

**Untersuchungen über die physikalischen Eigenschaften einiger Bodenprofile der Braunerdeserie des Schweizerischen Mittellandes, mit methodischem Beitrag zur physikalischen Bodenanalyse.**

---

VON DER

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN  
HOCHSCHULE IN ZÜRICH

ZUR ERLANGUNG

DER WÜRDE EINES DOKTORS DER  
TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

GENEHMIGTE

PROMOTIONSARBEIT

VORGELEGT VON

**Leutenegger Fridolin**

von Wil (St. Gallen)

Referent: Herr Prof. Dr. H. Pallmann

Korreferent: Herr Prof. Dr. H. Deuel

ZÜRICH 1950

Sedipan A.-G.

Gerechtigkeitsgasse 25/27

MEINEN LIEBEN ELTERN

Meinen verehrten Lehrern, Herrn Schulratspräsident Prof. Dr. H. Pallmann und Herrn Prof. Dr. H. Deuel danke ich herzlich für ihre grosse Hilfsbereitschaft und die vielseitigen Anregungen die ich von Ihnen empfangen durfte.

## Inhaltsübersicht.

- I. Einleitung und Problemstellung
- II. Untersuchungsmethoden
  - A. Kornanalyse
    - a) Methodische Voruntersuchungen
    - b) Kombinierte Pipett - Schlämmanalyse
  - B. Humusanalyse
  - C. Krümelanalyse
    - a) Bestehende Methoden
    - b) Beschreibung und Arbeitsweise des neuen Apparates
    - c) Gang der Analyse
      - 1. Probenahme
      - 2. Schlämmung
      - 3. Berechnung der Resultate
      - 4. Darstellung der Resultate
    - d) Kritik und Abänderungsvorschläge
  - D. Wasser- und Luftkapazität in natürlicher Lagerung
    - a) Bisherige methodische Grundlagen
    - b) Verwendete Methode
- III. Zusammenstellung der Definitionen
- IV. Beschreibung der untersuchten Bodenprofile und Diskussion der Analysenresultate
  - A. Profil "Villnachernschachen", Aueboden
  - B. Profil "Kreuzlingen I", mässig entwickelter Boden
  - C. Profil "Urdorf", voll entwickelte Braunerde
  - D. Profil "Kreuzlingen II", voll entwickelte Braunerde
  - E. Profil "Stetten I", schwach degradierte Braunerde
  - F. Profil "Stetten II", schwach degradierte Braunerde
  - G. Profil "Irchel", stark degradierte Braunerde
  - H. Profil "Stadlerberg", stark degradierte Braunerde
- V. Veränderung einiger Bodeneigenschaften bei der Bodenentwicklung (Braunerdeserie)
  - A. Bodenazidität
  - B. Tongehalt
  - C. Humusgehalt
  - D. Bodenstruktur
    - a) Strukturzustand der untersuchten Bodenprofile
    - b) Ursachen der Aggregatbildung
  - E. Gesamtporenvolumen, Wasser- und Luftkapazität
- VI. Beurteilung der Krümelanalyse
- VII. Zusammenfassung

## I. Einleitung und Problemstellung

Die genaue Analyse von Bodenprofilen setzt eine gut ausgebaute Untersuchungsmethodik voraus, die noch keineswegs überall gegeben ist. Besonders im argen liegt die Methodik zur Untersuchung der physikalischen Eigenschaften der Böden. Erstens sind die physikalischen Eigenschaften von sehr vielen Faktoren abhängig, zweitens bietet die Probenahme des Bodens in seiner natürlichen Lagerung viele Schwierigkeiten und drittens wurde dieses Wissensgebiet lange Zeit eher stiefmütterlich behandelt.

Die bisherigen Untersuchungen haben aber immer wieder gezeigt, dass die physikalischen Eigenschaften des Bodens die Ernteerträge nach Menge und Qualität wesentlich beeinflussen.

Von ausschlaggebender Bedeutung ist das Gesamtporenvolumen eines Bodens, seine Gliederung in Poren von verschiedenen Durchmessern und seine Verteilung im Boden. In den engen, kapillar wirksamen Poren wird das für die Pflanzen lebensnotwendige Wasser gespeichert. Durch die weiten, nicht kapillar wirksamen Poren wird dem Boden Sauerstoff zugeleitet, den die Wurzeln und Bakterien zum Leben benötigen.

Wasser- und Luftkapazität eines Bodens hängen vorerst vom Dispersitätsgrad und der Beschaffenheit der festen Bodeneinzelteile ab. Besteht ein Boden nur aus grobem Sand, so ist er unfruchtbar, weil seine Wasserkapazität und der verfügbare Nährstoffgehalt sehr klein sind. Auch ein reiner Tonboden ist unfruchtbar, weil seine Luftkapazität fast Null ist. Aber auch ein Boden, der zu gleichen Teilen aus Ton und Sand besteht, ist wegen des Luftmangels unfruchtbar, wenn die Tonteilchen dicht zwischen die Sandkörner eingelagert sind.

Die Bodeneinzelteile können sich aber zu Aggregaten zusammenschlagern. Sind die Aggregate genügend gross und beständig, dann können sie sich nach aussen wie die Sandkörner verhalten. Es bleiben zwischen den Aggregaten Hohlräume bestehen, die dank ihrer Grösse nicht mehr kapillar wirksam sind. In den Aggregaten bleiben die kapillaren Poren erhalten, die Wasserkapazität nimmt nur wenig ab. Durch die Aggregatbildung werden die Luftkapazität und das Gesamtporenvolumen grösser.

Je nach den Bildungsursachen ist die Stabilität der Aggregate verschieden. Sie muss daher mit verschiedenen Methoden gemessen werden.

Gedroiz (1931) unterscheidet drei Gruppen von Bodenaggregaten:

1. beständig im nassen und trockenen Zustand,
2. beständig im trockenen, unbeständig im nassen Zustand,
3. beständig im nassen, unbeständig im trockenen Zustand.

Massgebend für die Verteilung des Gesamtporenvolumens in Wasser- und Luftkapazität sind die Aggregate der ersten Gruppe, da diejenigen der beiden anderen Gruppen je nach dem Wassergehalt stabil oder unbeständig sind. Im natürlichen Wechsel von nass und trocken lagern sich diese leicht zu einem dichten Gefüge zusammen.

Gegenstand vorliegender Untersuchungen sind die sowohl im trockenen als auch im nassen Zustand beständigen Aggregate. Die erste Aufgabe besteht darin, die Struktur (Aggregierung) einiger Bodenprofile zu messen. Dazu musste in erster Linie eine geeignete Methode ausgearbeitet werden.

Von Bedeutung ist es aber auch, die Ursachen der Wasserstabilität und die Wirkungen der stabilen Aggregate auf das Gesamtporenvolumen und deren Verteilung in Wasser- und Luftkapazität zu kennen. Neben der Krümelung wurden deshalb einerseits die Bodenart und der Humusanteil bestimmt, um die Ursachen der Krümelbildung abzuklären, und andererseits die Wasser- und Luftkapazität, um die Wirkungen der Aggregatbildung zu untersuchen.

Als Untersuchungsobjekt wurden acht Profile der Braunerdeserie des schweizerischen Mittellandes ausgewählt, vom unentwickelten Boden bis zur stark degradierten Braunerde, die zum Teil schon Gegenstand früherer Arbeiten waren und in chemischer, biologischer und pflanzensoziologischer Hinsicht schon gut bekannt sind (vergl. Etter, 1943; Richard, 1945 und 1950).

## II. Untersuchungsmethoden

### A. Kornanalyse

Bei der Kornanalyse eines Bodens werden die Einzelteilchen der Feinerde nach dem Äquivalentdurchmesser in Fraktionen zerlegt. Aus dem Anteil der verschiedenen Fraktionen ergibt sich die Bodenart (tonig, lehmig, sandig).

Einzelteilchen, synonym mit Primärteilchen und Einzelkörnern, sind feste Bodenbestandteile, die sich als Individuen verhalten und sich nur durch starke chemische und physikalische Eingriffe weiter zerlegen lassen.

### a) Methodische Voruntersuchungen

---

Für die Bestimmung der Korngrößen im Boden bestehen sehr viele Methoden, die in verschiedenen Werken einlässlich behandelt und zusammengestellt sind (Gessner, 1931; Wiegner und Pallmann, 1938; Demolon, 1948). Die meisten dieser Methoden sind auf drei Grundoperationen zurückzuführen, nämlich das Sieben, das Schlämmen und das Sedimentieren. Keine dieser Grundoperationen eignet sich zur Bestimmung aller Korngrößen eines Bodens; es müssen mehrere kombiniert angewendet werden.

Es wurden an einer Probe aus dem  $B_t$ -Horizont \*) einer degradierten Braunerde folgende Voruntersuchungen durchgeführt:

1. Pipett-Siebanalyse: 25 g lufttrockene Feinerde wurden durch einstündiges Kochen in 500 ccm 2%iger Calgonlösung \*\*) zur Analyse vorbereitet. Die abschlämbare Fraktion, Teilchen mit weniger als 0,02 mm im Durchmesser, wurde mit dem Pipettapparat nach Eisenwein (siehe Wiegner-Pallmann) bestimmt. Der Staub- und Sandanteil wurde durch Sieben fraktioniert.
2. Schlämmanalyse a.: Die Bodenprobe wurde durch einstündiges Kochen in destilliertem Wasser und durch Zerdrücken der Krümel mit einem Gummipistill zur Analyse vorbereitet. Die Fraktionen wurden mit Hilfe des Kopecky-Schlammapparates bestimmt. Nach der Schlämmung wurden die Fraktionen II, III und IV einzeln gewogen und anschließend in 2%iger Calgonlösung gekocht. Die abschlämbaren, erneut suspendierten Teile wurden abpipettiert und die Gewichts-differenz ermittelt.

---

\*)  $B_t$ -Horizont: "B"-Horizont bedeutet Anreicherungshorizont.  
"B<sub>t</sub>"-Horizont bedeutet Tonanreicherungshorizont.

\*\*) Calgon oder Graham'sches Salz ist Natrium-Metahexaphosphat, das befähigt ist, zweiwertige Kationen komplex zu binden. Die Zusammensetzung des Ca-Komplexes entspricht der Formel  $Na_2(Ca_2P_6O_{18})$ . Das Äquivalentgewicht beträgt 153,04. Es kommen also auf 0,153 g Calgon ein Milliäquivalent zweiwertiger Kationen, die vom Bodenkörper desorbiert und komplex gebunden werden können. Die zugegebene Menge Calgon vermag 7,2 Milliäquivalente Calcium komplex zu binden. Bildet sich beim Abkühlen der Suspension ein Sedimentationspiegel aus, dann ist der Boden zu wenig dispergiert. Man muss dann weitere Calgonmengen zugeben und nochmals aufkochen. Bei der Berechnung der Pipettanalysenresultate ist die mitgewogene Menge Calgon vom Wägeregebnis abzuziehen.

3. Schlämmanalyse b: Die Bodenprobe wurde durch einstündiges Kochen in 500 ccm 2%iger Calgonlösung zur Analyse vorbereitet. Im übrigen wurden die Bestimmungen wie sub 2. ausgeführt.
4. Pipett-Schlämmanalyse: Die Bodenprobe wurde eine Stunde lang in 500 ccm 2%iger Calgonlösung gekocht. Mit Hilfe des Pipettapparates nach Eisenwein wurde die abschlämbare Fraktion bestimmt. Die Sand- und Staubfraktionen wurden im Kopeckyschlammapparat ermittelt, nachdem die abschlämbare Fraktion durch mehrmaliges Abhebern vorher entfernt worden war.

In der untenstehenden Tabelle 1 sind die Resultate der obigen Versuche zusammengestellt. In der Rubrik "Differenz" sind jene abschlämbaren Anteile aufgeführt, die bei der Schlämmanalyse in den Staub- und Sandfraktionen verblieben waren. Sie wurden nach dem Kochen in Calgonlösung abpipettiert, und sie sind von den Staub- und Sandfraktionen abzuziehen und bei der abschlämbaren Fraktion I zu addieren.

Tab. 1: Vorversuche zur Kornanalyse

Methode No.	Fraktion IV Sand 2,0-0,1 mm		Fraktion III Staubsand 0,10-0,05 mm		Fraktion II Staub 0,05-0,02 mm		Fraktion I Abschlämbbares <0,02 mm	
	Gew.%	Differ.	Gew.%	Differ.	Gew.%	Differ.	Gew.%	Differenz
1.	24,31	-	9,40	-	7,03	-	59,26	-
2.	9,99	-0,34	23,57	-3,05	20,52	-9,79	45,93	+14,11
3.	20,60	-0,49	9,94	-0,57	17,44	-6,12	52,20	+ 7,17
4.	14,30	-	12,64	-	14,08	-	58,99	-

Aus obigen Resultaten kann folgendes entnommen werden:

- 1) Die Schlämmanalysen 2. und 3. weisen erhebliche Fehler auf. Die abschlämbare Fraktion wird zu klein. Beim Kochen ohne Dispergator wird die Tonfraktion nur ungenügend dispergiert; die dispergierten Tone werden durch die Ca-Ionen des harten Wassers koaguliert.
- 2) Das Fraktionieren der Staub- und Sandfraktionen durch Absieben führt zu ganz ungenügenden Resultaten. Beim Sieben im trockenen Zustand entstehen Verluste durch das Wegfliegen von Teilchen. Beim Sieben im aufgeschlämmten Zustand sedimentieren die Sandfraktionen zuerst, es bildet sich ein dichtes Filter aus Sand, das die Durchlässigkeit derart vermindert, dass ein speditives Arbeiten nicht mehr möglich ist. Auch mit Hilfe des Vacuums kann die Suspension nicht abgesiebt werden, weil die Sandkörner so fest ineinander sitzen, dass die feineren Fraktionen nicht mehr passieren können.



- 3) Die Resultate der Pipettanalyse, bei der nur 20 ccm der ganzen Aufschlämmung entnommen werden, stimmen mit jenen Resultaten überein, die durch vollständiges Abpipettieren der abschlämbaren Fraktion erhalten werden. Die Pipettanalyse eignet sich sehr gut zur Bestimmung der feinen Fraktionen.
- 4) Die Schlämmanalyse nach Kopecky eignet sich sehr gut zur Bestimmung der Staub- und Sandfraktionen, wenn die abschlämbaren und koagulationsempfindlichen Teilchen vorgängig entfernt werden.

Auf Grund der obigen Resultate wurde eine kombinierte Pipett-Schlamm-analyse gewählt, die im folgenden näher beschrieben wird.

#### b) Kombinierte Pipett - Schlämmanalyse

-----

25 g Feinerde (einer guten Mischprobe) werden in ein Becherglas eingewogen. Man gibt 500 ccm 2%ige Calgonlösung hinzu und kocht eine Stunde lang unter häufigem Umrühren. Enthält ein Boden mehr als 2% Humus, so kocht man unter Zusatz von 200 ccm 2%iger Calgonlösung eine Stunde lang. Hierauf dampft man die Suspension in einer Porzellanschale auf dem Wasser- oder Sandbad ein und zerstört die Humusstoffe mit 6%igem  $H_2O_2$ , indem man portionenweise je 10 ccm davon zugebt und wieder eindampfen lässt, bis die Eigenfarbe der Mineralerde rein vorhanden ist. Dann kocht man unter Zugabe der restlichen 300 ccm 2%iger Calgonlösung eine weitere Stunde. Diese Arbeitsweise muss eingehalten werden, weil der Boden durch das Eindampfen wieder krümelt. Nach dem Abkühlen wird die Suspension quantitativ in den geeichten Pipettzylinder gespült, den man bis zur Eichmarke mit dest. Wasser auffüllt. Nach kräftigem Durchschütteln lässt man sedimentieren und entnimmt die gewünschten Fraktionen mit einem Durchmesser kleiner als 0,02 mm nach den Vorschriften der Pipettmethode.

Sind die Pipettproben entnommen, dann hebt man die über dem Bodensatz stehende Tonsuspension vorsichtig ab. Man füllt mit dest. Wasser wieder bis zur Eichmarke auf, schüttelt kräftig durch und hebt wieder ab, entsprechend den Fallzeiten und Fallhöhen bei der Sedimentationsanalyse. Beim Abhebern ist darauf zu achten, dass der Heber, der ca. 2 mm Durchmesser haben soll, etwa 5 cm unter der Wasseroberfläche angesaugt wird. Dann senkt man den Heber langsam, ohne Wirbel zu erzeugen, indem man knapp unter dem sinkenden Wasserspiegel saugen lässt. Die Sedimentationshöhe stellt man mit Vorteil so ein, dass bis ca. 1 cm über dem Bodensatz abgehert werden kann. Ist die Probe frei von abschlämbaren Teilchen - dies ist daran zu erkennen, dass die über dem Bodensatz stehende Wassersäule klar geworden ist - dann spült man den Bodensatz in den Kopecky-Schlammapparat und schlämmt wie gewohnt. Die Schlämdauer beträgt höchstens fünf Stunden. Die Apparatur bleibt immer sauber, da keine Koagulation mehr eintritt. Die an den Zylinderwandungen abgesetzten Staubteilchen können mit der Spritzflasche leicht abgespült werden.

#### B. Humusanalyse

An der Bildung der Bodenaggregate sind auch die Humusstoffe beteiligt. Die vorliegenden Untersuchungen haben ergeben, dass die Wirkung der Faserwurzeln, Pilzhyphen usw. auf die Aggregatbildung

mindestens so gross ist wie die Wirkung der ausgeflockten, kolloiden Humusstoffe.

Der Humus wurde deshalb als Gesamthumus durch nasse Verbrennung bis  $\text{CO}_2$  mit Schwefelsäure-Bichromat bestimmt (vergl. Schmuziger, 1935 und Frei, 1944).

Um den Humifizierungsgrad zu kennzeichnen, wurde das C/N-Verhältnis bestimmt, das nach Wakeman (1927) und anderen umso enger wird, je humifizierter die organischen Bodenkomponenten sind. Für die N-Bestimmung wurde die Methode nach Kjeldhal verwendet.

Die Analysenmethode, wie sie Schmuziger verwendete, wurde insofern abgeändert, als der Luftstrom nicht mit Hilfe einer Wasserstrahlpumpe hergestellt wurde, sondern mit einer Stickstoffdruckflasche, mit der mühelos ein Ueberdruck von 0,1 atü erzeugt werden konnte. Durch den ständig fliessenden Luftstrom wird ein Zurückschlagen der Reagenzien beim Abstellen und Abkühlen verhindert.

### C. Krümelanalyse

Die Aggregate im Boden können nach sehr verschiedenen Gesichtspunkten, nach ihrer Grösse, ihren Eigenschaften, ihren Bildungsursachen oder nach ihrem Verhalten im Boden definiert werden. Tatsächlich weichen denn auch die Definitionen der verschiedenen Forscher stark voneinander ab. Gedroiz (1931) bezeichnet als Strukturelemente oder Krümel Komplexe der Bodenelemente, die untereinander mit grösserer oder geringerer Festigkeit zusammengeklebt sind. Nach ihrer Stabilität unterscheidet Gedroiz drei Gruppen, nämlich:

1. beständig im nassen und trockenen Zustand,
2. beständig im trockenen, unbeständig im nassen Zustand,
3. beständig im nassen, unbeständig im trockenen Zustand.

Die erste Gruppe entspricht den echten Krümeln, die beiden anderen den unechten Krümeln nach Tjulin (1931).

Sekera und Brunner (1943) verstehen unter Krümel Bodenaggregate verschiedener Grösse, die bei schneller Befeuchtung unter dem Druck der eingeschlossenen Luft je nach ihrer Beständigkeit in wenige grosse, viele kleine Bruchstücke oder in ihre Primärteile, die Einzelteile, zerfallen. Die Bruchstücke nennen sie Krümelbruchstücke. Diese zerfallen beim nochmaligen schnellen Befeuchten nicht mehr.

Frei (1944) bezeichnet als Krümel Zusammenlagerungsprodukte einander verbundener Einzelteilchen von der Grösse 0,2-20 mm  $\varnothing$ . Den Krümeln unterscheidet Frei Feinkoagulate, die kleiner sind 0,2 mm, und Klumpen, die grösser sind als 20 mm im Durchmesser.

Feinkoagulate, Krümel und Klumpen können durch vorwiegend mechanische Kräfte locker zusammenschliessen. Dadurch entstehen Vielfachteilchenaggregate.

In dieser Arbeit werden nur trockenbeständige und wasserbeständige Aggregate als Krümel bezeichnet. Die obere Grössengrenze kann noch nicht genau festgelegt werden. Die untere Grenze ist bei 0,5 mm gegeben, da ein Boden, dessen Aggregate im Durchmesser kleiner sind als 0,5 mm, praktisch keine Luftkapazität besitzt. Dojarenko (1931) hat dies gezeigt, wie aus der untenstehenden Tabelle 2 ersichtlich ist. Auch die eigenen Untersuchungen ergeben dasselbe Bild. Dojarenko zerlegte eine gut gekrümelte, lufttrockene Schwarzerde durch Sieben in mehrere Krümelfraktionen. Diese füllte er in Glasröhren ein. Er schüttelte und klopfte die abgefüllten Röhre solange, bis die dichteste Packung erreicht war. Dann liess er die Bodenproben durch kapillaren Wasseraufstieg mit Wasser sättigen. An den wasser-gesättigten Proben bestimmte er das Gesamthohlraumvolumen und das kapillare und nichtkapillare Hohlraumvolumen. Seine Resultate sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tab. 2: Das kapillare, nichtkapillare und Gesamthohlraumvolumen in Böden von verschiedenem Durchmesser der Bodenteilchen (nach Dojarenko).

$\phi$ in mm	< 0,5	0,5 - 1,0	1,0 - 2,0	2 - 3	3 - 5
Kapillare H.V.	44,8	25,5	25,1	24,4	23,9
Nichtkapillares H.V.	2,7	24,5	29,6	35,1	38,7 *
Gesamt-H.V.	47,5	50,0	54,7	59,6	62,6

\*) in % vom Bodenvolumen

Aus Tabelle 2 kann folgendes entnommen werden:

Das Gesamthohlraumvolumen nimmt mit zunehmender Krümelgrösse langsam zu. Der Charakter des Hohlraumvolumens ändert sich stark bei der Krümelgrösse von mehr als 0,5 mm im Durchmesser.

Aggregate, die kleiner sind als 0,5 mm im Durchmesser, können als Feinkoagulate bezeichnet werden. Bei der Krümelbildung sind neben der Koagulation noch andere Ursachen wirksam, wie durch die folgenden Untersuchungen gezeigt wird.

In dieser Arbeit werden die Begriffe Krümel und Feinkoagulat im folgenden Sinne gebraucht:

Krümel sind trocken- und wasserbeständige Aggregate, die grösser sind als 0,5 mm im Durchmesser. Sie lassen sich durch Kochen in Wasser mit geeigneten Dispergatoren in ihre Einzelteilchen zerlegen.

Feinkoagulate sind trocken- und wasserbeständige Aggregate, die kleiner sind als 0,5 mm im Durchmesser. Sie lassen sich durch Kochen in Wasser mit geeigneten Dispergatoren in ihre Einzelteilchen zerlegen.

a) Bestehende Methoden

Man unterscheidet quantitative und qualitative Krümelanalysemethoden. An halbquantitativen Methoden sind die Auflichtmikroskopie im hohlgeschliffenen Objektträger, die Dünnschliffmethode nach Kubiena (1937) und die Petrischalenmethode nach Sekera und Brunner (1943) zu nennen. Die Resultate dieser Methoden, in relativen Zahlen ausgedrückt, erlauben wohl einen Vergleich verschiedener Böden. Die relativen Zahlen beruhen aber auf Schätzungen. Sie können je nach der Anschauung des Schätzenden recht verschieden ausfallen. Die relativen Zahlen müssen deshalb nach Möglichkeit durch exakte Zahlen ersetzt werden.

Von den quantitativen Methoden ist jene von Tjulin (1931) als erste zu nennen.

Tjulin (1931) bediente sich eines Siebsatzes mit Sieben von 0,25; 0,5 und 1,0 mm Maschenweite. Auf das Sieb von 1,0 mm gab er die durch kapillaren Wasseraufstieg gesättigte Bodenprobe. Dann tauchte er den Siebsatz 40 mal ins Wasser, wodurch sich die Krümel nach ihrer Grösse auf die verschiedenen Siebe verteilten. Die Nachteile dieser Methode sind:

- 1) Die Beanspruchung der Bodenprobe ist sehr verschieden je nachdem, ob langsam oder schnell eingetaucht wird.
- 2) Der Siebsatz mit dem untersten Sieb von 0,25 mm Maschenweite setzt dem Wasserstrom Widerstand entgegen. Der Siebsatz kann eintauchen, ohne dass der Wasserstrom durch die Siebe hindurchfließt. Das Wasser kann seitlich ausweichen.
- 3) Die Krümel > 1,0 mm werden nicht weiter fraktioniert.

Die Methode von L.Meyer und Rennekampf (1936) baut auf der Tjulin'schen Methode auf. Die Handarbeit wird durch mechanische Arbeit ersetzt. Es werden Siebe von 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0 und 4,0 mm Maschenweite verwendet, die man mit Gummidichtungen in ein Glasrohr einsetzt. Dieses Glasrohr ist unten an einem Wasserhahn angeschlossen, durch den das Spülwasser kontinuierlich einfließt. Ein seitlich angebrachter Heber saugt das Wasser aus dem Spülzylinder ab, sobald es das oberste Sieb passiert hat. Die Nachteile dieser Methode sind:

- 1) Durch das Leitungswasser werden dem Boden Ca-Ionen zugeführt.
- 2) Der Wasserstrom wirkt recht ungleich auf die verschiedenen Krümelfraktionen ein, da das oberste Sieb nur kurze Zeit und das feinste Sieb fast dauernd im Wasserstrom steht. Die groben Fraktionen werden daher wenig und die feinsten Fraktionen werden stark beansprucht.

Die Berechnungsmethode nach Sekera und Brunner (1943) verwendet die Wirkung fallender Wassertropfen für die Krümelanalyse. Die im getrockneten Zustand ausgesiebten Krümel, nicht grösser als 3,0 mm im Durchmesser, liegen auf einem rotierenden Sieb von 1,0 mm Maschenweite, auf das aus 20 cm Höhe Wassertropfen niederfallen. Die abge-

sprengten Bodenteile werden auf ein darunterliegendes Sieb von 0,2 mm Maschenweite gespült.

Auf dem gleichen Prinzip beruht die Methode Vilensky's (1934), der die Wassertropfen von 5 cm Höhe fallen liess.

Die Nachteile dieser Methoden sind:

- 1) Die Wassertropfen wirken nur von einer Seite auf die Krümel ein.
- 2) Die Bodenteilchen auf dem unteren Sieb werden nicht mehr gleichmässig beregnet.
- 3) Die kinetische Energie des fallenden Tropfens kommt zur Wirkung des Wassers als weiterer Zerstörungsfaktor hinzu.

Dieser Nachteile wegen scheint die Beregungsmethode, die bei Untersuchungen über das Verhalten von Ackererden gegenüber Regen recht gute Anhaltspunkte geben kann, für unsere Zwecke weniger geeignet.

Die neue Methode baut auf dem Spülprinzip der beiden vorgenannten Methoden von Tjulín und Meyer auf. Sie soll die aufgezählten Nachteile ausschalten und folgende Anforderungen erfüllen:

- 1) Die Spülung muss in destilliertem Wasser erfolgen können.
- 2) Der Wasserstrom muss genau regulierbar sein.
- 3) Alle Krümel fraktionen müssen gleichmässig beansprucht werden.
- 4) Der ganze Wasserstrom muss die Siebe passieren.
- 5) Ein serienmässiges Arbeiten soll möglich sein.

#### b) Beschreibung und Arbeitsweise des Krümelanalysenapparates

---

Der Schlammapparat (siehe Fig.1) besteht aus zwei Glaszylindern von 50 cm Länge und 7,5 cm lichter Weite. Sie sind unten verjüngt und laufen in ein rechtwinklig abgebogenes Rohr von 2 cm Durchmesser aus. Sie sind miteinander durch die waagrecht laufenden Schenkel eines T-Rohres (3) verbunden. Im dritten Schenkel des T-Rohres ist ein Glashahn (4) eingeschmolzen, durch den die Apparatur entleert werden kann. Zylinder (1) funktioniert als Wasserreservoir. Im Zylinder (2) wird der Siebsatz mit Hilfe von Gummiringen eingesetzt, das feinste Sieb zu unterst und das grösste knapp unter der Mitte des Rohres. Zylinder (2) ist mit einem Gummistopfen verschlossen, durch den ein Schenkel eines Dreiwegrohres (6) in den Zylinder führt. In diesem Schenkel ist ein Rückschlagventil (5) in Form eines Kugelschwimmers (siehe Fig.3) aus Glas eingeschmolzen. Es schliesst, sobald die Wassersäule die Ventilhöhe erreicht. Das Absaugen des Spülwassers wird dadurch verhindert. Die beiden anderen Schenkel des Dreiwegrohres (6) stehen mit den Ansatzstutzen einer Metalltrommel (9) in Verbindung, von denen der eine zu einer Wasserstrahlpumpe weiter führt (8a+b) und der andere frei endet und atmosphärische Luft einströmen lässt (7a+b). In der Trommel dreht sich ein Rotor (10), der abwechslungsweise die Saugleitung öffnet und die Luftleitung schliesst und umgekehrt. Ist die Saugleitung (8a+b) frei und die Luftleitung (7a+b) geschlossen, dann entsteht ein Vakuum, und die Wassersäule im Zylinder (2) steigt. Wird die Saugleitung unterbrochen und die Luftleitung geöffnet, dann fällt die Wassersäule wieder. Das Spülwasser fliesst daher kontinuierlich auf und ab. Der zurückfließende Wasserstrom verteilt die Krümel auf die verschiedenen Siebe. Der Rotor (10) wird durch einen kleinen Elektromotor (11) angetrieben. Die Rotationsgeschwindigkeit kann mit Hilfe eines Widerstandes (12) genau reguliert werden.

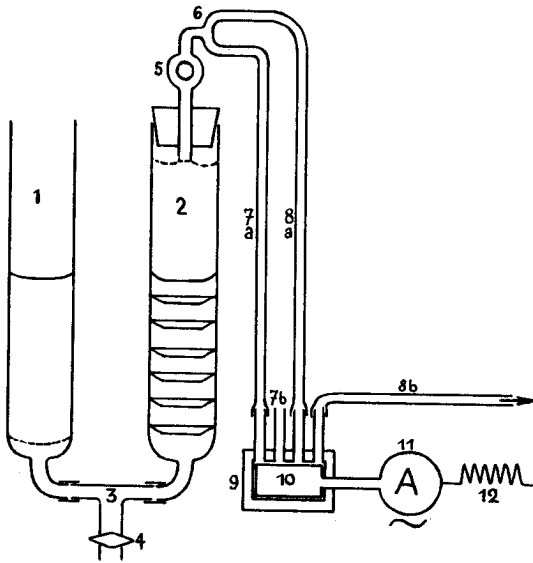


Fig. 1



Fig. 3

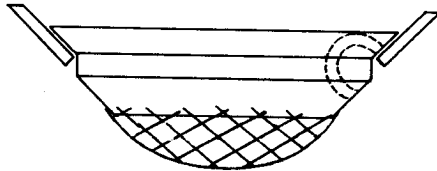


Fig. 2

- Fig. 1 Schlammapparat
- Fig. 2 Siebzarge mit Gummidichtung
- Fig. 3 Ventil

Der Siebsatz besteht aus sechs Sieben von 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0 und 4,5 mm Maschenweite. Die Siebzargen (siehe Fig. 2) sind gegen oben im Winkel von  $45^\circ$  erweitert, damit die Krümel restlos auf die Siebe gespült werden. Zum Befestigen der Gummidichtungen sind sie in der Mitte abgeschultert. Die Gummidichtungen bestehen aus drei Millimeter dickem Para-Plattengummi. Sie haben einen Innendurchmesser von 6 cm und einen Aussendurchmesser von 8 cm. Der Durchmesser der Zargen in der Höhe der Schultern beträgt 6,5 cm, ist also grösser als der Innendurchmesser der Dichtungen. Durch die Spannkraft des Gummis wird die Siebzarge festgehalten und die Dichtung schmiegt sich an die Metallform an. Der äussere Rand der Dichtungen ist gegen oben und einwärts im Winkel von  $45^\circ$  abgeschrägt, damit sich kein Absatz bildet, auf dem sich die Krümel absetzen können. Beim Einsetzen der Siebe wird der äussere Rand der Dichtungen, der um 0,5 cm im Durchmesser grösser ist als der Innendurchmesser der Spülzylinder, nach oben gepresst und zusammengedrückt, wodurch die Dichtungen luftdicht anliegen und die Siebe festgeklemt werden.

### c) Gang der Analyse

-----

#### 1. Probenahme

Für die Untersuchung des Krümelzustandes (Krümelzahl) werden aus dem frisch geöffneten Bodenprofil Schollen ausgestochen und davon die Krümel weggebrochen. Es ist darauf zu achten, dass man nicht Teile mitnimmt, die durch den mechanischen Druck der Werkzeuge zusammengepresst worden sind. Grobe Schollen mit mehr als 20 mm im Durchmesser werden mit den Fingern sorgfältig zerkleinert. Steine und Wurzeln werden herausgelesen. Die erhaltenen Krümel gibt man in feste, gut verschliessbare Gebinde, damit sie auf dem Transport nicht zusammengedrückt werden können. Da der gesamte Boden gleichmässig zur Krümelanalyse verwendet werden muss, ist eine Entmischung der verschiedenen Krümelgrössen zu vermeiden, indem man die Bodenprobe desselben Horizontes in mehrere kleine und enge Gefässe abfüllt, die beim Einwiegen nacheinander vollständig entleert werden. Im Laboratorium trocknet man die Bodenprobe bei  $80^\circ\text{C}$  und stellt sie dann an der Luft auf.

Für die Untersuchung der Krümelstabilität (Stabilitätszahl) sibt man aus der getrockneten Feinerde die trockenbeständigen Krümel von 0,5-2,0 mm im Durchmesser aus, da für alle Böden die gleiche Krümelfraktion verwendet werden muss (siehe unten). Die staubigen Beimischungen sind sorgfältig zu entfernen. Die untere Grenze von 0,5 mm wurde gewählt, weil sie der unteren Grenze der Krümel entspricht. Bei der Untersuchung von Böden, die sofort in Aggregate  $< 0,5$  mm zerfallen, werden die Siebe mit Maschenweiten  $< 0,5$  mm derart abgedichtet, dass die Wassersäule nicht mehr zurückfliessen kann. Die obere Grenze von 2,0 mm entspricht der oberen Grenze der Feinerde, auf die sich alle Berechnungen stützen. In manchen Bodenhorizonten sind auch nicht genügend grössere Krümel vorhanden.

#### 2. Schlammung

Man setzt im Zylinder (2) alle Siebe der Reihe nach ein, das feinste ca. 3 cm über der Verjüngung des Rohres, die anderen je im Abstand von 4 cm. Hierauf füllt man den Apparat mit dest. Wasser, bis alle Siebe unter Wasser stehen. Unter den Siebzargen bleibt je eine Luftblase zurück, wenn die Dichtungen satt anliegen. Die Unterseiten der Zargen kommen mit dem Boden nicht in Berührung. Dadurch wird ein sauberes Arbeiten möglich. Nun gibt man 10 - 15 gr genau gewogenen,

lufttrockenen Boden auf das oberste Sieb, setzt den Zapfen auf und lässt die Wasserstrahlpumpe und den Rotor laufen. Die Schlämmschwindigkeit stellt man so ein, dass vier Hin- und Herbewegungen pro Minute stattfinden. Die Schlämmdauer beträgt eine Stunde. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurden je Bodenhorizont fünf Parallelversuche durchgeführt, um die relativ grossen Differenzen auszugleichen, die auf die kleinen Einwaagen zurückzuführen sind.

Für die Bestimmung der Krümelstabilität verwendet man nur das Sieb mit 0,5 mm Maschenweite, das man im unteren Drittel des Schlämmschlauches einsetzt. Zur Schlämmdauer gelangen 10 - 15 gr lufttrockene Krümel von 0,5 - 2,0 Millimeter im Durchmesser. Die Schlämmdauer beträgt eine Stunde bei vier Hin- und Herbewegungen in der Minute. Es wurden je zwei Parallelversuche durchgeführt, da die Resultate sehr gut miteinander übereinstimmen.

### 3. Berechnung der Resultate

Die erhaltenen Krümelfraktionen werden bei 80°C getrocknet und im lufttrockenen Zustand gewogen. Dann dispergiert man jede Fraktion für sich durch Kochen mit 2%iger, wässriger Na-hexametaphosphat-Lösung (Calgon). Von den drei gröberen Fraktionen, > 4,5; 4,5-3,0 und 3,0-2,0 mm, werden die Skeletteile grösser als 2,0 mm im Durchmesser abgeseiht und sowohl von der Einwaage als auch von der gewogenen Krümelmenge abgezogen. Die Prozentberechnung bezieht sich, entsprechend der Berechnungsgrundlage bei der Einzelkornanalyse, auf die Feinerde. Die dispergierten feineren Krümelfraktionen werden durch die zugehörigen Siebe geseiht, und man zieht die entsprechenden Sandanteile von den gewogenen Krümelmengen ab. Es sind Einzelkörner, die zusammen mit der abgeschlämmten Fraktion < 0,25 mm zur Berechnung gelangen.

Für die Berechnung der Krümelstabilität trocknet man die stabilgebliebenen Krümel bei 80°C, dispergiert sie nach dem Wägen durch Kochen in 2%iger Calgonlösung und bestimmt den Sandanteil von 0,5-2,0 mm, den man von der Einwaage und der gewogenen Menge der stabilen Krümel abzieht. Mit den reduzierten Gewichten berechnet man den Prozentanteil der stabilen Krümel. Sandkörner > 0,5 mm, die ev. in den Krümeln eingeschlossen sind, können vernachlässigt werden.

### 4. Darstellung der Resultate

In der Arbeit werden die Krümelanalysenresultate graphisch dargestellt. Die Diagramme geben die Krümelverteilung für verschiedene Profiltiefen wieder. Der Flächenanteil aller Krümel, deren Durchmesser grösser als 0,5 mm ist, wird mit einer besonderen Zeichnung versehen, ebenso der Anteil der Feinkoagulate von 0,5-0,25 mm, da dieser Aggregatgrösse eine besondere Bedeutung zukommt.

Um den Krümelzustand und die Krümelstabilität in einer Zahl auszudrücken, wurden die Begriffe Krümelzahl und Stabilitätszahl eingeführt, die wie folgt definiert sind:

Die Krümelzahl gibt an, wieviele Gewichtsprocente der Feinerde in Krümeln vorliegen. Die Differenz zu 100 ergibt die Procente der Einzelkörner und der Feinkoagulate. (siehe 1. Abschnitt sub 1.; 2. und 3.)

\*)Rechnungsbeispiel siehe folgende Seite sub a).



Die Stabilitätszahl gibt an, wieviele Gewichtsprocente der im trockenen Zustand beständigen Aggregate von 0,5-2,0 mm Durchmesser auch wasserbeständig sind. (siehe 2. Abschnitt sub 1.; 2. + 3.)

\*) Rechnungsbeispiel siehe folgende Seite sub b).

In den graphischen Darstellungen entspricht die rechte Begrenzung des Krümelrasters der Krümelzahl. Die Stabilitätszahl ist mit einem besonderen Zeichen eingetragen.

d) Kritik und Abänderungsvorschläge

Der Krümelanalysenapparat hat sich bei der Durchführung der Analysen im grossen und ganzen bewährt. Die erhaltenen Resultate sind zufriedenstellend. Hingegen weist der Apparat einen Mangel auf, der aber leicht zu beheben ist: er ist zu klein. Die Siebe sollten grösser sein, damit grössere Bodenproben untersucht werden können. Besonders in Böden mit Feinkoagulatstruktur kam es vor, dass sich die ganze Einwaage auf dem untersten Sieb absetzte. Dadurch entstand ein dichtes Filter, das die Wassersäule nicht mehr passieren liess. Diesem Nachteil kann aber auch begegnet werden, indem die feinmaschigen Siebe die Form eines zylindrischen Sackes erhalten. Der Boden setzt sich dann auf den Grund des Sackes und die Wassersäule kann durch die Seitenwandungen der Siebe wegfliessen. Schon durch diese einfache Abänderung werden grössere Einwaagen möglich. Als weiteren Nachteil kann man anführen, dass die Siebe einzeln eingesetzt werden müssen. Mit einiger Uebung geht aber diese Arbeit schnell von der Hand. Zudem müsste man bei Verwendung eines geschlossenen Siebsatzes den Vorteil aufgeben, den Analysengang durch die Glaswandungen beobachten zu können.

Die Anforderungen, die im Abschnitt a) aufgestellt wurden, sind im beschriebenen Apparat erfüllt. Als besonderen Vorteil erweist sich der Umstand, dass für eine Analyse nur zwei Liter dest. Wasser benötigt werden. Es können daher ohne Schwierigkeiten Dispergierungsmittel zugesetzt werden, z.B. Calgon, und man kann den abgeschlammten Boden mit Hilfe der Sedimentations- oder Kopeckyschlammanalyse noch weiter untersuchen.

Rechnungsbeispiele

a) Für die Untersuchung des Krümelzustandes (Krümelzahl)

Die Einwaage der lufttrockenen Krümelprobe betrage 25 g

Siebe, Maschenweite in mm	4,5mm	3,0 mm	2,0mm	1,0mm	0,5mm	0,25mm	-
Fraktionen	> 4,5	4,5-3,0	3,0-2,0	2,0-1,0	1,0-0,5	0,5-0,25	< 0,25 mm Ø
Rückstand nach der Schlammung	5,0 g	4,6 g	4,8 g	3,2 g	4,0 g	1,4 g	2,0 g
Rückstand nach dem Dispergieren	3,0 g	1,4 g	0,6 g	0,2 g	0,0 g	0,8 g	-
Der Skelettanteil (3,0+1,4+0,6 = 5,0g) ist von der Einwaage Der Sandanteil (0,2+0,8 = 1,0 g) ist bei der abgeschlammten 0,25 mm zu addieren.							abzuziehen. Fraktion

Aggregatanteil in gr	2,0 g	3,2g	4,2 g	3,0 g	4,0 g	0,6 g	3,0 g	
Aggregatanteil in %	10,0 %	16,0 %	21,0 %	15,0 %	20,0 %	3,0 %	15,0 %	

Krümelmahl = Summe aller Krümelanteile > 0,5 mm in % = 10,0+16,0+21,0+15,0  
+20,0 = 82

b) Für die Untersuchung der Krümelmahlstabilität (Stabilitätszahl)

Die Einwaage an luftgetrockneten, trockenbeständigen Aggregaten + Sand von 0,5-2,0 mm im Durchmesser betrage 14 g.

Rückstand nach der Schlämzung 12 g

Rückstand nach dem Dispergieren 4 g

Anteil an wasserbeständigen Krümeln 8 g

Anteil an wasserunbeständigen Krümeln 2 g

Total Aggregate 10 g

Stabilitätszahl 80

=====

#### D. Wasser- und Luftkapazität in natürlicher Lagerung

Das Bodengefüge kennzeichnet die räumliche Anordnung der festen bestandteile und des Hohlraumsystems im Boden.

Die Wasserkapazität gibt an, wieviele Volumenprocente Wasser ein Boden enthält, wenn er durch kapillaren Aufstieg mit Wasser gesättigt ist.

Die Luftkapazität gibt an, wieviele Volumenprocente Luft ein Boden enthält, wenn er durch kapillaren Aufstieg mit Wasser gesättigt ist.

Das Gesamtporenvolumen ist gleich der Summe von Wasser- und Luftkapazität.

Die Bestimmung des Gesamtporenvolumens, der Wasser- und Luftkapazität an Böden in natürlicher Lagerung kann aufschlussreiche Anhaltspunkte über das Bodengefüge geben. Es sind aber einige Vorbehalte anzubringen.

Gesamtporenvolumen, Wasser- und Luftkapazität können in verschiedenen Böden gleich gross sein, auch wenn die Struktur und die Kornzusammensetzung dieser Böden verschieden sind.

Die Wasserkapazität gibt nur an, wieviele Procente des Bodenvolumens sich durch kapillaren Aufstieg mit Wasser füllen. Sie sagt über die räumliche Verteilung, über die Durchmesser und Form der kapillar wirksamen Poren nichts aus. Die gleichen Einwände gelten auch für die Luftkapazität.

Die drei Porenvolumenwerte sind deshalb nur grobe Kennzahlen für das Bodengefüge. Die vielgestaltigen Feinheiten, wie sie in

natürlich gelagerten Böden vorhanden sind, kommen darin nicht zum Ausdruck. Um diese Werte richtig deuten zu können, muss man sowohl die Resultate der Kornanalyse und der Krümelanalyse, als auch die Profilbeschreibung zu Rate ziehen. Eine Vervollständigung der Untersuchung durch Beizug der mikromorphologischen Dünnschliffanalyse wäre vorteilhaft (vergl. Richard, 1950).

#### a) Bisherige methodische Grundlagen

---

Die Bestimmung der Wasser- und Luftkapazität an Böden in natürlicher Lagerung bietet sehr grosse Schwierigkeiten. Der Boden hängt in horizontaler und vertikaler Richtung zusammen. Jede Probenahme aus diesem geschlossenen Verband heraus stört deshalb die natürliche Lagerung. Diesen Umstand berücksichtigen einige Methoden, wie die Wasser- und Luftdurchlässigkeitsmessungen im Felde und verschiedene andere Methoden, die das Bodengefüge durch den Widerstand kennzeichnen, den es eindringenden Sonden entgegengesetzt. Alle diese Feld- oder Schnellmethoden ergeben Testzahlen, die aber keinen eindeutigen Vergleich erlauben, weil sie vom jeweiligen Wassergehalt des Bodens sehr stark beeinflusst werden.

Diese Methoden stehen daher hinter jenen zurück, die exakte Zahlen liefern. Es sind verschiedene Methoden, bei denen die Wasser- und Luftkapazität an Stechzylinderproben gemessen wird.

Bei diesen Methoden werden die Bodenproben mit Hilfe von Stahlzylindern verschiedenen Inhaltes, die am unteren Rande scharf geschliffen sind, ausgestochen. Die Schwierigkeiten der Probenahme sind vor allem auf Wurzelstücke und Skelettbrocken zurückzuführen. Sie bleiben sich für alle Stechzylindermethoden gleich. Hingegen gehen die Meinungen auseinander bezüglich der zu verwendenden Zylindergrösse und des Arbeitsganges beim Bestimmen der Wasser- und Luftkapazität.

Burger (1927) verwendet bei seiner Wasserpyknometermethode Stechzylinder von 1000 ccm Inhalt. Bei der Probenahme wird der Stechzylinder mit einem schweren Holzhammer in den Boden eingetrieben. Die Bodenprobe wird unten und oben eben abgeschnitten und mit Deckeln verschlossen. Im Laboratorium werden die Proben zur Wassersättigung in Wasser untergetaucht und 24 Stunden darin belassen. Anschliessend werden die Proben mit einem scharfen Messer beidseits eben abgeschnitten, nachdem man sie eine Stunde lang (nach späteren Untersuchungen zwei Stunden) hat abtropfen lassen. Es dürfen nur 1000 ccm natürlich gelagerten Bodens zur Untersuchung gelangen. Nun werden die Proben gewogen, getrocknet und wieder gewogen. Die gefundene Wassermenge in Volumenprozenten entspricht der Wasserkapazität. Die feste Bodensubstanz wird in Skelett, Feinerde und Wurzeln zerlegt, gewogen und das spezifische Gewicht mit Hilfe eines Wasserpyknometers bestimmt. Aus den erhaltenen Zahlen wird das Volumen der festen Boden-

substanz errechnet. Die Luftkapazität erhält man durch Subtraktion der Volumenprocente Wasser und feste Bodensubstanz von 100. Nachteile dieser Methode sind:

- 1) Beim Hineintreiben der grossen Stechzylinder mit einem schweren Holzhammer muss sehr viel Kraft angewendet werden. Kleinere Widerstände können deshalb nicht mehr herausgeföhlt werden. Diese können aber genügen, die Bodenprobe aufzurütteln, wenn der Boden trocken ist, oder es können tiefe Furchen ausgekratzt werden, wenn der Boden nass und plastisch ist. Es können daher Bodenproben mitgenommen werden, die man als einwandfrei annimmt, die es aber nicht sind.
- 2) Das ebene Abschneiden der relativ grossen Flächen bereitet erhebliche Schwierigkeiten, besonders in lockeren, gut gekrümelten Böden und in Böden mit Einzelkornstruktur.
- 3) Das Ein- oder Untertauchen der Zylinderproben föhrt oft zu Fehlresultaten, wie unten nachgewiesen wird.
- 4) Werkzeuge und Zylinderproben erreichen ein erhebliches Gewicht. Für den Transport sind Traktionsmittel nötig, die nicht immer zu haben sind.

Neueren Datums ist die Ermittlung der Luftkapazität nach der sog. Luftpyknometermethode. Sie beruht auf dem Gasgesetz von Boyle-Mariotte. Die Bodenprobe gibt man in ein luftdicht verschliessbares Gefäss von bekanntem Volumen. Das Gefäss steht durch ein schliessbares Röhrchen mit dem Pyknometer in Verbindung, in dem ein bestimmtes Vacuum (Vacuumpyknometer) oder ein bestimmter Druck (Druckluftpyknometer) hergestellt wird. Oeffnet man den Hahn zwischen Pyknometer und Gefäss mit Bodenprobe, dann gleichen sich die beiden Drucke sogleich aus. Mit Hilfe der Druckausgleichsdifferenzen von zwei Messungen, mit und ohne Bodenprobe, lässt sich die Luftkapazität der Zylinderprobe errechnen. Die Wasserkapazität wird gravimetrisch ermittelt.

Torstenson und Erikson (1936) und Nitsch (1938) haben für die Luftpyknometermethode praktische Apparaturen entwickelt. Die apparativen Schwierigkeiten sind aber dennoch sehr gross.

Die methodischen Untersuchungen Gliemeroths (1948) haben ergeben, dass die Volumina der festen Bodensubstanz, ermittelt durch Wägen und Dividieren mit dem mittleren spezifischen Gewicht, mit etwas geringeren Fehlern behaftet sind als die mit Hilfe des Luftpyknometers ermittelten Werte. Gliemeroth schlägt vor, bei Untersuchungen an Böden, die nur kleine Differenzen im Humusgehalt aufweisen, direkt die Gewichte der Bodentrockensubstanz von 100 ccm Stechzylinderproben miteinander zu vergleichen. Der Untersuchungsengang erföhrt dadurch eine wesentliche Vereinfachung.

Die spezifischen Gewichte verschiedener Böden sind aber nicht gleich, vor allem bei Böden mit verschiedenem Humusgehalt. Demolon (1948) schlägt vor, für die anorganischen Bodenkomponenten ein mittleres spezifisches Gewicht von 2,6 zu verwenden, das dem gefundenen Mittelwert verschiedener Autoren entspricht. Bei Böden mit mehr als 3% Humus ist vom spezifischen Gewicht 2,6 ein Abzug von  $\frac{1,5 \text{mal } \% \text{ Humus}}{100}$  vorzunehmen.

b) Verwendete Methode

Für die vorliegenden Untersuchungen wurden 100 ccm Stechzylinder verwendet. Je Bodenhorizont wurden drei Parallelproben untersucht, um ein besseres Mittel zu erhalten. Bei der Wassersättigung der Bodenproben wurden die Vorschriften Burgers eingehalten.

Das Volumen des Wassers wurde gravimetrisch bestimmt. Das Volumen des Skelettes wurde errechnet aus dem Skelettgewicht durch Division mit dem mittleren spezifischen Gewicht von 2,6. Das Volumen der Feinerde wurde errechnet mit Hilfe der spezifischen Gewichte, für den Mineralerdeanteil 2,6 und für den Humusanteil 1,2. Das spezifische Gewicht für Humus von 1,2 wurde gewählt, weil das spezifische Gewicht von Torfhumus ca. 1,2 beträgt, und weil die hohen Humusgehalte der untersuchten degradierten Braunerden ein sehr weites C/N-Verhältnis wie Torf aufweisen.

Vor der Berechnung der Wasser- und Luftkapazität wurde das Volumen des Skelettes vom Zylindervolumen abgezogen. Die Berechnung der Wasser- und Luftkapazität bezieht sich auf den natürlich gelagerten, skelettfreien Boden, dessen Trockensubstanz der Feinerde entspricht. Die festgestellten Volumenanteile von Wasser und Feinerde sind zu dividieren mit  $\frac{100 - \text{Volumen Skelett}}{100}$ .

Rechnungsbeispiel

Eine 100 ccm Bodenprobe enthalte

41,0 gr Wasser  
26,0 gr Skelett  
100,0 gr Feinerde mit 10% Humus

Volumen Wasser		=	41,0 ccm
Volumen Skelett	26 : 2,6	=	10,0 ccm
Volumen Feinerde:	Humus 10 : 1,2 = 8,3 ccm		
	Mineralerde 90 : 2,6 = 34,6 ccm	=	42,9 ccm
Volumen Luft	100 - (41,0 + 10,0 + 42,9)	=	6,1 ccm
Wasserkapazität	41,0 : 0,9	=	45,6 %
Luftkapazität	6,1 : 0,9	=	6,8 %
Volumen skelettfreie Bodensubstanz	42,9 : 0,9	=	47,6 %
	Total	=	100,0 %
			=====

Bei der Durchführung der Analysen konnte beobachtet werden, dass das Gefüge jener Proben, die sich bei der Stabilitätsmessung als unstabil erwiesen hatten, beim Untertauchen unter den Wasserspiegel durch die eingeschlossene Luft gesprengt wurde. An der Oberfläche der Bodenproben bildeten sich Auswürfe in Form von kleinen Kratern, die nach dem Abtropfen als breiige Masse weggestrichen werden konnten. Bei jenen Bodenproben hingegen, die sich als stabil erwiesen hatten, blieben zwischen den Krümeln kleine Wasserbrücken bestehen.

Die Analysen ergaben denn auch ganz unwahrscheinlich kleine Luftkapazitäten, die weder den Schätzungen bei der Probenahme, noch den Krümelanalysenresultaten gerecht wurden.

Die Bestimmung der Wasser- und Luftkapazität wurde daher wiederholt, wobei die Proben durch kapillaren Wasseraufstieg gesättigt wurden, wie es russische Forscher der Schule Dojarenko (1931) vorgeschlagen hatten.

Auf die Unterseiten der eben abgeschnittenen Zylinderproben kam ein Streifen Filtrierpapier zu liegen. Darauf kam ein doppeltes Drahtgitter aus Fliegengewebe, um eine Wasseransammlung zwischen Saugpapier und Unterlage zu vermeiden. Die Unterlage bestand in einer genügend starken Holzlatte, die über ein Wasserbassin gelegt wurde. Darauf kamen die Zylinderproben zu stehen. Nur die beiden Ende des Filtrierpapierstreifens hingen ins Wasser hinein. Durch die kapillare Saugkraft konnte nun das Wasser in den Boden eindringen. Probewägungen ergaben, dass nach 42 Stunden alle Proben mit Wasser gesättigt waren. Es war äusserlich daran zu erkennen, dass sich an den Oberseiten der Bodenproben dünne Wasserfilme ausschieden. Es ergaben sich denn auch wesentlich höhere Luftkapazitäten, wie aus der untenstehenden Tabelle 3 ersichtlich ist.

Tab.3 Wasser- und Luftkapazität der Bodenproben nach verschiedener Art der Wassersättigung

1. Durch Eintauchen:					2. Durch kap. Wasseraufstieg:		
Bodentiefe	Stabil.-zahl	Skelett-freie B.subst.	Wasser-kapaz.	Luft-kapaz.	Skelett-freie B.subst.	Wasser-kapaz.	Luft-kapaz.
<b>Profil "Kreuzlingen I", mässig entwickelter Boden.</b>							
		Vol.%	Vol.%	Vol.%	Vol.%	Vol.%	Vol.%
0-5cm	79,2	39,4	57,1	3,5	41,0	45,5	13,3
10 cm	78,3	42,7	52,9	4,4	41,8	43,1	15,1
30 cm	36,6	48,1	46,6	5,3	44,8	39,6	15,6
70 cm	7,0	60,3	36,7	3,0	61,1	35,6	3,3
140cm	0,0	63,8	36,8	-0,6	61,0	37,9	1,1
<b>Profil Urdorf, voll entwickelte Braunerde.</b>							
0-5 cm	75,5	38,7	57,7	3,6	36,5	49,4	14,1
10 cm	74,9	46,0	49,7	4,3	45,2	47,2	7,6
30 cm	60,5	49,9	45,6	4,5	51,9	43,4	4,7
70 cm	53,5	52,3	44,5	3,2	55,6	43,5	0,9
90 cm	14,3	54,4	42,3	3,3	64,2	37,4	-1,6
<b>Profil Irchel, stark degradierte Braunerde.</b>							
10 cm	88,7	35,6	57,0	7,4	39,1	39,6	21,3
30 cm	25,8	46,0	47,7	6,3	53,7	39,9	6,4
70 cm	6,7	55,3	41,9	2,8	53,7	42,4	3,9
140cm	8,5	55,2	42,0	2,8	57,7	42,5	-0,2

Aus diesen Resultaten kann folgendes entnommen werden:

- 1) In jenen Horizonten, die eine stabile Krümelung besitzen, erhält man bei kapillarer Wassersättigung bedeutend grössere Luftkapazitäten als beim Sättigen mit Wasser durch Untertauchen.
- 2) Bei den Proben mit unstabiler Krümelung bleiben sich die Luftkapazitätswerte bei beiden Methoden annähernd gleich.

- 3) Die Volumina der skelettfreien Bodensubstanz bleiben sich im allgemeinen gleich. Die Erhöhung der Luftkapazität erfolgt somit auf Kosten der Wasserkapazität.

Beim schnellen Eintauchen jener Zylinderproben, die stabil gekrümelt sind, füllen sich die Luftkanäle sofort mit Wasser. Nachfolgend füllen sich auch die kapillaren Poren der Krümel. Die aus den Krümeln austretende Luft sammelt sich in den grösseren Kapillaren und kann nur noch teilweise entweichen. Beim Abtropfenlassen kann das Wasser in den Luftkanälen nicht abfliessen, da die Luftblasen den Weg versperren. In den lockeren Krümelböden bleibt zudem Wasser zwischen den Krümeln zurück, das nur langsam abfliessen kann. Bei der Wassersättigung durch kapillaren Aufstieg werden die Luftporen überhaupt nie mit Wasser gefüllt.

In den dichten und unstabilen Böden mit kleinen Luftkapazitäten bleiben die Luftkapazitäten bei beiden Sättigungsarten annähernd gleich. Beim schnellen Untertauchen entweicht ein Teil der Luft durch eine Gefügesprengung, wodurch die Bodenvolumenwerte etwas kleiner ausfallen. Bei kapillarer Sättigung tritt diese Erscheinung nicht ein.

### III. Zusammenstellung der Definitionen

=====

Einzelteilchen sind feste Bodenbestandteile, die sich als Individuen verhalten und sich nur durch starke chemische und physikalische Eingriffe weiter zerlegen lassen.

Bodenart kennzeichnet die Zusammensetzung eines Bodens nach Einzelteilchen (tonig, lehmig).

Feinkoagulate sind trocken- und wasserbeständige Aggregate, die kleiner sind als 0,5 mm im Durchmesser. Sie lassen sich durch Kochen in Wasser mit geeigneten Dispergatoren in ihre Einzelteilchen zerlegen.

Krümel sind trocken- und wasserbeständige Aggregate, die grösser sind als 0,5 mm im Durchmesser. Sie lassen sich durch Kochen in Wasser mit geeigneten Dispergatoren in ihre Einzelteilchen zerlegen.

Krümelzahl gibt an, wieviele Gewichtsprozent der Feinerde in Krümeln vorliegen. Die Differenz zu 100 ergibt die Prozente der Einzelkörner und der Feinkoagulate.

Stabilitätszahl gibt an, wieviele Gewichtsprozent der im trockenen Zustand beständigen Aggregate von 0,5 - 2,0 mm  $\emptyset$  auch wasserbeständig sind.

Bodenstruktur kennzeichnet die gegenseitigen Beziehungen der Bodeneinzelteile.

Einzelkornstruktur: die Einzelteilchen sind unter sich nicht verbunden.

Feinkoagulatstruktur: die Kolloide bilden Feinkoagulate.

Krümelstruktur: die Kolloide sind ausgeflockt und bilden Krümel.

Wasserkapazität gibt an, wieviele Volumenprocente Wasser ein Boden enthält, wenn er durch kapillaren Aufstieg mit Wasser gesättigt wird.

Luftkapazität gibt an, wieviele Volumprocente Luft ein Boden enthält, wenn er durch kapillaren Aufstieg mit Wasser gesättigt ist.

Gesamtporenvolumen ist gleich der Summe von Wasser- und Luftkapazität.

#### IV. Beschreibung der untersuchten Bodenprofile und Diskussion der

##### ===== Analysenresultate =====

Die Beschreibung der einzelnen Bodenprofile wird durch die Angaben über Bodenbezeichnung, Vegetation, Datum der Profilaufnahme, geographische und örtliche Lage und über das Muttergestein eingeleitet. Es folgen unter

- a) die Profilmerkmale und die besonderen Zeichen der einzelnen Horizonte, aus denen die Proben entnommen wurden. Unter
- b) folgt die Diskussion der Analysenresultate. Es werden darin jene Zahlen hervorgehoben, die für das betreffende Profil besonders wichtig sind.

Die Beurteilung aller Profile zusammen erfolgt im Abschnitt V.

Bei der Gegenüberstellung der Analysenresultate stehen diejenigen der Kornanalyse an erster Stelle. Sie sollen über die Möglichkeit der Aggregatbildung Aufschluss geben. An zweiter Stelle folgen die Resultate der Krümelanalyse, die den Strukturzustand der Profile kennzeichnen und an dritter Stelle kommen die Resultate der Wasser- und Luftkapazitätsmessungen. Sie geben Anhaltspunkte über das Bodengefüge.



A. Profil "Villnachern-Schachen", Aueboden der Braunerdeserie

Vegetation: *Salix alba* - *Salix triandra* - Assoziation

Datum der Profilaufnahme: 29. Juli 1948

Geographische Lage: S.A. Blatt 38, K. 655025/257020

Oertliche Lage: Das Profil liegt nahe am flachen Aareufer. Es ist der periodischen Ueberschwemmung ausgesetzt. H.ü.M. 344 m

Muttergestein: Aareschwemmsand.

a) Beschreibung des Bodenprofils

In diesem wenig tiefgründigen Profil konnte an Hand der Horizontenfolge die letzte Ueberschwemmung deutlich nachgewiesen werden. Unter dem A<sub>1</sub>-Horizont von 0 - 5 cm lag ein C-Horizont bis 22 cm Tiefe. Es folgte ein 5 cm mächtiger A<sub>1</sub>-Horizont und darunter wieder ein C-Horizont. Die Horizontengrenzen waren diffus, ausgenommen die obere Grenze des A<sub>1</sub><sup>c</sup>-Horizontes, die sehr deutlich zu erkennen war. Die physiologische Gründigkeit reichte bis in das Grundwasser hinein, dessen Spiegel in 50 cm Tiefe lag. CaCO<sub>3</sub> ist in allen Horizonten vorhanden. Die biologische Aktivität ist mittel, die Bodenoberfläche ist mit Lumbrizidenexkrementen übersät. Die Bodenfarbe ist in den A-Horizonten schwarzgrau und in den C-Horizonten hellgrau.

Die vier Horizonte unterscheiden sich ausser durch die Farbe vor allem durch die verschiedene Körnung. Die beiden Mullhorizonte haben grössere Anteile an Schluff und Staub. Die beiden C-Horizonte unterscheiden sich dadurch, dass der obere staubsandig und der untere grobsandig bis skelettig ist.

b) Diskussion der Analysenresultate (vergl. Fig. und Tab. 4, 5)

1. Die Kornanalyse gibt die selektive Ablagerung aus dem Ueberschwemmungswasser deutlich wieder. Die Sedimentation setzt erst beim Zurückgehen des Wassers ein. Die Stromgeschwindigkeit nimmt langsam ab, sodass zuerst die groben und dann immer feinere Fraktionen abgelagert werden. Die Schluff- und Tonanteile sind in den Mullhorizonten deutlich grösser als in den C-Horizonten. Die Mullhorizonte entstehen durch die Pflanzenbesiedlung.
2. Die Krümelanalyse zeigt eine schwache Krümelung in den beiden Mullhorizonten (22 % und 35 %). Für die Krümelbildung sind in erster Linie die Humusstoffe und die feinen Faserwurzeln verantwortlich, da der Anteil an kolloidem Ton in allen Horizonten sehr klein ist.
3. Die Krümelstabilität nimmt von oben nach unten ab (Stabilitätszahlen 48 bis 17). Sie ist mittel bis schwach. Die Stabilitätszahl ist in den beiden C-Horizonten bedeutend grösser

als die zugehörige Krümelzahl. Daraus ist ersichtlich, dass die Krümel ziemlich stabil, aber nur in geringer Zahl vorhanden sind. Es handelt sich um einen Sandboden in Einzelkornstruktur, dessen Mullhorizonte zu krümeln beginnen.

4. Die Gefügeanalyse konnte nicht durchgeführt werden, einerseits weil die Horizonte zu wenig mächtig waren, andererseits weil das Gefüge sehr primitiv war und bei der Probenahme sofort zusammenfiel.

0-4 cm	25	25	25	35,0	35,0	9,1	9,3	12,8	12,9	23,1	18,5	8,4	7,0
10 cm	14	14	14	5,1	5,1	7,3	9,3	17,5	17,5	23,8	35,5	32,5	7,4
25 cm	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
50 cm	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Profil-Humuse	Gew. %	c/N	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %	pH
Profil-Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Schluff
Profil-Staubsand	Staubsand	Staubsand	Staubsand	Staubsand	Staubsand	Staubsand	Staubsand	Staubsand	Staubsand	Staubsand	Staubsand	Staubsand	Staubsand
Profil-Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand

Tab.4 Kornanalysen des Profils "Villichern-Schachen"

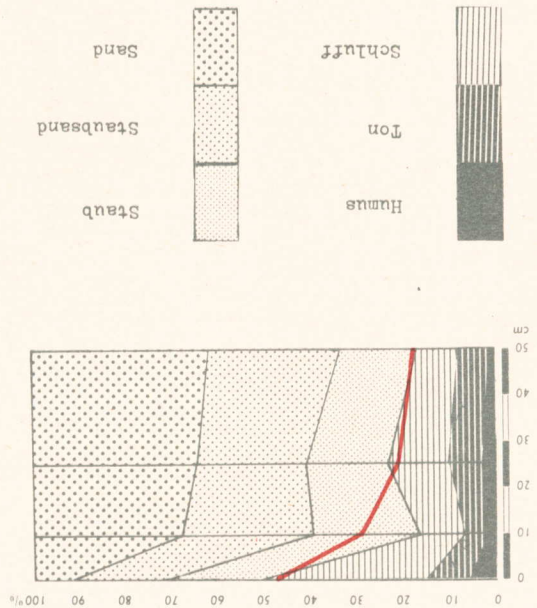


Fig. 4 Kornanalysen des Profils "Villichern-Schachen"

0-4 cm	25	25	25	3,2	3,2	1,4	1,4	3,5	3,5	5,9	7,5	10,6	21,5
10 cm	11,1	11,1	11,1	4,0	4,0	1,4	1,4	3,5	3,5	5,9	7,5	10,6	21,5
25 cm	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
50 cm	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Profil-Humuse	Gew. %	c/N	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %	Gew. %
Profil-Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Schluff	Schluff
Profil-Staubsand	Staubsand	Staubsand	Staubsand	Staubsand	Staubsand	Staubsand	Staubsand	Staubsand	Staubsand	Staubsand	Staubsand	Staubsand	Staubsand
Profil-Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand	Sand

Tab.5 Krümelanalysen des Profils "Villichern-Schachen"

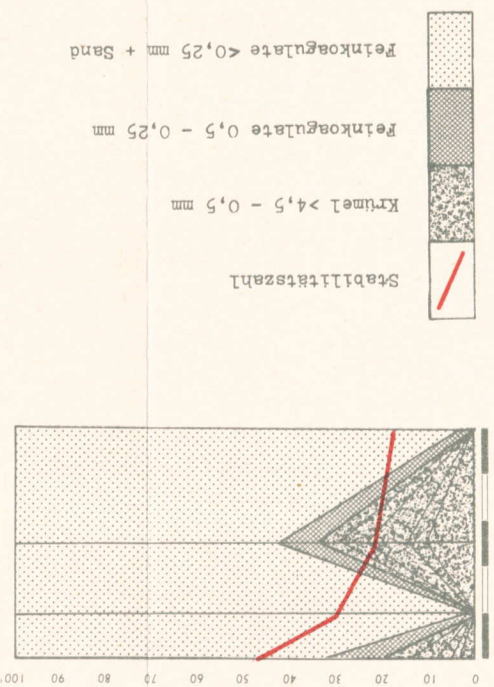


Fig. 5 Krümelanalysen des Profils "Villichern-Schachen"

B. Profil "Kreuzlingen I", mässig entwickelter Boden

(vergl. Richard, 1945; Etter, 1943)

Vegetation: Querceto-Carpinetum aretosum

Datum der Profilaufnahme: 10. Juli 1948

Geographische Lage: S.A. Blatt 60, K. 730950/277700

Oertliche Lage: Das Profil liegt ca. 80 m vom Waldrand entfernt  
an einem Hang mit ca. 10° Neigung nach Norden.  
H.ü.M. 468 m

Muttergestein: Süsswassermolasse

a) Beschreibung des Bodenprofils

In diesem tiefgründigen Profil können folgende Horizonte unterschieden werden. Von 0 - 60 cm reicht der Mullhorizont und von 60 - 80 cm ein Uebergangshorizont zum darunterliegenden C-Horizont. Die Horizontgrenzen sind diffus. Der Hauptwurzelraum umfasst 40 cm und der Nebenwurzelraum reicht bis 70 cm. Die biologische Aktivität ist mittel. CaCO<sub>3</sub> ist in allen Horizonten vorhanden. Die Bodenfarbe ist oben schwarzgrau. Die schwarze Farbe, die auf die kolloiden Humusstoffe zurückzuführen ist, nimmt gegen unten ab. In 80 cm Tiefe ist das Profil hellgrau.

Die Horizonte können leicht an Hand der Bodenfarbe und an Hand des Gefüges ermittelt werden. Der Mullhorizont ist schwarzgrau und locker. Der Uebergangshorizont ist dicht und fleckig schwarzgrau bis hellgrau gefärbt. Der C-Horizont ist hellgrau und dicht.

Die Moränendecke, die auf dem nahen Plateau noch vorhanden ist, wurde wahrscheinlich erst spät, nach dem Rückgang der Gletscher, aberodiert, so dass das Profil noch jung ist. Die anstehende, sehr CaCO<sub>3</sub>-reiche Molasse muss der Bodenentwicklung bedeutenden Widerstand geleistet haben, so dass das Profil noch nicht voll entwickelt ist.

b) Diskussion der Analysenresultate (vergl. Fig. und Tab. 6, 7, 8)

1. Die Kornanalyse (Fig. 6) ergibt mit zunehmender Tiefe abnehmende Tongehalte. Auch die Humusgehalte nehmen nach unten ab. Die Tonbildung ist wenig fortgeschritten (24-16%). Eine Tonverlagerung hat noch nicht stattgefunden.
2. Die Krümelanalyse (Fig. 7) zeigt eine gute Krümelstruktur im Hauptwurzelraum (77%, 82%, 60%). Im Nebenwurzelraum liegt eine Einzelkornstruktur mit einem gewissen Anteil an Feinkoagulaten (13%), und im Untergrund eine vollständige Einzelkornstruktur vor.

Die Krümelstabilität ist im Hauptwurzelraum hoch bis mittel (Stab. Zahlen 79; 37). Im Nebenwurzelraum sind die Aggregate instabil (7,0). Der Vergleich zwischen Krümelzahl, Stabilitätszahl und Krümelgrösse zeigt den Einfluss der grossen

Krümel, die stabiler sind als die kleinen, da die Oberfläche, an der das Wasser angreifen kann, mit abnehmender Krümelgrösse zunimmt. Die Ursache der Bildung grosser Krümel muss in der Wurzelverbauung liegen, da diese unterhalb des Wurzelraumes gänzlich verschwinden.

3. Die Wasser- und Luftkapazitäten (Fig.8) entsprechen dem Befund der Krümelanalyse. Die gekrümelten Horizonte besitzen eine beachtliche Luftkapazität (14 - 16 %) und ein grosses Gesamtporenvolumen von 55 - 60 %. Die Horizonte mit Einzelkornstruktur haben praktisch keine Luftkapazität mehr (3; 1 %) und das Gesamtporenvolumen ist kleiner als 40 %. Die Wasserkapazität nimmt von oben nach unten ab. Sie ist in den gekrümelten Horizonten, die einen höheren Humusgehalt aufweisen, wesentlich grösser.



Fig.6 Kornanalysen des Profils "Kreuzlingen I"

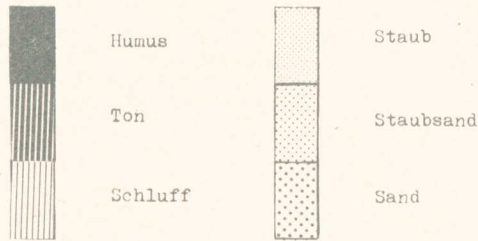
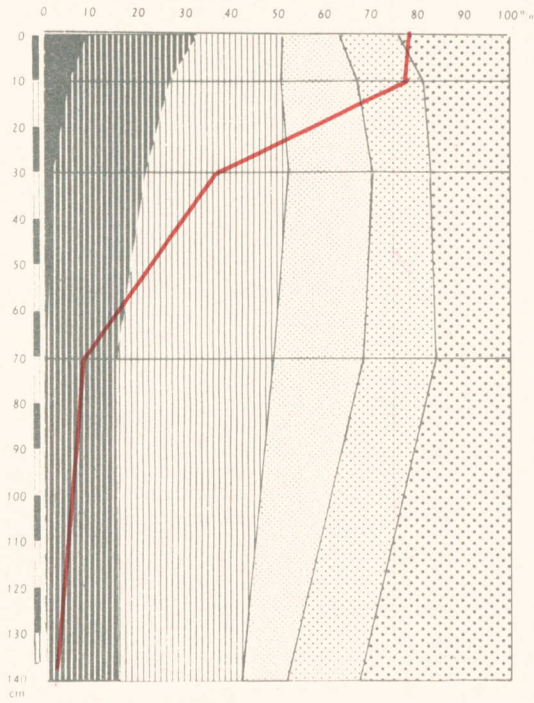


Fig.7 Krümelanalysen des Profils "Kreuzlingen I"

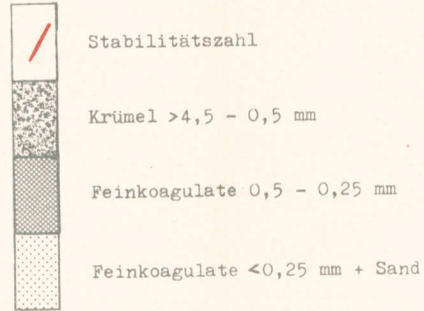
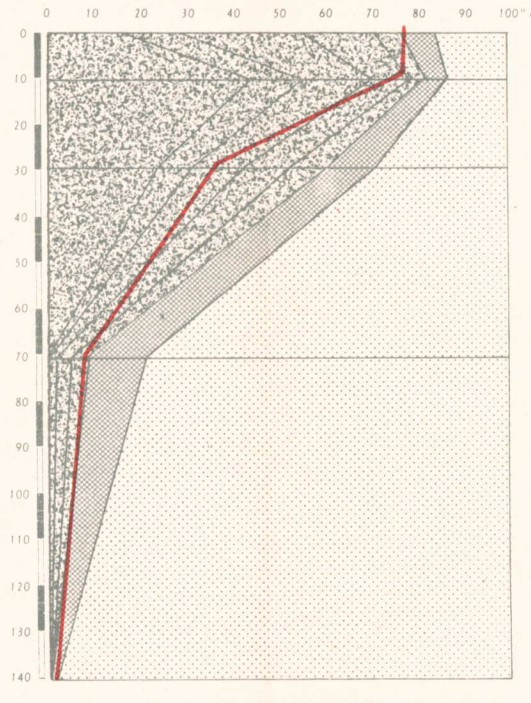
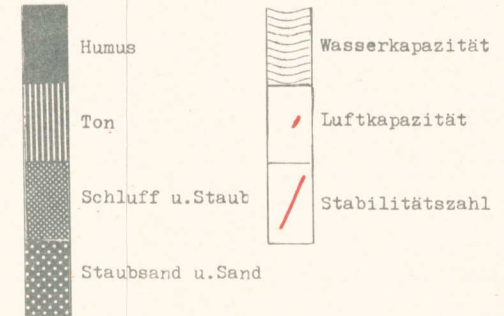
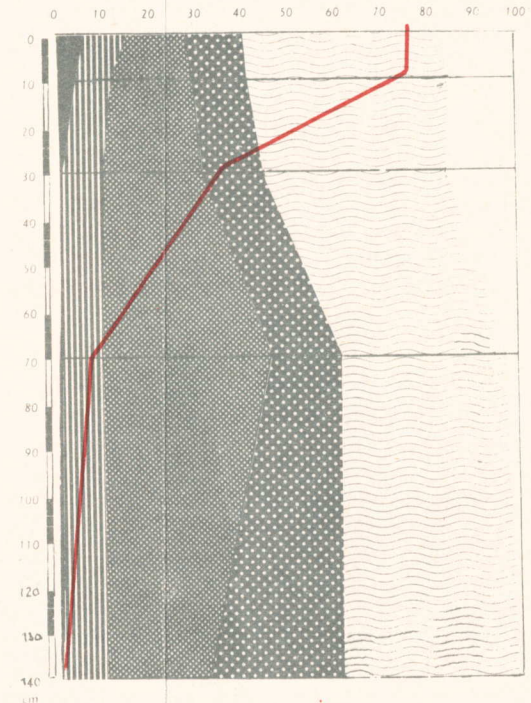


Fig.8 Wasser- und Luftkapazitäten des Profils "Kreuzlingen I"



Tab.6 Kornanalysen des Profils "Kreuzlingen I"

Profiltiefe	Gew.% Humus	C/N	Gew.% Ton <0,002	Gew.% Schluff 0,002-0,02	Gew.% Staub 0,02-0,05	Gew.% Staubsand 0,05-0,10	Gew.% Sand 0,10-2,0	pH.
0,5cm	9,0	29	23,7	18,4	12,2	12,7	24,0	6,9
10 cm	5,7	18	21,4	23,9	16,5	13,7	18,9	7,0
30 cm	1,9	13	19,8	30,6	17,6	12,5	17,4	7,2
70 cm	0,9	9	14,5	33,9	19,2	15,4	16,1	7,2
140cm	-	-	16,0	26,3	9,7	15,2	32,8	7,2

Tab.7 Krümelanalysen des Profils "Kreuzlingen I"

Profiltiefe	Gew.% Krümel >4,5	Gew.% Krümel 4,5-3,0	Gew.% Krümel 3,0-2,0	Gew.% Krümel 2,0-1,0	Gew.% Krümel 1,0-0,5	Gew.% Feinkoag. 0,5-0,25	Gew.% Feinkoag. <0,25 mm + Sand	Krüm. zahl	Stab zahl
0,5 cm	15,8	12,8	26,7	15,5	6,5	6,7	16,0	77,3	79,2
10 cm	44,2	11,1	15,9	7,5	3,9	4,6	13,2	82,2	78,3
30 cm	23,6	7,6	11,6	9,8	7,7	9,8	29,9	60,3	36,6
70 cm	0,0	0,6	1,3	3,0	4,3	12,6	78,2	9,2	7,0
140 cm	0,1	0,0	0,1	0,2	0,5	1,4	97,8	0,8	0,0

Tab.8 Wasser- und Luftkapazitäten des Profils "Kreuzlingen I"

Profiltiefe	Vol.% Humus	Vol.% Ton <0,002	Vol.% Schluff u. Staub 0,002-0,05	Vol.% Sand und Staubsand 0,05-2,0	Vol.% Boden	Gesamt-poren-volumen	H <sub>2</sub> O-kap.	Luftkap.
0,5 cm	7,2	8,0	13,4	12,4	41,0	59,0	45,5	13,5
10 cm	4,8	8,0	17,1	11,9	41,8	58,2	43,1	15,1
30 cm	1,8	8,5	21,5	13,0	44,8	55,2	39,6	15,6
70 cm	1,1	8,7	36,3	15,0	61,1	38,9	35,6	3,3
140 cm	-	9,8	21,9	29,3	61,0	39,0	37,9	1,1

C. Profil "Urdorf", voll entwickelte Braunerde

(vergl. Richard, 1945 und 1950; Etter, 1943)

Vegetation: Querceto-Carpinetum aretosum

Datum der Profilaufnahme: 29. Juli 1948

Geographische Lage: S.A. Blatt 160, K. 675900/247850

Oertliche Lage: Das Profil liegt in einem Hang mit einer

W.S.W.-Neigung von ca. 10°. H.ü.M. 553 m

Muttergestein: Würmmoräne

a) Beschreibung des Bodenprofils

Das Profil Urdorf ist tiefgründig. Die Horizonte: A<sub>1</sub> bis 20 cm, A<sub>1-2</sub> bis 40 cm, A<sub>2</sub> bis 60 cm, AC bis 80 cm und C sind deutlich erkennbar. Die Horizontengrenzen sind diffus bis deutlich. Der Hauptwurzelraum reicht bis 60 cm und der Nebenwurzelraum bis 70 cm. Vereinzelte Wurzelstränge sind, verlassenen Wurmröhren entlang, bis in den C-Horizont hinein vorgedrungen. Die CaCO<sub>3</sub>-Grenze liegt zwischen 60 und 80 cm. Die biologische Aktivität ist sehr hoch. Die Bodenoberfläche ist mit Wurmkot übersät. Die Farbe des Bodens ist oben schwarzgrau und wird gegen unten gleichmässig heller. Von 50 cm an abwärts tritt eine leichte Brauntönung hinzu. Der C-Horizont ist hellgrau.

Der A<sub>1</sub>-Horizont, bis 20 cm Tiefe, zeichnet sich durch rundliche, schwarzgraue Krümel aus. Der A<sub>1-2</sub>-Horizont ist in der Farbe schon bedeutend heller. Die Krümel nehmen mehr kantige Form an. Dieser Horizont bildet den Uebergang zum A<sub>2</sub>-Horizont, der durch seine bräunliche Färbung und geringere Krümelung hervortritt. Der AC-Horizont ist fleckig graubraun bis hellgrau gefärbt. Er bildet den Uebergang zum hellgrau gefärbten C-Horizont, der noch vereinzelte Wurmlöcher aufweist, die mit gräulicher Erde ausgekleidet sind. Im übrigen ist dieser Horizont dicht.

b) Diskussion der Analysenresultate (vergl. Tab. und Fig. 9, 10, 11)

1. Die Kornanalyse ergibt grosse Tonanteile (~40%) und eine schwache Tonanreicherung in 70 cm Tiefe. Der Humusgehalt nimmt von oben nach unten ab (8% in 0 - 5 cm, 1% in 70 cm).
2. Dieses Profil besitzt eine gute Krümelstruktur (Fig. 10). Im Hauptwurzelraum überwiegen die Krümel > 4,5 mm ganz beträchtlich, mit zunehmender Tiefe treten sie stark zurück (12%; 37%; 54%; 6%). Unterhalb des Nebenwurzelraumes nehmen die Feinkoagulate deutlich zu (17%; 19%). Die Krümelstabilität nimmt von oben nach unten langsam ab (Stabilitätszahlen 76; 75; 61; 54). Sie kann in allen Horizonten als hoch bezeichnet werden, mit Ausnahme des C-Horizontes, der instabil ist (14%).

3. Die Luftkapazitäten sind relativ klein und nehmen von oben nach unten stetig ab (von 14 auf 1%). Die Wasserkapazitäten sind gross und sie nehmen gleichfalls von oben nach unten ab (von 49 auf 43%).

Der Ton, der bei der Wassersättigung stark quoll, mag die kleinen Luftkapazitäten verursachen. Die Krümel und Feinkoagulate sind im nassen Zustand plastisch und lagern sich deshalb unter dem Druck der darüberliegenden Erdschichten eng ineinander. In den durchwurzelten Horizonten werden sie durch die Faserwurzeln verheftet. Es bilden sich grosse Krümel, und da das Gefüge im wassergesättigten Zustand dicht ist, formen sich die Krümel gegenseitig. Sie bekommen scharfe Kanten und glatte Grenzflächen, auf denen nicht selten Wurzelabdrücke zu finden sind.



Fig.9 Kornanalysen des Profils "Urdorf"

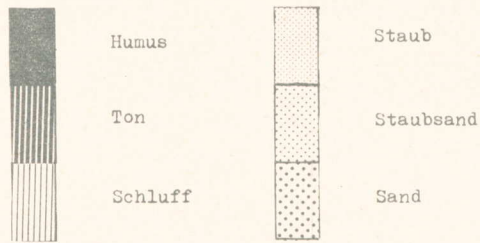
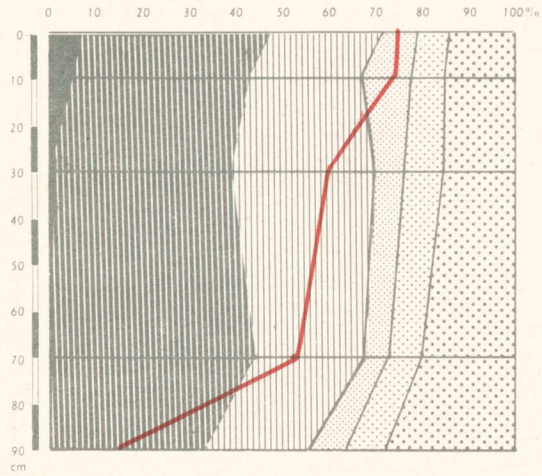


Fig. 10 Krümelanalysen des Profils "Urdorf"

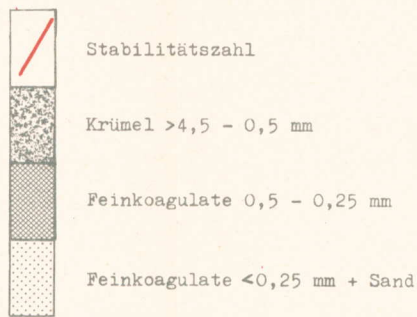
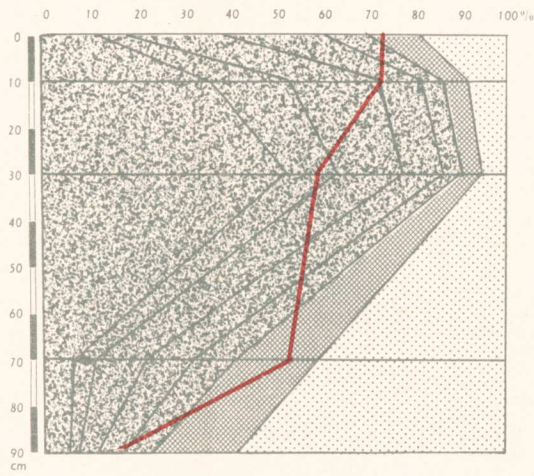
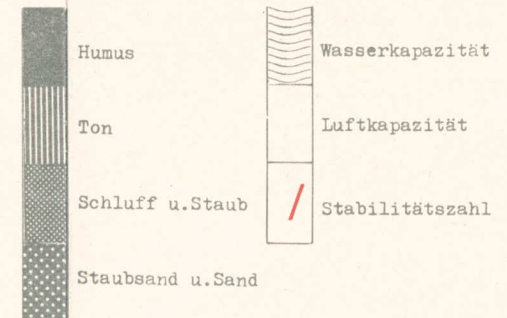
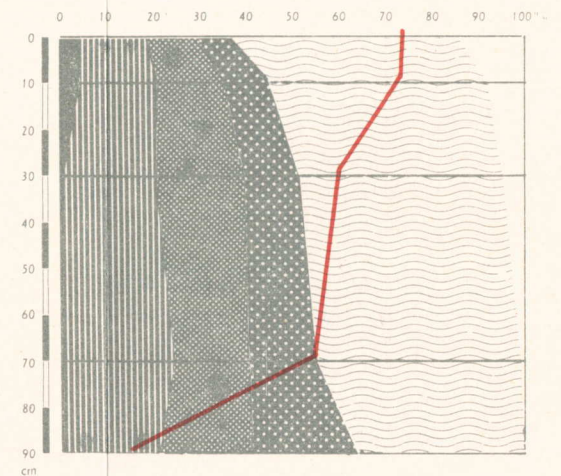


Fig.11 Wasser- und Luftkapazitäten des Profils "Urdorf"



Tab.9 Kornanalysen des Profils "Urdorf"

Profil-tiefe	Gew.% Humus	C/N	Gew.% Ton <0,002	Gew.% Schluff 0,002-0,02	Gew.% Staub 0,02-0,05	Gew.% Staubsand 0,05-0,10	Gew.% Sand 0,10-2,0	pH.
0-5 cm	7,8	12	40,3	23,4	7,9	6,4	14,2	7,1
10 cm	5,3	12	39,0	23,1	10,5	6,8	15,4	6,6
30 cm	1,3	8	38,2	30,3	6,7	8,6	14,9	6,7
70 cm	0,9	7	44,1	21,8	6,1	7,8	19,4	7,0
90 cm	0,8	7	33,5	21,8	8,2	7,7	28,0	7,2

Tab. 10 Krümelanalysen des Profils "Urdorf"

Profil-tiefe	Gew.% Krümel >4,5mm	Gew.% Krümel 4,5-3,0 mm	Gew.% Krümel 3,0-2,0 mm	Gew.% Krümel 2,0-1,0 mm	Gew.% Krümel 1,0-0,5 mm	Gew.% Feinkoag. 0,5-0,25 mm	Gew.% Feinkoag. <0,25mm +Sand	Krüm. zahl	Stab zahl
0-5 cm	11,8	6,4	22,1	20,3	11,0	10,8	17,6	71,7	75,5
10 cm	36,7	16,5	19,3	9,3	5,4	5,2	7,5	87,3	74,9
30 cm	53,5	10,4	14,2	9,0	4,1	3,6	5,3	91,1	60,5
70 cm	6,3	4,8	11,5	10,6	8,3	17,4	41,2	41,4	53,5
90 cm	5,5	2,2	4,3	5,7	6,3	18,7	57,5	23,9	14,3

Tab.11 Wasser- und Luftkapazitäten des Profils "Urdorf"

Profil-tiefe	Vol.% Humus <0,002	Vol.% Ton 0,002-0,05	Vol.% Schluff und Staub 0,002-0,05	Vol.% Staubsand + Sand 0,05-2,0	Vol.% Boden-Substanz	Gesamt-poren-volumen	H <sub>2</sub> O-Kap.	Luft-Kap.
0-5 cm	5,7	13,4	10,4	7,0	36,5	63,5	49,4	14,1
10 cm	4,8	16,6	14,3	9,5	45,2	54,8	47,2	7,6
30 cm	1,5	19,6	18,9	11,9	51,9	45,1	43,4	4,7
70 cm	1,1	24,2	15,4	14,9	55,6	44,4	43,5	0,9
90 cm	1,1	21,1	19,0	23,0	64,2	35,8	37,4	-1,6

D. Profil "Kreuzlingen II", voll entwickelte Braunerde

(vergl. Richard, 1945 und 1950; Etter, 1943)

Vegetation: Querceto-Carpinetum aretosum

Datum der Profilaufnahme: 1. Oktober 1948

Geographische Lage: S.A. Blatt 60, K. 731000/277600

Oertliche Lage: Das Profil liegt auf einem wenig geneigten Plateau, ca. 100 m in S.E.-Richtung von Profil "Kreuzlingen I" entfernt.

H.ü.M. 470 m

Muttergestein: Moräne

a) Beschreibung des Bodenprofils

Die Horizonte in diesem tiefgründigen Profil sind deutlich differenziert. Der A<sub>1</sub>-Horizont reicht bis 30 cm Tiefe, der A<sub>1-2</sub>-Horizont bis 80 cm. Der D-Horizont ist gegen den darauffliegenden A-Horizont scharf abgegrenzt. (D-Horizont = bodenfremde Unterlage). Der Hauptwurzelraum umfasst nur die obersten 20 cm, der Nebenwurzelraum reicht bis in 70 cm Tiefe. Die 80 cm mächtige Moränenschicht ist vollständig entkarbonatet. Die biologische Aktivität ist hoch. Die Bodenfarbe ist bis 30 cm grauschwarz, von 30 - 80 cm rotbraun, der Untergrund ist hellgrau.

Der A<sub>1</sub>-Horizont zeichnet sich aus durch seine grauschwarze Farbe und seine Lockerheit. Der A<sub>1-2</sub>-Horizont ist rotbraun. Diese Farbe deutet an, dass Sesquioxide freigelegt sind. Der D-Horizont enthält reichlich CaCO<sub>3</sub> und ist hellgrau. Wurmgänge konnten im D-Horizont keine festgestellt werden. In der Kornzusammensetzung entspricht er dem Untergrund von Profil "Kreuzlingen I".

b) Diskussion der Analysenresultate (vergl. Tab. und Fig. 12, 13, 14)

1. Die Kornanalyse ergibt nur geringe Tongehalte. In 30 cm Tiefe ist eine geringe Tonanreicherung festzustellen. Die Humusgehalte sind klein. Sie nehmen mit der Tiefe rasch ab.
2. Die Krümelanalyse zeigt nur im stärker durchwurzelten Obergrund eine mittlere Krümelung an (74% gegenüber 34% in 10 cm Profiltiefe), wobei die Krümelfraktion >4,5 mm überwiegt. Die Wurzelverbauung muss die Ursache sein, denn unterhalb des Hauptwurzelraumes ist die Krümelung gering (18%; 7%; 1%). In den Tiefen 10, 30 und 70 cm treten die Feinkoagulate relativ stark hervor (13%; 19%; 11%). Der Vergleich mit den Tongehalten zeigt, dass mit zunehmendem Tonanteil auch der Anteil

der Feinkoagulate zunimmt, sobald der Humusanteil klein ist.

3. Die Gefügeanalyse, die im Molasseuntergrund nicht durchgeführt werden konnte, ergibt für das Profil ziemlich hohe Luftkapazitäten (15%; 12%; 13%; 6%), obwohl kein guter Krümelzustand vorhanden ist. Die starke Wurmtätigkeit mag dies mitverursachen. Die Wasserkapazität nimmt nach unten ab, besonders zwischen 10 und 30 cm (43%; 43%; 37%; 38%). Das Gesamtporenvolumen ist schon in 30 cm Tiefe kleiner als 50%, sodass auch daraus auf eine dichte Lagerung der skelettfreien Bodensubstanz geschlossen werden kann.





E. Profil "Stetten I", schwach degradierte Braunerde

(vergl. Etter, 1943)

Vegetation: Querceto-Carpinetum luzuletosum

Datum der Profilaufnahme: 29. Juli 1948

Geographische Lage: S.A. Blatt 155, K. 665025/251275

Oertliche Lage: Das Profil liegt in einem Hang mit ca. 15°

Neigung nach Südwesten. H.ü.M. 422 m

Muttergestein: Moräne

a) Beschreibung des Bodenprofils

Das Profil ist in folgende Horizonte gegliedert. Von 0-5 cm Tiefe reicht der sehr deutlich abgegrenzte A<sub>1</sub>-Horizont, der fleckanweise mit einer dünnen Rohhumusschicht überlagert ist. Es folgt ein lockerer A<sub>2</sub>-Horizont bis 50 cm Tiefe. Darunter liegt ein B<sub>1</sub>-Horizont, der sich durch seine dichte Lagerung deutlich vom Obergrund abhebt. Nach unten geht er in den B<sub>2</sub>-Horizont über. In 150 cm Tiefe liegt die deutliche Grenze des C-Horizontes. Der Hauptwurzelraum umfasst 40 cm, der Nebenwurzelraum geht noch 20 cm tiefer. Die Karbonatgrenze liegt in 150 cm Tiefe. In der Verwitterungsschicht lässt sich kein CaCO<sub>3</sub> mehr feststellen. Die biologische Aktivität ist mittel, hingegen ist die Wurmtätigkeit ziemlich rege; sie reicht bis auf 140 cm hinab. Die Bodenfarbe ist im A<sub>1</sub>-Horizont schwarzgrau und im A<sub>2</sub>-Horizont hellbraun. Die B-Horizonte sind intensiv rostrot gefärbt, und der Untergrund ist hellgrau.

Der humusreiche und lockere A<sub>1</sub>-Horizont zeichnet sich vor allem durch seine dunkle Farbe aus, die den kolloiden Humusstoffen zugeschrieben werden muss. Die Krümel sind rundlich und koprogenen Ursprungs. An der Oberfläche liegen zahlreiche Wurmlösungen. Der A<sub>2</sub>-Horizont ist locker und reich durchwurzelt. Die wenigen noch vorhandenen Skelettbrocken bestehen aus schwerverwitterbarem Gestein. Die B-Horizonte sind nebst der rostroten Farbe vor allem durch die dichte Lagerung gekennzeichnet. Die grossen Skelettbrocken, die in den A-Horizonten fehlen, sind teils stark verwittert. Besonders im B<sub>2</sub>-Horizont finden sich viele, auch kleinere Skeletteile, die in sandigem Zerfall begriffen sind. Der C-Horizont ist karbonatreich. Die Skeletteile sind kaum verwittert.

b) Diskussion der Analysenresultate (vergl. Fig. und Tab. 15, 16, 17)

1. Der Humusgehalt nimmt zwischen 3 und 10 cm Tiefe sprunghaft von 17 auf 2% ab. Die Tone sind in 60 cm Tiefe infolge der Tonverlagerung angereichert (26% gegenüber 15% in 10 cm und 22% in 110 cm Tiefe). Der Vergleich der Tongehalte mit der Krümelanalyse zeigt deutlich, dass mit zunehmendem Tongehalt die Feinkoagulate von 0,5 - 0,25 mm zunehmen, sobald die Wurzelverbauung aufhört. Der auffallend grosse Sandanteil bei 110 cm ist auf die sandig verwitterten Skeletteile zurückzuführen.
2. Die Krümelanalyse (Fig. 16) ergibt nur in den obersten Horizonten eine gute bis mittlere Krümelung, wobei die grossen Krümel,

>4,5 mm, überwiegen (48%). Im B<sub>1</sub>-Horizont, in 60 cm Tiefe, ist die Krümelung praktisch null, hingegen ist die Fraktion der Feinkoagulate von 0,5 - 0,25 mm gross (16%). Es liegt eine Feinkoagulatstruktur vor, die bis zur Kalkgrenze reicht. Im C-Horizont fehlen auch die Feinkoagulate, trotz des relativ hohen Tonanteils. Der C-Horizont hat Einzelkornstruktur.

3. Die Luftkapazität im Hauptwurzelraum ist gross (21%). Sie nimmt aber im Tonanreicherungshorizont in 60 cm Tiefe, der praktisch keine Krümelung mehr besitzt, plötzlich stark ab. Die Wasserkapazität nimmt nach unten zu, steigt aber nur wenig über 40%. Wasser- und Luftkapazität konnten im A<sub>1</sub>-Horizont wegen der zu geringen Mächtigkeit, und im C-Horizont wegen des Skelettes nicht bestimmt werden.





## F. Profil "Stetten II", schwach degradierte Braunerde

(vergl. Richard, 1945 und 1950; Etter, 1943)

Vegetation: Querceto-Carpinetum luzuletosum

Datum der Profilaufnahme: 29. Juli 1948

Geographische Lage: Das Profil liegt in einem nach Nord-  
osten abfallenden Hang. Die Neigung  
beträgt ca. 15°.

H.ü.M. 412 m

Muttergestein: Moräne

### a) Beschreibung des Bodenprofils

Das tiefgründige Profil ist in folgende Horizonte deutlich gegliedert. Von 0 - 3 cm reicht der A<sub>1</sub>-Horizont. Seine Grenze gegen den A<sub>2</sub>-Horizont, der bis zu 60 cm reicht, ist sehr deutlich sichtbar. Es folgt ein 60 cm mächtiger B-Horizont, der gegen den darunterliegenden C-Horizont scharf abgezeichnet ist. Der Hauptwurzelraum umfasst 40 cm und der Nebenwurzelraum reicht noch 20 cm tiefer. Die CaCO<sub>3</sub>-Grenze verläuft in einer scharfen Linie in 120 cm Tiefe, die oberen Horizonte sind gänzlich entkarbonatet. Die biologische Aktivität ist mittel, die Lumbrizidentätigkeit ist sehr lebhaft. Die Bodenfarbe ist oben schwarzgrau und wird im A<sub>2</sub>-Horizont graubraun bis ocker. Der B-Horizont ist rostrot und der C-Horizont hellgrau.

Der A<sub>1</sub>-Horizont zeichnet sich vor allem durch seine dunkle Farbe aus. Seine Krümel sind rundlich und gehen auf die Wurmtätigkeit zurück. Die Bodenoberfläche ist teilweise mit Wurmkot und teilweise mit einer dünnen Rohhumusdecke überlagert. Der lockere A<sub>2</sub>-Horizont zeigt in den oberen Partien noch eine leichte Grautönung, die von den Humusstoffen verursacht ist. Er ist stark durchwurzelt. Der B-Horizont zeichnet sich aus durch seine dichte Lagerung und seine rostrote Farbe, die von den freigelegten Sesquioxiden stammt. Der grobsandig bis kiesige C-Horizont enthält reichlich Karbonate. Die Skeletteile zeigen kaum Spuren der chemischen Verwitterung.

### b) Diskussion der Analysenresultate

(vergl. Fig. und Tab. 18, 19, 20)

1. Die Kornanalyse (Fig. 18) ergibt eine Tonverlagerung aus den A-Horizonten und eine sehr starke Tonanreicherung in 70 cm Tiefe (27 % gegenüber 17 %). Der Humusanteil nimmt zwischen 2 und 10 cm sehr rasch ab (18 % in 2 cm auf 2,8 % in 10 cm Tiefe).
2. Die Krümelung (Fig. 19) nimmt von oben nach unten rasch ab (80%; 78%; 49%; 13%). In den oberen Horizonten überwiegen die wurzelverbauten grossen Krümel ganz beträchtlich (36%; 34%). In 70 cm Tiefe ist praktisch keine Krümelung



mehr festzustellen, hingegen ein hoher Anteil an Feinkoagulaten von 0,5 - 0,25 mm (24%), entsprechend dem grossen Tonanteil im Tonanreicherungshorizont. Der C-Horizont hat Einzelkornstruktur.

3. Die Wasser- und Luftkapazitäten konnten im A<sub>1</sub>-Horizont wegen der zu geringen Mächtigkeit und im C-Horizont wegen des hohen Skelettanteiles nicht bestimmt werden. Im Hauptwurzelraum ergaben sich, wie im vorigen Profil, grosse Luftkapazitäten (29 und 21%), die im Tonanreicherungshorizont sehr gering werden (8%). Die Wasserkapazität schwankt um 40% herum, sie ist klein.

Fig.18 Kornanalysen des Profils "Stetten II"

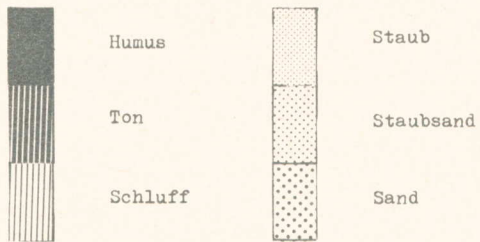
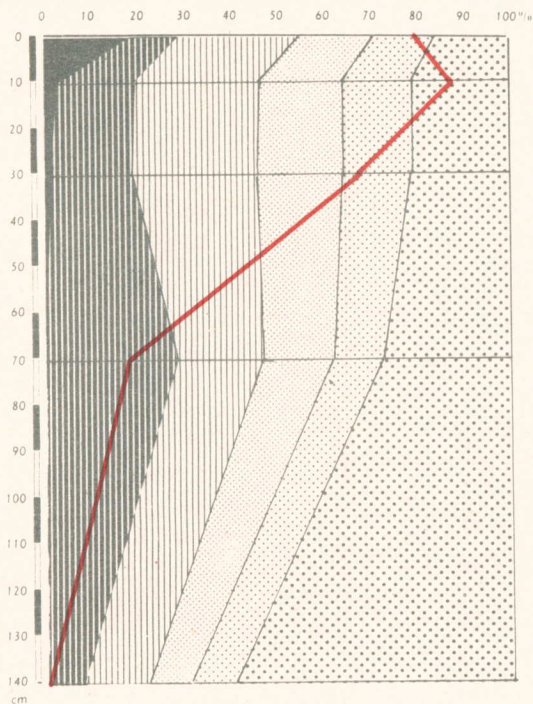
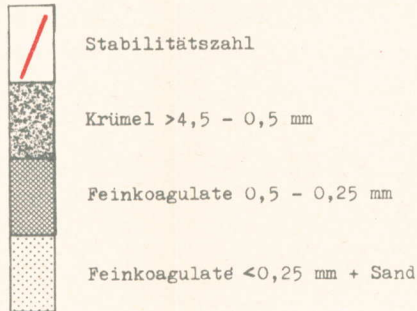
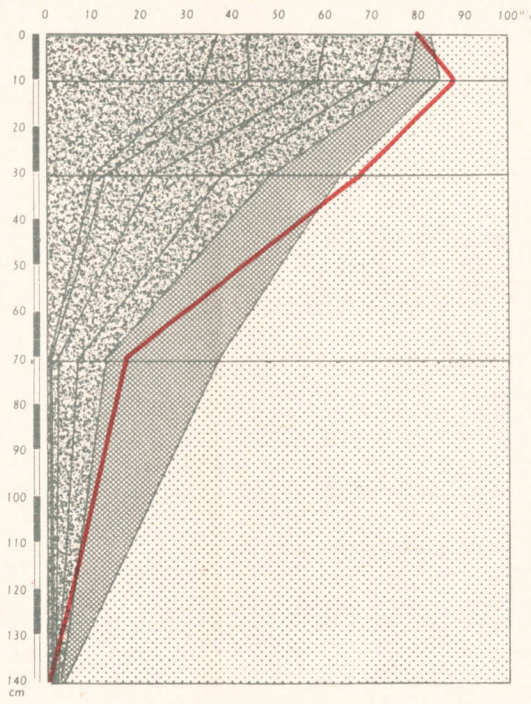


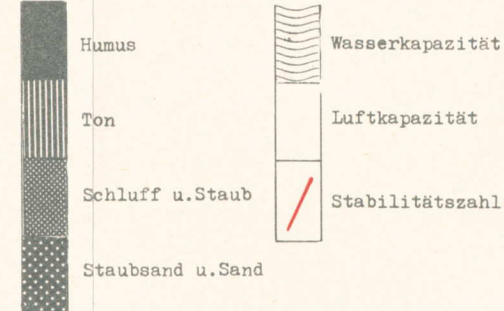
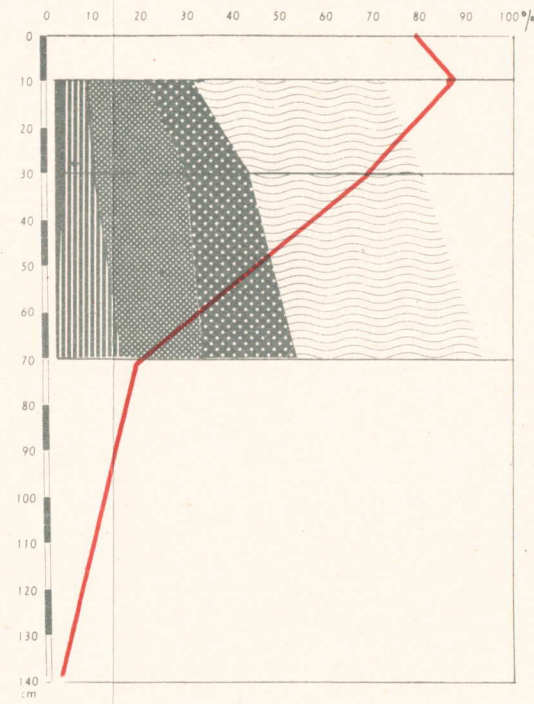
Fig.19 Krümelanalysen des Profils "Stetten II"



Tab.19 Krümelanalysen des Profils "Stetten II"

Profil-tiefe	Gew. % >4,5 mm	Gew. % Krümel 4,5-3,0 mm	Gew. % Krümel 3,0-2,0 mm	Gew. % Krümel 2,0-1,0 mm	Gew. % Krümel 1,0-0,5 mm	Gew. % Feinkoag. 0,5-0,25 mm	Gew. % Feinkoag. <0,25 mm + Sand	Krim.Stab.zahl	Stab.zahl
0-3 cm	36,5	7,3	16,8	13,3	6,3	3,0	16,8	80,2	81,4
10 cm	34,0	11,0	14,4	12,2	6,6	7,0	14,9	78,2	88,4
30 cm	9,6	3,5	9,3	14,9	11,5	15,0	36,1	48,9	68,5
70 cm	0,3	0,4	1,4	4,0	6,9	24,2	62,9	12,9	17,2
140 cm	0,9	0,4	0,2	0,4	0,6	1,0	96,5	2,4	0,0

Fig.20 Wasser- und Luftkapazitäten des Profils "Stetten II"



Tab.20 Wasser- und Luftkapazitäten des Profils "Stetten II"

Profil-tiefe	Vol. % Humus	Vol. % Ton <0,002	Vol. % Schluff und Staub 0,002-0,05	Vol. % Staubsand + Sand 0,05-2,0	Vol. % Boden-substanz	Gesamt-poren-volumen	H <sub>2</sub> O-Kap.	Luftkapaz.
0-3 cm	-	-	-	-	-	-	-	-
10 cm	1,8	4,8	12,8	10,4	29,8	70,2	41,6	28,6
30 cm	1,3	6,8	19,9	14,3	42,3	57,7	37,1	20,6
70 cm	-	14,4	17,8	20,1	52,3	47,7	39,9	7,8
140 cm	-	-	-	-	-	-	-	-

Tab.18 Kornanalysen des Profils "Stetten II"

Profil-tiefe	Gew. % Humus	C/N	Gew. % Ton <0,002	Gew. % Schluff 0,002-0,02	Gew. % Staub 0,02-0,05	Gew. % Staubsand 0,05-0,10	Gew. % Sand 0,10-2,0	pH.
0-3 cm	18,2	24	10,8	25,9	16,0	13,5	15,5	4,7
10 cm	2,8	15	16,0	26,4	18,0	14,9	21,1	5,1
30 cm	1,5	13	17,1	26,7	18,6	15,2	20,8	5,2
70 cm	-	-	27,2	19,4	15,5	10,4	27,5	5,4
140 cm	-	-	7,9	13,6	9,1	9,0	60,4	6,9

G. Profil "Irchel", stark degradierte Braunerde

vergl. Richard, 1945 und 1950; Etter, 1943)

Vegetation: Querceto-Betuletum

Datum der Profilaufnahme: 16. Juli 1948

Geographische Lage: S.A. Blatt 27, K. 688125/266100

Oertliche Lage: Das Profil liegt auf dem ebenen, niederschlagsreichen Irchelplateau.

H.ü.M. 695 m

Muttergestein: Deckenschotter

a) Beschreibung des Bodenprofils

Das sehr tiefgründige Profil weist folgende Horizonte auf. Von 0 - 5 cm einen lockeren A<sub>1</sub>-Horizont, der sich durch eine gezahnte deutliche Linie vom A<sub>2</sub>-Horizont unterscheidet. Es folgt ein mächtiger B-Horizont, dessen untere Grenze nicht erschlossen worden ist. Die Grenze zwischen A<sub>2</sub>- und B-Horizont ist nicht sehr deutlich. Die physiologische Gründigkeit umfasst nur die obersten 50 cm. Der Hauptwurzelraum reicht sogar nur bis 20 cm Tiefe. Das ganze Profil ist, soweit es geöffnet wurde, entkarbonatet. Die biologische Aktivität ist sehr klein. Es sind keine Wurmlosungen zu finden. Die wenigen kleinen Würmchen halten sich in der Rohhumusauflage zwischen den von Pilzen verfilzten, halbvermoderten Blättern auf. Die Bodenfarbe ist im A<sub>1</sub>-Horizont schwarzgrau. Der A<sub>2</sub>-Horizont ist in den obersten Partien noch grau-braun, wird aber gegen unten heller. Der B-Horizont ist rostrot und weist intensive Verfählungen auf (Marmorierung).

Der A<sub>1</sub>-Horizont unterscheidet sich vor allem durch seine Farbe. Er ist intensiv durchwurzelt und von einer mehrere cm dicken Rohhumusschicht überlagert. Der A<sub>2</sub>-Horizont ist in den oberen Partien reich durchwurzelt und zeigt ein lockeres Gefüge, das aber gegen unten sehr rasch dichter wird. Der Uebergang zum B-Horizont ist unscharf. Der B-Horizont zeichnet sich durch seine dichte Lagerung aus. Die dichteste Lagerung wurde bei 70 cm festgestellt. Wurmröhren sind keine zu finden, hingegen wurden abgestorbene Wurzeln festgestellt, von denen nur noch die Bastteile erhalten geblieben waren. Durch diese Drainageröhren floss nach einem intensiven Regen das Wasser aus der Profilwand heraus. Die wenigen Skeletteile sind stark durchverwittert. Sie zerfallen in Grus und Sand.

b) Diskussion der Analysenresultate

(vergl. Fig. und Tab. 21, 22, 23)

1. Die Tonverlagerung aus den A-Horizonten ist deutlich. Die Tonanreicherung ist in 70 cm Tiefe am grössten. Der A<sub>1</sub>-Horizont weist einen sehr hohen Humusgehalt auf (53%), der schon in 10 cm Tiefe klein wird (3,2%). Der hohe Humusgehalt kommt daher, dass bei der Probenahme auch die Rohhumusschicht mitgenommen wurde.

2. Die Krümelanalyse (Fig.22) ergibt eine hohe Krümelzahl bis in 20 cm Tiefe, mit vorwiegend grossen, wurzelverbauten Krümeln (36 und 30%), die schon bei 30 cm fast gänzlich fehlen. Die wenigen Prozente an Krümeln in den unteren Horizonten sind darauf zurückzuführen, dass beim Kochen der erhaltenen Krümel die verwitterten Skeletteile, deren Ritze und Risse mit Ton verkleistert sind, zerfielen und als gekrümelt in Rechnung kamen.
3. Die Luftkapazität ist im Hauptwurzelraum hoch, sie wird aber schon bei 30 cm klein und noch weiter unten sehr klein. Die Wasserkapazität nimmt von oben nach unten zu, steigt aber nur wenig über 40%. Das Gesamtporenvolumen beträgt schon in 30 cm Tiefe weniger als 48%.



Fig.21 Kornanalysen des Profils "Irchel"

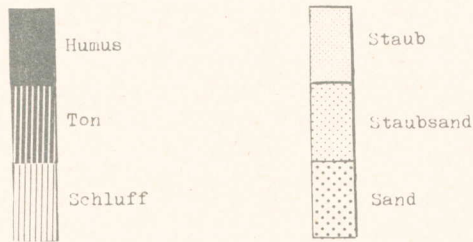
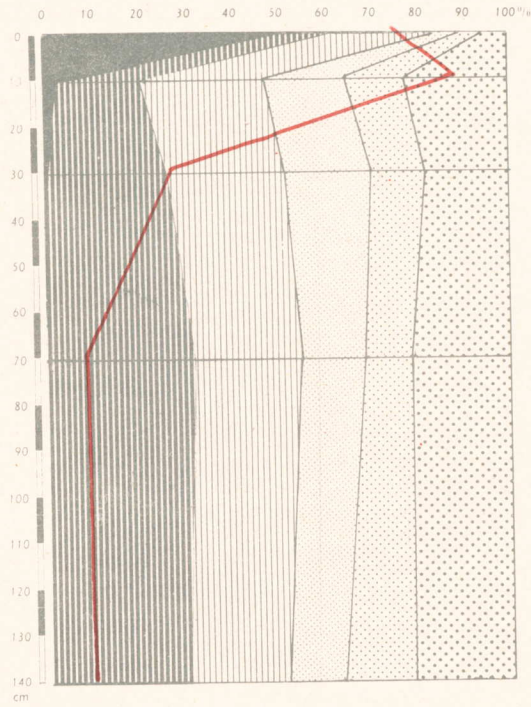


Fig.22 Krümelanalysen des Profils "Irchel"

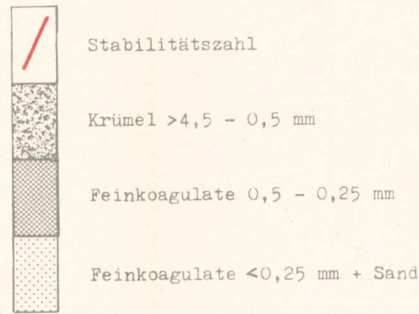
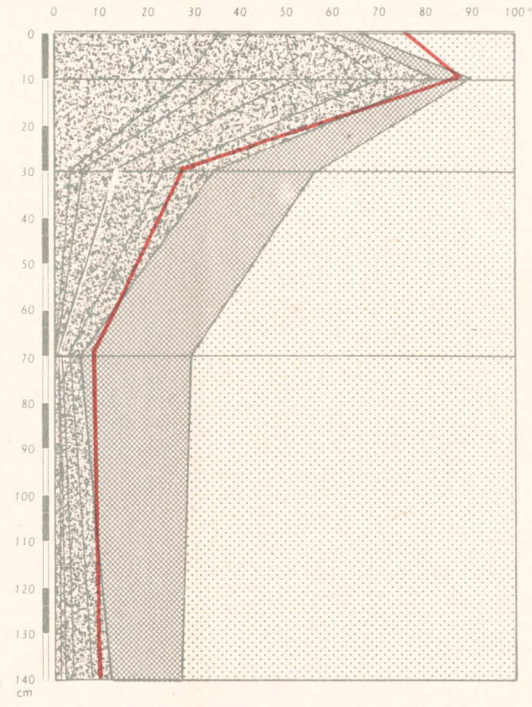
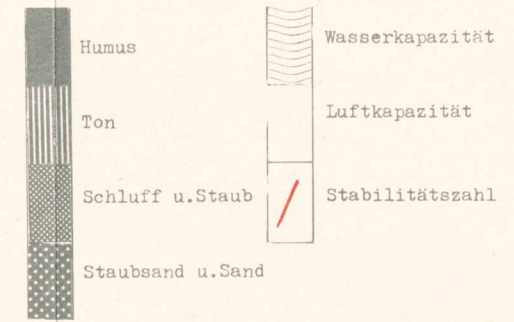
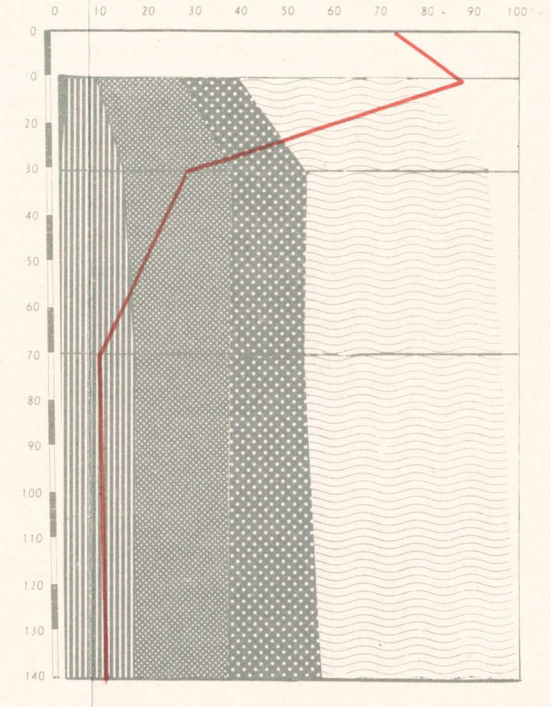


Fig.23 Wasser- und Luftkapazitäten des Profils "Irchel"



Tab.21 Kornanalysen des Profils "Irchel"

Profiltiefe	Gew.% Humus	C/N	Gew.% Ton <0,002	Gew.% Schluff 0,002-0,02	Gew.% Staub 0,02-0,05	Gew.% Staubsand 0,05-0,10	Gew.% Sand 0,10-2,0	pH
0-3 cm	52,7	25	9,2	23,0	5,2	3,9	6,0	4,5
10 cm	3,2	27	17,7	26,7	17,5	12,4	22,6	4,5
30 cm	0,8	10	25,8	25,2	18,7	11,5	18,5	4,6
70 cm	-	-	32,1	23,0	13,7	10,5	20,7	4,7
140 cm	-	-	30,3	21,3	12,6	12,5	23,3	4,8

Tab.22 Krümelanalysen des Profils "Irchel"

Profiltiefe	Gew.% Krümel >4,5 mm	Gew.% Krümel 4,5-3,0 mm	Gew.% Krümel 3,0-2,0 mm	Gew.% Krümel 2,0-1,0 mm	Gew.% Krümel 1,0-0,5 mm	Gew.% Feinkoag. 0,5-0,25 mm	Gew.% Feinkoag. <0,25 mm + Sand	Krüm. zahl	Stab. zahl
0-3 cm	35,9	7,0	7,4	6,3	5,5	5,0	32,9	62,1	75,6
10 cm	29,6	8,8	15,3	18,3	10,4	7,4	10,2	82,3	89,7
30 cm	3,6	1,6	7,0	10,6	12,2	21,6	43,5	35,0	25,8
70 cm	0,0	0,0	0,4	2,5	3,3	22,9	70,9	6,2	6,7
140 cm	1,9	0,6	2,2	3,8	4,0	14,9	72,6	12,5	8,5

Tab.23 Wasser- und Luftkapazitäten des Profils "Irchel"

Profiltiefe	Vol.% Humus	Vol.% Ton <0,002	Vol.% Schluff und Staub 0,002-0,05	Vol.% Staubsand + Sand 0,05-2,0	Vol.% Bodensubstanz	Gesamt-porenvolumen	H <sub>2</sub> O-kap.	Luftkapaz.
0-3 cm	-	-	-	-	-	-	-	-
10 cm	2,6	6,2	18,0	12,3	39,1	60,9	39,6	21,3
30 cm	1,0	13,6	23,3	15,8	53,7	46,3	39,9	6,4
70 cm	-	17,2	19,9	16,6	53,7	46,3	42,4	3,9
140 cm	-	17,3	19,6	20,8	57,7	42,3	42,5	-0,2

## H. Profil "Stadlerberg", stark degradierte Braunerde

Vegetation: Querceto-Betuletum

Datum der Profilaufnahme: 16. Juli 1948

Geographische Lage: S.A. Blatt 40, K. 675800/266700

Oertliche Lage: Das Profil liegt auf dem breiten, schwach gewölbten Rücken des Stadlerberges, ca. 80 m vom Rande des Plateaus entfernt.  
H.ü.M. 619 m

Muttergestein: Deckenschotter

### a) Beschreibung des Bodenprofils

Das sehr tiefgründige Profil weist folgende Horizonte auf. Der A<sub>1</sub>-Horizont von 0 - 5 cm ist gegen den A<sub>2</sub>-Horizont deutlich abgegrenzt, der bis 60 cm Tiefe reicht. Dort beginnt der B-Horizont mit einer undeutlichen Grenze. Dieser reicht bis auf den Profilgrund, soweit das Profil geöffnet wurde. Der Hauptwurzelraum umfasst nur 30 cm und der Nebenwurzelraum geht bis 50 cm Tiefe. Das ganze Profil ist entkarbonatet. In einer nahe gelegenen Kiesgrube konnte die CaCO<sub>3</sub>-Grenze in ca. drei Metern Tiefe festgestellt werden. Die biologische Aktivität ist klein. Lumbrizidenexkremate sind keine zu finden. Die Bodenfarbe ist im A<sub>1</sub>-Horizont schwarzgrau, im A<sub>2</sub>-Horizont graubraun bis rotbraun und im B-Horizont deutlich rotbraun.

Der A<sub>1</sub>-Horizont ist mit einer Rohhumusdecke von einigen Zentimetern Höhe überlagert. Zwischen den rundlichen Krümeln sind zahlreiche, sauber gewaschene Sandkörner eingelagert. Das Gefüge ist locker. Der A<sub>2</sub>-Horizont ist skelettig und locker. Die Skelettbrocken sind teils frisch, teils angewittert und teils zerfallen. Der B-Horizont enthält sehr viel Skelett in verschiedenen Verwitterungsstufen. Ein auffallend dichter Tonanreicherungshorizont konnte beim Graben nicht festgestellt werden.

### b) Diskussion der Analysenresultate

(vergl. Fig. und Tab. 24 und 25)

1. Die Kornanalyse (Fig.24) ergibt eine weitgehende Tonverlagerung aus den A-Horizonten und eine sehr deutliche Tonanreicherung im B-Horizont (7%; 9% zu 12%; 21%; 30%). Der Humusgehalt nimmt zwischen 2 und 10 cm sprunghaft ab (17,3 zu 3,7%). Der relativ niedrige Humusgehalt im A<sub>1</sub>-Horizont kommt daher, weil die Rohhumusschicht vor der Probenahme im Gegensatz zur Probenahme beim Profil "Irchel" entfernt worden war.

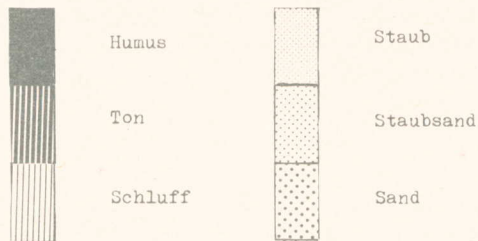
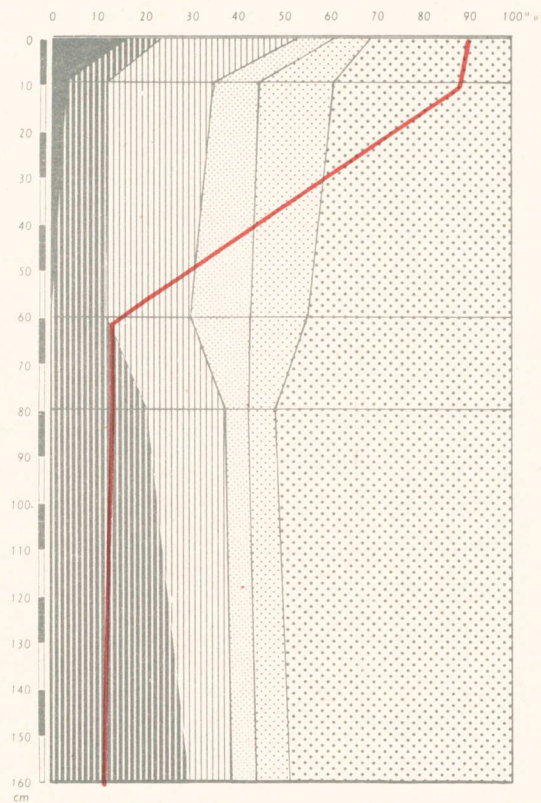
2. Die Krümelung (Fig. 25) ist im Obergrund dem grossen Sandanteil entsprechend mittelmässig (38%; 52%). Unterhalb des Wurzelraumes sind keine Krümel mehr vorhanden, hingegen nehmen die Feinkoagulate von 0,5 - 0,25 mm entsprechend den steigenden Tonanteilen mit zunehmender Tiefe zu (6%; 10%; 27%).

Der Vergleich der Krümelzahl mit der Stabilitätszahl zeigt, dass die vorhandenen Krümel stabil sind, dass aber der Sandanteil nur in geringem Masse an der Krümelung beteiligt ist.

3. Die Wasser- und Luftkapazitäten konnten wegen des durchgehend hohen Skelettanteils nicht bestimmt werden. Eine sehr dichte Lagerung konnte hingegen bei der Profilaufnahme nirgends festgestellt werden.



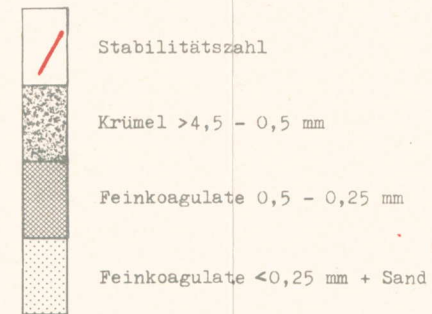
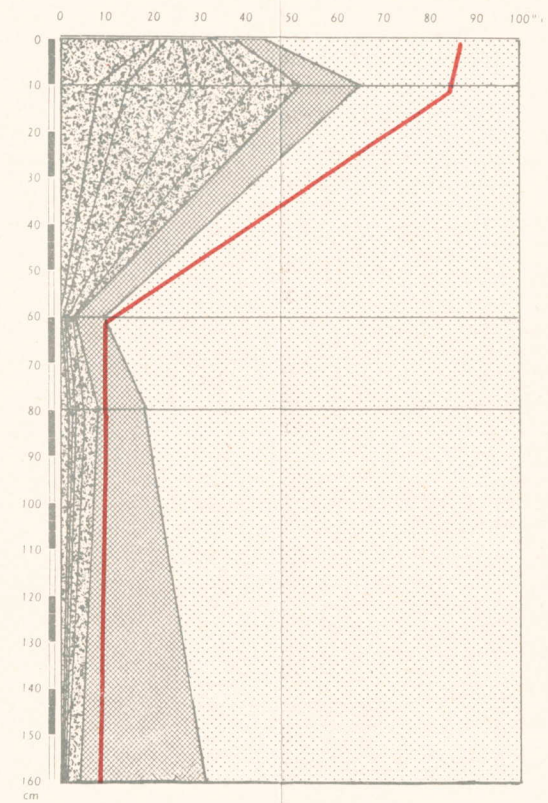
Fig.24 Kornanalysen des Profils "Stadlerberg"



Tab.24 Kornanalysen des Profils "Stadlerberg"

Profil-tiefe	Gew.% Humus	C/N	Gew.% Ton <0,002	Gew.% Schluff 0,002-0,02	Gew.% Staub 0,02-0,05	Gew.% Staubsand 0,05-0,10	Gew.% Sand 0,10-2,0	pH.
0-3 cm	17,3	30	6,6	29,6	7,1	8,1	31,3	4,4
10 cm	3,7	20	8,6	23,1	9,9	15,6	39,2	4,9
60 cm	0,5	10	12,0	18,1	12,2	12,9	44,4	4,9
80 cm	-	-	21,0	16,8	5,3	5,5	51,4	5,3
160 cm	-	-	30,3	8,7	5,3	7,1	48,6	5,5

Fig.25 Krümelanalysen des Profils "Stadlerberg"



Tab.25 Krümelanalysen des Profils "Stadlerberg"

Profil-tiefe	Gew.% Krümel >4,5 mm	Gew.% Krümel 4,5-3,0 mm	Gew.% Krümel 3,0-2,0 mm	Gew.% Krümel 2,0-1,0 mm	Gew.% Krümel 1,0-0,5 mm	Gew.% Feinkoag. 0,5-0,25 mm	Gew.% Feinkoag. <0,25 mm + Sand	Krüm.zahl	Stab.zahl
0-3 cm	21,8	1,5	3,2	5,6	6,1	6,0	55,8	38,2	88,1
10 cm	8,6	6,2	13,9	13,5	10,1	12,3	35,4	52,3	85,8
60 cm	0,6	0,4	0,6	1,2	0,8	5,3	90,6	3,6	8,5
80 cm	1,6	0,7	0,8	2,3	3,0	10,3	81,4	8,3	8,9
160 cm	0,0	0,0	0,1	0,5	3,8	26,7	68,9	4,4	6,9



V. Veränderung einiger Bodeneigenschaften bei der Boden-  
=====  
entwicklung in der Braunerdeserie  
=====

Als Untersuchungsobjekt wurden acht Profile in verschiedenen Entwicklungsstadien ausgewählt, vom unentwickelten Aueboden bis zur stark degradierten Braunerde. Aus begreiflichen Gründen konnten andere Faktoren nicht konstant gehalten werden, wie z.B. geologische Verhältnisse, Kornzusammensetzung, etc. Bei den wiedergegebenen Untersuchungsergebnissen sind daher Verallgemeinerungen nur mit Vorsicht möglich. Die acht Profile geben aber immerhin einen Ueberblick über die Braunerdeserie.

Bei der Gegenüberstellung der Resultate wird die gleiche Profilreihenfolge eingehalten, wie im vorausgehenden Kapitel, vom unentwickelten Boden bis zur stark degradierten Braunerde. Bei der Reihenfolge wurde darauf geachtet, dass die voranstehenden Ergebnisse die folgenden verständlicher machen. Aus den pH-Werten und der Lage der  $\text{CaCO}_3$ -Grenzen lassen sich gewisse Rückschlüsse auf den Entwicklungszustand der hier untersuchten Profile ziehen. Die Kornzusammensetzung, die im zweiten Abschnitt dargestellt ist, beeinflusst die Krümelung, und Kornzusammensetzung und Krümelung zusammen haben einen wesentlichen Einfluss auf das Gesamtporenvolumen und seine Aufteilung in Wasser- und Luftkapazität.

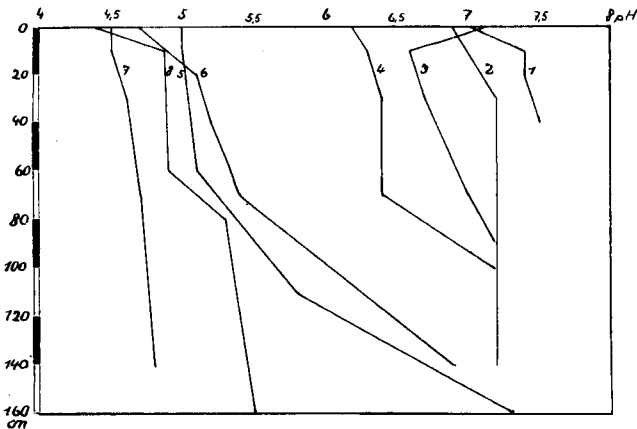
A. Bodenazidität

In Tab.26 sind die pH-Werte und Karbonatgrenzen der untersuchten Profile zusammengestellt. In Fig.26 sind die pH-Werte graphisch dargestellt.

Tab.26 Die Karbonatgrenzen und pH-Werte der untersuchten Profile.

Profil- tiefe	No.1 Vill- nachern wenig entwick. Boden	No.2 Kreuz- lingen I mässig entwick. Boden	No.3 Urdorf voll entwick. Braun- erde	No.4 Kreuz- lingen II voll entwick. B.erde	No.5 Stetten I schwach degrad. B.erde	No.6 Stetten II schwach degrad. B.erde	No.7 Irchel stark degrad. Braun- erde	No.8 Stadler- berg stark degrad. B.erde
CaCO <sub>3</sub> Grenze	0 cm	0 cm	80 cm	80 cm	150 cm	120 cm	tiefer 160 cm	tiefer 160 cm
	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH	pH
0-5 cm	7,0	6,9	7,1	6,2	5,0	4,7	4,5	4,4
10 cm	7,4	7,0	6,6	6,3	5,0	5,1	4,5	4,9
30 cm	7,4	7,2	6,7	6,4		5,2	4,6	
40 cm	7,5							
60 cm					5,1			4,9
70 cm		7,2	7,0	6,4		5,4	4,7	
80 cm								5,3
90 cm			7,2					
100 cm				7,2				
110 cm					5,8			
140 cm		7,2				6,9	4,8	
160 cm					7,3			5,5

Fig.26 Die pH-Werte der untersuchten Bodenprofile



Die wenig entwickelten Profile 1 und 2, die in allen Horizonten  $\text{CaCO}_3$  enthalten, reagieren neutral bis leicht alkalisch. Die voll entwickelte Braunerde 3 reagiert in 10 und 30 cm Tiefe leicht sauer, während der Obergrund bis zu 5 cm Tiefe, infolge der Ablagerung von Lumbrizidenexkrementen, deren Material zum Teil aus dem basenhaltigen Untergrund stammt, neutral ist. Das voll entwickelte Profil 4 weist bis auf die scharf abgezeichnete  $\text{CaCO}_3$ -Grenze hinab deutlich saure Reaktion auf. Auch der Obergrund ist sauer. Dieses Profil zeigt die ersten Anzeichen einer Degradation. Die schwach degradierten Profile 5 und 6 reagieren bis auf die tiefliegenden Karbonatgrenzen hinab stark sauer. In den stark degradierten Böden 7 und 8 fällt das pH unter 5. Die Kalkgrenzen konnten nicht mehr festgestellt werden. Sie liegen wesentlich tiefer als 160 cm.

Die Braunerden gehören zu den endoperkolativen Böden. Das Sickerwasser löst Kalziumkarbonat auf und führt es aus dem Profil weg. Die  $\text{CaCO}_3$ -Grenze wird im Verlaufe der Entwicklung immer mehr abgetieft. Ist die Feinerde vollständig entkarbonatet, dann versauert der Boden.

**B. Tongehalt**

Bei den vorliegenden Untersuchungen wurden als Tone alle jene Bodenteilchen mit einem Äquivalentdurchmesser kleiner als 0,002 mm bezeichnet. Fein zerteilter Quarz, Feldspatresttone, nicht quellbare und quellbare Schichtgittertone und in karbonathaltigen Horizonten auch fein zerteiltes CaCO<sub>3</sub> sind darin enthalten. Tab. und Fig. 27 geben über den Tongehalt der untersuchten Profile Auskunft.

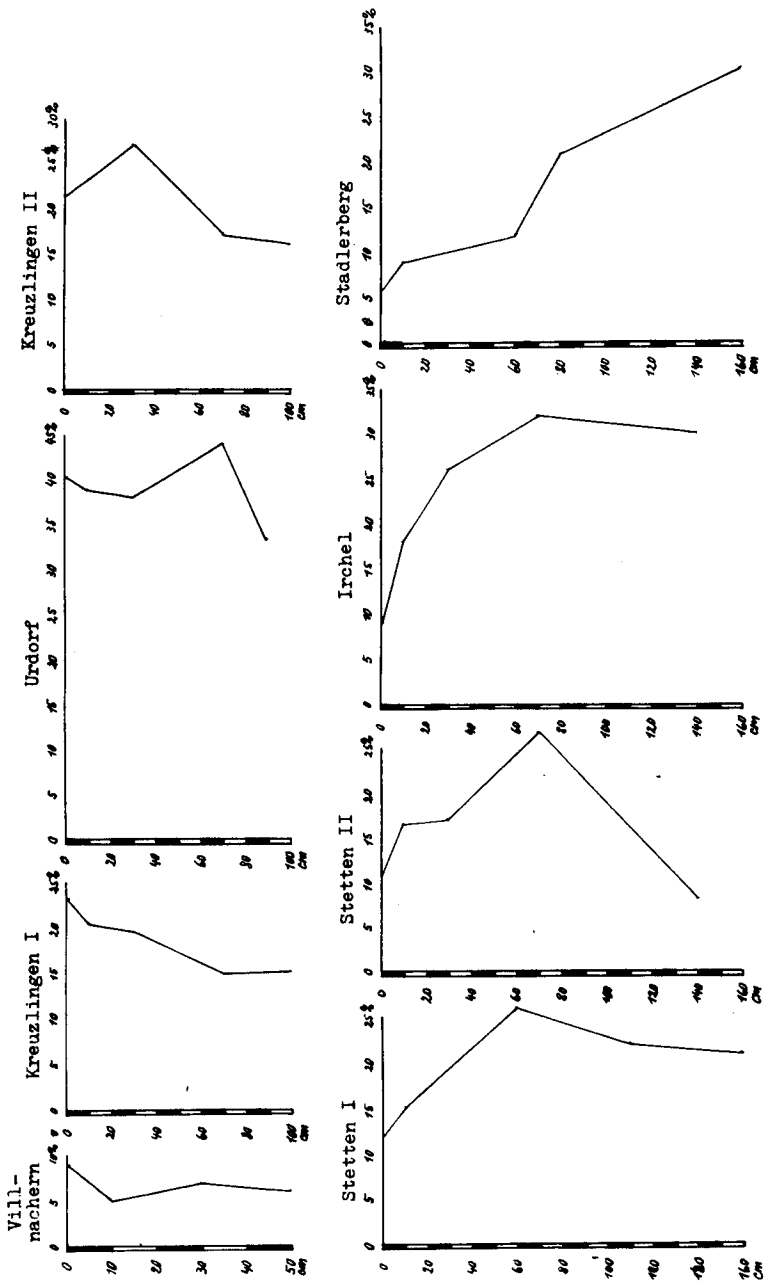
Tab. 27 Die Tongehalte der untersuchten Bodenprofile in Gew.%

Profil-tiefe	Vill-nachern wenig entwick. Boden	Kreuz-lingen I mässig entwick. Boden	Urdorf voll entwick. Braunerde	Kreuz-lingen II voll entwick. B.erde	Stetten I schwach degrad. B.erde	Stetten II schwach degrad. B.erde	Irchel stark degrad. Braunerde	Stadler berg stark degrad. B.erde
0-5 cm	9,1	23,7	40,3	21,5	12,0	10,8	9,2	6,6
10 cm	5,1	21,4	39,0	23,2	15,1	16,8	17,7	8,6
30 cm	7,3	19,8	38,2	27,1		17,1	25,8	
40 cm	6,6							
60 cm					26,4			12,0
70 cm		14,5	44,1	17,1		27,2	32,1	
80 cm								21,0
90 cm			33,5					
100 cm				15,9				
110 cm					22,3			
140 cm		16,0				7,9	30,3	
160 cm					21,5			30,3

Aus Tabelle 27 kann folgendes entnommen werden:

Der Ton des wenig entwickelten Profils Villnachern ist bei der Ueberschwemmung abgelagert und nicht im Profil gebildet worden. Die Tongehalte der verschiedenen Schichten sind auf die selektive Ablagerung zurückzuführen. Im mässig entwickelten Profil Kreuzlingen I nehmen die Tongehalte von oben nach unten ab. Die Feinerde des unverwitterten, karbonatreichen Muttergesteins weist den kleinsten Tongehalt auf. Ton wird aus dem Muttergestein durch CaCO<sub>3</sub>-Auswaschung freigelegt. Die beiden vollentwickelten Braunerden von Urdorf und Kreuzlingen II zeigen in den A-Horizonten ebenfalls höhere Tongehalte als in den nicht entkarbonateten C-Horizonten. Tonanreicherungs-horizonte zeichnen sich ab. Im Profil Urdorf nehmen die Tonanteile bis in 30 cm Tiefe ab, wie im mässig entwickelten Boden von Kreuzlingen I. Der höhere Tongehalt in 70 cm Tiefe beruht eher auf einem Schichteneffekt als auf einer Tonanreicherung durch mechanische Tonverlagerung aus den oberen Horizonten. In der voll entwickelten Braunerde Kreuzlingen II, die nach den pH-Werten als leicht degradiert beurteilt wurde, nehmen die Tongehalte von oben nach unten bis zum Tonanreicherungs-horizont zu, wie in allen degra-

Fig. 27 Die Tongehalte der untersuchten Bodenprofile



dierten Profilen. In diesem Fall ist eine Tonanreicherung wahrscheinlicher. In allen degradierten Profilen nimmt der Tongehalt bis auf die Tonanreicherungshorizonte hinab stetig zu. Tonverlagerung und Tonanreicherung sind so deutlich, dass Schichteneffekte nicht mehr wahrscheinlich sind.

Mit zunehmender Bodenentwicklung findet durch die Verwitterung vorerst eine Tonbildung statt. Die Tongehalte in den Verwitterungshorizonten sind grösser als in den C-Horizonten. Mit der Zeit werden die Tone durch das Sickerwasser verlagert. Es bilden sich Tonanreicherungshorizonte, die in den verschiedenen Profilen verschieden tief liegen (vergl. Geering, 1936).

### C. Humusgehalt

Die Humusgehalte der untersuchten Bodenprofile, bestimmt als Gesamthumus, sind in Fig. und Tab.28 zusammengestellt. In Tabelle 29 sind die zugehörigen C/N-Verhältnisse aufgeführt, die einen Anhaltspunkt über den Humuszustand ergeben.

Tab.28 Die Humusgehalte der untersuchten Bodenprofile in Gew.%

Profil-tiefe	Vill-nachern wenig entw. Boden	Kreuz-lingen I mässig entw. Boden	Urdorf voll entw. Braunerde	Kreuz-lingen II voll entw. Braunerde	Stetten I schwach degrad. B.erde	Stetten II schwach degrad. Braun-erde	Irchel stark degrad. Braunerde	Stadlerberg stark degradierte Braunerde
0-5 cm	5,9	9,0	7,8	3,8	16,7	18,2	52,7	17,3 <sup>*)</sup>
10 cm	2,2	5,7	5,3	1,8	2,2	2,8	3,2	3,7
30 cm	3,1	1,9	1,3	1,2	0,4	1,5	0,8	0,5
70 cm	-	0,9	0,9	0,7	-	-	-	-

Tab.29 Die C/N-Verhältnisse in den untersuchten Bodenprofilen

0-5 cm	25	29	12	13	25	24	25	30
10 cm	14	18	12	7	13	15	27	20
30 cm	14	13	8	10	5	13	10	10
70 cm	-	9	7	6	-	-	-	-

\*) Vor der Probenahme wurde die Rohhumusschicht entfernt, im Gegensatz zum Profil Irchel, bei dem die Rohhumusschicht miteinbezogen ist.

Im wenig entwickelten Boden von Villnachern entsprechen die Humusgehalte der Profilschichtung. Die beiden A-Horizonte haben hervortretende Humusgehalte. Der Humusabbau ist im A<sub>1</sub><sup>2</sup>-Horizont in 30 cm Tiefe fortgeschrittener als im A<sub>1</sub>-Horizont.

Die mässig bis voll entwickelten Profile von Kreuzlingen und Urdorf haben Humusgehalte unter 10%. Sie nehmen mit zunehmender Profiltiefe langsam ab. Der Humusabbau ist im mässig entwickelten Profil

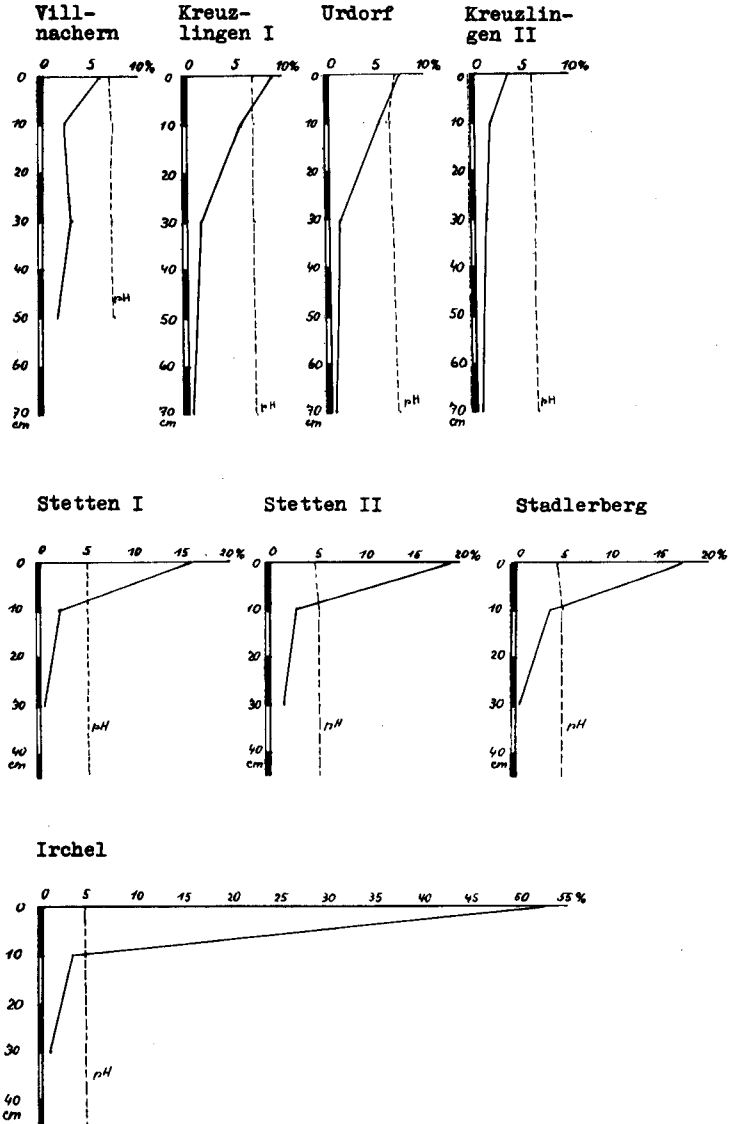
von Kreuzlingen I wenig fortgeschritten. Die voll entwickelten Profile von Urdorf und Kreuzlingen II zeigen den stärksten Humusabbau.

Alle degradierten Profile enthalten bis 5 cm Tiefe viel Humus (>15%). Die Humusgehalte nehmen aber mit der Profiltiefe sehr rasch ab. In 70 cm Tiefe fehlen die Humusstoffe ganz. Der Humusabbau ist in den schwach degradierten Profilen gebremst und die stark degradierten Profile weisen den geringsten Humusabbau auf.

Richard (1945) hat nachgewiesen, dass die biologische Aktivität, gemessen am Eiweiss-, Zellulose- und Streueabbau, bei den Braunerden mit der Degradation abnimmt. Die den Boden natürlich deckende Laubstreue wird im Querceto-Carpinetum aretosum (voll entwickelte Braunerden von Urdorf und Kreuzlingen) alljährlich zu 100% abgebaut; im Querceto-Carpinetum luzuletosum (schwach degradierte Braunerden von Stetten) zu 84% und im Querceto-Betuletum (stark degradierte Braunerden vom Irchel und Stadlerberg) nur noch zu 62%. Dies hat zur Folge, dass stellenweise Rohhumusauflagen entstehen, die sogar zu zusammenhängenden, einige Zentimeter mächtigen Rohhumushorizonten anwachsen können.

Bei der Entwicklung der Braunerden bis zu den voll entwickelten Stadien nimmt der Humusabbau, infolge der zunehmenden biologischen Aktivität, zu. In diesen Profilen steigen die Humusgehalte nicht oder nur wenig über 10%, und mit zunehmender Tiefe nehmen die Humusanteile allmählich ab. Mit der fortschreitenden Degradation versauert der Boden (vergl. Tab.26). Die biologische Aktivität und der Humusabbau nehmen ab. Die Humusstoffe reichern sich in den obersten Zentimetern des Bodenprofils sehr deutlich an. Die Humusgehalte steigen über 15%, sie nehmen aber mit der Tiefe sehr rasch ab.

Fig.28 Die Humusgehalte der untersuchten Bodenprofile





D. Bodenstruktur

a) Strukturzustand der untersuchten Bodenprofile

Ueber den Strukturzustand der untersuchten Bodenprofile können die Krümelzahlen in Verbindung mit den Stabilitätszahlen und den Feinkoagulatanteilen einigen Aufschluss geben. Sie sind in den untenstehenden Tabellen 30, 31 und 32 zusammengestellt.

Tab.30 Die Krümelzahlen der untersuchten Bodenprofile

Profil-tiefe	Vill-nachern wenig entwick. Boden	Kreuz-lingen I mässig entwick. Boden	Urdorf voll entwick. Braunerde	Kreuz-lingen II voll entwick. B.erde	Stetten I schwach degrad. B.erde	Stetten II schwach degrad. B.erde	Irchel stark degrad. Braunerde	Stadler-berg stark degrad. B.erde
0-5 cm	21,5	77,3	71,7	73,6	78,1	80,2	62,1	38,2
10 cm	0,3	82,2	87,3	34,4	38,4	78,2	82,3	52,3
30 cm	34,5	60,3	91,1	17,9		48,9	35,0	
60 cm					7,0			3,6
70 cm		9,2	41,4	7,3		12,9	6,2	
80 cm								8,3
90 cm			23,9					
100 cm				1,0				
110 cm					9,7			
140 cm		0,8				2,4	12,5	
160 cm					2,5			4,4

Die verschiedenen Horizonte der untersuchten Bodenprofile sind recht unterschiedlich gekrümelt. Die Krümelung nimmt im allgemeinen von oben nach unten ab. In 0-5 und 10 cm Tiefe weisen alle Profile, mit Ausnahme des wenig entwickelten Bodens von Villnachern, eine grosse bis mittlere Krümelung auf. In 30 cm Tiefe sind nur noch die beiden Profile von Urdorf und Kreuzlingen I stark gekrümelt.

Vergleicht man die Krümelzahlen mit den Humusgehalten (Tab.28) und den Tongehalten (Tab.27), so zeigt sich, dass die Krümelung aufhört, sobald die Humusstoffe fehlen. Die Tone allein bilden keine Krümel. In den Tonanreicherungshorizonten ist in keinem einzigen Fall eine grosse Krümelung anzutreffen. Der Vergleich mit den pH-Werten (Tab.26) zeigt, dass in den Braunerden die Krümelung ziemlich unabhängig vom pH-Wert ist.

Es finden sich in neutralen und sauren Horizonten sowohl grosse als auch kleine Krümelzahlen.

Tab. 31 Die Stabilitätsszahlen der untersuchten Bodenprofile

Profil- tiefe	Vill- nachern wenig entwick. Boden	Kreuz- lingen I mässig entwick. Boden	Urdorf voll entw. Braun- erde	Kreuz- lingen II voll entwick. B.erde	Stetten I schwach degrad. B.erde	Stetten II schwach degrad. B.erde	Irchel stark degrad. Braun- erde	Stadler- berg stark degrad. B.erde
0-5 cm	47,6	79,2	75,5	39,1	83,4	81,4	75,6	88,1
10 cm	29,2	78,3	74,9	8,8	43,9	88,4	88,7	85,8
30 cm	21,1	36,6	60,6	11,5		68,5	25,8	
60 cm					4,3			8,5
70 cm		7,0	53,5	12,0		17,2	6,7	
80 cm								8,9
90 cm			14,3					
100 cm				0,0				
110 cm					9,1			
140 cm		0,0				0,0	8,5	
160 cm					3,2			6,9

Die Stabilitätsszahl (vergl. Tab. 30 und 31) ist im wenig entwickelten Profil von Villnachern und in den oberen Horizonten der degradierten Profile grösser als die Krümelzahl. Daraus ist ersichtlich, dass die Krümel wohl stabil sind, dass aber schon im trockenen Zustand ein Teil des Bodens nicht gekrümelt ist. In den mässig bis voll entwickelten Profilen von Urdorf und Kreuzlingen ist die Stabilitätsszahl kleiner als die Krümelzahl. Die grossen wurzelverbauten Krümel machen sich darin bemerkbar. Die grossen Krümel bieten dem Wasserstrom eine relativ kleine Angriffsfläche, weshalb sie weniger zerteilt werden als die kleinen Krümel. Im übrigen nehmen die Stabilitätsszahlen den gleichen Verlauf wie die Krümelzahlen.

Tab.32 Die Feinkoagulatanteile der untersuchten Bodenprofile in Gew.%

Profil- tiefe	Vill- nachern wenig entw. Boden	Kreuz- lingen I mässig entw. Boden	Urdorf voll entw. Braun- erde	Kreuz- lingen II voll entw. B.erde	Stetten I schwach degrad. B.erde	Stetten II schwach degrad. B.erde	Irchel stark degrad. Braun- erde	Stadlerberg stark degradierte Braunerde
0-5 cm	10,6	6,7	10,8	5,7	5,8	3,0	5,0	6,0
10 cm	0,9	4,6	5,2	12,7	11,2	7,0	7,4	12,3
30 cm	8,1	9,8	3,6	18,7		15,0	21,6	
60 cm	-				16,1			5,8
70 cm		12,6	17,4	11,0		24,2	22,9	
80 cm								10,3
90 cm			18,7					
100 cm				0,8				
110 cm					7,9			
140 cm		1,4				1,0	14,9	
160 cm					2,0			26,7

Die Feinkoagulatanteile (Tab.32) nehmen im allgemeinen zu, sobald der Krümelanteil abnimmt. Der Vergleich mit den Humusgehalten (vergl.Tab.28) zeigt, dass die Feinkoagulatanteile zunehmen, sobald die Humusstoffe fehlen. Der Vergleich mit den Tongehalten (vergl. Tab.27) zeigt, dass die Feinkoagulate mit zunehmendem Tongehalt zunehmen. Die Feinkoagulatanteile sind in den Tonanreicherungs-horizonten am grössten. Eine Ausnahme machen die C-Horizonte, in denen trotz relativ hohen Tongehalten die Feinkoagulate gänzlich fehlen.

Die Struktur der Braunerden verändert sich im Verlaufe der Bodenentwicklung. Durch die Vegetation und die Humusstoffe beginnen die wenig entwickelten Profile zu krümeln. Mit zunehmender Entwicklung, bis zu den voll entwickelten Stadien, nimmt die Krümelung zu, infolge des zunehmenden Humusanteils und des zunehmenden Tonanteils. Die Krümelstruktur nimmt in den mässig bis voll entwickelten Pro-filen von oben nach unten langsam ab. Sie wird von einer Einzelkorn-  
struktur abgelöst, wenn die humushaltigen Horizonte in den C-Horizont übergehen. Folgen unter den humushaltigen Horizonten noch humusfreie Verwitterungsschichten, dann geht die Krümelstruktur in eine Fein-  
koagulatstruktur über. Mit beginnender Degradation werden die Humus-  
stoffe zu oberst angereichert. Die Krümelstruktur bleibt in den humushaltigen Horizonten erhalten. Sie nimmt aber mit der Tiefe plötzlich ab und geht in eine Feinkoagulatstruktur über, die die B-Horizonte umfasst und bis auf die Karbonatgrenze hinunter reicht. Die Mächtigkeit der Horizonte mit Feinkoagulatstruktur ist umso grösser, je tiefer die CaCO<sub>3</sub>-Grenze liegt. Die C-Horizonte haben Einzelkornstruktur.

b) Ursachen der Aggregatbildung

Um die Ursachen der Aggregatbildung zu untersuchen, wurde die Krümelanalyse an den Profilen von Villnachern, Urdorf, Stetten II und Irchel unter Zusatz von 200 ccm 2%iger Calgonlösung durchgeführt. Die Schlämdauer und die Schlammgeschwindigkeit wurden nicht verändert, ebenso wurde der Boden in lufttrockenem Zustand in den Schlammapparat gegeben. In Tabelle 33 sind die Krümelzahlen und die Feinkoagulatanteile gegenübergestellt, wie sie sich bei der Wasser- und bei der Calgonlösung ergeben haben.

Tab.33 Die Krümel- und Feinkoagulatanteile nach der Krümelanalyse in dest.Wasser und in dest.Wasser mit Calgonzusatz in Gew.%

Bodentiefe	Wasserschläm- ung		Calgonlösung	
	Krümel- anteil	Feinkoagulat- anteil	Krümel- anteil	Feinkoagulat- anteil
<b>Profil Villnachern</b>				
0-4 cm	21,5	10,6	4,4	2,2
10 cm	0,3	0,9	-	-
25 cm	34,5	8,1	29,2	4,3
50 cm	0,8	2,0	-	-
<b>Profil Urdorf</b>				
0-5 cm	71,7	10,8	50,1	4,0
10 cm	87,3	5,2	62,4	3,2
30 cm	91,1	3,6	49,8	1,1
70 cm	41,4	17,4	10,7	0,8
90 cm	23,9	18,7	0,0	0,0
<b>Profil Stetten II</b>				
0-3 cm	80,2	3,0	79,9	7,3
10 cm	78,2	7,0	77,6	5,4
30 cm	48,9	15,0	14,2	3,8
70 cm	12,9	24,2	2,0	1,2
140 cm	2,4	1,0	-	-
<b>Profil Irchel</b>				
0-3 cm	62,1	5,0	69,2	6,4
10 cm	82,3	7,4	70,0	6,8
30 cm	35,0	21,6	8,5	1,3
70 cm	6,2	22,9	0,0	3,0
140 cm	12,5	14,9	9,2	3,9

Aus Tabelle 33 ist ersichtlich, dass durch den Zusatz von 200 ccm 2%iger Calgonlösung die Krümelanteile stark verringert und die Feinkoagulate von 0,5 - 0,25 mm gänzlich zerstört werden. Eine Ausnahme machen die stark durchwurzelten Krümel aus dem Obergrund der degradierten Profile von Stetten und vom Irchel, die durch den Dispergierungszusatz nicht zerstört worden sind.

Der Mechanismus der Bildung wasserbeständiger Aggregate in den Profilen der Braunerdeserie kann an Hand der vorliegenden Untersuchungen wie folgt erklärt werden.

In den wenig verwitterten, kalkhaltigen und humusfreien C-Horizonten konnte trotz des oft hohen Tonanteils keine Aggregatbildung festgestellt werden. Da aber in diesen Horizonten genügend zweiwertige Kationen in der Bodenlösung vorhanden sind, muss angenommen werden, dass für die Aggregatbildung nicht der prozentuale Anteil an Tonen, sondern die Eigenschaften der Tone wesentlich sind.

Der physikalische Druck der Erdschichten, der in den C-Horizonten am grössten ist, fällt als Faktor für die Bildung von wasserbeständigen Aggregaten ausser Betracht, und es ist auch wenig wahrscheinlich, dass der physikalische Druck von Pflanzenwurzeln stark krümelbildend wirken kann, wie russische Forscher der Schule Dojarenko (1931) vermutet haben.

In den nicht oder nur wenig durchwurzelten, entkarbonateten und humusfreien B-Horizonten, die sich durch Tonanreicherung und ihre rostrote Farbe auszeichnen, wurden Feinkoagulatstrukturen festgestellt. Die im trockenen Zustand beständigen Aggregate von mehreren Millimetern im Durchmesser zerfallen bei der plötzlichen und allseitigen Benetzung durch den Druck der eingeschlossenen Luft sofort in Feinkoagulate von 0,5 - 0,25 mm, in Feinkoagulate kleiner als 0,25 mm und in Sand. Bei der Schlämzung mit Calgonzusatz verschlämmen auch die Feinkoagulate von 0,5 - 0,25 mm vollständig in kleinere Teile. Da durch den Calgonzusatz die mehrwertigen Kationen, vor allem die zweiwertigen Ca-Kationen, vom Bodenkörper entfernt und durch einwertige Na-Kationen ersetzt werden, kann angenommen werden, dass die koagulationsempfindlichen Tone, zusammen mit den mehrwertigen Kationen, an der Bildung der Feinkoagulate massgebend beteiligt sind. Der Einfluss der H-Ionen ist nicht abgeklärt. (Ueber den Mechanismus der Krümelbildung durch Elektrolytflockung von Ton vergl. Russell (1938)).

In den humushaltigen und reich durchwurzelten A-Horizonten wurden Krümelstrukturen festgestellt, und zwar sowohl in den neutral bis leicht alkalisch reagierenden Mullhorizonten der mässig bis voll entwickelten Profile, als auch in den leicht bis stark sauren A-Horizonten der degradierten Braunerden. Die Schlämzung mit Calgonzusatz ergab in den Horizonten mit Krümelstruktur der voll entwickelten Braunerde von Urdorf eine starke Verminderung des Krümelanteils. In den A-Horizonten der degradierten Braunerden hatte der Calgonzusatz

keine nennenswerte Wirkung. Daraus kann gefolgert werden, dass der Humus ein wesentlicher Bestandteil der Krümel ist. Sicher ist, dass die Faserwurzeln krümelbildend wirken, indem sie mehrere, durch Koagulation der Kolloide entstandene Feinkoagulate, zusammenhalten, wodurch auch Sandkörner eingeschlossen werden können (vergl. Demolon und Henin, (1932); Baver, (1948)).

Auch die Drucke können in den Bodenhorizonten mit Krümel- und Feinkoagulatstruktur aggregatbildend wirken, indem die Feinkoagulate und Krümel, die im nassen Zustand plastisch sind, zusammengepresst und ineinander verzahnt werden können. Die Wasserstabilität wird aber dadurch nicht erhöht. Solche Aggregate werden bei der raschen Benetzung wieder in die Krümel und Feinkoagulate zersprengt, im Gegensatz zu den wurzelverbauten Aggregaten, die nur aufgelockert werden (vergl. Yoder, 1936); Sekera, (1943)).

Aehnlich der Sprengwirkung der eingeschlossenen Luft bei der raschen Benetzung mag die Sprengwirkung des Frostes sein. Die durch den physikalischen Druck zu Klumpen verfestigten Krümel werden durch die Ausdehnung des Wassers beim Gefrieren gelockert, wodurch die Schollen schliesslich in die Krümel zerfallen (vergl. Jung, (1931)).

#### E. Gesamtporenvolumen, Wasser- und Luftkapazität

Die Gesamtporenvolumina und Wasser- und Luftkapazitäten der untersuchten Bodenprofile sind in den folgenden Tabellen 34, 35 und 36 zusammengestellt.

Tab. 34 Die Gesamtporenvolumina der untersuchten Bodenprofile

Bodentiefe	Kreuzlingen I mässig entw. Boden	Urdorf voll entw. Braunerde	Kreuzlingen II voll entw. B.erde	Stetten I schwach degrad. B.erde	Stetten II schwach degrad. B.erde	Irchel stark degrad. Braunerde
0-5 cm	59,0	63,5	58,0	-	-	-
10 cm	58,2	54,8	54,8	60,1	70,2	60,9
30 cm	55,2	48,1	49,6	56,6	57,7	46,3
60 cm				47,1		
70 cm	38,9	44,4	44,2		47,7	46,3
90 cm		35,8				
110 cm				44,9		
140 cm	39,0					42,3

Die Gesamtporenvolumina (Tab.34) nehmen ohne Ausnahme in allen Profilen von oben nach unten ab. Die Abnahmen betragen 14 - 28%. In den gekrümelten Horizonten der degradierten Böden sind die Gesamtporenvolumina (über 60%) grösser als in den gekrümelten Horizonten der mässig bis voll entwickelten Profile.

Den verschiedenen Bodenstrukturen (vergl.Tab.30 und 32) entsprechen nach den vorliegenden Untersuchungen folgende Gesamtporenvolumina:

Gesamtporenvolumen grösser als 48% gut gekrümel  
 Gesamtporenvolumen 48 bis 42% schwach gekrümel und Feinkoag.  
 struktur  
 Gesamtporenvolumen kleiner als 42% Einzelkornstruktur.

Tab.35 Die Wasserkapazitäten der untersuchten Bodenprofile

Bodentiefe	Kreuzlingen I mässig entw. Boden	Urdorf voll entw. Brauner- erde	Kreuzlingen II voll entw. B.erde	Stetten I schwach degrad. B.erde	Stetten II schwach degrad. B.erde	Irchel stark degrad. Brauner- erde
0-5 cm	45,5	49,4	42,8	-	-	-
10 cm	43,1	47,2	42,6	38,9	41,9	39,6
30 cm	39,6	43,4	37,4	37,9	37,1	39,9
60 cm				40,8		
70 cm	35,6	43,5	38,3		39,9	42,4
90 cm		37,4				
110 cm				41,2		
140 cm	37,9					42,5

Die Wasserkapazitäten (Tab.35) nehmen in den mässig bis voll entwickelten Profilen nach unten ab. In den degradierten Profilen nehmen sie nach unten zu.

Zwischen Bodenstruktur und Wasserkapazität bestehen keine eindeutigen Beziehungen. Werte über 43% weisen nur die humus- und tonreichen Horizonte der Profile Kreuzlingen I und Urdorf auf. Wasserkapazitäten von 43 - 38% haben die Bodenhorizonte mit Feinkoagulat- bis Krümelstruktur. Böden in Einzelkornstruktur haben Wasserkapazitäten kleiner als 38%.

Tab.36 Die Luftkapazitäten der untersuchten Bodenprofile

Boden- tiefe	Kreuz- lingen I mässig entw. entw. Boden	Urdorf voll entw. Braun- erde	Kreuz- lingen II voll entw. B.erde	Stetten I schwach degrad. B.erde	Stetten II schwach degrad. B.erde	Irchel stark degrad. Braun- erde
0-5 cm	13,5	14,1	15,2	-	-	-
10 cm	15,1	7,6	12,2	21,2	28,6	21,3
30 cm	15,6	4,7	13,2	18,7	20,6	6,4
60 cm				6,3		
70 cm	3,3	0,9	5,9		7,8	3,9
90 cm		-1,6				
110 cm				3,7		
140 cm	1,1					-0,2

Die Luftkapazitäten (Tab.36) nehmen mit zunehmender Profiltiefe allgemein ab. Auffallend ist die sehr starke Abnahme unterhalb der Hauptwurzelräume. Die Luftkapazitäten der A<sub>1</sub>-Horizonte sind in den degradierten Böden bedeutend grösser als in den mässig bis voll entwickelten Profilen. Eine besondere Stellung nimmt das Profil Urdorf ein, das sehr reich an Tonen und gut gekrümelt ist. Es hat grosse Wasserkapazitäten, aber auffallend kleine und rasch abnehmende Luftkapazitäten. Die grossen Krümel bilden im wassergesättigten Zustand ein dichtes Gefüge. Eine starke Krümelung bedingt nicht immer eine hohe Luftkapazität, es kommt auch auf die Lagerung der Krümel an.

Die Luftkapazitäten -8% in den unteren Horizonten, die reich an Feinkoagulaten sind, können zum grössten Teil auf die Tätigkeit der Würmer zurückgeführt werden.

Kleine negative Luftkapazitäten können sich ergeben, wenn die Zylinderproben nicht vollständig eben abgeschnitten werden. Das Präparieren ist bei wassergesättigten und dichten Böden nicht einfach.

Um den Einfluss der Würmer auf das Bodengefüge zu untersuchen, wurden bei den Profilen von Villnachern, Urdorf, Stetten I und II, Irchel und Stadlerberg je zwei Versucherahmen von 50 cm im Quadrat ausgelegt. In Tabelle 37 sind die Wurm Kotmengen, die vom 15. Juli bis 15. November 1948 gesammelt wurden, auf 1 m<sup>2</sup> umgerechnet, wiedergegeben. Der prozentische Humusgehalt, sowie das C/N-Verhältnis der Exkremente und der obersten Bodenschicht sind ebenfalls aufgeführt.



Tab.37 Die gesammelten Wurm Kotmengen, ihr Humusgehalt und C/N-Verhältnis

Profil	Villnachern		Urdorf		Stetten I		Stetten II		Irchel		Stadlerberg	
Wurmkot in gr/m <sup>2</sup>	311,2		442,6		367,5		333,0		2,4		1,5	
	Kot	Boden	Kot	Boden	Kot	Boden	Kot	Boden	Kot	Boden	Kot	Boden
%Humus C/N	5,11 14	5,9 25	12,29 17	7,8 12	10,1 18	16,7 25	14,9 19	18,2 24	-	-	-	-

Aus Tabelle 37 kann entnommen werden, dass die Wurmtätigkeit in den stark degradierten Profilen des Irchels und Stadlerberges fehlt. Diese beiden Profile haben zusammenhängende Rohhumusaufgaben. Sie sind biologisch inaktiv. Beim Profil Urdorf, das den stärksten Humusabbau zeigt, wurde die grösste Wurmkotmenge gesammelt. Die beiden Profile von Stetten und das Profil Villnachern, die einen schlechteren Humusabbau aufweisen als das Profil Urdorf, ergaben kleinere Kotmengen. Die Unterschiede sind aber nicht so gross, dass die Wurmkotmenge als Mass für die biologische Aktivität herangezogen werden könnte.

Der Einfluss der Würmer auf das Bodengefüge ist sehr beachtlich. Die Wurmkotmenge von Stetten I (360 gr mit 10% Humus) ergibt ein Volumen an fester Bodensubstanz von 155 ccm. Bei der Annahme eines Gesamtporenvolumens von 50% entspricht die in drei Monaten ausgestossene Wurmkotmenge einem Bodenvolumen von 310 ccm. Berechnet auf ein Jahr und eine Bodentiefe von 100 cm, entspricht dieser Kotmenge eine Erhöhung des Gesamtporenvolumens von 0,12%.

Ueber die Ursachen der Gefügeausbildung können folgende Feststellungen gemacht werden:

1. Von grossem Einfluss ist die Bodenart. Ein extrem grobsandiger Boden hat eine grosse Luftkapazität und eine kleine Wasserkapazität. Ein extrem toniger Boden hat eine grosse Wasserkapazität und eine kleine Luftkapazität. Das Gesamtporenvolumen kann aber bei beiden Fällen gleich gross oder verschieden sein. Da die Bodenart von Profil zu Profil verschieden sein kann und sich im Verlauf der Entwicklung verändert, sind auch die grossen Variationsmöglichkeiten verständlich.
2. Die koagulationsfähigen Tone und der Humus haben die Fähigkeit, Aggregate von verschiedenen Eigenschaften zu bilden, von denen die Aggregatgrösse und die Wasserbeständigkeit die wichtigsten sind. Durch die Aggregatbildung kann das Gesamtporenvolumen

erhöht und die Verteilung in Wasser- und Luftkapazität kann verändert werden.

3. Eine grosse Rolle spielt die Lagerung der Bodenaggregate und der Einzelteile. Die Bodenaggregate sind im nassen Zustand plastisch. Unter dem Druck der darauffliegenden Bodenschichten, dem Quellungsdruck bei der Wasseraufnahme und unter dem Druck der wachsenden Wurzeln werden die Aggregate und Einzelteile zusammengepresst und dicht zusammengefügt. Dadurch wird die Luftkapazität vermindert. Stehen hingegen die wasserbeständigen Aggregate nicht unter Druck, so verhalten sie sich wie die sperrigen Sandkörner. Sie bilden ein lockeres Krümelgefüge mit einem grossen Gesamtporenvolumen.
4. Von erheblichem Einfluss auf die Gestaltung des Bodengefüges sind die mannigfachen Verlagerungsprozesse im Boden, von denen in den Braunerden folgende zu nennen sind. Die Verlagerung der Tone, die oben (vergl. Tab. 27) nachgewiesen und auch von anderen Forschern, z. B. Geering (1936), festgestellt wurde, erhöht das Gesamtporenvolumen in den Auswaschungshorizonten. In den Anreicherungs-horizonten werden die gröberen Poren verstopft, die Wasserkapazität kann zunehmen, die Luftkapazität und das Gesamtporenvolumen nehmen ab. Ein weiterer Verlagerungsprozess, der dem vorigen entgegenwirkt, ist die Wurmtätigkeit. Durch das Ausheben von Wurmgängen wird das Gesamtporenvolumen und die Luftkapazität erhöht, und die Wasserkapazität wird kleiner.
5. Als letzte Ursache ist die verschieden grosse Wasseraufnahmefähigkeit der Bodenbestandteile zu nennen. Ein grosser Anteil an quellbaren Humusstoffen und Tonen erhöht die Wasserkapazität auf Kosten der Luftkapazität bei gleichbleibendem Gesamtporenvolumen.

Alle diese Faktoren mit ihren unterschiedlichen Einflüssen können bei der Gefügebildung mitwirken. Es ist deshalb verständlich, dass bei der grossen Zahl von Möglichkeiten aus den wenigen Untersuchungsergebnissen nur schwer allgemeine Schlüsse gezogen werden können. Es ist auch selbstverständlich, dass mit Hilfe von Gesamtporenvolumen, Wasser- und Luftkapazität, ein Bodengefüge nur ungenügend, und an Hand einer einzigen dieser drei Zahlen überhaupt nicht beurteilt werden kann. Die Resultate der Korn- und Krümelanalysen und die Profilbeschreibung müssen zu Rate gezogen werden.

### Veränderungen des Bodengefüges mit zunehmender Bodenentwicklung

In den mässig bis voll entwickelten Profilen nimmt das Gesamtporenvolumen in den A-Horizonten mit zunehmender Profiltiefe langsam ab, da die Humusstoffe und die Krümelung langsam abnehmen und die Tongehalte keine grossen Schwankungen aufweisen. Beim Uebergang in den C-Horizont ist die Abnahme des Gesamtporenvolumens ziemlich gross. Die dichten C-Horizonte haben nur kleine Gesamtporenvolumina. Die Wasserkapazitäten sind im A<sub>1</sub>-Horizont gross. Auch sie nehmen nach unten langsam ab. Die Luftkapazitäten sind in den gekrümelten Horizonten ziemlich gross, steigen aber kaum über 15%. Sie nehmen mit zunehmender Tiefe ziemlich rasch ab.

In den degradierten Profilen ist das Gesamtporenvolumen in den A<sub>1</sub>-Horizonten auffallend gross (grösser als 60%). Es nimmt unterhalb des Hauptwurzelraumes, beim Uebergang von der Krümel- zur Feinkoagulatstruktur plötzlich stark ab, sinkt aber in den B-Horizonten in keinem Fall unter 42%. Die Wasserkapazität schwankt um 40% herum. Sie ist in den gekrümelten Horizonten trotz des hohen Humusgehaltes meist kleiner als in den darunterliegenden B-Horizonten. Die Luftkapazitäten sind in den gekrümelten Horizonten der degradierten Braunerdeböden weit grösser (grösser als 20%) als in den gekrümelten Horizonten der nicht degradierten Profile (kleiner als 15%), sie nehmen aber beim Uebergang von der Krümel- zur Feinkoagulatstruktur plötzlich stark ab.

### VI. Beurteilung der Krümelanalyse

=====

Die Untersuchungen des Krümelzustandes und der Krümelstabilität geben aufschlussreiche Einblicke in die physikalischen Verhältnisse eines Bodens. Sie ergänzen die Bestimmung der Wasser- und Luftkapazität in vorteilhafter Weise. Die Resultate beider Methoden lassen ähnliche Schlussfolgerungen zu, hingegen scheint die Krümelanalyse empfindlicher zu sein.

Es wurden in Horizonten, die wegen der dichten Lagerung nicht mehr durchwurzelt sind, noch ansehnliche Luftkapazitäten gemessen, die an und für sich das Wurzelwachstum nicht verunmöglichen sollten. Die Krümelanalysen zeigten aber Feinkoagulatstrukturen an, die als dicht beurteilt werden müssen. Andererseits wurden im Profil Urdorf kleine Luftkapazitäten festgestellt, die das Wurzelwachstum

eigentlich verhindern sollten. Die Profilaufnahme ergab hingegen eine gute Durchwurzelung und die Krümelanalyse eine grosse bis mittlere Krümelung. Diese Feststellungen lassen vermuten, dass nicht die absolute Grösse der Luftkapazität, sondern ihre Verteilung wesentlich ist. Es ist nicht dasselbe, ob sich eine Luftkapazität von 5% auf Grund eines Wurmanges ergibt, oder ob diese 5% in einem Netz von Poren auf das ganze Bodenvolumen verteilt sind. Ein Boden mit ansehnlicher Luftkapazität kann physiologisch dicht sein, und ein Boden mit geringerer Luftkapazität kann für das Wachstum der Wurzeln genügend Luft enthalten. Weitere Untersuchungen sollten darüber Aufschluss bringen können.

Die vorliegenden Untersuchungen über den Krümelzustand einiger Profile der Braunerdeserie des schweizerischen Mittellandes sind selbstverständlich zu wenig umfangreich, als dass eine endgültige Einteilung und Benennung festgelegt werden könnte. Weitere Untersuchungen, vor allem an Profilen anderer Bodenserien, sollten durchgeführt werden: Die untenstehende Einteilung ist daher nur provisorisch (vergl. Tab. 38).

Innerhalb der Braunerdeserie sind vor allem drei verschiedene Strukturen festzustellen, zwischen denen alle Uebergänge vorkommen können, nämlich die Krümelstruktur, die Feinkoagulatstruktur und die Einzelkornstruktur. Ein Boden in Krümelstruktur enthält einen grossen Anteil an Krümeln. Ein Boden mit Feinkoagulatstruktur zerfällt bei der Schlämmung in Wasser, in Feinkoagulate und in Sand. Ein Boden mit Einzelkornstruktur zerfällt bei der Wasserschlämmung sofort in seine Einzelteile.

Tab. 38 Die Einteilung der untersuchten Braunerden nach der Krümelzahl

<u>Krümelzahl</u>	<u>Benennung</u>	<u>Eigenschaften</u>	<u>Vorkommen</u>
0 - 10 ohne Feinkoagulate	Einzelkornstruktur	Dichter Boden mit Gesamtporenvolumen kleiner als 42% und Wasserkapazitäten kleiner als 38%, die Luftkapazität ist praktisch gleich Null	C-Horizonte
0 - 20 mit relat. grossem Anteil an Feinkoagulaten	Feinkoagulatstruktur	Dichter Boden mit Gesamtporenvolumen von 42-48% und kleiner Luftkapazität wenig durchwurzelt	B-Horizonte
20 - 50	mässig gekrümelt bis Einzelkornstruktur	Gesamtporenvolumen sehr verschieden. Wasserkapazität kleiner als 42%, physiologisch zugänglich	A-C-Horizonte und AB-Horizonte

<u>Krümelmzahl</u>	<u>Benennung</u>	<u>Eigenschaften</u>	<u>Vorkommen</u>
50 - 70	gute Krümelstruktur	Gesamtporenvolumen grösser als 48% physiologisch zugänglich	A <sub>2</sub> -Horizonte und sandige A <sub>1</sub> -Horizonte
grösser 70	sehr gute Krümelstruktur	Gesamtporenvolumen grösser als 48% physiologisch zugänglich	A <sub>1</sub> - und A <sub>1</sub> <sup>2</sup> -Horizonte, sandige Horizonte ausgenommen

## VII. Zusammenfassung

=====

### A. Methodisches

1. Es wurden methodische Voruntersuchungen für die Kornanalyse durchgeführt. Als Resultat ergab sich eine kombinierte Pipett-Schlamm-analyse. Die Fraktionen kleiner als 0,02 mm im Durchmesser werden mit der Pipette entnommen. Die Sandfraktionen werden im Kopecky-apparat bestimmt, nachdem die Tonfraktionen vorgängig abpipettiert worden sind.
2. Die Begriffe Krümel und Feinkoagulat wurden diskutiert und umschrieben. Krümel sind trocken- und wasserbeständige Aggregate grösser als 0,5 mm im Durchmesser. Sie lassen sich durch Kochen in Wasser mit geeigneten Dispergatoren in ihre Einzelteilchen zerlegen.  
Feinkoagulate sind trocken- und wasserbeständige Aggregate kleiner als 0,5 mm im Durchmesser. Sie lassen sich durch Kochen in Wasser mit geeigneten Dispergatoren in ihre Einzelteilchen zerlegen.
3. Die bekannten Krümelanalysenmethoden wurden diskutiert. Ein neuer Krümelanalysenapparat, der eine Weiterentwicklung der Methode "Tjulin" und "Meyer & Rennenkampff" darstellt, wurde beschrieben.
4. Für die Kennzeichnung der Bodenhorizonte wurden die Begriffe Krümelzahl und Stabilitätszahl eingeführt und definiert. Die Krümelzahl gibt an, wieviele Gewichtsprozente der Feinerde in Krümeln vorliegen. Die Differenz zu 100 ergibt die Prozente der Einzelkörner und der Feinkoagulate.  
Die Stabilitätszahl gibt an, wieviele Gewichtsprozente der im

trockenen Zustand beständigen Aggregate von 0,5 - 2,0 mm  $\phi$  auch wasserbeständig sind.

5. Die bestehenden Methoden zur Untersuchung des Bodengefüges wurden erörtert, die Methode nach Burger wurde untersucht. Es wurde nachgewiesen, dass die Zylinderproben zur Wassersättigung nicht sofort ins Wasser eingetaucht werden dürfen, da sich beim Untertauchen auf Kosten der Luftkapazitäten zu grosse Wasserkapazitäten ergeben.
6. Die Bestimmung der Wasser- und Luftkapazität erfährt durch die Krümelanalyse eine wertvolle Bereicherung. Im grossen und ganzen lassen beide Analysen ähnliche Schlüsse zu, hingegen scheint die Krümelanalyse empfindlicher zu sein.
7. Für die Beurteilung des Bodengefüges genügen die Werte Gesamtporenvolumen, Wasser- und Luftkapazität nicht. Die Resultate der Kornanalyse, der Krümelanalyse und die Profilbeschreibung müssen zu Rate gezogen werden.

#### B.-Untersuchungen an einigen Entwicklungsstadien der Braunerdeserie

1. Mit zunehmender Bodenentwicklung werden die Braunerden von oben nach unten entkarbonatet und die pH-Werte nehmen ab.
2. Der Tonanteil nimmt mit der Bodenentwicklung zu. Die Tone werden schliesslich nach unten verlagert. Sie reichern sich in tiefer gelegenen Horizonten an.
3. In den mässig bis voll entwickelten Profilen beträgt der Humusanteil im  $A_1$ -Horizont nicht mehr als 10%. Er nimmt mit der Profiltiefe nur allmählich ab. Die engen C/N-Verhältnisse zeigen einen weitgehenden Humusabbau an. In den degradierten Profilen ist der Humusanteil im  $A_1$ -Horizont grösser als 15%. Er nimmt mit der Profiltiefe rasch ab. Die weiten C/N-Verhältnisse zeigen, dass die Humusstoffe wenig abgebaut sind.
4. In den Profilen der Braunerdeserie können folgende Strukturen unterschieden werden:  
Krümelstruktur: Sie ist deutlich vom Humus abhängig. Der Krümelanteil nimmt in den mässig bis voll entwickelten Profilen mit zunehmender Tiefe langsam ab. In den degradierten Profilen sind nur die obersten Horizonte stark gekrümelt. Unterhalb des Hauptwurzelraumes nimmt die Krümelung plötzlich ab.

Feinkoagulatstruktur: Sie hängt von den koagulierten Tonen ab. In den B-Horizonten der degradierten Profile ist sie am deutlichsten ausgebildet. Sie löst die Krümelstruktur ab, sobald die Humusstoffe fehlen.

Einzelkornstruktur: Sie ist vor allem in den nicht verwitterten, nicht entkarbonateten C-Horizonten anzutreffen.

5. Bei den Böden der Braunerdeserie können tendenzmässig folgende Gesamtporenvolumina festgestellt werden:

Gesamtporenvolumen grösser als	48%	: Krümelstruktur
Gesamtporenvolumen	48 - 42%	: Feinkoagulatstruktur
Gesamtporenvolumen kleiner als	42%	: Einzelkornstruktur.
  
6. Die Wasserkapazität ist in den A<sub>1</sub>-Horizonten der mässig bis voll entwickelten Profile am grössten. Sie nimmt in diesen Profilen mit der Tiefe langsam ab. In den degradierten Profilen beträgt die Wasserkapazität um 40%. Sie ist in den gekrümelten Horizonten trotz des grossen Humusanteils kleiner als in den humusfreien Horizonten mit Feinkoagulatstruktur. In den degradierten Profilen nimmt die Wasserkapazität von oben nach unten um wenige Prozente zu.
  
7. Die Luftkapazität nimmt in allen Profilen von oben nach unten ab. Sie steigt in den gekrümelten Horizonten der mässig bis voll entwickelten Profile kaum über 15%, in den degradierten Profilen hingegen über 20%.

Literaturverzeichnis  
=====

- B a v e r, L.D., (1948) Soil physics. 2nd ed. New York.
- B u r g e r, H., (1927) Physikalische Eigenschaften von Wald- und Freilandböden. Mitt. schweiz. Centralanstalt forstl. Versuchsw. 14, 201-250.
- D e m o l o n, A., (1948) Dynamique du sol. Paris.
- D e m o l o n, A., und H é n i n, S., (1932) Recherches sur la structure des limons et la synthèse des agrégats. Recherches sur le Sol. 3, 1-9.
- D o j a r e n k o, A.G., (1931) zitiert von Krause, M. in "Russische Forschungen auf dem Gebiete der Bodenstruktur". Landw. Jb. 73, 603-690.
- E t t e r, H., (1943) Pflanzensoziologische und bodenkundliche Studien an schweizerischen Laubwäldern. Mitt. Schweiz. Anstalt forstl. Versuchsw., 13, 1, 1-132.
- F r e i, E., (1944) Morphologische, chemische und kolloidchemische Untersuchung subalpiner Weide- und Waldböden der Renzina- und der Podsolserie. Ein Beitrag zur Humusklassifizierung. Ber. Schweiz. Bot. Ges., 54, 267-346.
- G e d r o i z, K.K., (1931) zitiert von Krause, M. in "Russische Forschungen auf dem Gebiete der Bodenstruktur". Landw. Jb., 73, 603-690.
- G e e r i n g, J., (1936) Beitrag zur Kenntnis der Braunerdebildung auf Molasse im schweizerischen Mittelland. Landw. Jahrb. Schweiz. 50, 136-203.
- G e s s n e r, H., (1931) Die Schlämanalyse. Leipzig.
- G l i e m e r o t h, G., (1948) Fragen zur Durchführung von Bodenbearbeitungsversuchen und zum Arbeiten bei Stechzylinderuntersuchungen. Berichte über Landtechnik. 4, 92-108.
- J u n g, E., (1931) Untersuchungen über die Einwirkung des Frostes auf den Erdboden. Kolloidchem. Beih. 32, 320-373.
- K u b i e n a, W., (1937) Verfahren zur Herstellung von Dünnschliffen von Böden in ungestörter Lagerung. Zeiss Nachrichten. 2, 81-91.
- M e y e r, L., und R e n n e n k a p f f, U., (1936) Neuer Apparat und Methode zur automatischen Durchführung der Krümelanalyse nach Tjulín und Vorschläge zur Bestimmung der Krümelgrößen des Krümelanteils und der Krümel-fähigkeit des Bodens. Pflanzenernährung und Düngung. 42, 268-280



- N i t z s c h, W., (1938) Porengrößen im Boden, ihre Beziehungen zur Bodenbearbeitung und zum Wasserhaushalt. Schriften des Reichskuratoriums für Technik in der Landwirtschaft. 85, Berlin.
- R i c h a r d, F., (1945) Der biologische Abbau von Zellulose- und Eiweisstestschnüren im Boden von Wald- und Rasengesellschaften. Mitt.Schweiz.Anstalt forstl.Versuchsw. 24, 297-396.
- R i c h a r d, F., (1950) Böden auf sedimentären Mischgesteinen im schweizerischen Mittelland. Veröffentlichung erfolgt demnächst.
- R u s s e l l, E.W., (1934) 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. Phil.Trans.Roy.Soc. London. 233A, 361-389.
- S c h m u z i g e r, A., (1935) Ueber die Verteilung und den Chemos der Humusstoffe in den Profilen einiger schweizerischer Bodentypen. Dissertation E.T.H. Turbenthal.
- S e k e r a, E., und B r u n n e r, A., (1943) Beiträge zur Methodik der Gareforschung. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Düngung. 29-30, 169-212.
- T j u l i n, A.F., (1931) zitiert von Krause, M. in "Russische Forschungen auf dem Gebiete der Bodenstruktur". Landw.Jb. 73, 603-690.
- T o r s t e n s s o n, G., and E r i k s s o n, S., (1936) A new method for determining the porosity of the soil. Soil.Sci. 42, 406-416.
- V i l e n s k y, D., (1934) Influence de l'humidité du sol sur la structure. C.R.Ire Comm.Assoc.Intern.Sc.Sol. 97-108.
- W a k s m a n, S.A., (1927) The composition of natural organic materials and their decomposition in the soil. Soil Sci. 24, 275-334.
- W i e g n e r, G., und P a l l m a n n, H., (1938) Anleitung zum quantitativen agrikulturchemischen Praktikum. Berlin.
- Y o d e r, R.E., (1936) A direct method of aggregate analysis and a study of the physical nature of erosion losses. J.Am.Soc.Agron. 28, 337-351.

## **Lebenslauf.**

Ich, Leutenegger Fridolin, von Horben - Sirnach, wurde am 11. August 1920 in St. Gallen geboren. Kurz darauf übersiedelten meine Eltern nach Wil (St. G.), wo ich die Primarschulen und ein halbes Jahr Realschule besuchte. 1934 trat ich in Feldkirch ins Gymnasium „Stella Matutina“ ein und absolvierte die dritte, vierte und fünfte Gymnasialklasse. 1937 besuchte ich das Kantonale Gymnasium in Sarnen, wo ich im Sommer 1941. nach einem Jahr Unterbruch wegen Militärdienstes, die Maturitätsprüfung Typ A bestand. In den beiden folgenden Jahren war ich teilweise in der praktischen Landwirtschaft tätig und teilweise im Militärdienst. Ende 1942 besuchte ich die Infanterieoffiziersschule in Zürich. Im Oktober 1943 begann ich das Studium der Landwirtschaft an der E.T.H. in Zürich und schloss dasselbe im März 1947 mit dem Eidgenössischen Diplom ab. Von Ende Juli an arbeitete ich am agrikulturchemischen Institut der E.T.H. bei den Herren Professoren Dr. H. Pallmann und Dr. H. Deuel, wo ich die vorliegende Arbeit verfasste.

---