

INSTITUT FÜR DEN WISSENSCHAFTLICHEN FILM

*Wissenschaftlicher Film C 724/1956*

Aus dem Institut für Bodenbearbeitung der Forschungsanstalt  
für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode  
(Prof. Dr. H. FRESE)

**Boden-Strukturbildung durch Frost  
(Modellversuche)**

Von  
Dr. W. CZERATZKI

GÖTTINGEN 1957

Aus dem Institut für Bodenbearbeitung der Forschungsanstalt  
für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode  
(Prof. Dr. H. FRESE)

## **Boden-Strukturbildung durch Frost (Modellversuche)**

Von Dr. W. CZERATZKI

Das wegen seiner wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Bedeutung besonders interessante Verhalten des Bodens beim Gefrieren wird durch kinematographische Aufnahmen in starker Zeitraffung an Modellen (im Eisschrank gekühlten Bodenproben) untersucht. Je nach der Art und Zusammensetzung des Bodens und je nach Gefriereschwindigkeit und Wassergehalt bilden sich verschiedenartige Froststrukturen. Es entstehen horizontal-schichtige oder polyedrische Formen oder das Gefrieren kann auch homogen erfolgen.

### **I. Allgemeine Vorbemerkungen**

Die Wirkungen des Frostes auf den Boden haben seit jeher die Aufmerksamkeit der Forschung auf sich gelenkt. Neben dem rein wissenschaftlichen Interesse spielen hierbei aber auch die wirtschaftlichen Schäden eine entscheidende Rolle, die Jahr für Jahr durch den Bodenfrost verursacht werden. Hiervon werden vor allem die Landwirtschaft, der Straßenverkehr und das Baugewerbe betroffen.

Während die Wirkungen des Frostes auf die Bodenstruktur im wesentlichen bekannt und die Erscheinungsformen der Froststruktur in zahlreichen Arbeiten beschrieben sind, liegen keine direkten Beobachtungen über die Vorgänge beim Gefrieren des Bodens vor, so daß z.B. noch Unklarheiten über den Beginn und die weitere Eiskristallbildung in der Zone unmittelbar unter der Frostfront bestehen.

Bei geeigneter Versuchsanstellung läßt sich zwar das Vordringen des Frostes im Boden auf photographischem Wege gut verfolgen, doch bringt diese Methode das Geschehen beim Wachstum der Eiskristalle nur bedingt zur Anschauung, weil die Einzelbilder keine Wiedergabe des Ablaufs in Form eines Bewegungsvorganges gestatten. Diese Möglichkeit ergibt sich erst dann, wenn der Vorgang mit einem der üblichen

kinematographischen Verfahren aufgenommen und im Laufbild mit 24 B/s betrachtet wird. Daneben können die Aufnahmen mit einem der gebräuchlichen kinematographischen Meßverfahren ausgewertet werden<sup>1)</sup>.

Beim Abkühlen eines wassergesättigten Bodens unter 0° C und der dabei eintretenden Umwandlung von Wasser in Eis spielen sich zwei Vorgänge ab, die je nach der Bodenart und den Gefrierbedingungen verschieden stark auftreten. Es sind dies erstens die Bewegung des schwach gebundenen Kapillarwassers zum eindringenden Frost hin, und zweitens die Einlagerung dieses Wassers als Eis in intermittierenden Schichten zwischen dem Boden. Beim Eindringen des Frostes aus nur einer Richtung führt diese Eisanreicherung zu Froststrukturen, die man als „homogene“ bzw. „heterogene“ Froststrukturen bezeichnet. Während die „homogene“ Froststruktur gegenüber dem ungefrorenen Ausgangszustand makroskopisch kaum eine Änderung des Bodens erkennen läßt, kann die „heterogene“ Froststruktur je nach Bodenart, Gefriergeschwindigkeit und Wassernachschub zur Frostzone in sehr verschiedenen Formen auftreten. In den feinsand- und schluffhaltigen Böden bildet sich diese Froststruktur vorwiegend horizontalschichtig aus, in den tonhaltigen Böden wegen der während des Gefrierens eintretenden Entwässerung und Schrumpfung des Tones dagegen in polyedrischen Formen. Da jeder Boden homogen erstarrt, wenn sein Wassergehalt unter eine von Bodenart und Gefriertemperatur abhängige Grenze sinkt, ist ein genügender Vorrat oder ausreichender Nachschub von leicht beweglichem Wasser eine wichtige Voraussetzung für eine kräftige Ausbildung von Froststrukturen.

Auf diese Zusammenhänge, die hier nur kurz angedeutet werden können, mußte bei der Versuchsanordnung für die Filmaufnahmen Rücksicht genommen werden, wenn die Vorgänge beim Gefrieren des Bodens möglichst naturgetreu und deutlich gezeigt werden sollten. Am geeignetsten schien hierfür die in der Baugrundforschung verwendete Methode zu sein, wo man den Frost einseitig einwirken läßt und den Boden hinsichtlich der Wasserzufuhr als „offenes System“ behandelt, d. h. ihn während des Frierens mit einem künstlichen Grundwasserhorizont verbindet.

Um diese Bedingungen zu erfüllen, wurden die Versuchsböden so in einen umgebauten Küchenschrank eingebracht, daß der Frost nur von oben eindringen konnte und der Boden über eine Filterplatte<sup>2)</sup> mit einem Grundwasserhorizont in Verbindung stand. Die Böden wurden in der Fraktion < 2,0 mm verwendet und zu zylindrischen Körpern von 12 cm Durchmesser und 10 cm Höhe gepreßt. Das Porenvolumen dieser Formlinge betrug 40 Vol.-%, der Wassergehalt 20 Gew.-%. An der Vorderseite jeder Probe wurde eine senkrechte Fläche ange-

<sup>1)</sup> Die Untersuchungen wurden mit Forschungsmitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten durchgeführt, für deren Bereitstellung bestens gedankt sei.

<sup>2)</sup> Filterplatte Diapor M<sub>32</sub> der SCHUMACHERSchen Fabrik, Bietigheim.

schnitten, an der die Bildung der Froststruktur aufgenommen werden konnte. Zu diesem Zweck befand sich in der provisorischen Holztür des Kühlschranks ein Loch, durch das der Objektivtubus der Filmkamera bis zur erforderlichen Aufnahmeentfernung in das Innere eingeschoben werden konnte. Die Aufnahmefrequenz betrug in der Regel 1 B/Min. Der Kühlschrank wurde so eingestellt, daß im Boden an der Oberfläche eine Temperatur von  $-1^{\circ}$  bis  $-1,5^{\circ}$  herrschte.

## II. Erläuterungen zum Film

### *Schwarzerde aus Löß—A-Horizont*

*Temperatur  $-1^{\circ}$  C bis  $-1,5^{\circ}$  C*

*Bildfeld  $3,4 \times 4,6$  cm*

Das Bodenmaterial stammt aus dem A-Horizont einer Schwarzerde aus Löß (Söllingen bei Braunschweig).

#### **Korngrößenzusammensetzung und Versuchsbedingungen**

Grobsand . . . . .	(2,0 bis 0,2 mm) . . .	5,2 %
Feinsand . . . . .	(0,2 bis 0,02 „) . . .	40,1 %
Schluff . . . . .	(0,02 bis 0,002 „) . . .	35,7 %
Ton . . . . .	(< 0,002 „) . . .	19,0 %
Porenvolumen der Probe . . . . . 40 Vol.-%		
Anfangswassergehalt . . . . . 20 Gew.-%		
Gefriertemperatur . . . . . $-1^{\circ}$ C bis $-1,5^{\circ}$ C		

Der von oben in den Boden eindringende Frost ist an der Bildung von horizontal orientierten Eislin sen am oberen Bildrand zu erkennen. Sie entstehen in zeitlichen Intervallen untereinander zuerst als sehr feine Striche, die langsam etwas dicker werden. Viele Eisschichten berühren sich mit ihren aufwärts gebogenen Enden, so daß nach und nach eine charakteristische, an manchen Stellen fast netzartige geschichtete Froststruktur entsteht. Die Verdickung der Eisschichten setzt sich auch dann noch fort, wenn der Frost die betreffende Eislinse „überholt“ und sich darunter bereits eine neue gebildet hat. Je mehr sich der Vorgang der Wasserquelle nähert, um so langsamer schreitet er nach unten fort und um so dicker werden auch die Eisschichten. Gleichzeitig entstehen an vereinzelt en Stellen senkrechte Eisbänder, deren Bildung den horizontalliegenden Eisschichten voraus eilt. Am Ende des Vorgangs zeigt die Bildfläche eine geschichtete, heterogene Struktur.

### *Parabraunerde aus Löß—A<sub>3</sub>-Horizont*

*Temperatur  $-1^{\circ}$  C bis  $-1,5^{\circ}$  C*

*Bildfeld  $3,4 \times 4,6$  cm*

Das Bodenmaterial stammt aus dem A<sub>3</sub>-Horizont einer Parabraunerde aus Löß, ebenfalls aus dem Raume um Braunschweig.

### Korngrößenzusammensetzung

Grobsand....(2,0 bis 0,2 mm)...	1,7 %
Feinsand....(0,2 bis 0,02 ,, )...	55,5 %
Schluff.....(0,02 bis 0,002 ,, )...	29,9 %
Ton.....( < 0,002 ,, )...	12,9 %

Der Boden wurde in der gleichen Weise wie das Schwarzerdematerial für die Aufnahmen vorbereitet und auch unter denselben Versuchsbedingungen gefroren. Auch bei diesem Boden verursacht der Frost im oberen Teil der Probe die Bildung horizontal orientierter Eisschichten, die allerdings nicht so gestreckt sind wie bei der Schwarzerde, sondern mehr zickzackförmig verlaufen. Schon bald entstehen aber auch senkrechte Eisschichten, die, wie bei der Schwarzerde, den horizontalen Schichten vorauseilen. Das Ergebnis der beiden Vorgänge ist ein Netzwerk von horizontalen und vertikalen Eisschichten, die eine „polygonale“ Froststruktur entstehen lassen. Unter natürlichen Verhältnissen ist diese Form der Froststruktur bei dieser Korngrößenzusammensetzung eines Bodens nur selten zu beobachten. Im vorliegenden Fall ist sie vermutlich auf die geringe Gefriereschwindigkeit, vor allem aber wohl auf die gute Wassernachlieferung aus dem nahen Wasserhorizont zurückzuführen. Hinweise für diese Annahme bieten Beobachtungen auf Marschböden, die bei ähnlicher Korngrößenzusammensetzung und hohem Grundwasserstand in ähnlichen Aggregatformen gefrieren, wie sie diese Aufnahme zeigt.

Neben der Bildung der beschriebenen Froststrukturen zeigt dieser Filmteil, wie unter einzelnen Eislinen in der Nähe der Frostfront Wasser austritt und in Eisblumen auf dem bereits gefrorenen Boden kristallisiert. Diese Erscheinung, die auch noch in einigen anderen Aufnahmen zu sehen ist, kommt durch die Ausdehnung des Wassers beim Übergang in Eis zustande, wobei durch den entstehenden Druck ein Teil des Eises wieder verflüssigt wird (Regelation).

Bei einer weiteren Filmaufnahme ist der Bildausschnitt etwas kleiner (Bildfeld  $2,3 \times 3,2$  cm) und die Zeitraffung beträgt 2 B/min. Bis zur Mitte des Bildfeldes entsteht eine horizontalschichtige Froststruktur, wie sie auch beim Frieren dieses Bodens unter gewöhnlichen Verhältnissen in der Natur beobachtet werden kann.

Durch eine Verminderung der Frosttemperatur kommt dann der Vorgang in der Mitte des Bildfeldes eine Zeitlang zum Stillstand und man sieht deutlich, wie sich die Eisschicht an der Frostgrenze langsam verdickt. Dieses Beispiel zeigt sehr anschaulich die Bedeutung der Gefriereschwindigkeit für das Dickenwachstum der Eisschichten. Nach Einstellung einer höheren Gefriereschwindigkeit läuft der Vorgang durch das restliche Bildfeld, wobei sich jetzt eine mehr polygonale Froststruktur bildet. Die zunehmende Aufhellung des Bodens am oberen Bildrand wird durch die Sublimation des Eises von der Sichtfläche verursacht.

### *Parabraunerde aus Löß—A<sub>3</sub>-Horizont*

—5° C — Bildfeld 3,4 × 4,6 cm

Der stärkeren Frosttemperatur entsprechend läuft der Vorgang auch mit einer höheren Geschwindigkeit ab. Schon bald bildet sich vom oberen Bildrand her in schneller Folge ein Netz von horizontalen, oft zickzackförmig verlaufenden Eisschichten. Sie sind wesentlich dünner als bei den Aufnahmen mit einer Temperatur von —1°, weil infolge der höheren Gefriereschwindigkeit nicht genügend Zeit für einen stärkeren Wassernachschub zur Gefrierzone zur Verfügung steht. Aus diesem Grunde bilden sich auch keine senkrechten Eisschichten.

### *Parabraunerde aus Löß—A<sub>3</sub>-Horizont*

—1° C bis —1,5° C — Bildfeld 3,4 × 4,6 cm

*Deutlich sichtbare Hebung durch Frost*

In den bisherigen Einstellungen war die Bodenhebung durch den Frost nicht unmittelbar an einer Bodenbewegung, sondern nur am langsamen Hochwandern der Eisschichten an den Bildrändern zu beobachten. Um diese Erscheinung besser sichtbar zu machen, wurde diese Bodenprobe mit einer krümeligen Sichtfläche vorbereitet, an der die Hebung des Bodens an der Bewegung der einzelnen Krümel verfolgt werden konnte. Vor Eintritt des Gefriervorganges in das Bildfeld entsteht in der Bildmitte zuerst ein sich langsam verbreiternder Spalt, der wahrscheinlich durch die Ausdehnung des darüberliegenden gefrierenden Bodens verursacht wurde. Dann beginnt am oberen Bildrand über die ganze Breite des Bildfeldes eine Bewegung der Krümel nach oben. Mit fortschreitendem Eindringen des Frostes werden nach und nach immer neue tieferliegende Krümel von der Bewegung erfaßt, bis schließlich der Vorgang den unteren Bildrand erreicht hat.

### *Diluvialer Sand*

—1° C bis —1,5° C — Bildfeld 3,4 × 4,6 cm

#### **Korngrößenzusammensetzung und Versuchsbedingungen**

Grobsand....(2,0 bis 0,2 mm)...	37,7 %
Feinsand ....(0,2 bis 0,02 „ )...	50,3 %
Schluff .....(0,02 bis 0,002 „ )...	8,5 %
Ton.....( $< 0,002$ „ )...	3,5 %
Porenvolumen .....	40 Vol.-%
Wassergehalt .....	10 Gew.-%
Temperatur im Boden an der Oberfläche .....	—1° C bis —1,5° C

Der Sandboden zeigt beim Frieren ein wesentlich anderes Verhalten als das Bodenmaterial der Parabraunerde. Infolge der großen Körnung ruft der Frost keine Eisschichten hervor, sondern bewirkt ein homogenes Durchfrieren des Bodens. Daher ist das Eindringen des Frostes in den

Boden lediglich am Herabwandern des Schattens im Bildfeld zu erkennen. Dieser Schatten entsteht durch einen Eisüberzug, der sich aus dem während des Gefrierens herausgepreßten Wasser bildet. Auch bei diesem Boden tritt von oben her eine Aufhellung durch Verdunsten des Eises ein.

### *Kreideton*

—1° C bis —1,5° C — Bildfeld 3,4 × 4,6 cm

#### **Korngrößenzusammensetzung und Versuchsbedingungen**

Grobsand....(2,0 bis 0,2 mm)...	7,7 %
Feinsand ....(0,2 bis 0,02 ..)	29,2 %
Schluff .....(0,02 bis 0,002 ..)	37,4 %
Ton.....( $< 0,002$ ..)	25,7 %

Wassergehalt .....35 Gew.-%

Temperatur im Boden an der

Oberfläche .....—1° C bis —1,5° C

Diese Probe wurde nicht wie die anderen auf einen bestimmten Substanzgehalt gepreßt, sondern gründlich durchgeknetet und zu einem Klob von entsprechender Größe geformt.

Beim Ton zeigen die Filmaufnahmen ganz andere Froststrukturen als beim Löß- und Sandboden. Denn infolge des hohen Tongehaltes ist die Wasserbeweglichkeit sehr gering, so daß kein Wassernachschub aus dem Wasserhorizont erfolgen kann und die Eisschichten sich nur aus dem Bodenvorrat in ihrer unmittelbaren Nähe bilden können. Außerdem führt der Wasserentzug beim Frieren zu einer Schrumpfung des ungefrorenen Bodens in unmittelbarer Nähe der Frostzone, so daß sich an bestimmten Stellen Schrumpfrisse bilden, die schon während ihrer Entstehung mit Eis gefüllt werden. Im Film bilden sich von oben her mehrere zuerst parallelaufende nadelspitze senkrechte Eisschichten, die sich im weiteren Verlauf des Vorgangs zu kräftigen Eisbändern verdicken und später durch horizontale Eisschichten verbunden werden. Das Ergebnis beider Vorgänge sind verhältnismäßig grobe polygonale Strukturformen, begrenzt durch die sich bis zum Ende des Vorganges noch ständig verdickenden Eisbänder.

Eine weitere Aufnahme mit dem Bildfeld 2,3 × 3,2 cm bringt eine Wiederholung des Vorgangs 7, der hier infolge des kleineren Bildausschnittes besonders deutlich zu beobachten ist.

### **Literatur**

1. CZERATZKI, W., Zur Wirkung des Frostes auf die Struktur des Bodens. Zeitschr. Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde 72 (117, (1956), S. 15—32.
2. CZERATZKI, W., u. H. FRESE, Kinematographische Untersuchungen zur Strukturbildung. Sixième Congrès International de la Science du Sol, Paris 1956, Rap. Vol. B., S. 173—178.

*(Eingegangen am 22. 11. 1956)*