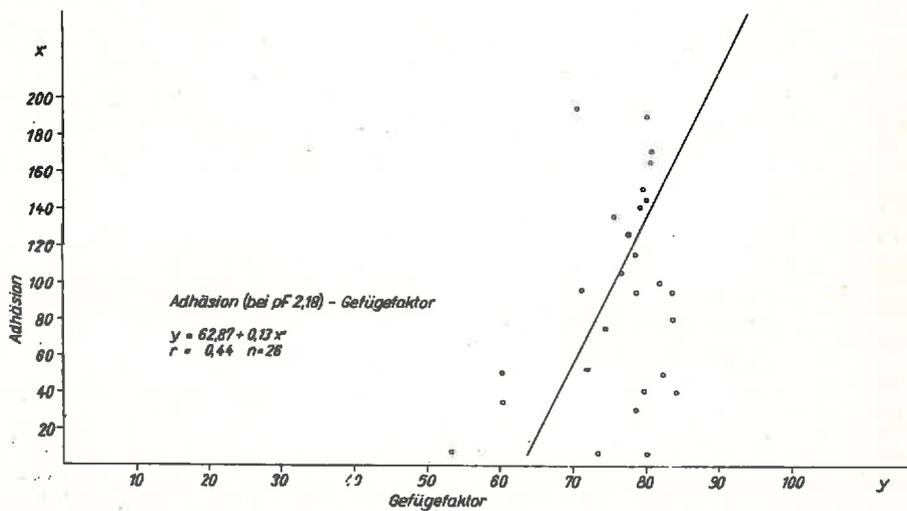
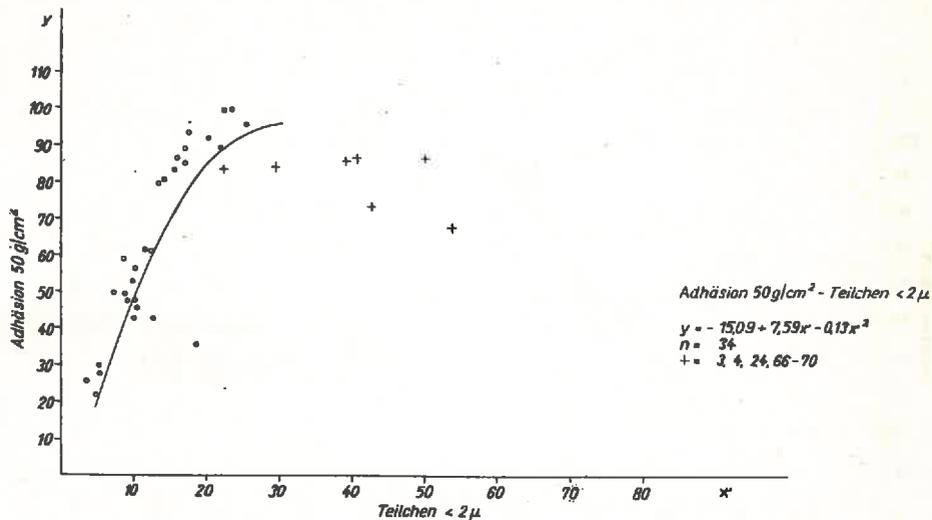
Nr 13

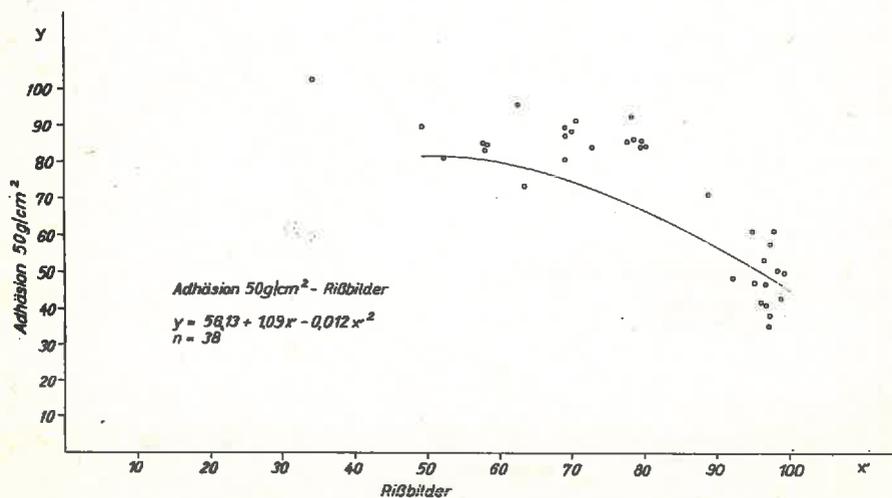
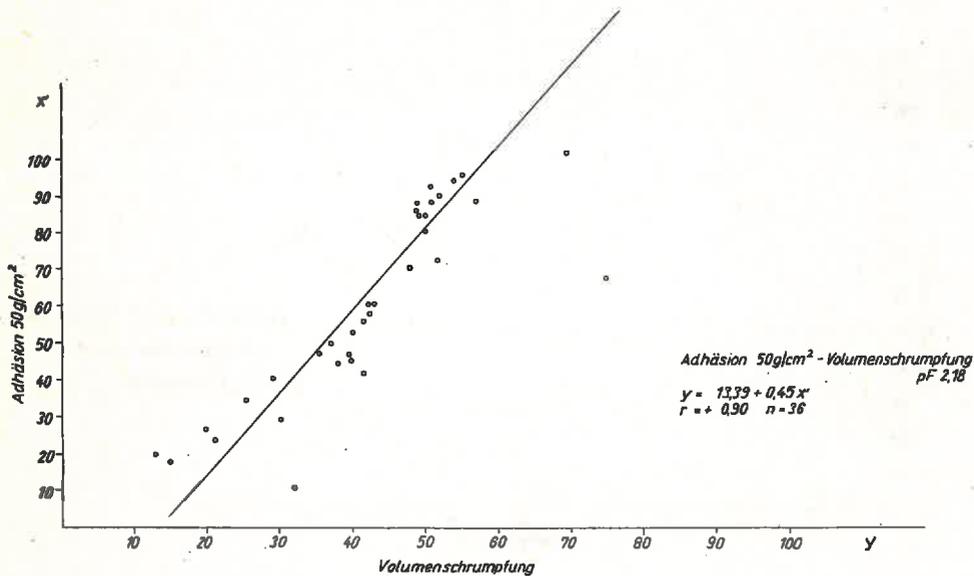


Nr 14

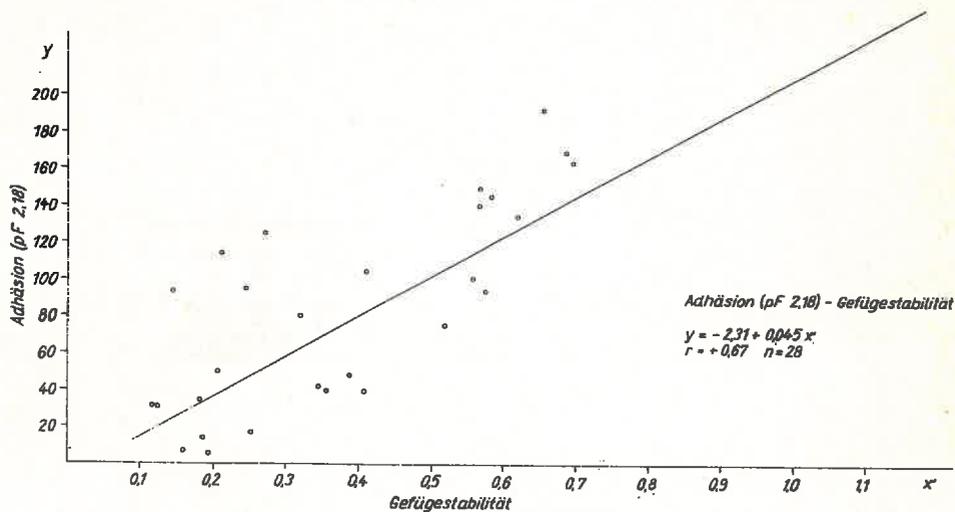




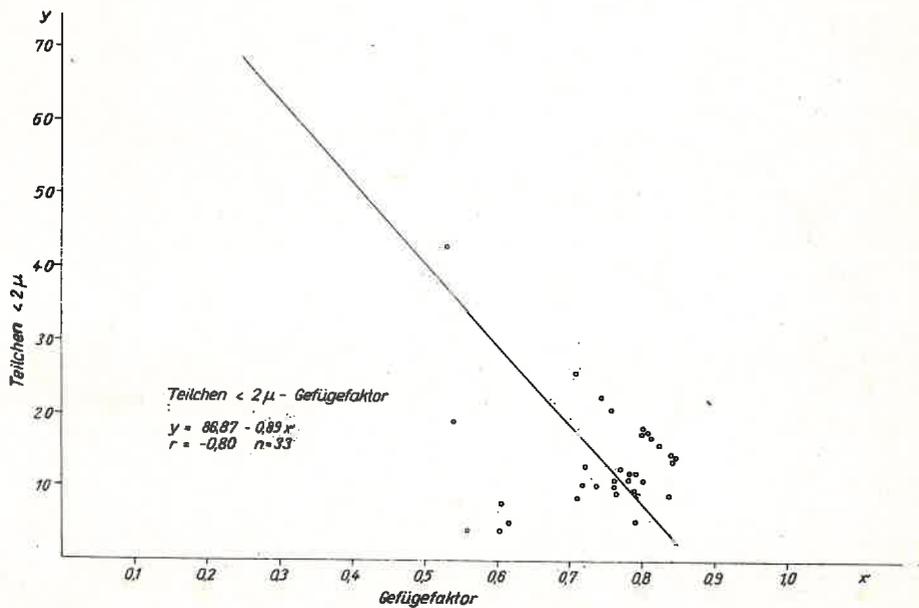


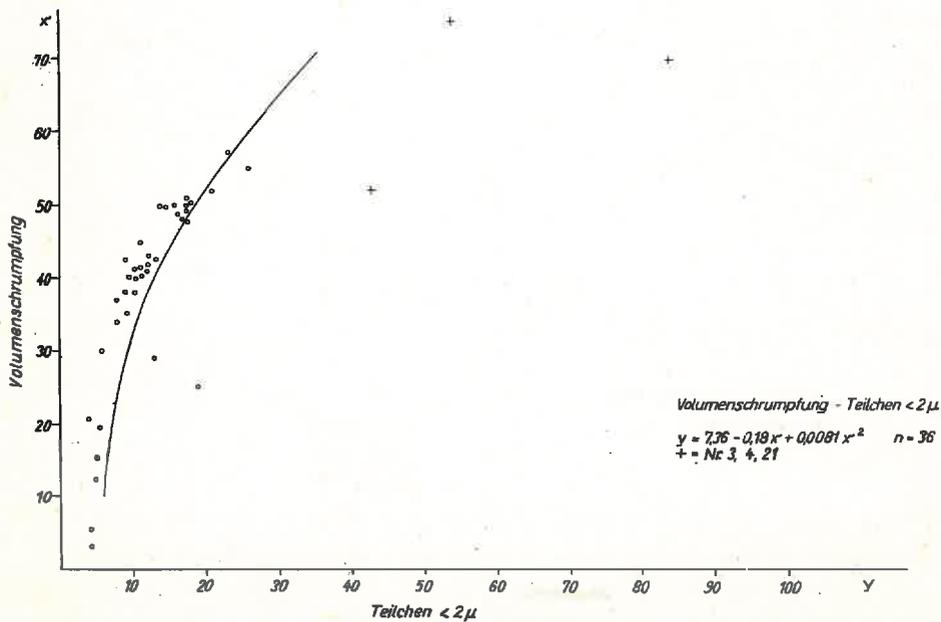
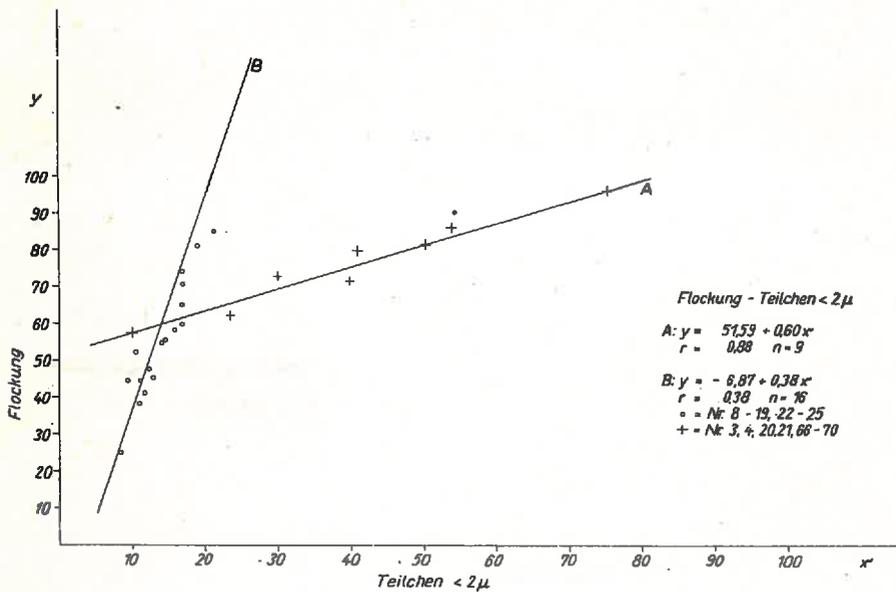


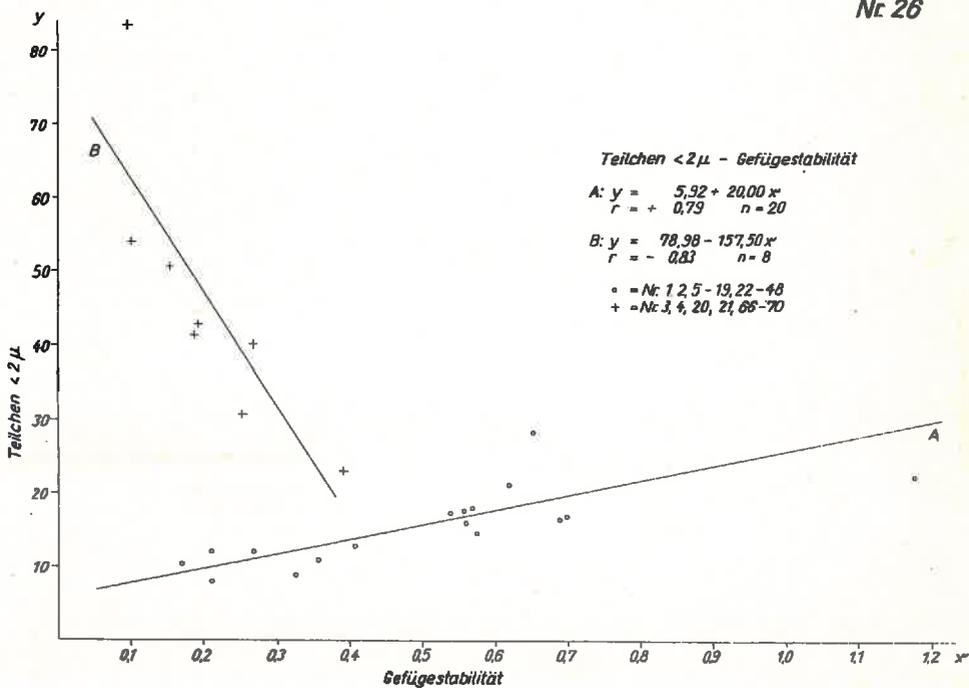
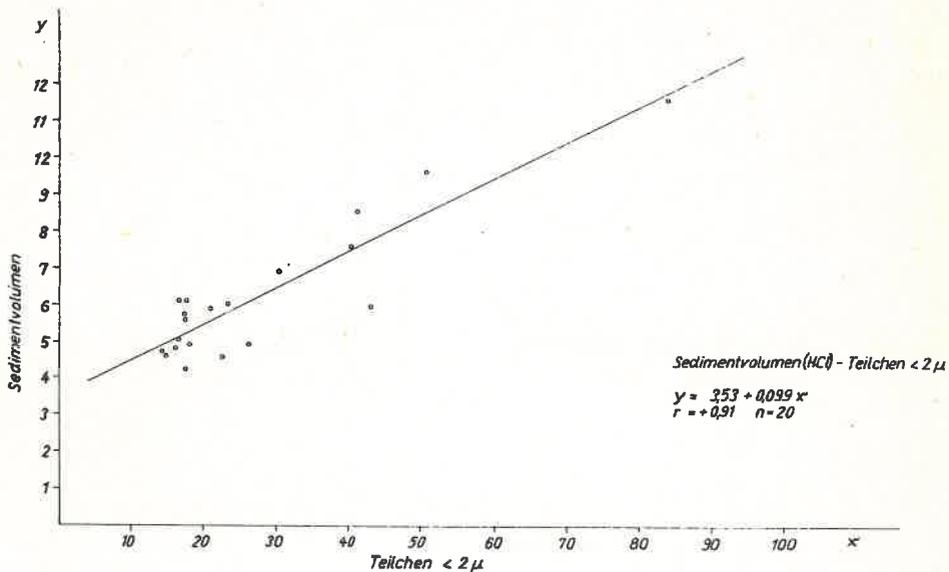
Nr. 21

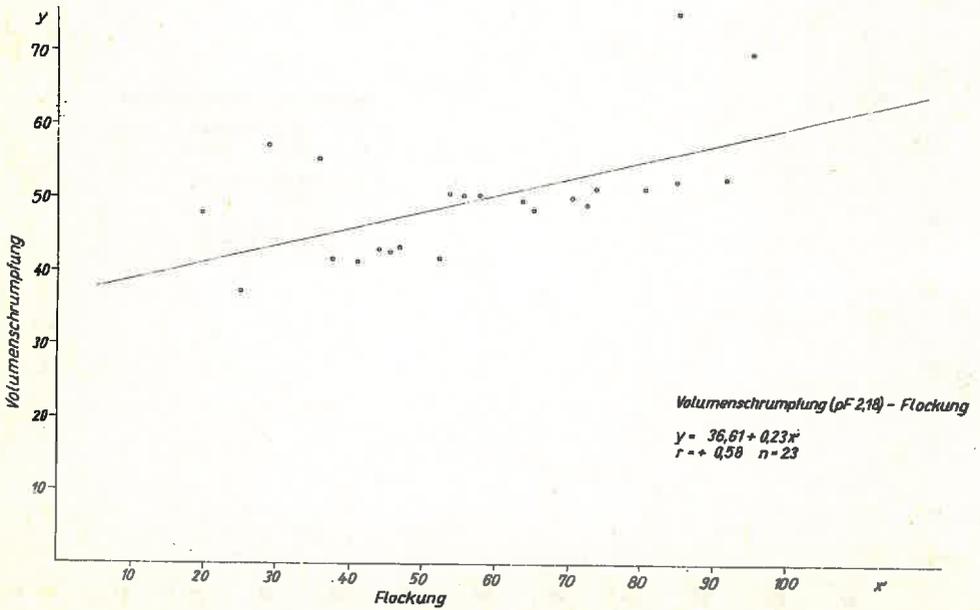
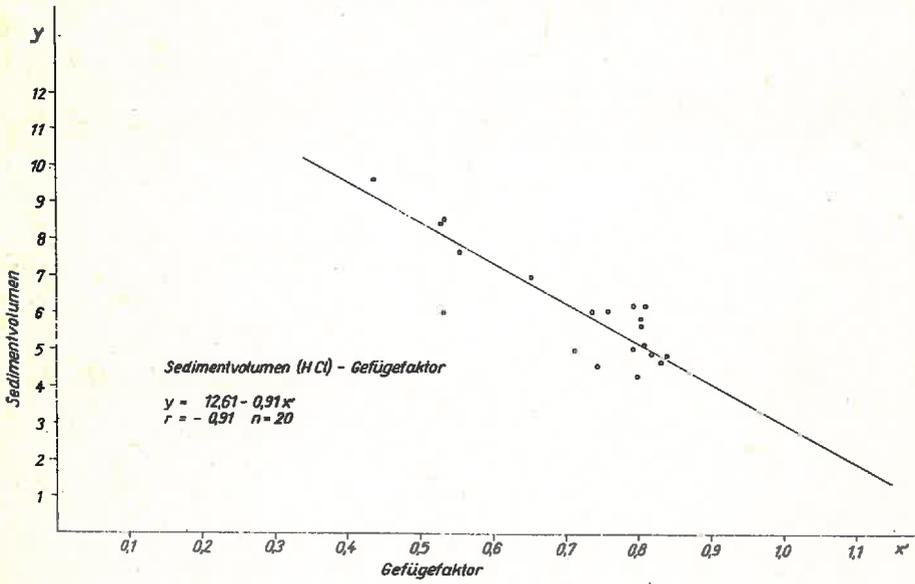


Nr. 22

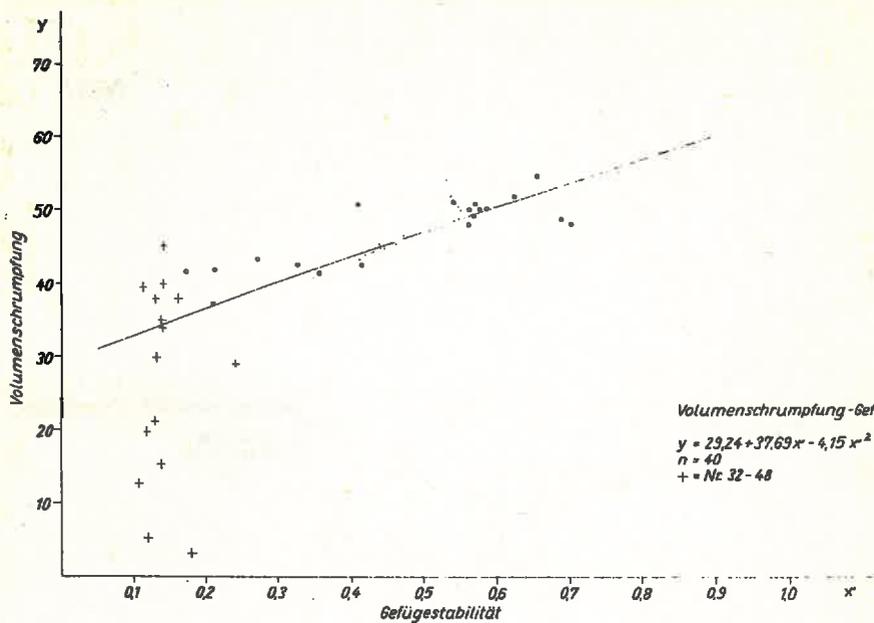




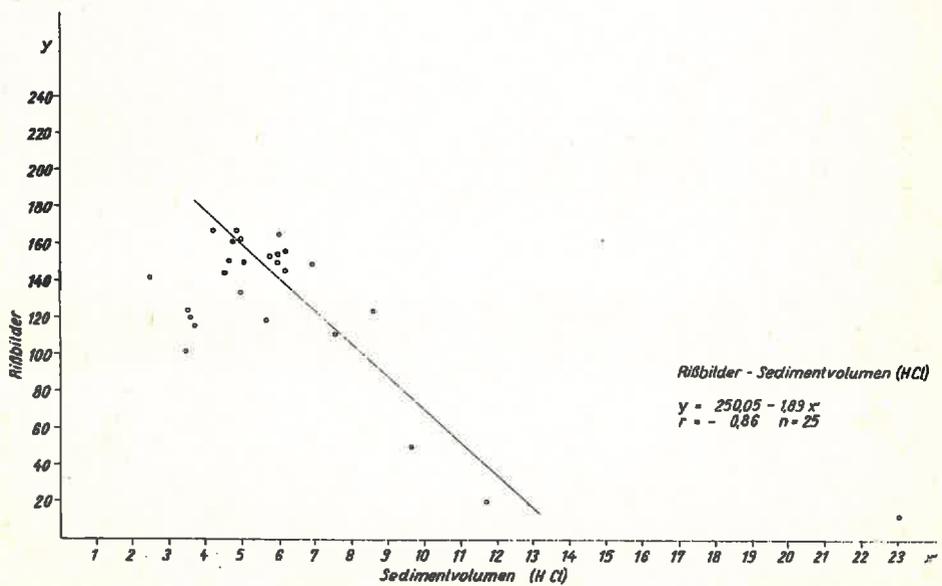




Nr. 29



Nr. 30



84/164

Nr. 31

