



Bodengefüge

Ansprechen und Beurteilen mit visuellen Mitteln

Jakob Nievergelt, Milan Petrasek, Peter Weisskopf

**Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau,
Zürich-Reckenholz**

Dank

Für die wertvollen Beiträge danken wir:

Dr. H.H. Becher, Lehrstuhl für Bodenkunde,
Technische Universität München,
Norbert Emch, Fachstelle Bodenschutz
Kanton Solothurn

und

Gerhard Hasinger, Service Romand de
Vulgarisation Agricole, Lausanne.

Impressum

ISSN

1421-4393 Schriftenreihe der FAL

ISBN

3-905608-62-6

Herausgeberin

Eidgenössische Forschungsanstalt für
Agrarökologie und Landbau, FAL
Reckenholzstrasse 191, CH-8046 Zürich
Telefon ++41 (0)1 377 71 11
info@fal.admin.ch www.reckenholz.ch

Redaktion

Ruth Floeder-Bühler, 8494 Bauma

Résumé français

Jean-Auguste Neyroud, Station fédérale
de recherches en production végétale de
Changins, CH-1290 Nyon

Gestaltung

Ursus Kaufmann/Gabriela Brändle

Fotos

Gabriela Brändle

Preis

CHF 40.00 / inkl. MwSt

Copyright

by FAL 2002



Vorwort

Zu einem nachhaltigen Landbau gehört, dass den Pflanzen möglichst gute Bedingungen für die Wurzelentwicklung geschaffen werden. Die Bodenbewirtschaftung soll so geplant und durchgeführt werden, dass ein Gleichgewicht zwischen Massnahmen entsteht, die das Gefüge verschlechtern und solchen, die es verbessern. Anhaltende Gefügeschäden gilt es zu vermeiden.

Die ökonomischen Rahmenbedingungen und technischen Entwicklungen begünstigen allerdings eine schonende Bodenbewirtschaftung nicht: Transport- und Erntefahrzeuge werden immer schwerer, Bodenbearbeitungsgeräte greifen intensiv ins Bodengefüge ein. Sie sind auch unter ungünstigen Bodenverhältnissen einsetzbar. Die Gefahr steigt, dass sich agronomisch wichtige Gefügeeigenschaften wie Wasser- und Lufthaushalt oder Durchwurzelbarkeit ungünstig entwickeln – ganz zu schweigen von weiteren ökologisch bedeutenden Bodenfunktionen.

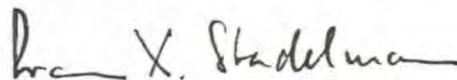
Im Hinblick auf die Erhaltung eines guten Gefüges ist es deshalb wichtig, Schäden bereits im Feld zu erkennen und zu beurteilen, zum Beispiel anhand einer Spatenprobe. Mit der vorliegenden Schrift «Bodengefüge – Ansprechen und Beurteilen mit visuellen Mitteln» wollen wir allen Interessierten eine standardisierte Beurteilungsmethode zur Verfügung stellen, die es erlaubt, das Gefüge mit einfachen Mitteln zuverlässig anzusprechen. Die Methode soll trotzdem wissenschaftlichen Ansprüchen genügen. Die Standardisierung ermöglicht zeitliche und örtliche Vergleiche der Gefügeentwicklung. Die visuelle Gefügeansprache ist ein Hilfsmittel für landwirtschaftliche Beraterinnen und Berater, kantonale Bodenfachstellen und private Ingenieurbüros, die sich mit Boden- und Standort-Untersuchungen befassen.

Kernstücke sind Bildtafeln und systematische Beschreibungen der verschiedenen Aggregattypen und Schlüssel zum Bestimmen der Gefügeform und des Gefügestandes im Feld. Jahrelange Erfahrungen von Fachleuten der Feldbodenkunde und Kartierung flossen in diese handliche Klassifikationshilfe ein. Es werden einfach wahrnehmbare Merkmale zur Unterscheidung der Gefügeformen verwendet. Da Gestalt und Funktion des Gefüges in enger Beziehung zueinander stehen, ist mit einer reproduzierbaren Gefügeansprache auch die Grundlage für eine Gefügebeurteilung gelegt. Neu werden alle vorkommenden Aggregattypen erfasst und nach Aggregat-Grössenklassen aufgeteilt. Dies ermöglicht eine feldtaugliche quantitative Bestimmung.

Den Autoren sowie den Fachleuten von kantonalen Ämtern, Hochschulen und privaten Ingenieurbüros, die mit vielen Anregungen und kritischen Bemerkungen die Qualität der vorliegenden Publikation gefördert haben, danke ich an dieser Stelle ganz herzlich.

Zürich, April 2002

Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL)



Franz X. Stadelmann
Leiter Umweltressourcen/Landwirtschaftlicher
Umweltschutz

**Beim Nachdenken über das Bodengefüge
bekommen wir jedesmal das Gefühl,
nicht alles begreifen zu können, was eigentlich
wichtig wäre.**

(frei nach Tschechow)

Inhalt

Zusammenfassung	6
Résumé	7
Summary	8
1. Grundlagen der Gefügeansprache	10
1.1 Ziele und Entstehung der Methode	10
1.2 Fachausdrücke	11
1.3 Gefügeformen und ihre Ansprache	12
2. Gefüge visuell ansprechen und beurteilen	17
2.1 Einführung	17
2.2 Bildtafeln	18
2.3 Bestimmungsschlüssel	71
2.4 Durchführung der visuellen Gefügeansprache	73
2.5 Vorschlag zur pflanzenbaulichen Bewertung der Gefügequalität	78
3. Erläuterungen	80
3.1 Gefügegenetik und visuelle Gefügeansprache	80
3.2 Ausführliche Beschreibung der Gefügeformen	80
3.3 Fraktionierung von Aggregatgefügen	84
3.4 Mechanische Eigenschaften des Gefüges	85
3.5 Gefügequalität	86
3.6 Überblick visuelle Gefügeansprache	88
Anhang 1	
Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen	90
Anhang 2	
Verzeichnis der Bildtafeln in Kapitel 2.2	91
Anhang 3	
Literaturverzeichnis	92
Anhang 4	
Beispiele zur Anwendung der visuellen Gefügeansprache	93

Zusammenfassung

Mit der vorliegenden Publikation stellen wir eine an der FAL Zürich-Reckenholz entwickelte, feldtaugliche Methode zur visuellen Ansprache des Bodengefüges vor. Die Aggregate von strukturierten Böden klassieren wir als Typen, die durch ihre Entstehungsgeschichte und ihre sichtbaren Eigenschaften definiert sind. Wir unterscheiden dabei natürliche und anthropogen geprägte Aggregattypen. Eine standardisierte, semiquantitative Beschreibung der Gefügesteform eines Bodenbereiches erreichen wir durch

- das Bestimmen der Aggregatgrößenverteilung mittels Fraktionieren in Grössenklassen.
- das Erfassen aller Aggregattypen in den Fraktionen.
- das Beurteilen des mechanischen Zusammenhaltes zwischen den Aggregaten und der Druckfestigkeit der Aggregate.

Diese standardisierte Gefügebildbeschreibung ermöglicht objektivere Vergleiche des Gefügestandes bezüglich Zeit und Raum als andere visuelle Methoden.

Die Anleitung zur Durchführung dieser standardisierten visuellen Gefügesprache ist in drei Teile gegliedert:

Im ersten Teil werden die verfolgten Ziele beschrieben und die verwendeten Begriffe erläutert. Die Grundlagen der Gefügestklassifikation werden übersichtlich dargestellt: Natürliche Prozesse des Bodens und äussere Einflüsse durch Witterung und Bewirtschaftung, die das Gefüge bilden und verändern.

Der zweite Teil enthält die Unterlagen zur Durchführung der visuellen Gefügesprache. Eine Sammlung von 27 Bildtafeln der für Schweizer Standortverhältnisse wichtigsten Aggregattypen sowie ein entsprechender Bestimmungsschlüssel erleichtern die Bestimmung der Aggregattypen. Als Klassifikationsmerkmale dienen dabei die geometrische Form (Umriss, Achsenlängen, Kanten, Ecken) und die Beschaffenheit der Oberfläche (Rauheit, Porenanteil). Eine Anleitung zur schrittweisen Durchführung mit dem Aufnahmeformular ist darin enthalten. Die Bewertung der pflanzenbaulichen Gefügestqualität als eine der Interpretationsmöglichkeiten der erfassten Gefügesteigenschaften wird in Form eines Schemas vorgeschlagen.

Der dritte Teil umfasst Erläuterungen zur visuellen Gefügesprache: Die systematische und ausführliche Abgrenzung der natürlichen beziehungsweise der anthropogen geprägten Aggregattypen, die Bestimmung der Aggregatgrößenverteilung, das Prüfen der mechanischen Eigenschaften und das Abschätzen der pflanzenbaulichen Qualität eines Bodengefüges werden hier genauer beschrieben und begründet. Eine tabellarische Übersicht aller methodischen Elemente ist hier eingereiht.

Im Anhang geben Beispiele aus der Forschungstätigkeit der FAL Hinweise für mögliche Anwendungen. Ein Literaturverzeichnis weist auf einige vertiefte Darstellungen der Bodenstruktur und weitere Ansätze von praktisch ausgerichteten Gefügestuntersuchungen hin.

Résumé

Les auteurs présentent un concept de classification et d'évaluation visuelle de la structure du sol. Destinée à l'utilisation au champ ainsi qu'au laboratoire, la méthode présente les caractéristiques suivantes:

- Description de la structure du sol basée sur les types d'agrégats et les formes structurales, définies par les formes et le mode de formation
- Distribution de l'échantillon de terre en agrégats de tailles différentes (par tamisage ou par estimation); pour chaque fraction, attribution du type d'agrégat et estimation de sa part pondérale
- Appréciation des propriétés mécaniques des unités structurales: solidité des agrégats et cohésion inter-agrégats
- Appréciation de la qualité de la structure basée sur les types, les tailles et les propriétés mécaniques des agrégats

La description de la méthode se fait en trois parties:

La première partie décrit les buts, les notions et donne une vue générale des formes de structure du sol. Les bases de la classification sont brièvement décrites: processus naturels de

formation, modification ou destruction de la structure, influence du temps et de l'exploitation par l'homme.

La deuxième partie, centrale, contient les instructions pour la description visuelle de la structure. Elle comprend les 27 tableaux photographiques de référence des types structuraux et la description systématique de leurs caractéristiques. La clé de détermination repose sur les formes. Elle permet une appréciation standardisée du type structural. Un guide pour l'appréciation par étape, un protocole de saisie et un schéma d'estimation sont proposés.

La troisième partie contient des explications plus précises de la méthode. Les types d'agrégats, l'estimation des propriétés mécaniques et de la qualité de la structure du point de vue de la physiologie des plantes sont décrites de manière plus détaillée.

Dans l'annexe, des exemples tirés des essais de notre station de recherche montrent le potentiel d'application de la méthode. Une liste de références propose des approches plus approfondies de la structure du sol et mentionne d'autres méthodes de description de la structure au champ.

Summary

Keywords: soil structure, visual method, aggregate, classification, evaluation

The method of «visual classification of soil structure» presented in this paper was developed at the Swiss Federal Research Station of Agroecology and Agriculture. The method is suitable for field and laboratory use. Aggregates of structured soils are classified into types by their visible properties and presumed genesis. A clear distinction is made between natural and anthropogenic types of aggregate. A standardised, semiquantitative description and evaluation of the soil structure in a certain layer is achieved by

- assessing the size distribution of aggregates by fractionising
- determining all types of aggregate present in each fraction.
- judging the mechanical properties of the soil structure by the inter- and intra-aggregate strength.

This standardised description of the soil structure allows more reliable comparisons to be made in time and space than is possible with other visual methods.

The manual comprises of three parts:

Part One is dedicated to the aims and concepts of structure quality. The basis of visual soil structure classification is explained: natural soil processes depending on climate and

weather as well as anthropogenic factors influence the formation, change and degradation of soil structure.

Part Two refers to the tools necessary to perform the standardised visual classification and to evaluate the quality of the soil structure. 27 tables with photographs of classified aggregates (from typical Swiss sites) and a classification key, help to determine the types of aggregate. Properties used to classify aggregates are: geometrical form (contour, length of axes, angles and edges) and surface qualities (roughness and visible pores). Furthermore a step-by-step procedure and rules of thumb are included, to evaluate the agronomic quality of the soil structure based on the observed aggregate properties.

Part Three gives detailed background information on the visual classification and evaluation of soil structure. Systematic and extended definitions of types of aggregate are given in tabular form. Descriptions and explanations are provided for fractionising the soil sample by hand and/or with sieves, judging the mechanical properties and evaluating the quality of soil structure in relation to agronomic requirements. It concludes with an overview of all the elements of the method in tabular form.

An annex provides examples of the application of the method at our Institute, indicating its possible use in field studies. A list of literature for further reading is included.

1. Grundlagen der Gefügeansprache

1.1 Ziele und Entstehung der Methode

Mit der Publikation eines Verfahrens zur visuellen Ansprache und Beurteilung wollen wir dazu beitragen, dass das von Auge sichtbare Bodengefüge nach einheitlichen Kriterien untersucht und beschrieben werden kann. Dadurch werden Gefügebeurteilungen vergleichbar. Gefügeveränderungen auf dem Acker eines landwirtschaftlichen Betriebes, auf der Rekultivierungsfläche einer Grossbaustelle oder auf dem Bodenbearbeitungsversuch einer landwirtschaftlichen Schule sollen reproduzierbar beschrieben werden können. Wir wollen allgemein die Anwendung der Gefügeansprache und letztlich das Verständnis für die ökologische Bedeutung des Bodengefüges fördern.

Untersuchungsobjekt der visuellen Gefügeansprache ist eine punktuelle Bodenprobe aus einer Bodenschicht beziehungsweise aus einem Bodenhorizont. Um das Gefüge einer bestimmten Parzelle zuverlässig beurteilen zu können, sind mehrere punktförmige Gefügeuntersuchungen gemäss einem entsprechenden Probenahme-Plan auszuwerten.

Bei der Erarbeitung der Methode stützten wir uns nicht nur auf eigene Erfahrungen aus Feldbodenkunde und Bodenkartierung (FAL 1997) ab, sondern auch auf folgende drei Werke: Handbuch der Bodenkunde (Teil 2.6.2.1 Gefüge/Morphologie von H.H. Becher, 8. Erg. Lieferung, 2000), Publikationen von Th. Diez (z.B. «Bodenstruktur erkennen und beurteilen», Bayer. Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau», Freising-München, 1997) und die Schweizerische Publikation «Bodenbeurteilung im Feld» (Hasinger 1993). In der Methode «visuelle Gefügeansprache» sind etwa

die Beobachtung der Wurzelverteilung und der Regenwurmgänge sowie Geruchs- und Farbwahrnehmungen nicht enthalten. Sie ist als Vertiefung und Weiterentwicklung der Gefügeansprache bei der klassischen Spatenprobe im Sinne einer besser reproduzierbaren und teilweise quantifizierenden Methode vorgesehen. Die Fachausdrücke (Kapitel 1.2, Tabelle 1a) entsprechen weitgehend den gängigen Begriffen in der Literatur (Anhang 3).

Die uns bekannten Beschreibungen und Abgrenzungen von Gefüge- und Aggregatformen erwiesen sich für unsere Zwecke als nicht befriedigend. In bearbeiteten Bodenschichten befinden sich die Aggregatformen in ständiger Umwandlung. Zweckmässig erschien daher ein «genetischer» Ansatz, mit dem gefügebildende und -abbauende Vorgänge systematisch erfasst werden (Kapitel 1.3).

Bei systematischen Untersuchungen von Gefügeproben ist zu erkennen, dass meistens ein Gemisch von Aggregattypen und -grössen vorliegt. Dies trifft auch für kleinste Matrixbereiche zu, besonders in den von der Bodenbearbeitung geprägten Bodenschichten. Die vorgängige Fraktionierung der Probe nach Grössenklassen der Aggregate erleichtert die Bestimmung der vorherrschenden Aggregattypen.

Die «visuelle Gefügeansprache» wird als Ordner publiziert, damit Änderungen und Ergänzungen jederzeit eingefügt werden können. Eine Kurzfassung wird das bisherige Kapitel 3.3 «Gefüge» der Schriftenreihe Nr. 24 «Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden» (FAL 1997) ersetzen.

1.2 Fachausdrücke

Um eine Verständigungsgrundlage zu schaffen, grenzen wir einige Begriffe aus dem Bereich Bodengefüge für die visuelle Gefügeansprache ab (Tabelle 1a). Weitere Begriffe der Feld-

bodenkunde sind in der Schriftenreihe Nr. 24 «Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden» (FAL 1997) ausführlich beschrieben.

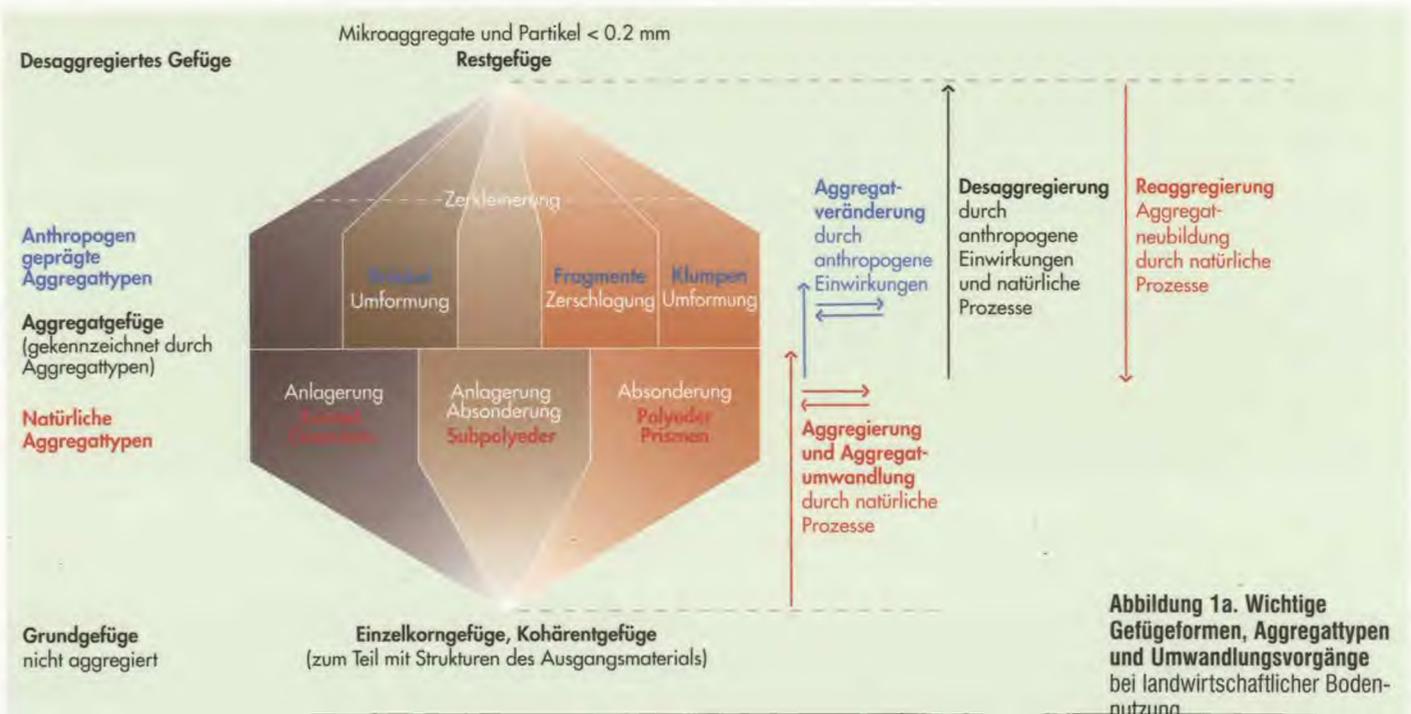
Tabelle 1a. Fachausdrücke zum Thema Bodengefüge

Begriff («Alternativbezeichnung»)	Kurzbeschrieb
Aggregat («Bodenteilchen»)	Bereich des Bodens, der einen gegenüber der Umgebung separaten Körper bildet und aus einer Vielzahl mineralischer Bestandteile, lebender und abgestorbener organischer Substanz sowie Hohlräumen besteht
Aggregattyp	Aggregate ähnlicher Form, Oberflächengestalt und Entstehung
Aggregierungsanalyse	Bestimmen des Zusammenhalts zwischen den Aggregaten, Fraktionierung (siehe dort) und Bestimmen der Aggregattypen sowie ihrer Festigkeit
Bodengefüge («Bodenstruktur», «Gefüge»)	Art der räumlichen Anordnung der festen Bodenbestandteile und der Hohlräume in einem Bodenbereich
Bodenmatrix («Matrix»)	Bodenfestsubstanz angeordnet als mehrphasiger, poröser Körper
Desaggregation	Abbau von Kittsubstanzen und Einwirkung der Witterung, Bodenbearbeitung, Befahrung und Beweidung trennen Teile von Aggregaten ab, was einen Abbau bis hin zum Restgefüge (siehe dort) zur Folge haben kann.
Festigkeit der Aggregate	Druckfestigkeit der einzelnen Aggregate, 5-stufige Unterscheidung durch Fingerprobe
Fraktionierung	Bestimmung der Aggregatgrößenverteilung mittels Sieben und Wägen oder Volumenschätzung
Gefügeform	Durch überwiegende(n) Aggregattyp(en) gekennzeichnete Ausprägung eines Gefüges; falls keine Aggregate vorhanden: Grundgefüge
Grundgefüge	Kohärent- oder Einzelkorngefüge; ohne Aggregatausbildung, in entwickelten Böden meist nur im C-Horizont, zum Teil mit Strukturen des Ausgangsmaterials
Horizont («Bodenhorizont»)	Meist parallel zur Oberfläche verlaufende Schicht, entstanden infolge spezifischer Bodenbildung; Bezeichnung der Horizonte mit A, B, C (von oben nach unten)
Mikro-/Makroaggregat	Massgebende Grenze bei 0,2 mm Durchmesser
Restgefüge	Lose Bodenbestandteile mit Durchmesser < 0,2 mm: Mikroaggregate, mineralische Einzelkörner (Feinsand, Schluff) sowie organische Partikel
Zusammenhalt des Gefüges	Bindungskraft zwischen den Aggregaten; in 5 Stufen unterschieden durch Aufprall der Gefügeprobe aus ca. 1 m Höhe auf harte Unterlage

1.3 Gefügeformen und ihre Ansprache

Das Konzept der Gefügedynamik und der Klassifikation der Gefügeformen ist in Abbildung 1a schematisch dargestellt. Zusammen mit einer Kurzbeschreibung der wichtigen Aggregattypen und Gefügeformen und einer Darstellung ihres typischen Vorkommens im Bodenaufbau von landwirtschaftlich

genutzten Böden (Abbildung 1b) sind die Grundlagen für die visuelle Gefügeansprache (Kapitel 2) gelegt. Ausführlichere Beschreibungen der Aggregattypen, Begründungen von methodischen Ansätzen und eine Übersicht der visuellen Gefügeansprache als Ganzes sind in Kapitel 3 enthalten.



Aggregatbildung durch natürliche Prozesse («Aggregierung» beziehungsweise «Reaggregation»)

a) Anlagerung:

Durch Verkittung von Feinkoagulaten und sonstigen losen Partikeln mit Schleimstoffen entstehen Granulate, meist als Kotpillen; Pilzhypen und Feinwurzeln vernetzen Granulate und sonstige Bodenpartikel zu Krümeln. Vorwiegend im biologisch sehr aktiven Bereich der Krume (Ah, Aa-Horizonte).

b) Absonderung («Segregierung»):

Durch Quellen und Schrumpfen sondern sich je nach Intensität und Art der Absonderung Polyeder oder Prismen ab. Dies geschieht im Oberboden rasch und häufig, im Unterboden (B- und BC-Horizonte) langsamer und seltener.

c) Absonderung und Anlagerung:

Oberflächen von Absonderungen werden durch «Lebendverbau» mit organischer Substanz verwebt und belegt (zum Beispiel Humushüllen) und dadurch rauer; im biologisch mässig aktiven Bereich des Unterbodens (AB-Horizonte) und der Krume (Ah-Horizonte) entstehen Subpolyeder.

Aggregatveränderungen durch anthropogene Einwirkung

a) Umformung:

Während mechanischer Einwirkungen auf die Ackerkrume (Ahp-Horizont) und die angrenzenden Schichten (AB- und B-Horizonte) können natürliche Aggregattypen plastisch ver-

formt und zu Bröckeln oder Klumpen (seltener Platten) zusammengepresst werden, je nach Typ der Ursprungsaggregate und Art der Einwirkung.

b) Zerschlagung:

Durch das Zerschlagen von Klumpen (seltener von grossen Bröckeln, Subpolyedern und Polyedern) mit Bodenbearbeitungsgeräten entstehen in der Bearbeitungsschicht (Ahp-Horizonte) Fragmente.

Aggregatabbau durch anthropogene und natürliche Einwirkung («Desaggregation»)

Unterstützt durch natürlichen und anthropogen verursachten Abbau von Kittsubstanzen werden unter mechanischer Einwirkung von Witterung, Bodenbearbeitung, Befahrung und Beweidung sehr kleine Teilchen aus Aggregaten abgetrennt, was bis hin zur Entstehung des sogenannten Restgefüges führt. Es besteht aus losen Mikroaggregaten, mineralischen Einzelkörnern sowie organischen Partikeln, alle <0,2 mm. Diese Zerkleinerung der Aggregate findet am intensivsten an der Bodenoberfläche und in Ackerkrumen (Ahp-Horizonte) mit niedrigem Ton- und Humusgehalt sowie geringer biologischer Aktivität statt.

Die beschriebenen Umwandlungsvorgänge laufen oft gleichzeitig ab. Deshalb können Gefügeproben genetisch unterschiedliche Aggregattypen enthalten.

Abbildung 1b liefert eine Übersicht zu den Gefügeformen und ihren Bestimmungskriterien. Merkmale wie Grösse, Form und Beschaffenheit der Oberflächen dienen der visuellen Unterscheidung der Typen. Die Aggregateigenschaften sind aber auch mit den Entstehungsprozessen verknüpft: Beispielsweise sind scharfe Kanten kennzeichnend für Polyeder und Prismen und können durch die Art der Kräfteinwirkung beim Absonderungsvorgang erklärt werden.

Die Bodenschicht beziehungsweise der Horizont, woraus die Bodenprobe stammt, bildet ein zweites Kriterium zur Ansprache des Aggregattyps. Da viele Einwirkungen oder Prozesse nur einen beschränkten Bereich der Bodenmatrix beeinflussen, wird der Kreis der in Frage kommenden Aggregattypen, wie in Abbildung 1b ersichtlich, oft eingengt.

Kurzbeschreibung der Aggregattypen und Gefügeformen				
Aggregattyp bzw. Gefügeform	Code	Vorherrschende natürliche aggregatbildende Prozesse	Charakteristische Form und Beschaffenheit der Oberflächen	Typische Grösse (Siebmaschenweite) in mm
Grundgefüge, ohne Aggregate				
Einzelkorn	Ek	ohne Aggregatbildung	lose mineralische Einzelkörner	
Kohärent	Ko	ohne Aggregatbildung	ungegliederte, zusammenhängende Masse	
Natürliche Aggregattypen				
Prismen	Pr	Absonderung	vertikal länglich; scharfe Kanten; glatte Oberflächen	>20
Polyeder	Po	Absonderung	unregelmässige, meist insgesamt rundliche Umrisse mit Ecken; meist scharfe Kanten; zum Teil glatte Oberflächen	2–100
Subpolyeder	Sp	Absonderung und Anlagerung	unregelmässige, teils buchtige Umrisse; abgerundete Kanten; sehr raue, poröse Oberfläche	2– 50
Granulate	Gr	Anlagerung, meist durch Verkittung	rundliche Umrisse; raue Oberfläche	<5
Krümel	Kr	Anlagerung, meist durch Vernetzung	unregelmässig buchtige Umrisse; extrem raue, sehr poröse Oberfläche	1–10
Aggregattyp bzw. Gefügeform	Code	Wichtigste aggregatverändernde Einwirkung, Art der Ausgangsaggregate	Charakteristische Form und Beschaffenheit der Oberflächen	Typische Grösse (Siebmaschenweite) in mm
Anthropogen geprägte Aggregattypen				
Bröckel	Br	Umformung von Anlagerungsaggregaten	meist rundliche Umrisse; abgerundete Kanten, da gerollt bzw. geknetet; poröse Oberflächen zum Teil geglättet, mässig verfestigt	5–50
Klumpen rundlich	Klr	Umformung von Absonderungsaggregaten	rundliche Umrisse; abgerundete Kanten, da gerollt bzw. geknetet; eher glatte Oberflächen, stark verfestigt	>20
Klumpen kantig	Klk	Umformung von Absonderungsaggregaten	insgesamt rundliche Umrisse mit Ecken; scharfe Kanten, da gepresst; eher raue Oberflächen, stark verfestigt	>20
Fragmente	Fr	Zerschlagung von grossen Aggregaten, meist Klk und Klr	stark unregelmässige Umrisse; Bruchflächen mit sehr scharfen Bruchkanten; vorwiegend raue Oberflächen	2–20
Desaggregiertes Gefüge: Mikroaggregate und Partikel < 0,2 mm				
Restgefüge	Rg	Desaggregation von Aggregaten des obersten Horizontes durch anthropogene und natürliche Einwirkung	lose Mikroaggregate und Partikel, an der Bodenoberfläche evtl. verkrustet	< 0,2

Vorkommen		Bodenschicht bzw. bodenkundlicher Horizont				
Aggregattyp bzw. Gefügeform	Code	unbearbeiteter Oberboden Ah	bearbeiteter Oberboden Ahp	Übergangsschicht AB	Unterboden B	Ausgangsmaterial C
Grundgefüge, ohne Aggregate						
Einzelkorn	Ek					
Kohärent	Ko					
Natürliche Aggregattypen						
Prismen	Pr					
Polyeder	Po					
Subpolyeder	Sp					
Granulate	Gr					
Krümel	Kr					
Anthropogen geprägte Aggregattypen						
Bröckel	Br					
Klumpen rundlich	Klr					
Klumpen kantig	Klk					
Fragmente	Fr					
Desaggregiertes Gefüge: Mikroaggregate und Partikel < 0,2 mm						
Restgefüge	Rg					

	Hauptvorkommen
	Nebenvorkommen
	kommt selten oder in unbedeutenden Anteilen vor

Abbildung 1b. Aggregattypen und Gefügeformen: Kurzbeschreibung und Vorkommen im Bodenprofil (bei künstlichen Auffüllungen: Abweichungen vom Schema möglich)

2. Gefüge visuell ansprechen und beurteilen

2.1 Einführung

27 Bildtafeln (Kapitel 2.2) stellen die Aggregattypen in natürlicher Grösse in ihren wichtigsten Grössenklassen dar. Sie bilden ein Hilfsmittel für reproduzierbare Ansprachen. Abgebildet werden Gefügeformen landwirtschaftlich genutzter Böden des schweizerischen Mittellandes. Bei der Auswahl wurde auf typische Erscheinungsformen geachtet. Da die Aggregate vorgängig zur Klassierung in 7 Grössenklassen aufgeteilt werden (Kapitel 2.4), sind die Tafeln nach Grössenklasse geordnet. Zwei Tafeln mit den verschiedenen Aggregattypen der Grössenklasse 3 und 5 sind zum unmittelbaren Vergleich vorangestellt.

Der Begleittext weist auf die differenzierenden Merkmale hin. Zusätzlich führt ein verbaler Bestimmungsschlüssel (Kapitel 2.3, Abbildung 2a) zum Aggregattyp oder zur Gefüge-

form. Die Anzahl der Aggregattypen ist beschränkt, einzelne Aggregattypen sind typisch für bestimmte Horizonte und Tiefen des Bodens oder kommen meistens nur dort vor. Wer routiniert ist, braucht deshalb die Hilfsmittel nicht mehr in jedem Fall zu benutzen.

Bei visuellen Methoden der Bodenansprache, so auch bei der Bestimmung des Aggregattyps, stehen (Feld-)Bodenkundlerin und Bodenkundler häufig vor einer Entscheidung zwischen mehreren Möglichkeiten. Dies trifft besonders in den anthropogen beeinflussten Bodenbereichen zu, wo Gefügeveränderungen schnell und vielfältig ablaufen (Kapitel 3.2). Dort wird eine Grössenfraktion der Bodenprobe häufig durch zwei oder mehr Aggregattypen geprägt und muss deshalb auch so beschrieben werden (Kapitel 2.4, Abbildung 2c).

2.2 Bildtafeln

Visuelle Unterscheidungsmerkmale der Aggregattypen der Grössenklasse 3 (5-10 mm)

					
	Natürliche Aggregate	Natürliche Aggregate	Anthropogen umgeformte Aggregate	Natürliche Aggregate	Anthropogen zerschlagene Aggregate
Typ	Grosse Krümel, Kr 3	Mittlere Subpolyeder, Sp 3	Kleine Bröckel, Br 3	Sehr kleine Polyeder, Po 3	Mittlere Fragmente, Fr 3
Umriss	<i>unregelmässig buchtig</i>	<i>unregelmässig, teils buchtig</i>	<i>meist rundlich</i>	<i>unregelmässig, rundlich bis länglich (durch Frostgare), mit Ecken</i>	<i>unregelmässig, mit Ecken</i>
Achsenlängen	<i>unterschiedlich bis etwa gleich</i>	<i>unterschiedlich bis etwa gleich</i>	<i>meist etwa gleich</i>	<i>etwa gleich bis stark unterschiedlich</i>	<i>häufig stark unterschiedlich</i>
Kanten	<i>keine</i>	<i>abgerundet (infolge Anlagerns)</i>	<i>meist deutlich gerundet (durch Verformen)</i>	<i>scharf bis sehr scharf (durch Absondern)</i>	<i>sehr scharf (Bruchkanten, durch Zerschlagen)</i>
Beschaffenheit der Oberfläche	<i>extrem rau bis schwammartig, matt</i>	<i>sehr rau, matt, häufig dunkler als im Innern</i>	<i>rau, z.T. geglättet und verschmiert oder muschelartig gerippt</i>	<i>rau, teils glatt</i>	<i>vorwiegend rau, mit ebenen Bruchflächen, matt</i>

Visuelle Unterscheidungsmerkmale der Aggregattypen der Grössenklasse 5 (20-50 mm)

						
	Natürliche Aggregate	Anthropogen umgeformte Aggregate	Natürliche Aggregate	Natürliche Aggregate	Natürliche Aggregate	Anthropogen umgeformte Aggregate
Typ	Sehr grosse Subpolyeder, Sp 5	Grosse Bröckel, Br 5	Mittlere Polyeder, Po 5	Kleine Prismen, Pr 5	Kleine rundliche Klumpen, Klr 5	
Umriss	unregelmässig, teils buchtig, insgesamt rundlich	meist <i>rundlich</i>	meist unregelmässig rundlich, mit Ecken	meist <i>länglich</i>	unregelmässig, insgesamt meist rundlich	
Achsenlängen	etwa gleich	meist etwa gleich	meist etwa gleich	<i>vertikal meist deutlich länger</i>	meist etwa gleich	
Kanten	<i>abgerundet</i> (infolge Anlagerns)	meist <i>deutlich gerundet</i> (durch Verformen)	stumpf bis <i>scharf</i> (durch Absondern)	<i>scharf</i> (durch Absondern)	<i>meist gerundet</i> (durch Verformen)	
Beschaffenheit der Oberfläche	<i>sehr rau</i> , matt, oft <i>dunkler als im Innern</i>	rau, zum Teil <i>geglättet</i> und <i>verschmiert</i> oder <i>muschelartig gerippt</i>	rau, <i>teils glatt</i> und eventuell glänzend (Tonhüllen)	vertikale Seitenflächen mit glatten <i>Tonhüllen</i> , sonst rau	oft <i>geglättet</i> und <i>verschmiert</i> , <i>stark verfestigt</i>	

Kleine Krümel und Granulate (0,2 - 2 mm)

Entstehung und Vorkommen

Kr: Anlagerung durch Vernetzung, mässig ausgeprägt; Krume (Ah)

Gr: Anlagerung durch Verkittung, meist als Kotpillen; Krume (Ah, Ahp)

Geometrische Form

Kr: Umriss unregelmässig buchtig;
Achsenlänge meist stark unterschiedlich;
ohne Kanten

Gr: Umriss vorwiegend rundlich;
Achsenlängen etwa gleich; ohne Kanten

Oberfläche

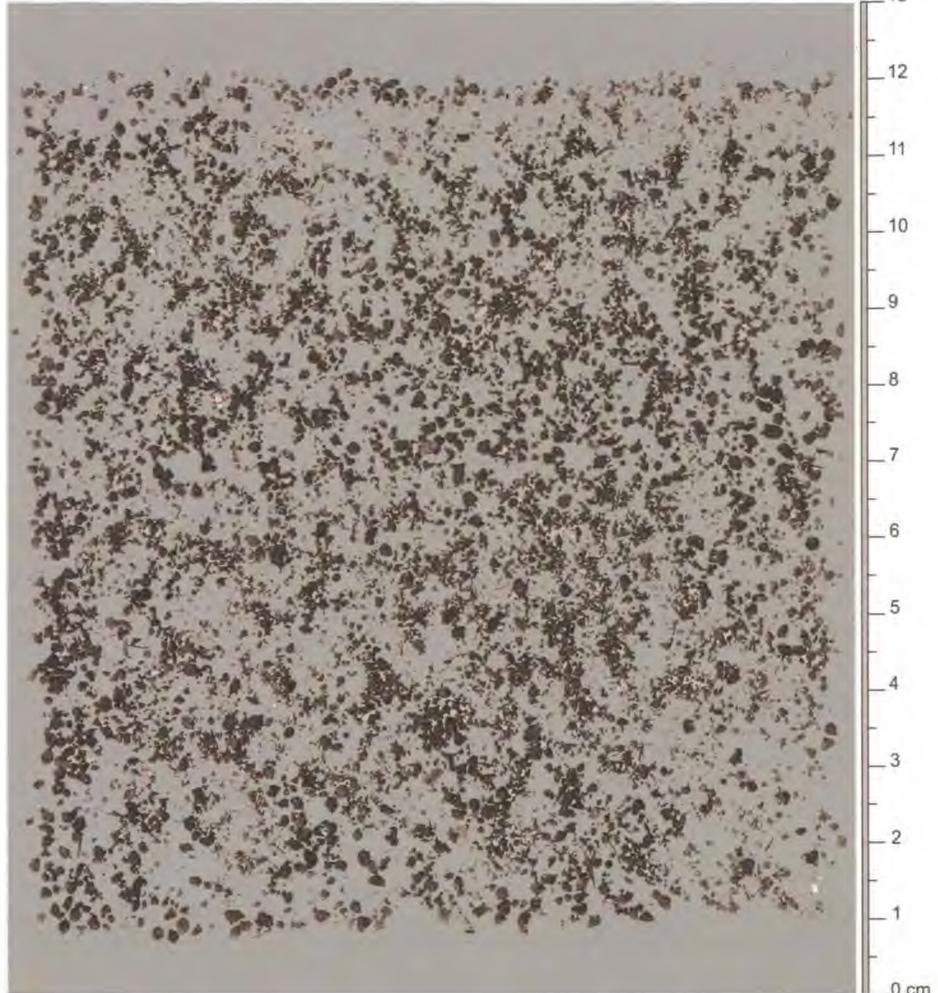
Kr: extrem rau; Porenanteil sehr hoch

Gr: rau, matt; Porenanteil mittel

Krümel

Granulat

ca. 5x vergrössert



Mittlere Krümel (2 - 5 mm)

Entstehung und Vorkommen

Anlagerung durch Vernetzung, stark ausgeprägt; humose Krume (Ah)

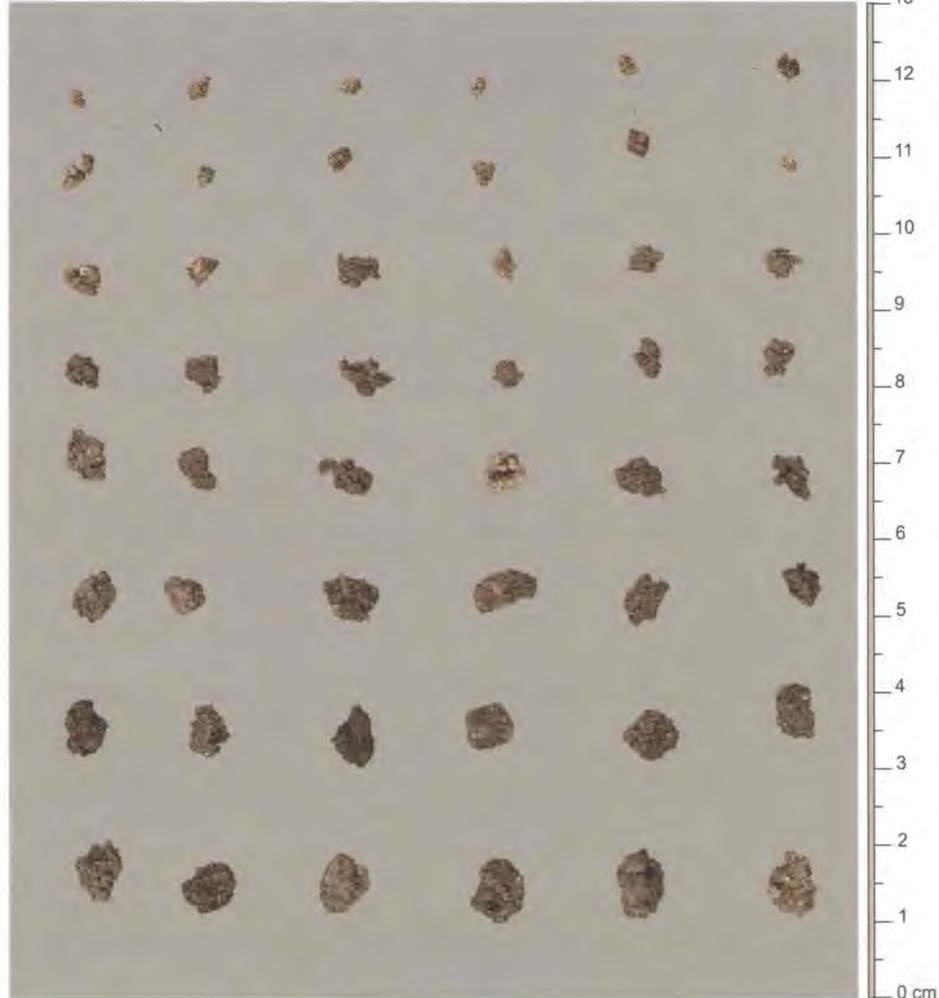
Geometrische Form

Umriss unregelmässig buchtig;
Achsenlänge meist stark unterschiedlich;
ohne Kanten

Oberfläche

sehr rau, matt; Porenanteil sehr hoch

ca. 5x vergrössert



Kleine Subpolyeder (2 - 5 mm)**Entstehung und Vorkommen**

Absonderung und Anlagerung;
Übergangsschicht (AB) und Krume (Ah)

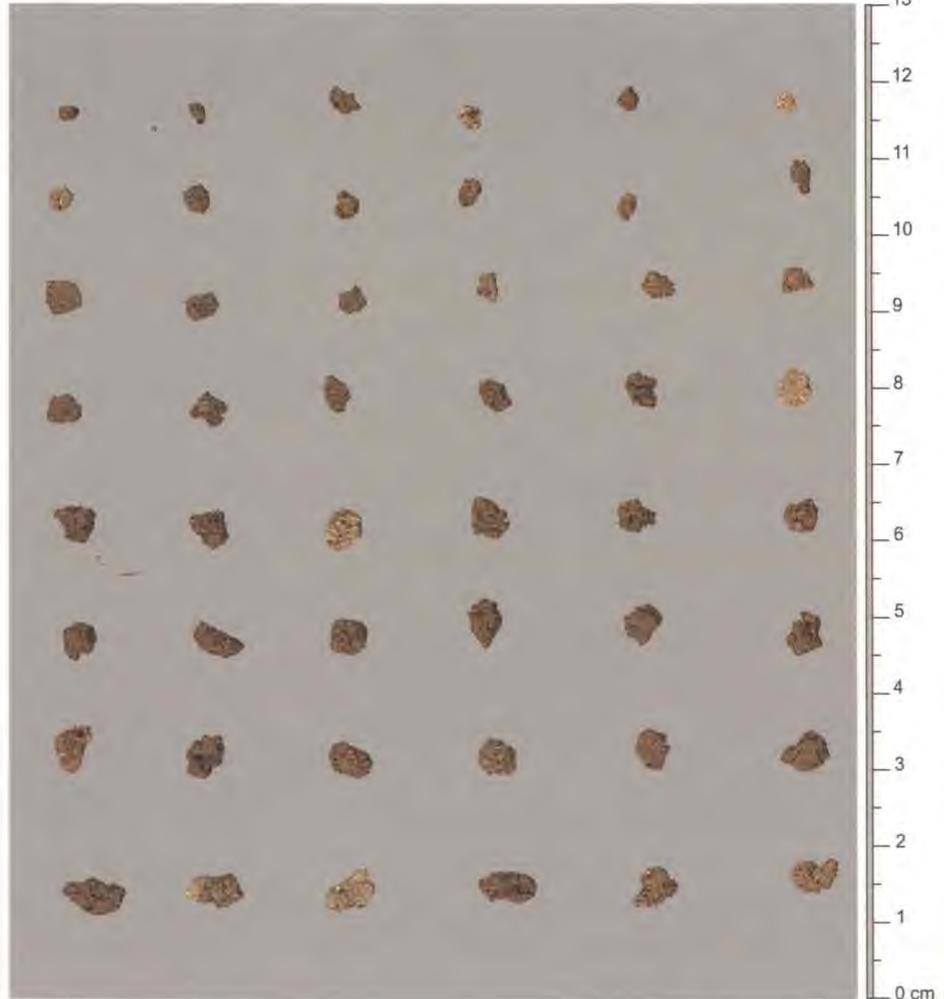
Geometrische Form

Umriss unregelmässig rundlich, teils
buchtig; Achsenlängen unterschiedlich bis
etwa gleich; Kanten abgerundet

Oberfläche

sehr rau, matt; Porenanteil hoch; oft
dunkler als Aggregatinneres

ca. 5x vergrössert



Extrem kleine Polyeder (2 - 5 mm)**Entstehung und Vorkommen**

Absonderung meist durch Wasserentzug (zum Beispiel Frostgare); meist Ackerkrume (Ahp) mit höherem Tongehalt (>20%)

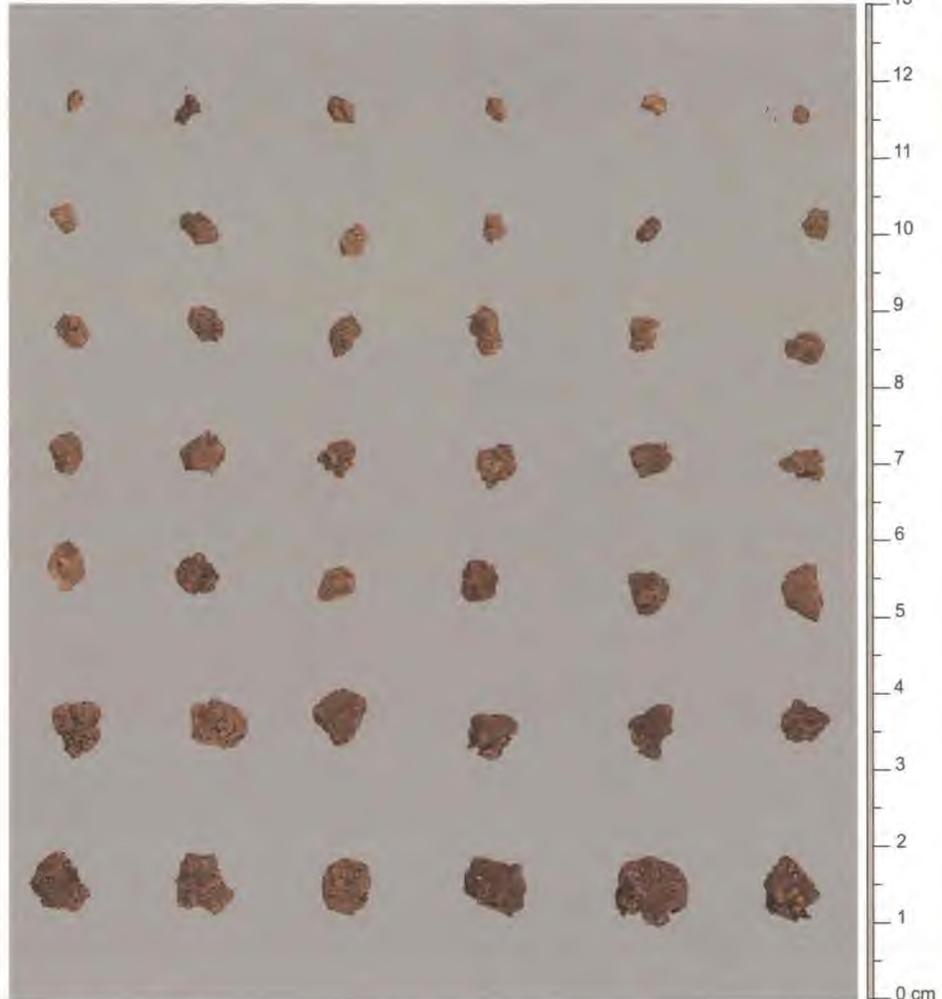
Geometrische Form

Umriss unregelmässig rundlich (bei Frostgare auch länglich) mit Ecken; Achsenlängen etwa gleich (bei Frostgare oft stark unterschiedlich); Kanten meist scharf

Oberfläche

rau, matt; Porenanteil gering bis mittel

ca. 5x vergrößert



Kleine Fragmente (2 - 5 mm)**Entstehung und Vorkommen**

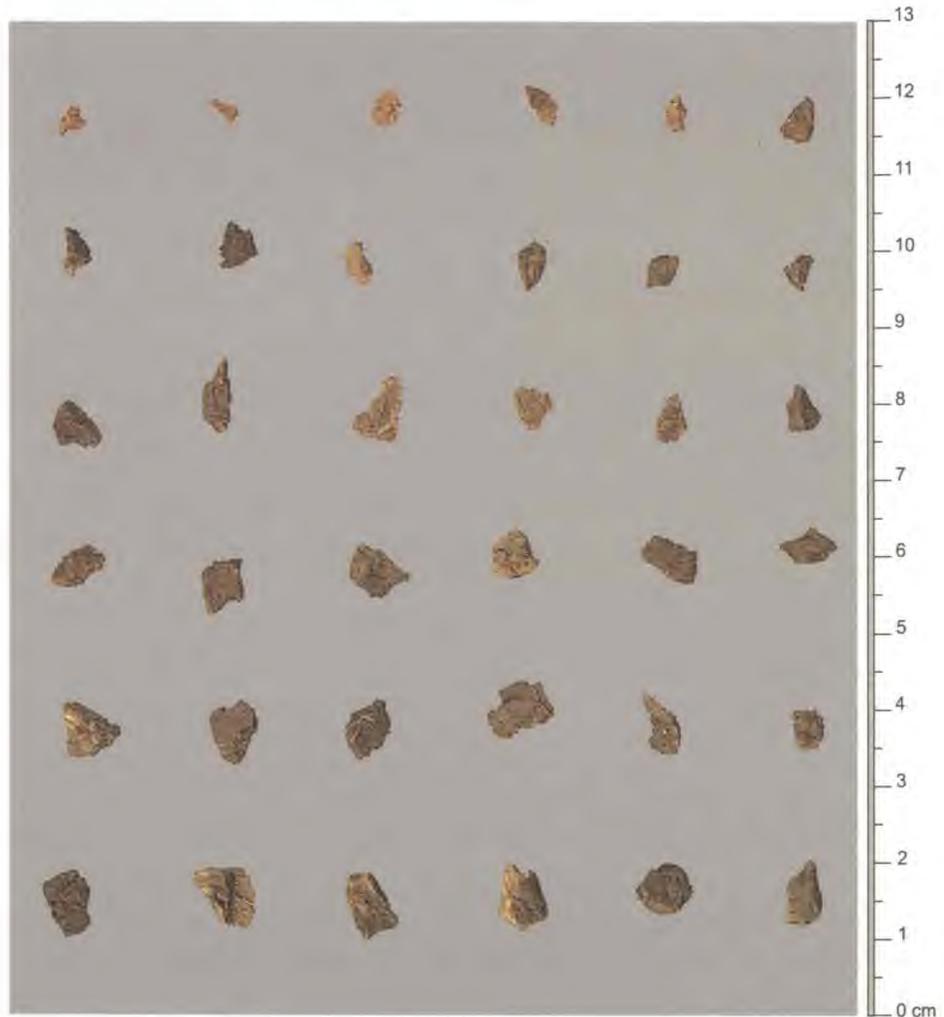
Mechanisches Zerschlagen, meist von Klumpen, selten von anderen grösseren Aggregaten; Ackerkrume (Ahp)

Geometrische Form

Umriss unregelmässig mit Ecken;
Achsenlängen häufig stark unterschiedlich; Bruchkanten sehr scharf

Oberfläche

vorwiegend rau, mit ebenen Bruchflächen, matt; Porenanteil gering (bei entsprechenden Ausgangsaggregaten: mittel)



Grosse Krümel (5 - 10 mm)**Entstehung und Vorkommen**

Anlagerung durch Vernetzung, sehr stark ausgeprägt; humose Krume (Ah)

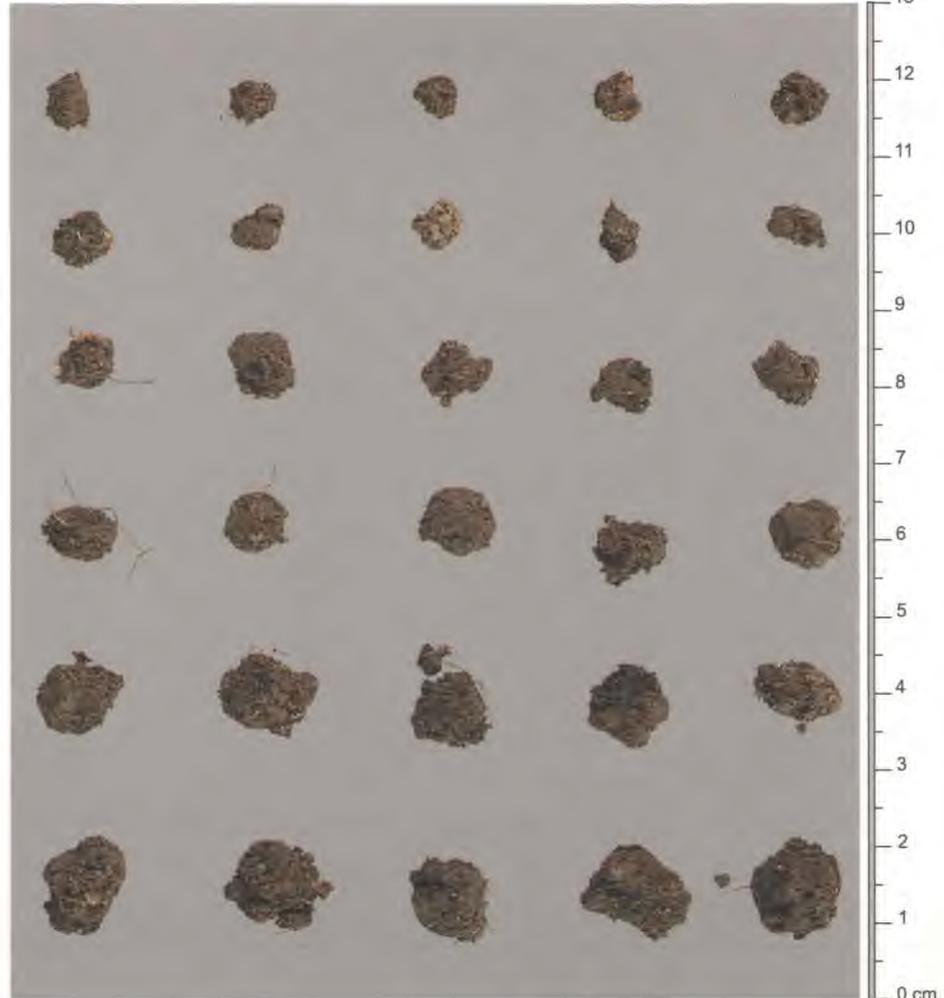
Geometrische Form

Umriss unregelmässig buchtig, insgesamt meist rundlich; Achsenlänge stark unterschiedlich bis etwa gleich; ohne Kanten

Oberfläche

sehr rau, matt; Porenanteil sehr hoch

ca. 5x vergrössert



Mittlere Subpolyeder (5 - 10 mm)

Entstehung und Vorkommen

Absonderung und Anlagerung;
Übergangsschicht (AB) und Krume (Ah)

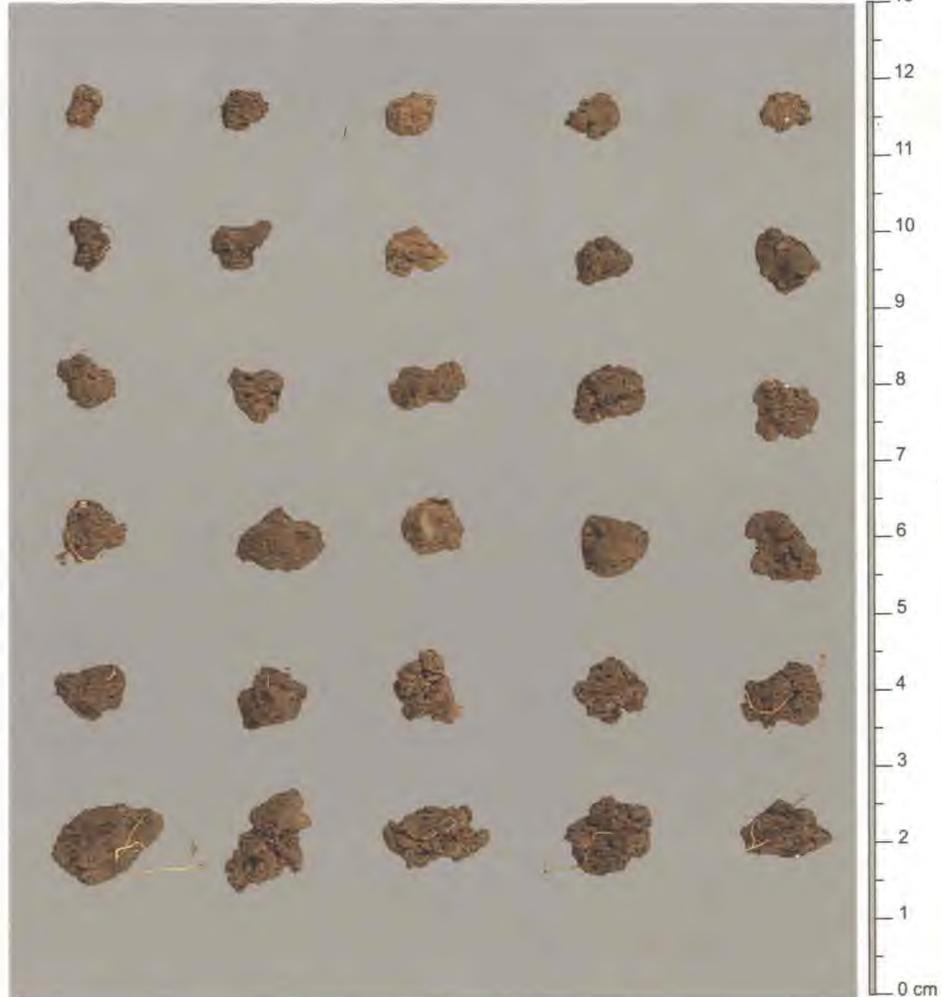
Geometrische Form

Umriss unregelmässig rundlich, teils
buchtig; Achsenlängen unterschiedlich bis
etwa gleich; Kanten abgerundet

Oberfläche

sehr rau, matt; Porenanteil hoch; oft
dunkler als Aggregatinneres

ca. 5x vergrössert



Kleine Bröckel (5 - 10 mm)

Entstehung und Vorkommen

Mechanisch gerollt bzw. geknetet, vorwiegend aus Anlagerungsaggregaten; Ackerkrume (Ahp)

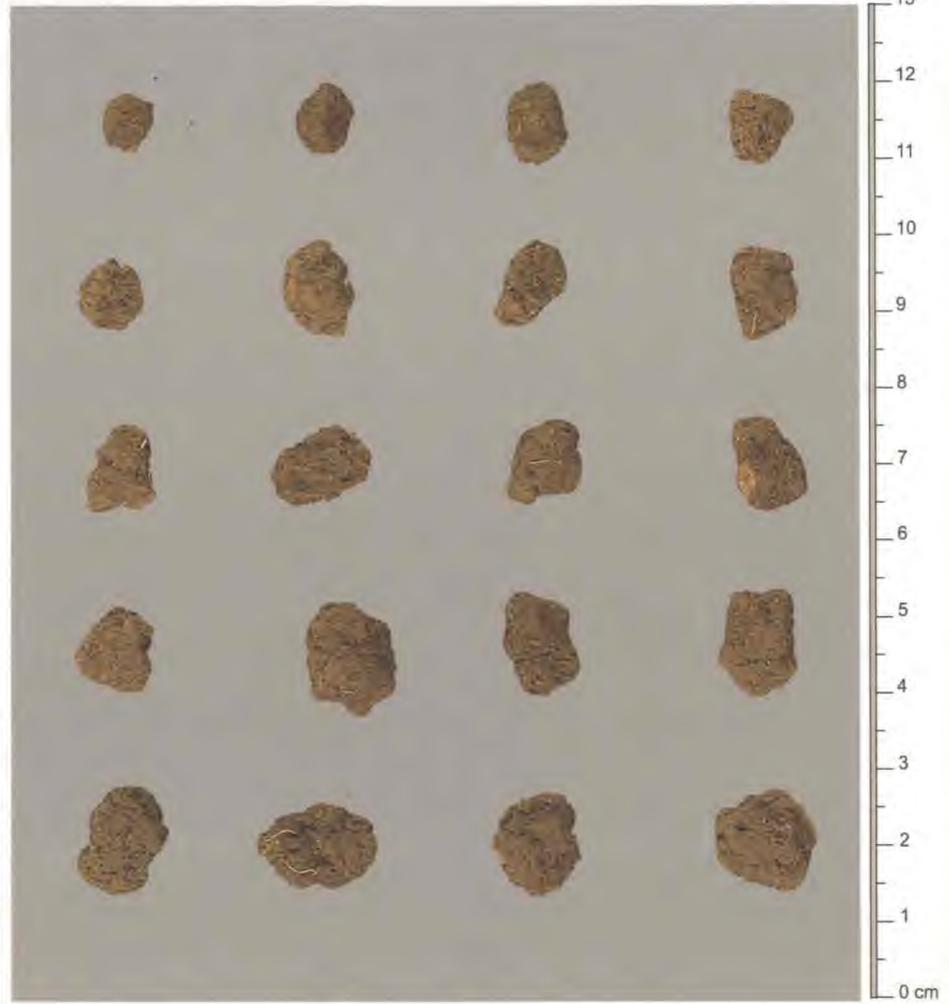
Geometrische Form

Umriss meist rundlich; Achsenlängen meist etwa gleich; Kanten meist deutlich gerundet, selten scharf

Oberfläche

rau, teils geglättet und verschmiert oder muschelartig gerippt; Porenanteil mittel bis hoch, von Bodenart abhängig

ca. 5x vergrößert



Sehr kleine Polyeder (5 - 10 µm)**Entstehung und Vorkommen**

Intensive Absonderung; ausgeprägter Verwitterungshorizont (Bst), bei Frostgare in Ackerkrume (Ahp) mit höherem Tongehalt (>20%)

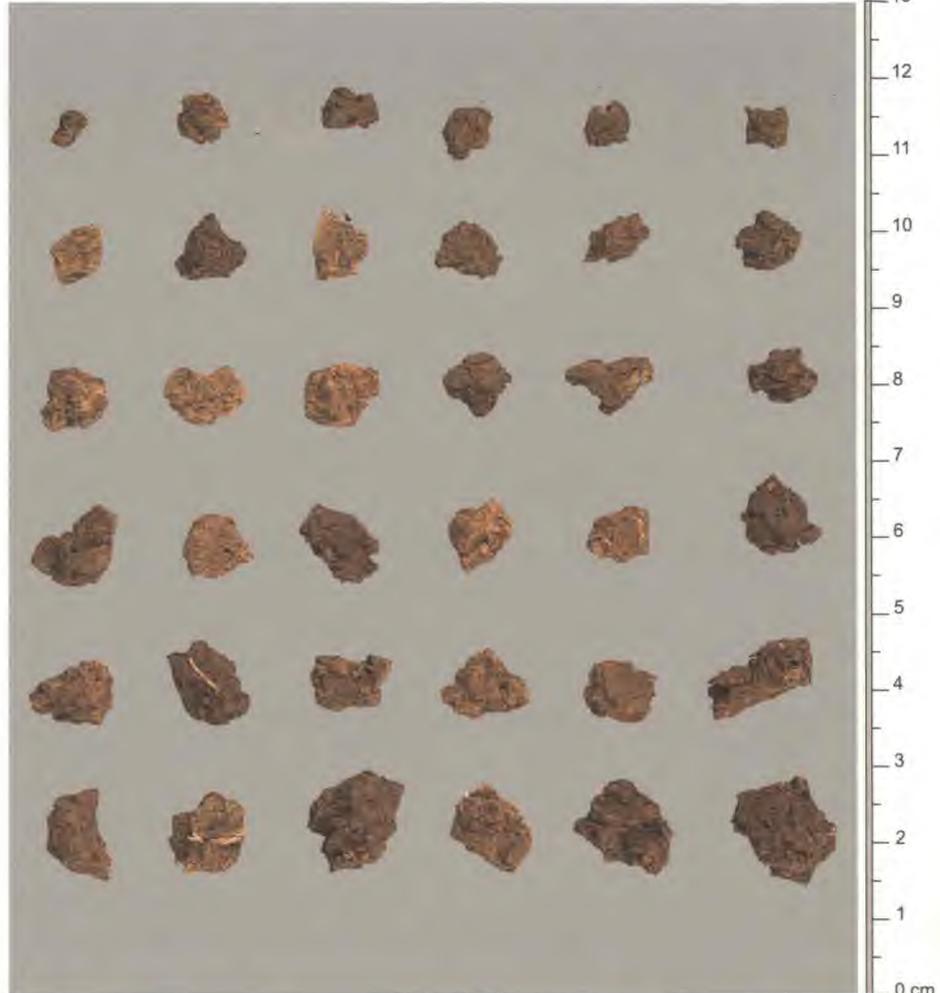
Geometrische Form

Umriss unregelmäßig rundlich (bei Frostgare länglich) mit Ecken; Achsenlängen etwa gleich (bei Frostgare oft stark unterschiedlich); Kanten meist scharf

Oberfläche

rau, teils glatt und glänzend (Tonhüllen); Porenanteil mittel

ca. 5x vergrößert



Mittlere Fragmente (5 - 10 mm)**Entstehung und Vorkommen**

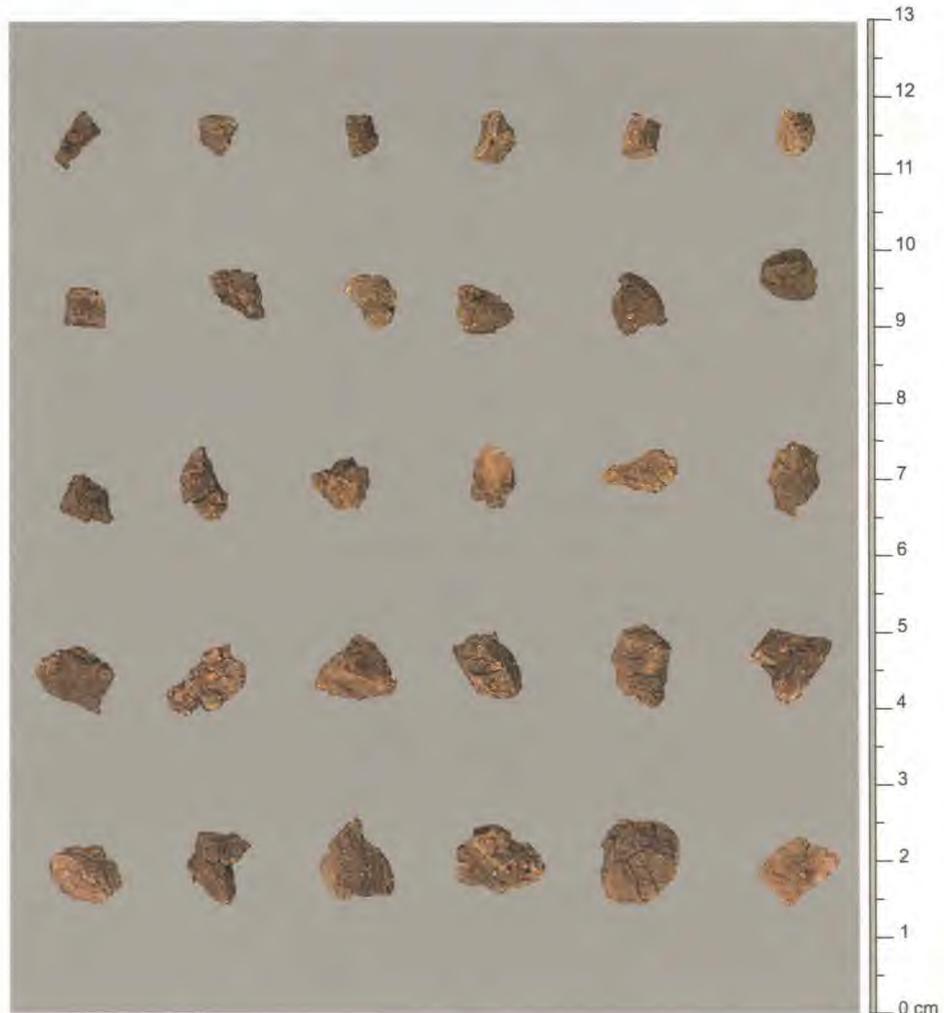
Mechanisches Zerschlagen, meist von Klumpen, selten von anderen grösseren Aggregaten; Ackerkrume (Ahp)

Geometrische Form

Umriss unregelmässig mit Ecken; Achsenlängen häufig stark unterschiedlich; Bruchkanten sehr scharf

Oberfläche

vorwiegend rau, mit ebenen Bruchflächen, matt; Porenanteil gering (bei entsprechenden Ausgangsaggregaten: mittel)



Grosse Subpolyeder (10 - 20 mm)**Entstehung und Vorkommen**

Absonderung und Anlagerung;
Übergangsschicht (AB) und Krume (Ah)

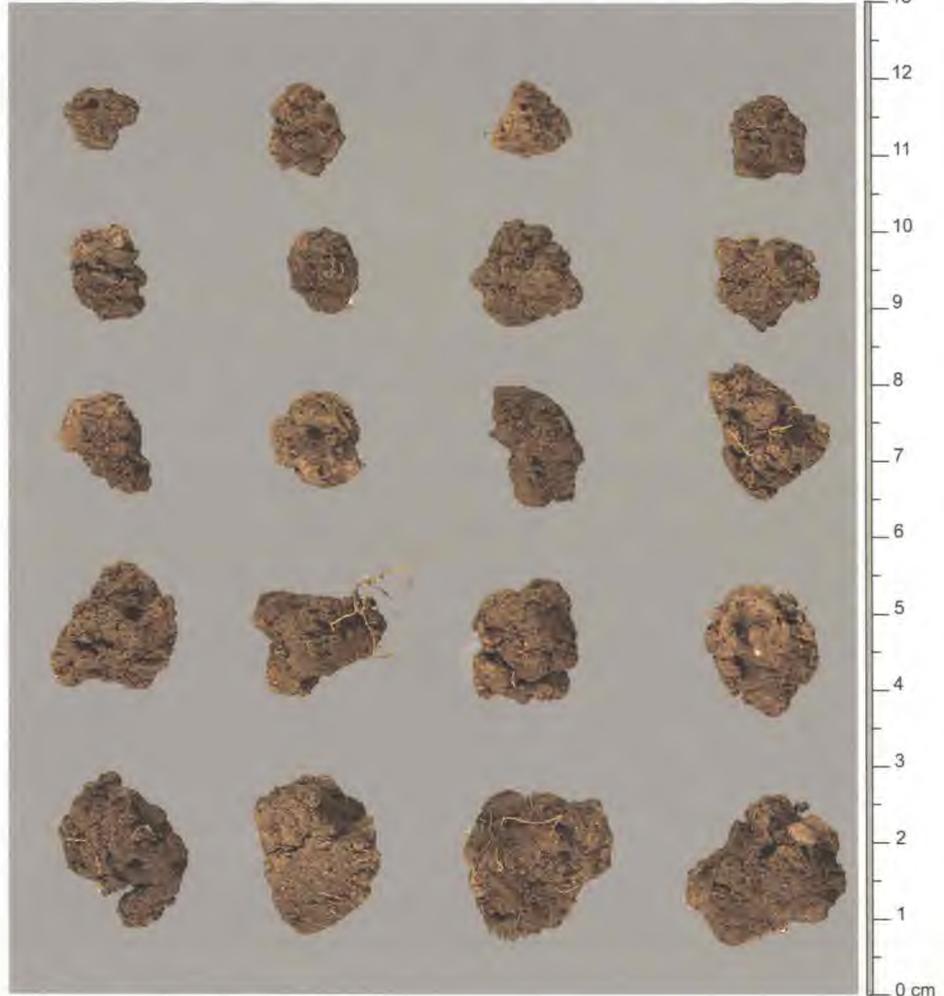
Geometrische Form

Umriss unregelmässig, teils buchtig,
insgesamt rundlich; Achsenlängen meist
etwa gleich; Kanten abgerundet

Oberfläche

sehr rau, matt; Porenanteil hoch; oft
dunkler als Aggregatinneres

ca. 5x vergrössert



Mittlere Bröckel (10 - 20 mm)**Entstehung und Vorkommen**

Mechanisch gerollt bzw. geknetet,
vorwiegend aus Anlagerungsaggregaten;
Ackerkrume (Ahp)

Geometrische Form

Umriss meist rundlich; Achsenlängen
meist etwa gleich; Kanten meist deutlich
gerundet, selten scharf

Oberfläche

rau, teils geglättet und verschmiert oder
muschelartig gerippt; Porenanteil mittel
bis hoch, von Bodenart abhängig

ca. 5x vergrößert



Kleine Polyeder (10 - 20 mm)**Entstehung und Vorkommen**

Intensive Absonderung; Verwitterungshorizont (Bw)

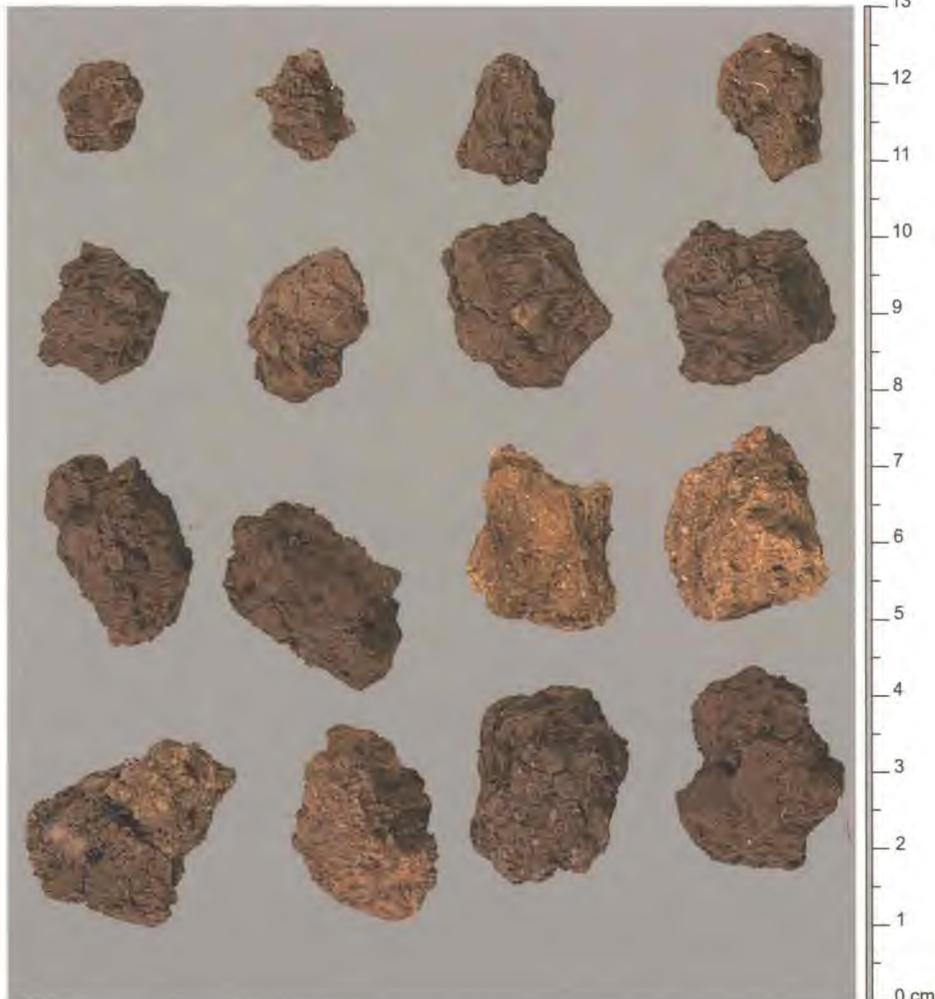
Geometrische Form

Umriss meist unregelmässig rundlich mit Ecken; Achsenlängen meist etwa gleich; Kanten scharf; Grenzflächen benachbarter Aggregate häufig komplementär

Oberfläche

rau, teils glatt und glänzend (Tonhüllen); Porenanteil mittel

ca. 5x vergrößert



Grosse Fragmente (10 - 20 mm)**Entstehung und Vorkommen**

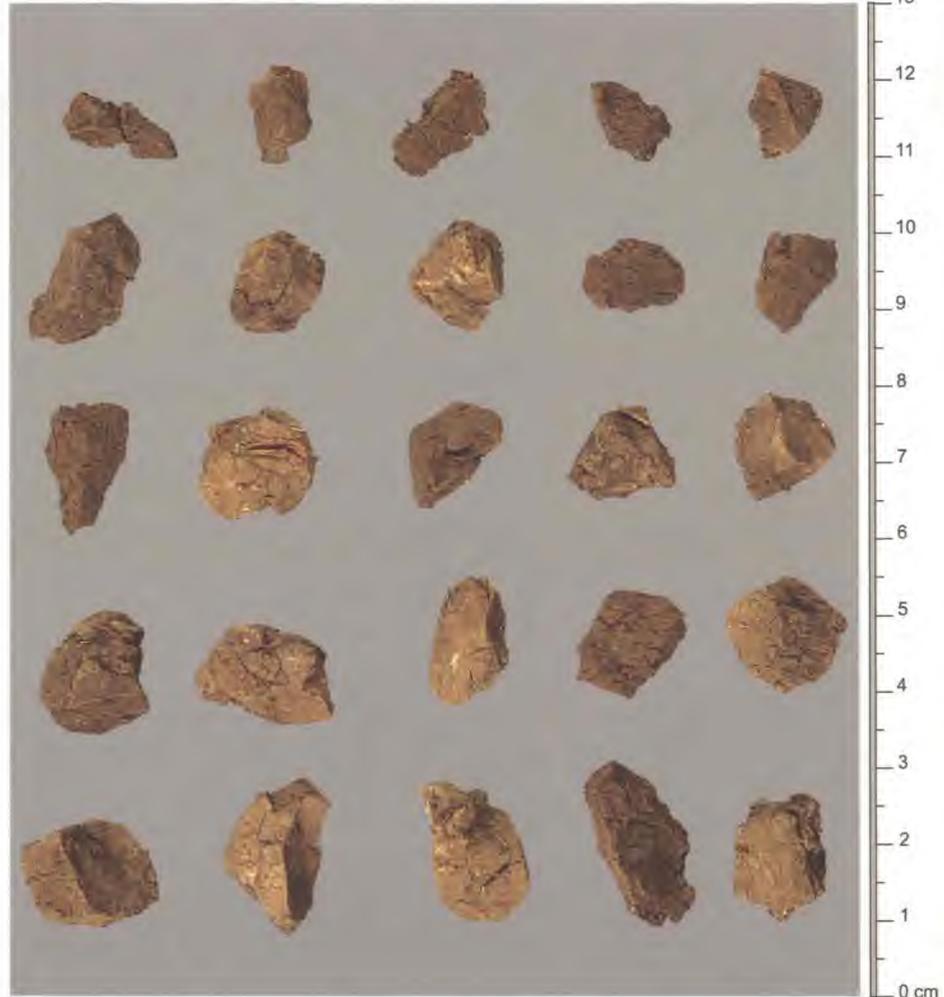
Mechanisches Zerschlagen, meist von Klumpen, selten von anderen grösseren Aggregaten; Ackerkrume (Ahp)

Geometrische Form

Umriss unregelmässig mit Ecken; Achsenlängen häufig stark unterschiedlich; Bruchkanten sehr scharf

Oberfläche

vorwiegend rau, mit ebenen Bruchflächen, matt; Porenanteil gering (bei entsprechenden Ausgangsaggregaten: mittel)



Sehr grosse Subpolyeder (20 - 50 mm)

Entstehung und Vorkommen

Absonderung vorherrschend; Krume (Ah),
biologisch aktive Übergangsschicht (AB)

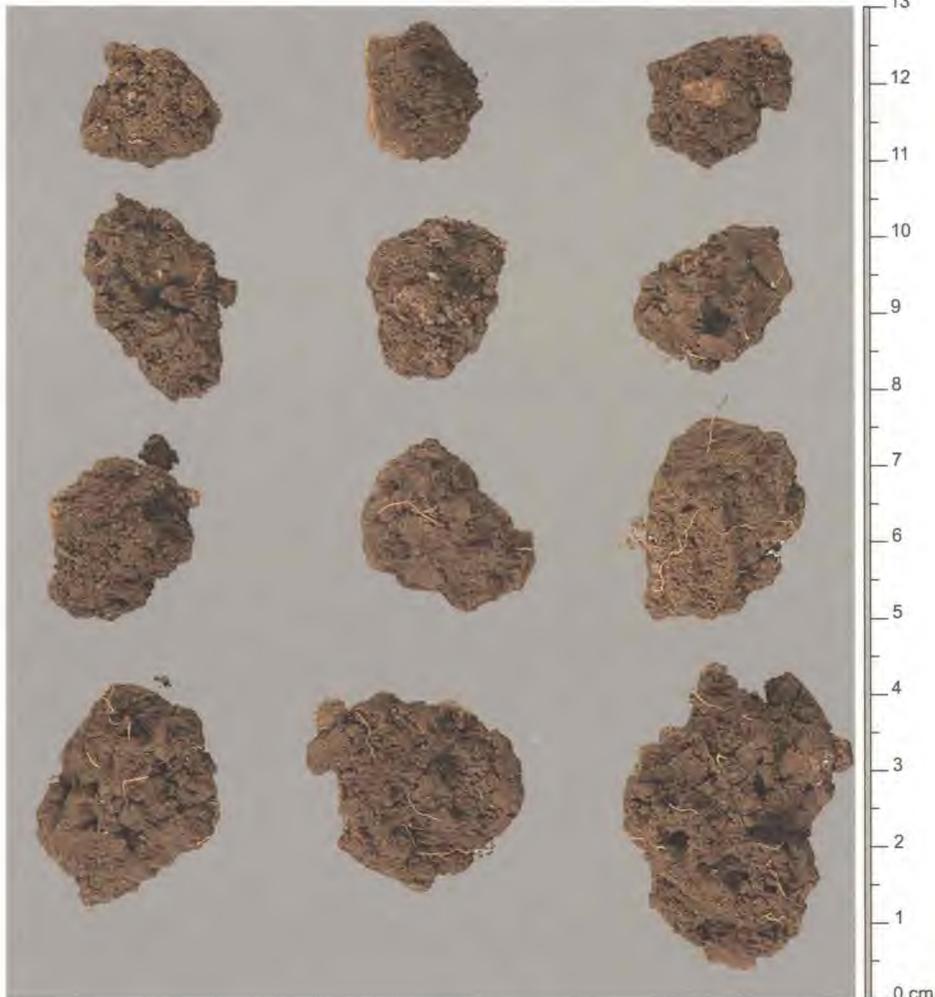
Geometrische Form

Umriss unregelmässig, teils buchtig,
insgesamt rundlich; Achsenlängen meist
etwa gleich; Kanten abgerundet

Oberfläche

sehr rau, matt; Porenanteil hoch; oft
dunkler als Aggregatinneres

ca. 5x vergrössert



Grosse Bröckel (20 - 50 mm)**Entstehung und Vorkommen**

Mechanisch gerollt bzw. geknetet,
vorwiegend aus Anlagerungsaggregaten;
Ackerkrume (Ahp)

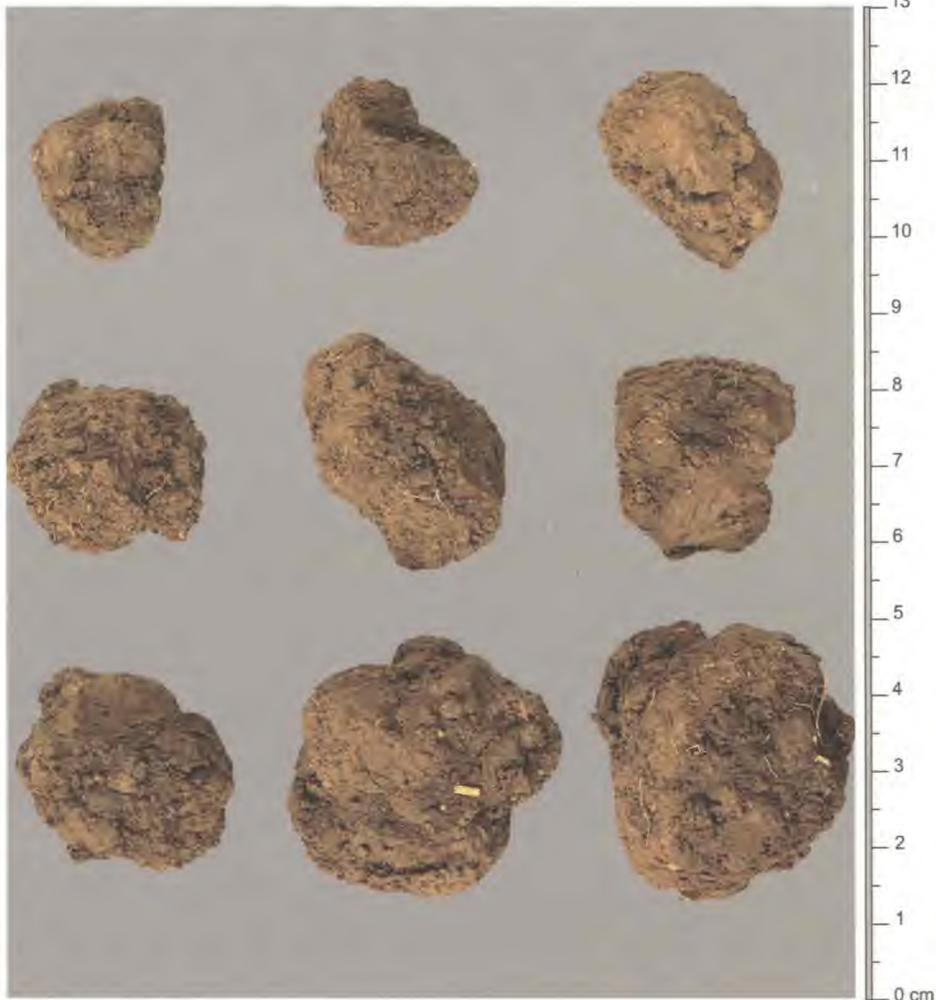
Geometrische Form

Umriss unregelmässig rundlich; Achsen-
längen meist etwa gleich; Kanten meist
deutlich gerundet, selten scharf

Oberfläche

rau, teils geglättet und verschmiert oder
muschelartig gerippt; Porenanteil meist
mittel

ca. 5x vergrössert



Mittlere Polyeder (20 - 50 mm)**Entstehung und Vorkommen**

Mässig intensive Absonderung;
Verwitterungshorizont (Bw, Bst) und
Vernässungshorizont (Bg, Bgg)

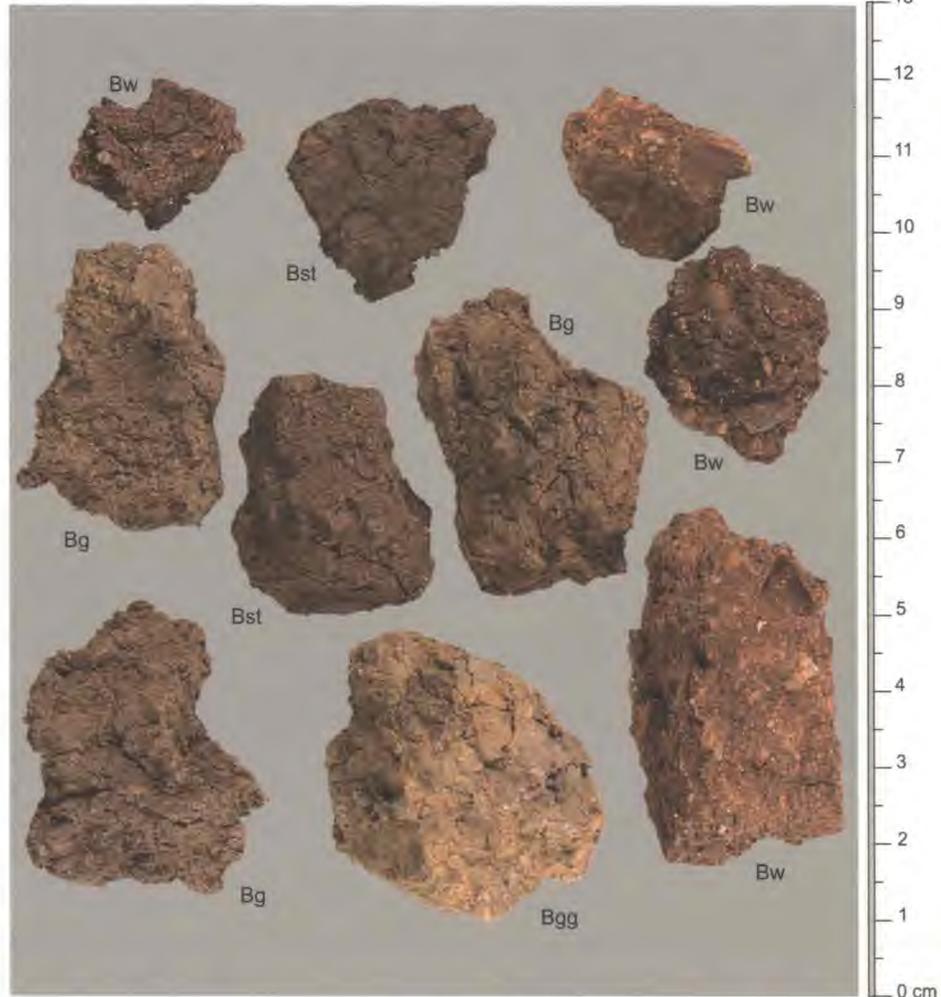
Geometrische Form

Umriss insgesamt meist rundlich, mit
Ecken; Achsenlängen meist etwa gleich;
Kanten stumpf bis scharf; Grenzflächen
benachbarter Aggregate häufig
komplementär

Oberfläche

rau, teils glatt und glänzend (Tonhüllen);
Porenanteil gering (Bgg) bis mittel (Bw)

ca. 5x vergrössert



Kleine Prismen (20 - 50 mm)**Entstehung und Vorkommen**

Intensive Absonderung und Toneinwaschung; illuvialer (Bt, It) und hydro-morpher, tonreicher (Bgg) Horizont

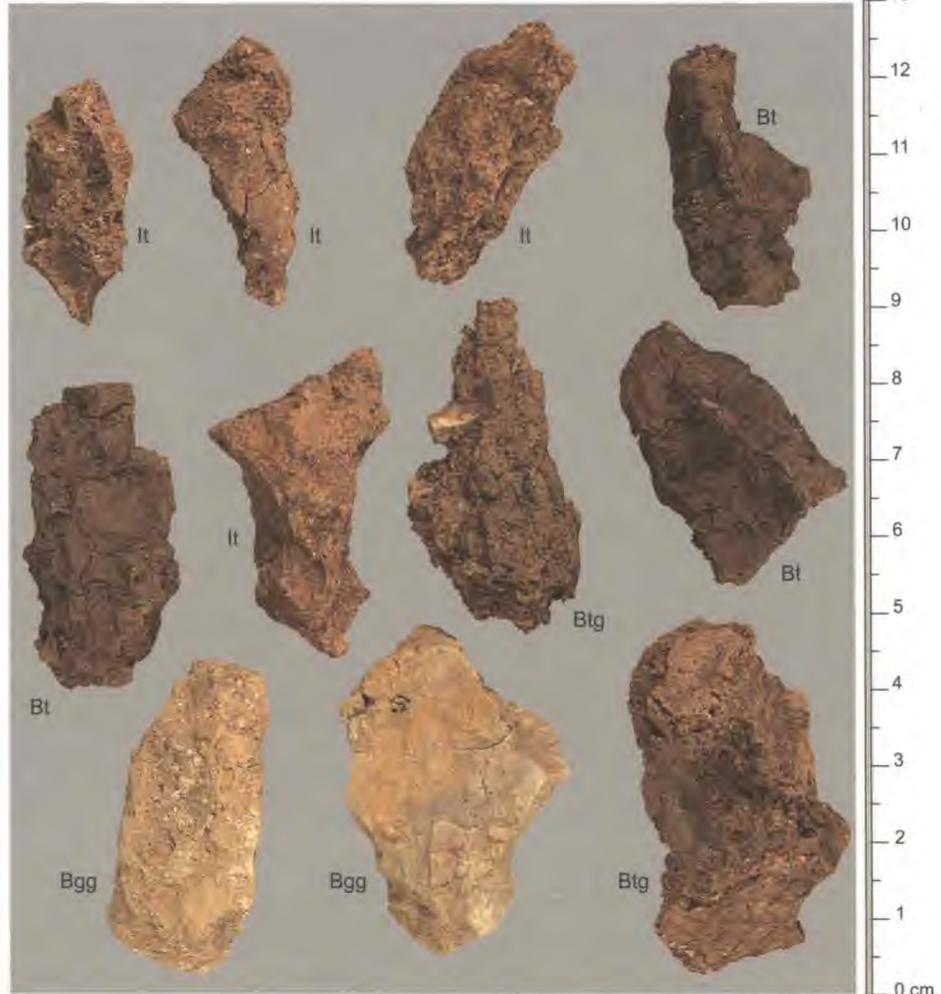
Geometrische Form

länglich; längste Achse vertikal; Kanten scharf; Grenzflächen benachbarter Aggregate komplementär

Oberfläche

senkrechte Seitenflächen mit glatten Tonhüllen, sonst rau; Porenanteil gering (Bgx, Bgg) bis mittel (Bt, It)

ca. 5x vergrößert



**Kleine kantige und rundliche Klumpen
(20 - 50 mm)**

Entstehung und Vorkommen

vorwiegend aus Absonderungs-
aggregaten;

Klk: mechanisch gepresst; vorwiegend
Ackerkrume und angrenzende Schichten
(Ahp, AB bis B);

Klr: mechanisch gerollt bzw. geknetet;
Ackerkrume (Ahp)

Geometrische Form

Klk: Umriss insgesamt rundlich, mit
Ecken; Achsenlängen etwa gleich; Kanten
scharf

Klr: Umriss unregelmässig, insgesamt
meist rundlich; Achsenlängen meist etwa
gleich; Kanten meist abgerundet

Oberfläche

Klk: rau, Porenanteil gering, stark
verfestigt

Klr: rau, teils geglättet und verschmiert;
Porenanteil meist gering; stark verfestigt

ca. 5x vergrößert



**Grosse und sehr grosse Polyeder
(50 - 100 mm / > 100 mm)**

Entstehung und Vorkommen

Wenig intensive Absonderung;
Verwitterungshorizont (Bw) der tieferen
Bodenschichten und Vernässungshorizont
(Bg, Bgg)

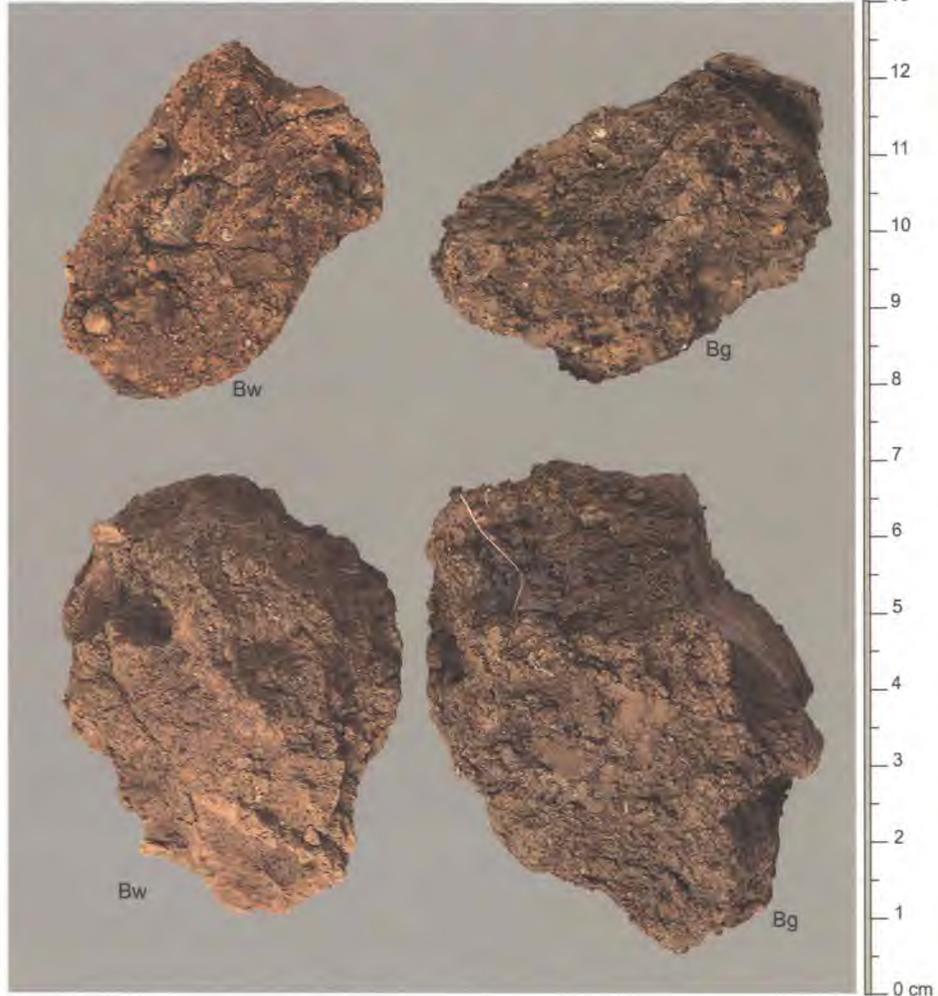
Geometrische Form

Umriss insgesamt meist rundlich, mit
Ecken; Achsenlängen meist etwa gleich;
Kanten stumpf bis scharf; Grenzflächen
benachbarter Aggregate häufig
komplementär

Oberfläche

rau, teils glatt und glänzend (Tonhüllen);
Porenanteil gering (Bgg) bis mittel (Bw)

ca. 5x vergrössert



**Mittlere und grosse Prismen
(50 - 100 mm / > 100 mm)**

Entstehung und Vorkommen

Gehemmte Absonderung und
Toneinwaschung; illuvialer (Bt, It) und
hydromorpher, tonreicher (Bgg) Horizont

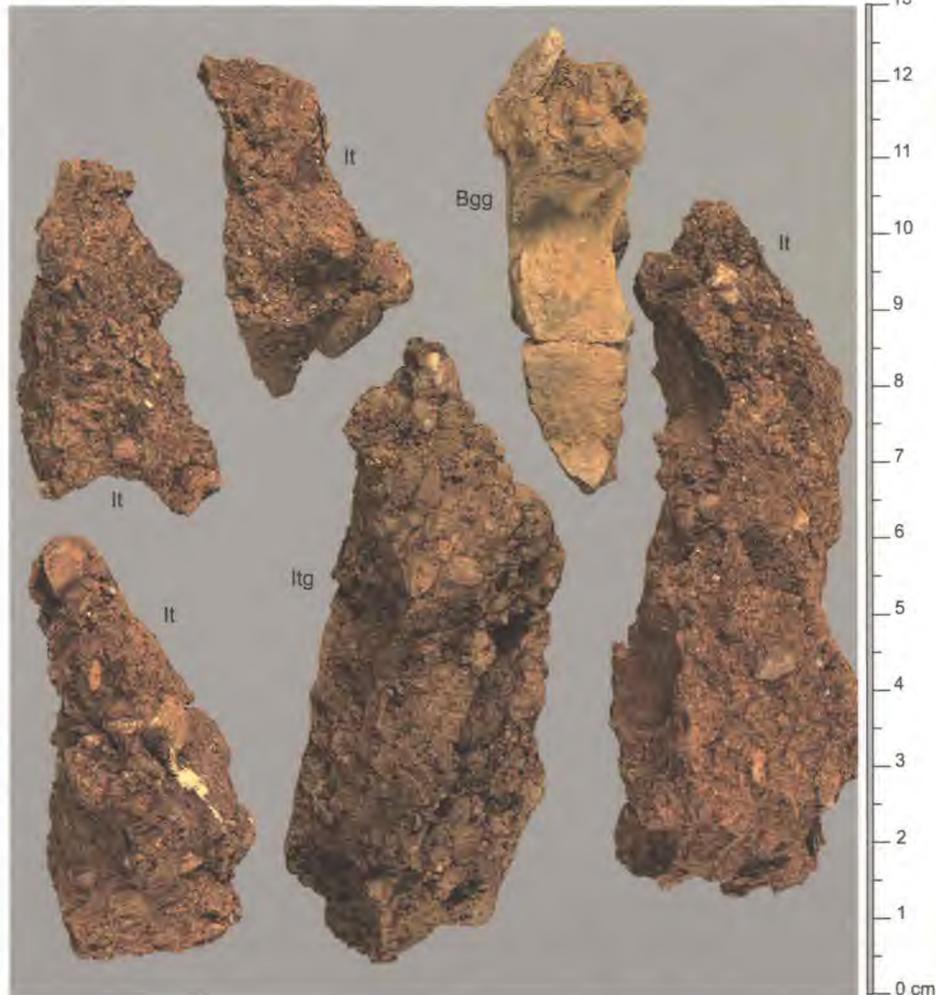
Geometrische Form

länglich; längste Achse vertikal; Kanten
scharf; Grenzflächen benachbarter
Aggregate komplementär

Oberfläche

senkrechte Seitenflächen mit glatten
Tonhüllen, sonst rau; Porenanteil gering
(Bgx, Bgg) bis mittel (Bt, It)

ca. 5x vergrößert



Klk 7
Klr 6
Klr 7

Mittlere und grosse, kantige und rundliche Klumpen (50 - 100 mm / > 100 mm)

Entstehung und Vorkommen

vorwiegend aus Absonderungsaggregaten;
Klk: mechanisch gepresst; vorwiegend Ackerkrume und angrenzende Schichten (Ahp, AB bis B);
Klr: mechanisch gerollt bzw. geknetet; Ackerkrume (Ahp)

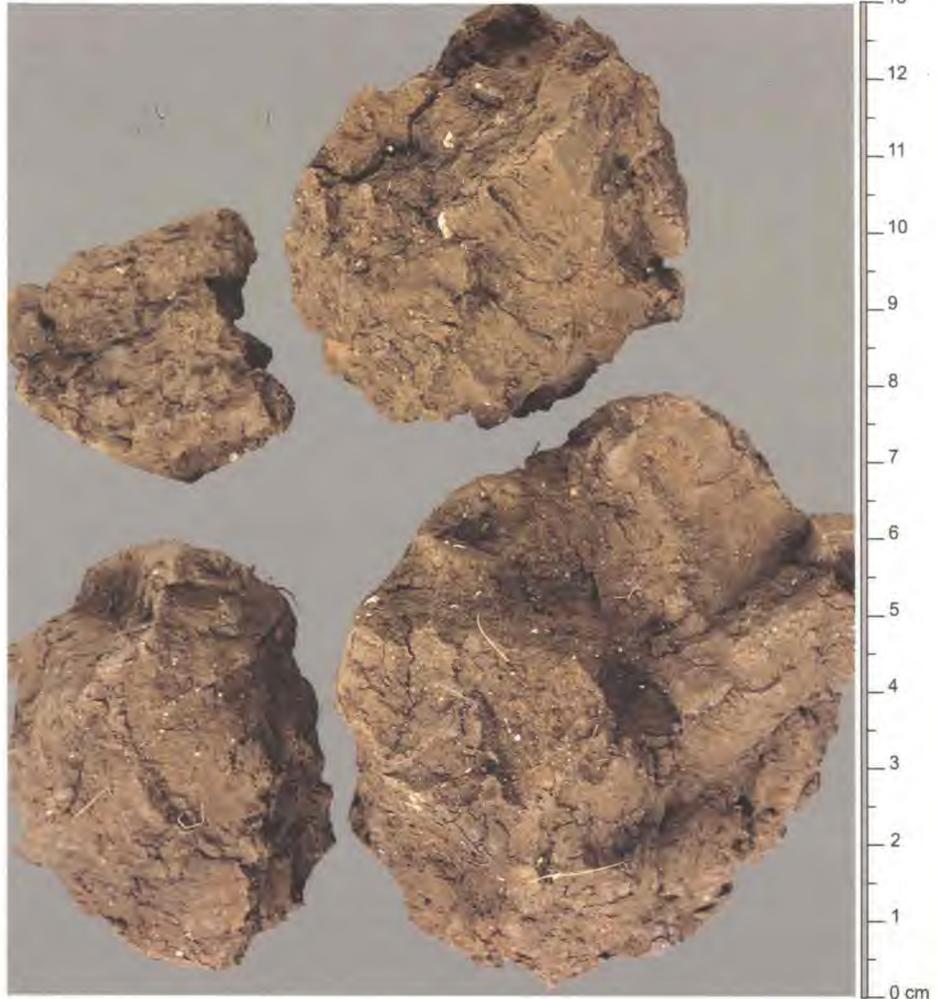
Geometrische Form

Klk: Umriss insgesamt rundlich, mit Ecken; Achsenlängen etwa gleich; Kanten scharf
Klr: Umriss unregelmässig, insgesamt meist rundlich; Achsenlängen meist etwa gleich; Kanten meist abgerundet

Oberfläche

Klk: rau; Porenanteil gering; stark verfestigt
Klr: rau, teils geglättet und verschmiert; Porenanteil meist gering; stark verfestigt

ca. 5x vergrössert



Kohärentgefüge

Entstehung und Vorkommen

Zusammenhaltende Bodenmatrix, ohne aktuelle Aggregatbildung; Untergrund (C) und hydromorpher (r)-Horizont

Geometrische Form

ungegliedert, zum Teil Strukturen des Ausgangsmaterials erkennbar

Oberfläche

den Eigenschaften des Ausgangsmaterials entsprechend

1mm



Einzelkorngefüge

Entstehung und Vorkommen

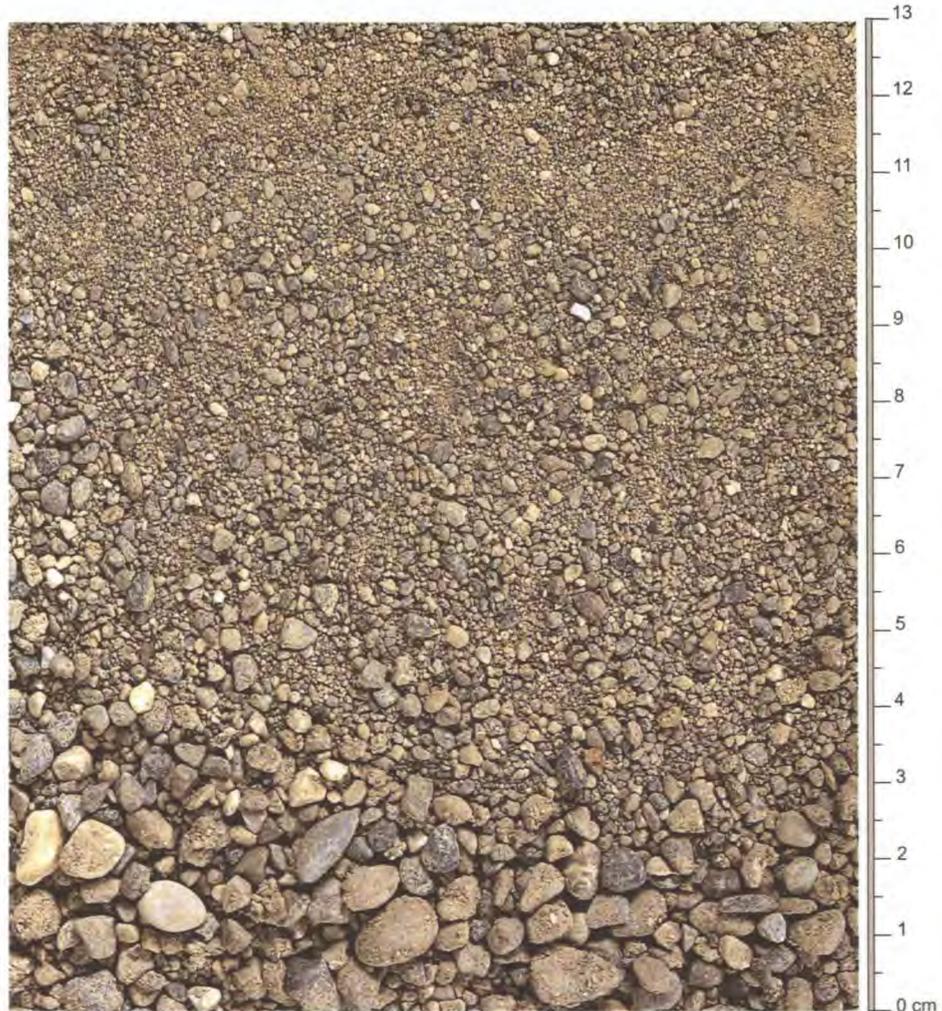
Lose Bodenmatrix ohne Zusammenhalt, eventuell temporär durch Wassermenisken verbunden, ohne aktuelle Aggregatbildung; Untergrund (C) und hydromorpher (r) Horizont von meist tonarmem Ausgangsmaterial

Geometrische Form

ungegliedert, zum Teil Strukturen des Ausgangsmaterial erkennbar

Oberfläche

den Eigenschaften des Ausgangsmaterials entsprechend



Rg

Restgefüge (< 0,2 mm)

Entstehung und Vorkommen

Lose Zerfalls- und Abbauprodukte von Aggregaten: mineralische und organische Partikel, Mikroaggregate (Rg); nach Verschlammung zum Teil eingebunden in die oberflächliche Kruste (Rgk); Ackerkrume (Ahp)

Geometrische Form

Rg: stark unterschiedlich (Lupe)

Rgk: horizontale, dünnplattige Schicht

Oberfläche

Rg: grosse Vielfalt (Lupe)

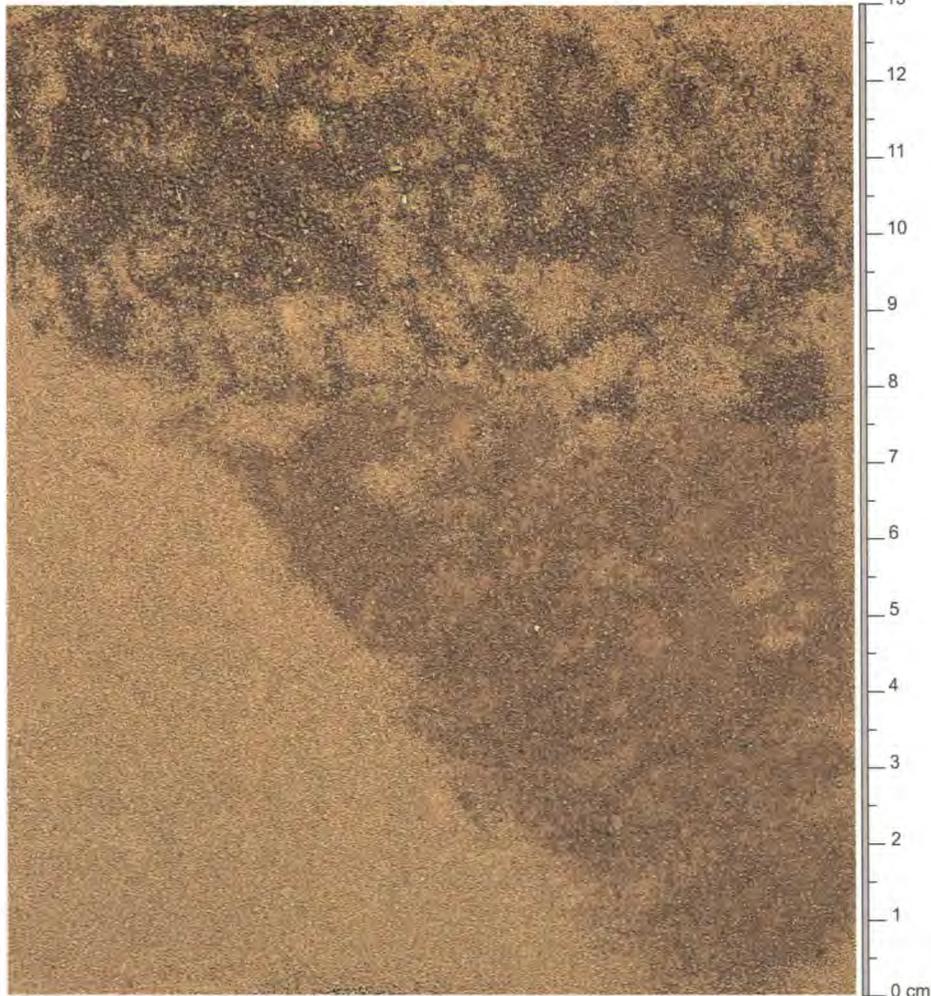
Rgk: rau; Porenanteil gering

ca. 5x vergrössert

Rg



Rgk



2.3 Bestimmungsschlüssel

Anhand des Bestimmungsschlüssels (Tabelle 2a) lässt sich der Aggregattyp festlegen. Die visuellen Merkmale «Umriss», «Kanten», «Längen von gedachten Achsen durch den Schwerpunkt des Aggregats», «Beschaffenheit der Aggregatoberfläche» ermöglichen in den meisten Fällen eine Bestimmung des Aggregattyps.

In Zweifelsfällen können die Bildtafeln mit Kurzbeschreibung (Kapitel 2.2) oder die ausführlichen Beschreibungen der Aggregattypen (Kapitel 3.2) herangezogen werden. In den meisten Fällen ist es hilfreich, die Herkunft des Aggregats zu beachten, da in bestimmten Bodenhorizonten und -schichten gewisse Typen gehäuft auftreten. Auch die Feinerdekörnung, insbesondere der Tongehalt (Fingerprobe), beeinflusst die Ausprägung der Typen. Die Schärfe von Kanten etwa nimmt im Allgemeinen mit dem Tongehalt zu.

Tabelle 2a. Schlüssel zur Bestimmung des Aggregattyps aufgrund visueller Merkmale

Aggregatgefüge	Aggregattyp	Typische Grössen	Achsenverhältnis: längste zu kürzeste
1	ohne Kanten oder kantenähnliche Oberflächenstrukturen		
2	Achsenlängen etwa gleich; Umriss rundlich; Oberfläche rau; mässig porös	Granulate	<5 mm meist <1,5
2*	Achsenlängen stark variierend; Umriss mit zum Teil tiefen Buchten; Oberfläche extrem rau, sehr porös	Krümel	<10 mm häufig >2
1*	mit Kanten oder kantenähnlichen Oberflächenstrukturen		
3	Kanten meist abgerundet		
4	Achsenlängen variierend; Umriss teilweise buchtig; Oberfläche sehr rau, porös, oft dunkler und grauer als Inneres	Subpolyeder	2–50 mm meist >1,2
4*	Achsenlängen etwa gleich; Umriss rundlich; Oberfläche rau		
5	Oberfläche oft muschelartig gerippt, mässig bis sehr porös, mässig verfestigt	Bröckel	5–50 mm meist <1,5
5*	Oberfläche oft geglättet und verschmiert, wenig bis mässig porös, stark verfestigt	Klumpen rundlich	>20 mm meist <1,5
3*	Kanten meist oder immer scharf		
6	Achsenlängen etwa gleich		
7	Oberfläche oft mit glatten glänzenden Tonhüllen, nicht verfestigt	Polyeder	>10 mm meist <1,5
7*	Oberfläche teilweise geglättet und verschmiert, teilweise rau, meist matt, stark verfestigt	Klumpen kantig	>20 mm meist <1,5
6*	Achsenlängen meist deutlich variierend		
8	Achsenlängen in einer oder zwei Hauptrichtungen deutlich länger		
9	Achsenlängen vertikal meist deutlich länger als horizontal, vertikale Seitenflächen mit glänzenden Tonhüllen	Prismen	>20 mm häufig >2
9*	häufig unregelmässig plattig, oft sehr scharfkantig und mit spitzwinkligen Ecken	Polyeder, sehr klein	1–10 mm häufig >2
8*	Achsenlängen unregelmässig variierend mit sehr scharfen (Bruch-)Kanten und spitzwinkligen Ecken; Oberfläche meist mit erkennbaren Bruch-Flächen	Fragmente	2–50 mm häufig >2
Gefügelformen ohne Makroaggregate			
	ohne Aggregatbildung, lose Einzelpartikel z.B. Sandkörner	Einzelkorngefüge	
	ohne Aggregatbildung, zusammenhaltend, evtl. mit Struktur des Ausgangsmaterials	Kohärentgefüge	
	Lose Partikel kleiner als 0,2 mm	Restgefüge	< 0,2 mm

2.4 Durchführung der visuellen Gefügeansprache

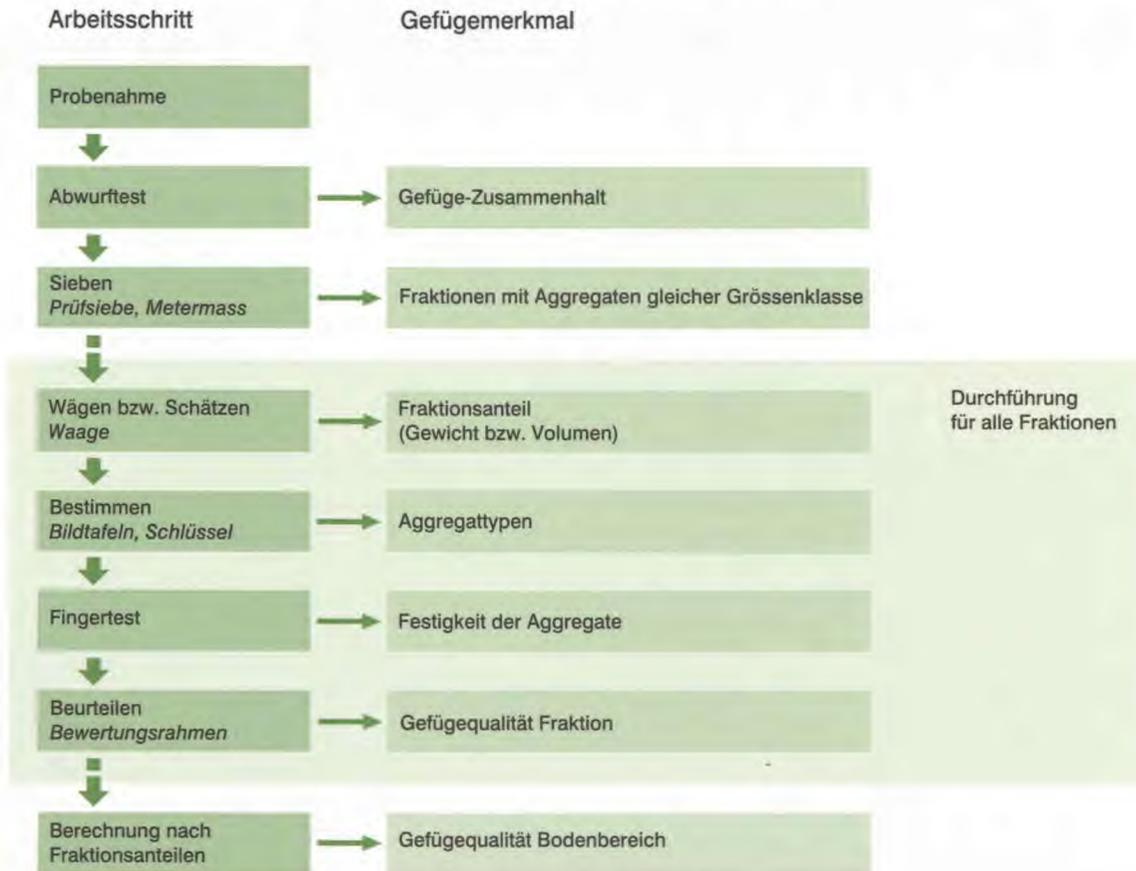


Abbildung 2a. Ablauf der visuellen Gefügeansprache

Feldausrüstung

Flacher Spaten (z.B. Drainagespaten mit 50 cm langem Blatt), 1 hellfarbener Behälter (etwa 70 x 50 x 15 cm) mit glattem Boden für Abwurfprobe und mindestens 7 hellfarbene gleichgewichtige Behälter (etwa 20 x 20 x 5 cm) für Grössenfraktionen, Waage, Metermass (Doppelmeter), Prüfsiebe mit quadratischem Netz (Maschenweiten 0,2 mm, 2 mm, 5 mm, 10 mm und 20 mm); Aufnahmeformular (Abbildung 2b).

Entnahme einer Bodenprobe mit dem Spaten

Bedingungen

Nur bei mässig feuchtem Boden (Saugspannung zwischen pF 2 und pF 3 beziehungsweise zwischen 100 und 1000 hPa), das heisst bei «brüchigem» Bodengefüge, das leicht in einzelne Aggregate zerfällt. Nasser (plastischer) oder trockener (verhärteter) Boden ist für eine detaillierte Gefügeansprache nicht geeignet. Standort eventuell zuvor vor Niederschlag schützen, um zum Zeitpunkt der Probenahme günstige Bodenfeuchtigkeit vorzufinden.

Entnahme

Spatenrube öffnen (rund 50 cm Tiefe). Spatenstich-Probe (etwa 50x20x15 cm) möglichst ungestört entnehmen, das heisst Quetschungen und Schmierschichten vermeiden oder nach Probenahme sorgfältig entfernen. Notfalls grössere Proben nehmen und je nach Bedarf trocknen oder befeuchten.

Unterteilung der Spatenprobe

Grundsätzlich nach erkennbaren Schichten (eventuell Horizonten), typischerweise in 4 Schichten; zum Beispiel Saatbett, darunter liegende Bearbeitungsschicht, (eventuell verdichtete) Pflugssole und Unterboden. Falls keine erkennbaren Schichtungsunterschiede vorliegen, Probe in die vier Schichten 0-12, 12-24, 24-36 und 36-48 cm unterteilen. Bei Wiesenböden oberflächlichen Wurzelfilz entfernen.

Reihenfolge der Beurteilungen

Zuerst den Unterboden mit seinen meist ungestörten Horizonten beurteilen, da hilfreich für die Einschätzung der natürlichen Aggregattypen und der Umformungsvorgänge in der Ackerkrume.

Aggregierungsanalyse mittels Grössen-Fraktionierung

Zusammenhalt

1) Probe von 2 bis 4 kg (je nach Aggregatgrösse) aus etwa 1m Höhe in offenen Behälter mit glattem Boden fallen lassen. Beobachten, ob Aggregate allenfalls durch den Aufprall auf den Gefässboden gestaucht werden: Wenn ja, betroffene Aggregate entfernen. Grosse Aggregate entlang vorgeprägten Trennflächen trennen, falls dies mit leichten Zug- beziehungsweise Scherkräften der Finger möglich ist; Steine und verbindende Wurzeln soweit möglich entfernen.

2) Den Gefügezusammenhalt (Zusammenhalt zwischen den Aggregaten) aufgrund der Aufprallwirkung bestimmen (Abbildung 2b und Kapitel 3.4).

Grössenfraktionen

Massgebend für die Zuordnung eines Aggregates: kleinster Querschnitt.

3) Repräsentative Teilprobe von 1 bis 2 kg auswählen: mit Brett/Schale Probe in 2 oder 4 etwa gleichgrosse Portionen teilen, aufgrund der Anzahl grosser Aggregate repräsentativen Teil bestimmen.

4) Damit Siebvorgang sanfter wird und weniger Artefakte entstehen: Grössenfraktionen 7 (>10 cm) und 6 (5 - 10 cm) mittels Metermass bestimmen. Aggregate, die zweifelsfrei der Fraktion 5 (2-5 cm) angehören, von Hand entnehmen.

5) Rest der repräsentativen Teilprobe auf den Siebturm legen (zu grosse Proben portionieren). Mit möglichst kleiner Reibung - Oberflächenformen wie Kanten und Ecken werden zur Bestimmung des Aggregattyps gebraucht! - Aggregate un-

ter sanftem Rütteln im Siebturm fraktionieren (Kapitel 3.3). Rückstand des grössten Siebes (20 mm) mit den unter Punkt 4 von Hand selektierten Aggregaten zusammen legen.

Gewichtsanteil, Aggregattyp, Festigkeit pro Grössenfraktion

6) Organische Teile und Skelett entfernen, dann Gewicht bestimmen (oder Volumenanteil schätzen), vorherrschende(n) Aggregattyp(en) bestimmen; bei stark unterschiedlichen Verhältnissen zwei dominante Typen angeben. Danach Festigkeit der Aggregate bestimmen (Abbildung 2b und Kapitel 3.4).

7) Vor allem bei zu feuchten Bedingungen: Durch Vergleich mit Aggregattypen der ungestörten Bodenprobe kontrollieren, ob durch Abwurfprobe (Punkt 1) oder Sieben (Punkt 5) Artefakte entstanden sind, zum Beispiel in Form von Veränderungen an Kanten oder Beschaffenheit der Aggregatoberfläche.

Im Übrigen empfiehlt es sich, eine Boden- und Standortsbeschreibung (zum Beispiel nach «Beurteilung und Kartierung von Landwirtschaftsböden», Schriftenreihe Nr. 24 der FAL, 1997) der zu beurteilenden Probenahmestelle vorzu-

nehmen. Besonders die für das Gefüge massgebenden Merkmale wie Wasserhaushalt des Bodens, Feinerdekornung, Humus- und Kalkgehalt sowie pH gehören dazu. Andere wichtige Merkmale der Gefügequalität wie Art, Tiefe und Intensität der Durchwurzelung müssen ebenfalls beachtet und erfasst werden. Sie dienen der Überprüfung der Aggregierungsanalyse.

Beurteilung der pflanzenbaulichen Gefügequalität

Gefügequalität bei Bedarf nach der Aggregierungsanalyse fraktionsweise bewerten gemäss Kapitel 2.5, Abbildung 2c und Tabelle 2b.

Die Ergebnisse der visuellen Gefügeansprache protokolliert man auf einem Aufnahmeformular (Abbildung 2b). Die entsprechende Excel-Tabelle mit den Berechnungsformeln (in Abbildung 2b durch Platzhalter ## angedeutet) kann von unserer Homepage www.reckenholz.ch (Rubrik: Forschung / Umweltressourcen/Landw. Umweltschutz / Bodenfruchtbarkeit/Bodenschutz) heruntergeladen werden.

2.5 Vorschlag zur pflanzenbaulichen Bewertung der Gefügequalität

Die folgende Bewertung beruht auf einer empirischen Beurteilung des Bodengefüges im Hinblick auf das Wurzelwachstum von Kulturpflanzen (Kapitel 3.5): Die Grössenfraktionen werden gemäss einem Bewertungsrahmen (Abbildung 2c) beurteilt. Im ersten Schritt berücksichtigt man die massgebenden Gefügemerkmale Aggregattyp und -grösse. Als weitere Schritte sind Abzüge von dieser Bewertung vorgesehen, falls das Restgefüge (< 0,2 mm) ins Gewicht fällt und falls die Festigkeit der Aggregate als ungünstig beurteilt wird (Tabelle 2b).

Das mit dem Gewichts- beziehungsweise Volumenanteil gewichtete Mittel aller Fraktionen ergibt die pflanzenbauliche Gesamtbewertung der Gefügequalität. Wenn der Gefügezusammenhalt als ungünstig zu beurteilen ist, wird die Gesamtbewertung gemäss Tabelle 2b korrigiert (Abbildung 2b). Die Bewertungs-Zahlen sind als ordinale Wertstufen zu verstehen: Gefügebewertung 11 bedeutet zum Beispiel «ein wenig günstiger» als 10, 7 bedeutet «wesentlich günstiger» als 2. Da eine ordinale Wertskala zugrunde liegt, sind daraus folgende Unterschiede in der Bewertung der Gefügequalität an verschiedenen Standorten vorsichtig zu interpretieren.

Tabelle 2b.
Bewertungskorrektur für
ungünstige mechanische
Eigenschaften des Gefüges
bzw. der Aggregate

Beispiel (vereinfacht). Die Aggregierungsanalyse einer bearbeiteten Bodenschicht ergibt: Zusammenhalt 2, 70% Bröckel der Grössenklasse 4 und Festigkeit 4 sowie 30% Krümel der Grössenklasse 2 und Festigkeit 3. Bewertung gemäss Abbildung 2c und Tabelle 2b:

1. Bröckel: Grössenklasse 4, Bewertung		10
2. Abzug für Festigkeit Stufe 4		-1
3. Anteil 70%	0,7 x 9	6,3
4. Krümel: Grössenklasse 2, Bewertung		14
5. Anteil 30%, Bewertung	0,3 x 14	4,2
6. Gesamtbewertung des Gefüges		10,5

Ausprägungsstufe des Zusammenhalts bzw. der Festigkeit der Aggregate	Abzug für Festigkeit der Aggregate (fraktionsweise)	Abzug für Zusammen- halt des Gefüges (bezogen auf Gesamt- bewertung des Gefüges)
1	-2	-1 (Ahp = 0)
2	-1	0
3	0	0
4	-1	-1
5	-2	-2

Abbildung 2c. Vorschlag zur pflanzenbaulichen Bewertung des Gefüges aufgrund von Aggregattyp und -größenklasse

	Größenklasse der Aggregate						
	1 0,2–2 mm	2 2–5 mm	3 5–10 mm	4 10–20 mm	5 20–50 mm	6 50–100 mm	7 >100 mm
Natürliche Aggregattypen							
Krümel	14	14	14				
Granulate	13	13					
Subpolyeder		12	11	10	9		
Polyeder		10	9	8	7	6	5
Prismen					7	6	5
Anthropogen geprägte Aggregattypen							
Bröckel			11	10	9		
Klumpen rund					8	7	6
Klumpen kantig					7	6	5
Fragmente Bröckel ¹⁾		11	10	9			
Fragmente Klumpen ¹⁾		9	8	7	6		
Platten					7	6	5
Restgefüge							
Restgefüge	Korrektur der Bewertung der Größenklasse 1 (siehe unten)						
Grundgefüge							
Kohärentgefüge	3						
Einzelkorngefüge	2						
Bewertungskorrektur der Aggregat-Größenklasse 1: je nach Gewichtsverhältnis Restgefüge zu Größenklasse 1							
	Abzug						
<1 %	0						
1–5 %	-1						
für jeweils weitere 5 %	zusätzlich je -1						

¹⁾Fragmente werden unterschiedlich bewertet, je nach dem, ob sie eher aus Bröckel (FrBr) oder aus Klumpen (FrKl) entstanden sind. Unterscheidungsmerkmal ist u.a. die Festigkeit: FrBr haben meist eine Festigkeit <4, FrKl meist >3.

3. Erläuterungen

3.1 Gefügegenetik und visuelle Gefügeansprache

Das einzige Beständige am Bodengefüge sind seine stetigen Veränderungen: Einerseits sind kaum wahrnehmbare Gefügeveränderungen in tieferen Bodenschichten ein Ausdruck der langsamen Bodenentstehung und -entwicklung. Andererseits verändert sich das Gefüge im Oberboden sehr kurzfristig und auffällig durch biologische Aktivitäten, durch Witterungseinflüsse und besonders schnell durch bewirtschaftungsbedingte mechanische Kräfte.

Zur Beurteilung des Gefügestandes eines Standortes sind die Gefügeformen unter ungestörten Böden, etwa schonend bewirtschaftete Naturwiesen, als standorttypische Referenz geeignet. Sie ermöglichen, das Ausmass anthropogener Veränderungen zu erkennen.

In einer auf die praktische Anwendung im Feld ausgerichteten Gefügeansprache geht es darum, den momentanen Gefügestand mit möglichst wenig Aufwand so genau wie nötig zu beschreiben. In Zweifelsfällen der Zuordnung von Aggregattypen aufgrund der visuellen Merkmale können die gefügebeeinflussenden Faktoren am Standort, insbesondere die Art der mechanischen Einwirkung, zur Entscheidungsfindung beitragen.

Mit der Darstellung der wichtigsten Gefügeformen, Aggregattypen und Umwandlungsvorgänge (Abbildung 1a und Begleittext) hoffen wir, eine Grundlage für reproduzierbare Gefügeansprachen an einem grossen Teil der landwirtschaftlichen Standorte im Schweizerischen Mittelland und an weiteren, vergleichbaren Standorten geschaffen zu haben. In der vorliegenden Fassung (2002) sind bestimmte Besonderheiten von Waldstandorten und organischen Böden (zum Beispiel die Formen der Schwammgefüge), aber auch seltenere Gefügeformen des Unterbodens (wie Ortstein) noch nicht berücksichtigt.

3.2 Ausführliche Beschreibung der Gefügeformen

Als Grundlage der Gefügeklassifikation werden alle Aggregattypen und die Grundgefüge aufgrund ihrer wichtigsten visuellen Merkmale, ihrer Entstehung und der möglichen Umwandlung zu andern Typen systematisch beschrieben (Tabelle 3a). Die Aggregattypen werden in jeder Grössenfraction einzeln angesprochen (Kapitel 2.4 Abbildung 2b).

Die Beschreibung der Aggregattypen ist auf die sichtbaren Eigenschaften von typischen Exemplaren ausgerichtet. Bei Übergangsformen zwischen genetisch nahestehenden Aggregattypen sind diese Eigenschaften nicht so ausgeprägt ausgebildet und die Zuordnung zu einem Typ nicht eindeutig. Zudem werden die geometrischen Formen vom Tongehalt (und der Art der Tonminerale) beeinflusst: Die Kanten von Prismen oder Polyeder sind im Allgemeinen schärfer bei tonigem Lehm als bei sandigem Lehm.

In Zweifelsfällen bilden weitere Merkmale wie Wurzelverteilung, Tiefe des Vorkommens, Körnung und Wasserhaushalt wichtige Indikatoren für die Festlegung des Aggregattyps. Die Kenntnis der Zeitpunkte von Maschineneinsätzen, der Bearbeitungsverfahren sowie anderer landwirtschaftlicher Bewirtschaftungsmassnahmen erleichtert die Beurteilung der aktuellen Gefügedynamik und die Bestimmung des Aggregattyps im anthropogen beeinflussten Bodenbereich.

Für die Bestimmung des Typs sind die Aggregate in ungestörter Form massgebend. Mechanische Einwirkungen bei der Probenahme, bei der Abwurfprobe und beim Siebvorgang – vor allem bei etwas zu feuchten Proben – können plastische Veränderungen der Bestimmungsmerkmale, etwa der Kanten, bewirken. Deshalb sind zur Bestimmung des Aggregattyps im Zweifelsfall immer auch die Beobachtungen am ungestörten Bodenprofil, an der Bodenprobe vor dem Abwurf und vor dem Sieben einzubeziehen.

Tabelle 3a. Beschreibung der Gefügeformen: 1. Natürliche Aggregattypen

Aggregat- typ	Kurz- beschreibung	Typisches Vor- kommen; Schichten, Horizonte, Grösse	Geometrische Form	Beschaffen- heit der Oberfläche	Anteil sichtbarer Poren [Vol. %]	Entstehung	Häufigste Umwand- lungsvorgänge zu anderen Aggregattypen (und zurück)
Krümel	Anlagerungs- aggregate, vernetzt	oberste, biologisch sehr aktive Boden- schichten, Ah, 0,2–10 mm	unregelmässig buchtige Umrisse, stark unterschiedlich lange Achsen, ohne Kanten	extrem rau bis schwamm- artig, matt	sehr hoch, > 10 %	Granulate, sehr kleine Bodenpar- tikel und infolge Wasserentzug aus- geflockte Tonmineralien und Eisen- oxide (=Feinkoagulate) werden mit Schleimstoffen (Polysaccharide usw.) verklebt und mit Feinwurzeln und Pilzhyphen vernetzt.	sehr rasche Umwandlung zwischen Krümel und Rest- gefüge; jährlich mehr- mals möglich
Granulate	Anlagerungs- aggregate, verkittet	oberste, biologisch sehr aktive Boden- schichten und tiefere Schichten, 0,2–5 mm	vorwiegend rundliche Umrisse, etwa gleich lange Achsen, meist ohne Kanten	rau, matt	mittel, 2–5 %	Feinkoagulate und lose Partikel durch Schleimstoffe von Lebe- wesen verkittet, meist in Form von Kotpillen.	rasche Umwandlung zwischen Granulaten und Krümeln bzw. Rest- gefüge; jährlich mehr- mals möglich
Sub- polyeder	Aggregate mit Absonderung und Anlagerung	obere biologisch aktive Boden- schichten, AB und Ah, 2–50 mm	unregelmässig rund- liche, teils buchtige Umrisse, häufig unterschiedlich lange Achsen, abgerundete Kanten	sehr rau, matt	hoch, 5–10 %	Durch Wirkung der Bodenorganis- men wird die Oberfläche von Boden- teilchen mit Schleimstoffen, Pilz- hyphen, Feinkoagulaten, Mikro- aggregaten und Kotpillen belegt. Diese bilden häufig eine Art Humus- hülle um Bodenteilchen, die zuvor bei Quellungs- und Schrumpfungsvorgängen abgesondert worden sind.	rasche Umwandlung zwischen Subpoly- edern und Krümeln bzw. kleinen Polyeder; jährlich mehrmals möglich
Polyeder	Absonderungs- aggregate, teilweise mit Tonhüllen oder Vernässungs- merkmalen	mittlere biologisch wenig aktive und obere biologisch aktive Boden- schichten, Ah, 2–20 mm / AB, 5–50 mm / Bw, 20–100 mm / Bgx, >100 mm	unregelmässige, meist rundliche Umrisse, meist etwa gleich lange Achsen, stumpfe bis scharfe Kanten; Seitenflächen benach- barter Aggregate oft komplementär	rau, matt, zum Teil mit glatten, glänzenden Tonhüllen	je nach Lagerungs- dichte bzw. Tiefe: mittel (2–5%, Bw) bis gering (1–2%, Bgx)	Kleine Polyeder (20 mm) entstehen in den obersten Bodenschichten infolge Entwässerung grösserer Aggregate (z.B. dickplattige, scharf- kantige durch «Frostgare»). Grösse- re Polyeder entstehen durch episo- disches Quellen und Schrumpfen in mittleren Bodenschichten. Mit der Tiefe nimmt die Grösse der Aggregate infolge der selteneren Feuchtewechsel zu.	rasche Umwandlung zwischen kleinen Poly- edern und Subpolyedern bzw. Restgefüge in der Krume (Ah); mit zuneh- mender Tiefe (AB oder B) und Grösse lang- samere Umwandlung (meist als Grösse- veränderung)
Prismen	Absonderungs- aggregate mit ausgeprägten Tonhüllen, teilweise mit Vernässungs- merkmalen	mittlere biologisch wenig aktive Boden- schichten, Bt, 20–100 mm / Bgx, >100 mm	länglich, längste Achsen vertikal, scharfe Kanten, Seiten- flächen benachbarter Aggregate meist komplementär	rau, matt, vertikale Seiten- flächen mit glatten Tonhüllen	je nach Lagerungs- dichte Poren- anteil mittel (2–5%, Bt) bis gering (1–2%, Bgx)	Durch Quellungs- und Schrump- fungsvorgänge infolge Veränderung des Wassergehalts sondern sich vertikal-längliche Teile vom Kohä- rentgefüge ab. Senkrechte Tonein- waschung und Reibung bewirken dabei Einregulierung der Tonplättchen zu glatten Tonhüllen.	langfristige Umwandlung zwischen Prisma, Poly- eder und Subpolyeder im Bereich B/AB (kurzfristig nur Grösse- veränderungen)

Tabelle 3a. Beschreibung der Gefügeformen: 2. Anthropogen geprägte Aggregattypen

Aggregat- typ	Kurz- beschreibung	Typisches Vor- kommen: Schichten, Horizonte, Grösse	Geometrische Form	Beschaffen- heit der Oberfläche	Anteil sichtbarer Poren [Vol. %]	Entstehung	Häufigste Umwand- lungsvorgänge zu anderen Aggregattypen (und zurück)
Bröckel	mässig verfestigte Aggregate, vorwiegend aus Anlagerungsaggregaten geformt	oberste biologisch aktive Bearbeitungsschicht, Ahp, 5–50 mm	(mechanisch) gerundet, gerollt, geknetet; meist unregelmässig rundliche Umrisse (nicht buchtig), etwa gleich lange Achsen, meist deutlich gerundete Kanten	rau, zum Teil geglättet und verschmiert oder muschelartig gerippt, meist matt, mässig verfestigt	mittel (2–5 %) bis hoch (5–10 %), von Bodenart abhängig	überwiegend durch Verkneten und Zusammenpressen von Krümeln, Granulaten und Subpolyedern; je kleiner die Aggregate, desto höher der Anteil von Anlagerungsaggregaten. Bei Direktsaaten können in den obersten Schichten infolge vertikalen Druckbelastungen horizontal ausgerichtete Bröckel mit zum Teil scharfen Kanten entstehen.	sehr rasche Umwandlung zu Krümeln, Granulaten, Subpolyedern oder Restgefüge
Klumpen	stark verfestigte Aggregate, vorwiegend aus Absonderungsaggregaten geformt	oberste biologisch aktive Bearbeitungsschicht und weitere anthropogen geprägte Bodenschichten, > 20 mm	(mechanisch) gerundet, gerollt, geknetet oder gepresst; unregelmässig rundliche oder eckige Umrisse, etwa gleich lange Achsen, abgerundete oder scharfe Kanten	geglättet und verschmiert, teilweise rau, meist matt, stark verfestigt	gering (< 2 %) bis mittel (2–5 %), von Bodenart abhängig	durch starkes Verkneten bzw. Zusammenpressen bei meist ungünstiger Bodenfeuchte, überwiegend als plastische Verformung von Subpolyedern, Polyedern; je grösser die Aggregate, desto höher der Anteil an Absonderungsaggregaten	langsame Umwandlung zu Subpolyedern, Polyedern und Restgefüge
Fragmente	stark verfestigte Aggregate, durch Zerschlagen entstanden	oberste biologisch aktive Bearbeitungsschicht, Ahp, 2–20 mm	meist stark unregelmässige, eckige Umrisse, stark ungleich lange Achsen, sehr scharfe Bruchkanten	vorwiegend rau, mit ebenen Bruchflächen, meist matt	gering (< 2 %) bis mittel (2–5 %), vom Ausgangsaggregat abhängig	durch mechanisches Zerschlagen von Klumpen, seltener von grossen Bröckeln, Polyedern und Subpolyedern oder durch Auseinanderbrechen von Platten in ausgetrocknetem Zustand	Dauer der Rückbildung zu einem natürlichen Aggregattyp vom Ausgangsaggregat abhängig
Platten	anthropogen gepresste Aggregate	unterhalb Bearbeitungsschicht, meist als Pflugsohle und in Auffüllungen, Ahpx, 20–50 mm / ABx, > 50 mm	(mechanisch) gepresste, horizontale Grenzflächen, längste Achse horizontal	geglättet bis verschmiert	gering (1–2 %)	durch Dichtpressen von Aggregaten, meist bei ungünstiger Bodenfeuchte (= plastische Verformung); meist mit Entlastungsbrüchen	Dauer der Rückbildung zum Typ des Ausgangsgefüges von Lagerungsdichte abhängig

Tabelle 3a. Beschreibung der Gefügeformen: 3. Weitere Formen

Bezeichnung	Kurzbeschreibung	Typisches Vorkommen: Schichten, Horizonte, Grösse	Geometrische Form	Beschaffenheit der Oberfläche	Anteil sichtbarer Poren [Vol. %]	Entstehung	Häufigste Umwandlungsvorgänge zu anderen Gefügeformen (und zurück)
Desaggregiertes Gefüge: Lose Mikroaggregate und Partikel < 0,2 mm							
Restgefüge	lose Mikroaggregate, mineralische Einzelkörner (Feinsand, Schluff, Ton) sowie organische Partikel	an der Bodenoberfläche und zum Teil in Ackerkrumen (Ahp-Horizonte) mit niedrigem Ton- und Humusgehalt, < 0,2 mm	grosse Vielfalt (Lupe)	grosse Vielfalt (Lupe)	keine	gefördert durch den Abbau von Kittsubstanzen werden unter Einwirkung der Witterung (Schlagwirkung des Niederschlags, Luftsprengung bei Wiederbefeuchtung und Frostsprengung) oder Bewirtschaftung (Bodenbearbeitung, Befahrung oder Beweidung) Partikel vom Aggregatverband abgetrennt. Das Restgefüge wird nach Verschlämmungen zum Teil in die oberflächliche Kruste eingebunden.	sehr rasche Umwandlung zwischen Restgefüge und Krümeln bzw. Granulaten, Verweildauer im losgelösten Zustand von der biologischen Aktivität abhängig; Umwandlung jährlich mehrmals möglich
Grundgefüge: ohne Aggregate							
Kohärentgefüge	ungegliederte, zusammenhängende Bodenmatrix	vorwiegend Ausgangsmaterial mit Tongehalt > 10 % und hydromorphe Horizonte, C und BCr	ungegliederte Masse mit Zusammenhalt, zum Teil Strukturen des Ausgangsmaterials erkennbar			besteht meist aus mineralischem Ausgangsmaterial ohne aktuelle Aggregatbildung. Die Kohäsionskräfte werden durch die Körnung und die Kittsubstanzen bestimmt.	äusserst langsame Veränderung zu Aggregatgefügen, in seltenen Fällen reversibel
Einzelkorngefüge	ungegliederte Bodenmatrix ohne Zusammenhalt	vorwiegend Ausgangsmaterial mit Tongehalt < 5 % und hydromorphe Horizonte, C und BCr	ungegliederte lose Masse ohne Zusammenhalt, zum Teil Strukturen des Ausgangsmaterials erkennbar			besteht meist aus losem mineralischem Ausgangsmaterial ohne aktuelle Aggregatbildung, höchstens temporär durch Wassermenisken verbunden (bei mittlerem Wassergehalt)	äusserst langsame Veränderung zu Aggregatgefügen, in seltenen Fällen reversibel
Organisches Gefüge							
Schwammgefüge	miteinander weitvernetzte Anlagerungsaggregate	überwiegend organische Bodenmatrix, organische Substanz > 30 %, Horizonte O und T	ungegliederte, faserige oder schwammartig gegliederte organische Substanz	extrem rau, matt	extrem hoch, > 50 %	abgestorbene organische Substanz wird humifiziert und mineralisiert; aerob: Rohhumus-Moder-Mull; anaerob: Rohhumus-Torf (-Anmoor an aeroben Oberflächen)	teils Abbau zu Kohlendioxid innert Jahresfrist, nicht reversibel

3.3 Fraktionierung von Aggregatgefügen

Die genaue Untersuchung von Bodenschichten zeigt, dass in Bereichen, wo mehrere gefügebildende Prozesse gleichzeitig ablaufen, Aggregate in stark unterschiedlichen Grössen, Formen und Häufigkeiten vorkommen können. Vor allem anthropogen beeinflusste Schichten sind oft sehr heterogen gegliedert. Mit der Profiltiefe nimmt die Homogenität und die Grösse der Aggregate deshalb meist zu.

Mit der Fraktionierung der Gefügeprobe in Grössenklassen von Aggregaten sind folgende Vorteile verbunden:

- Einblick in die Grössenverteilung der Aggregate
- Sicheres Erkennen von vorhandenen Aggregattypen, weil die Variation der Aggregatformen innerhalb einer Fraktion meist deutlich kleiner ist als in der Gesamtprobe
- Möglichkeit, auf feldtaugliche Art (durch Wägen oder Schätzen des Volumenanteils der verschiedenen Fraktionen) den Gefügestand, zum Beispiel durch die mittlere Aggregatgrösse, semi-quantitativ zu beschreiben (Kapitel 2.4)

Da mit der Grösse der Aggregate im Allgemeinen die Dichte zu- und das Porenvolumen abnimmt, wird mit einer Fraktionierung der Probe auch eine Grundlage für die qualitative Beurteilung des Gefüges geschaffen (Kapitel 2.5 und Kapitel 3.5). Als Masszahl für die Aggregatgrösse der Gesamtprobe kann der gewogene mittlere Durchmesser (GMD) aller Fraktionen berechnet werden («Mittlere Aggregatgrösse» in Abbildung 2c).

Die Feinheit der Fraktionierung wird im Allgemeinen vom Untersuchungsziel abhängen. Für gründliche Beurteilungen empfehlen wir, die Aggregate der Proben in 7 makroskopische Grössenklassen (Abbildung 2c und Kapitel 3.6) und das Restgefüge ($< 0,2$ mm) zu unterteilen. Dabei kommen handels-

übliche Prüfsiebe mit unterschiedlichen quadratischen Maschenweiten zum Einsatz, wobei der kleinste Querschnitt des Aggregates für seine Klassenzugehörigkeit massgebend ist. Da grosse Aggregate (> 50 mm) in den benötigten Probengrössen von wenigen Kilogramm Boden nur in geringer Anzahl vorkommen, genügt ein Metermass, um sie der richtigen Grössenklasse zuteilen zu können.

Methodische Probleme

Gross-Aggregate:

Die Entscheidung, ob ein Gross-Aggregat aus einigen zusammenhängenden Polyedern zusammengesetzt oder ein einzelnes grosses Prisma ist, wird subjektiv beeinflusst, indem zur Trennung mit den Fingern beider Hände «leichte» Zug- oder Scherkräfte auf das fragile Gross-Aggregat ausgeübt werden (Kapitel 2.4).

Bodenfeuchte:

Die Fraktionierung soll in brüchigem Zustand erfolgen (Saugspannung 100 bis 1000 hPa). Bei zu feuchten Proben von bindigen Böden kleben die Aggregate stark aneinander. So verformen sich auch bei sanftem Sieben Kanten und Oberflächen plastisch. Dadurch werden wichtige Unterscheidungsmerkmale der verschiedenen Aggregattypen verändert. Nicht zuletzt verschmieren die Siebe und werden unpräzise.

Steingehalt:

Steine, die nicht deutlich in Aggregate integriert sind, müssen vor der Bestimmung des Gewichts oder vor der Schätzung des Volumenanteils aus den Fraktionen entfernt werden. Bei hohem Gehalt an kleinen Steinen wird es im Allgemeinen zu aufwändig sein, diese vor oder nach der Fraktionierung zu entfernen. Eine Korrektur ist möglich durch Schätzen und Subtrahieren des Steinanteils oder durch Abschlämmen der Feinerde und Bestimmen des Steingewichtes in den Fraktionen.

3.4 Mechanische Eigenschaften des Gefüges

Mit den mechanischen Eigenschaften eines Gefüges sind die Reaktionen des Bodengefüges auf statische oder dynamische Kräfte gemeint. Zur Untersuchung dieser Reaktionen können Messgeräte wie Penetrometer für *in-situ*-Messungen eingesetzt oder ungestörte Proben für Labormessungen der Aggregatstabilität entnommen werden. Zweck solcher Untersuchungen ist es, Aussagen zu machen über die Stabilität des Gefüges gegenüber mechanischen Belastungen, aber auch über die Widerstände, die das Gefüge dem Wurzelwachstum entgegengesetzt («Eindringwiderstand»).

Für direkte Beobachtungen des mechanischen Zusammenhalts bietet sich bei Felduntersuchungen die Abwurfprobe an. Dabei wird ein möglichst ungestörter Gefügeteil, der zum Beispiel mit dem Spaten sanft aus dem Boden gelöst wurde, aus etwa 1 m Höhe (= Hüfthöhe) auf eine glatte Unterlage fallen gelassen. Aus dem Anteil des auseinandergefallenen Bodenmaterials der Probe wird eine Aussage über den Zusammenhalt zwischen den Aggregaten im Gefügeverband, das heisst über den sogenannten Zusammenhalt des Gefüges, abgeleitet. Bei der visuellen Gefügebeurteilung werden 5 Stufen des Zusammenhaltes unterschieden (Kapitel 2.4, Abbildung 2b; Kapitel 3.6, Tabelle 3c).

Zur Beurteilung der Festigkeit von Einzelaggregaten dient in der visuellen Gefügeansprache ein Fingertest. Dazu presst man das Aggregat zwischen Daumen und Zeigefinger zusammen. Aus dem Druck, der nötig ist, um das Aggregat zu zerteilen, wird auf seine Druckfestigkeit geschlossen. Es werden fünf Stufen der Aggregat-Festigkeit unterschieden (Kapitel 2.4, Abbildung 2b; Kapitel 3.6, Tabelle 3c).

Methodische Probleme und Details

Bodenfeuchte

Die beiden vorgeschlagenen Methoden sind nur dann sinnvoll, wenn die Saugspannung des Wassers in der Probe zwischen 100 und 1000 hPa (bzw. pF 2 und pF 3) liegt. Bei zu feuchtem Boden kann entweder der Boden vor der Probenahme gegen Niederschlag geschützt oder die Bodenprobe nachgetrocknet werden. Zu trockener Boden weist gegenüber feuchtem Boden stark veränderte mechanische Eigenschaften auf.

Abwurfprobe

Bei der Abwurfprobe von stark durchwurzelten Proben ist zu berücksichtigen, dass grössere Wurzeln viel zum mechanischen Zusammenhalt beitragen. Nur durch sichtbare Wurzeln zusammengehaltene Aggregate sind dem auseinandergefallenen Teil zuzurechnen.

Festigkeit

Die Prüfung der Festigkeit mittels Fingerdruck erfolgt fraktionsweise (Kapitel 3.3) und sollte pro Fraktion an mindestens drei Aggregaten gemacht werden. Meist ist die Festigkeit innerhalb einer Grössenklasse ziemlich konstant, nimmt jedoch mit der Grösse im Allgemeinen zu. Die Festigkeit kleiner Aggregate lässt sich mit der Hand schlecht bestimmen, deshalb wird sie für die Fraktion 0,2-2 mm nicht getestet. Da die Druckausübung mit den Fingern subjektiv ist, ist die Reproduzierbarkeit vor allem im mittleren Festigkeitsbereich nicht immer gewährleistet.

3.5 Gefügequalität

Die Gefügeklassierung und die Aggregierungsanalyse sollen zum Beispiel Rückschlüsse auf die Qualität eines Gefüges als Pflanzenstandort sowie auf die Einflüsse von vorangegangenen Bodenbearbeitungen oder von Rekultivierungsarbeiten ermöglichen. Die Ergebnisse der visuellen Gefügeansprache können diesbezüglich ausgewertet und interpretiert werden. Die Eigenschaften der Gefügeformen oder Aggregattypen und -grössen liefern zum Beispiel Hinweise zur Porenverteilung, zur Lagerungsdichte sowie zur mechanischen Stabilität. Wir beschränken uns hier auf die Ansprüche von Kulturpflanzen mit Augenmerk auf die Wurzeln.

Aus Untersuchungen weiss man, dass sich Grösse und Lagerungsdichte der Aggregate als limitierende Faktoren für das Pflanzenwachstum erweisen können (De Freitas 1996) oder dass die Wurzellänge in Aggregaten mit der Grösse und Festigkeit der Aggregate abnimmt (Misra 1988; De Freitas 1999). Horn (1987) wies nach, dass der Eindringwiderstand mit der Grösse der Aggregate zunimmt, falls die Aggregate die Möglichkeit zur Ausdehnung haben.

Für praktische Belange hat Diez (1991) zur Beurteilung der Gefügeform im Hinblick auf das Pflanzenwachstum ein Schema mit 5 Stufen vorgeschlagen, aufbauend auf der «Görbingschen Spatendiagnose». Da die visuelle Gefügeansprache zusätzliche Aggregatmerkmale wie Grösse und Festigkeit in die Beurteilung einbezieht und zudem in der Ansprache der Gefügeformen detaillierter ist, benötigt sie ein eigenes, umfangreicheres Schema.

Bei unserem empirischen Ansatz sind in erster Linie der Aggregattyp und das Vorkommen im Bodenprofil für die Gefügequalität und die Bewertung («Typwert») massgebend. Bewertet wird in einer ordinalen Skala mit Stufenwerten zwischen 1 und 9 (Tabelle 3b). In zweiter Linie sind die untersuchten Merkmale Aggregatgrösse, Zusammenhalt des Gefüges und Festigkeit der Aggregate zu berücksichtigen.

Zur einfachen Anwendung schlagen wir vor, die Aggregatgrösse durch eine Anhebung des «Typwertes» um bis zu 5 Stufen zu bewerten (Kapitel 2.5, Abbildung 2c) und ungünstige mechanische Eigenschaften in Form einer Zurückstufung um bis zu 4 Stufen zu berücksichtigen (Kapitel 2.5, Tabelle 2b). Die Beurteilung wird in jeder Fraktion vorgenommen und führt durch Gewichtung mit dem Gewichts- oder Volumenanteil schliesslich zu einer Gesamtbeurteilung des Gefüges (Kapitel 2.4, Abbildung 2b).

Je nach Verhältnis zwischen desaggregierenden und aggregierenden Vorgängen variiert der Anteil des Restgefüges, das heisst der Partikel, die durch das 0.2 mm Sieb fallen. Ein grosser Anteil solcher Mikroaggregate und loser mineralischer beziehungsweise organischer Kleinstpartikel deutet auf eine Dominanz desaggregierender Prozesse hin. In unserem Ansatz sind deshalb Abzüge in der Bewertung der Fraktion 1 (0,2-2 mm) gemäss dem Mengenverhältnis zwischen Restgefüge und Fraktion 1 vorgesehen (Kapitel 2.5, Abbildung 2c).

Tabelle 3b. Beurteilung der pflanzenbaulichen Gefügequalität

Aggregattyp bzw. Gefügeform	überwiegendes Vorkommen im Bodenprofil (Bodenhorizont)	pflanzenbauliche Qualität	Typwert
Anlagerungsaggregate: Krümel, Granulate	oberste, biologisch sehr aktive Bodenschichten (Ah)	sehr hoch	9
Anlagerungs- und Absonderungsaggregate: Subpolyeder	obere, biologisch aktive Bodenschichten (AB, Ah)	sehr hoch	8
Absonderungsaggregate: sehr kleine Polyeder, z.B. bei Frostgare	oberste, biologisch aktive Bodenschichten (Ahp)	hoch	6
Anthropogen geprägte Anlagerungs- und Absonderungsaggregate: Bröckel	oberste, biologisch aktive Bodenschichten (Ahp)	hoch	7
Anthropogen geprägte Absonderungs- aggregate: runde Klumpen	oberste, biologisch aktive Bodenschichten (Ahp)	mittel	5
Anthropogen geprägte Absonderungs- aggregate: kantige Klumpen, Platten	oberste, biologisch aktive Bodenschichten (Ahp) und weitere anthropogen geprägte Bodenschichten	mittel	3
Absonderungsaggregate, intensive Boden- bildung: mittlere Polyeder, Prismen	mittlere biologisch wenig aktive Bodenschichten (Bw, Bt)	mittel	5
Absonderungsaggregate, mässig intensive Bodenbildung: grosse Polyeder, Prismen	mittlere biologisch kaum aktive Bodenschichten (Bg, BC)	mittel	4
Grundgefüge ohne Aggregate: Kohärentgefüge	Unterboden, Ausgangsmaterial; BC, C	gering	2
Grundgefüge ohne Aggregate: Einzelkornggefüge	Unterboden, Ausgangsmaterial; BC, C	gering	1

Ausblick

Im Problemkreis «Gefügequalität» gibt es viele Fragestellungen, bei denen die visuelle Gefügeansprache eingesetzt werden kann. Wir greifen hier willkürlich ein paar heraus:

- Ansprüche der verschiedenen Kulturpflanzen an die Gefügeform
- Herausarbeiten von Gefüge-Referenzwerten («Standortoptimum») für die landwirtschaftliche Praxis an repräsentativen Standorten
- Zusammenhang zwischen dem Anteil an Restgefüge und der biologischen Aktivität, der Gefügestabilität beziehungsweise der Verschlammungsgefahr
- Wenn wir die Luft und das Wasser in ihren Poren einziehen, können Aggregate auch als Kleinbiotope des Bodens angesehen werden. Zusammenhang zwischen der Gefügeform als Habitat und der sie besiedelnden Lebensgemeinschaft?

3.6 Überblick visuelle Gefügeansprache

Die visuelle Gefügeansprache umfasst die Klassifikation sämtlicher Aggregat- und Gefügeformen in einem bestimmten Bereich des Bodens (Bodenschicht oder Horizont) gemäss den definierten Aggregattypen und Grundgefüge-Formen (Kapitel 1.3 und 3.2). Zur weiteren Beschreibung werden die Merkmale «Grösse der Aggregate» (Kapitel 3.3), «Zusammenhalt des Gefüges» (Kapitel 3.4) und «Festigkeit der Aggregate» (Kapitel 3.4) angesprochen. Bei den Aggregatgefügen entspricht der

Zusammenhalt des Gefüges dem Zusammenhalt zwischen benachbarten Aggregaten im Gefügeverband.

In Tabelle 3c sind die verschiedenen Ausprägungsklassen der Merkmale «Grösse der Aggregate», «Zusammenhalt des Gefüges» und «Festigkeit der Aggregate» gegeneinander abgegrenzt. Die Eigenschaften von Aggregaten desselben Typs streuen meistens in einem typischen Bereich bezüglich dieser drei Merkmale (Tabelle 3d).

Tabelle 3c. Klassenabgrenzung der Merkmale «Grösse der Aggregate», «Zusammenhalt des Gefüges» und «Festigkeit der Aggregate»

Merkmalsname	Grösse der Aggregate	Zusammenhalt des Gefüges (= Zusammenhalt zwischen den Aggregaten im Gefügeverband)	Festigkeit der Aggregate
Bestimmungsverfahren	Siebe mit quadratischer Maschenweite bzw. Metermass	Fall der Bodenprobe in ein Gefäss aus 1 m Höhe und Schätzen des Anteils der Probe, der in Einzelaggregate zerfallen ist	Reaktion der Aggregate auf Druck, der zwischen zwei Fingern ausgeübt wird
Klasse 1	0,2–2 mm	Zusammenhalt sehr schwach, zerfällt ohne Fallprobe (bei Entnahme) restlos	Sehr leicht zerdrückbar, zerfallen beim Berühren
Klasse 2	2–5 mm	Zusammenhalt schwach, zerfällt bei Aufprall restlos	Leicht zerdrückbar, zerfallen unter geringem Druck
Klasse 3	5–10 mm	Zusammenhalt mässig stark, zerfällt bei Aufprall mehrheitlich (>50 Vol. %)	Mässig leicht zerdrückbar, zerfallen unter mässig starkem Druck
Klasse 4	10–20 mm	Zusammenhalt stark, zerfällt bei Aufprall zum kleineren Teil (10–50 Vol. %)	Schwer zerdrückbar, zerfallen unter starkem Druck
Klasse 5	20–50 mm	Zusammenhalt sehr stark, zerfällt bei Aufprall kaum (<10 Vol. %)	Sehr schwer zerdrückbar, halten jedem Fingerdruck stand
Klasse 6	50–100 mm		
Klasse 7	>100 mm		

Tabelle 3d. Typische Ausprägungen der Merkmale «Grösse der Aggregate», «Zusammenhalt des Gefüges» und «Festigkeit der Aggregate»

Aggregattypen bzw. Gefügeform	Code	Grösse der Aggregate	Zusammenhalt des Gefüges	Festigkeit der Aggregate
Klassenabgrenzung siehe Tabelle 3c				
Natürliche Aggregate				
Anlagerungsaggregate:				
Krümel	Kr	1-3	1-2	1-3
Granulate	Gr	1-2	1-2	2-4
Aggregate mit Absonderung und Anlagerung:				
Subpolyeder	Sp	2-5	1-3	1-4
Absonderungsaggregate:				
Polyeder	Po	2-7	2-5	2-5
Prismen	Pr	5-7	2-5	2-5
Anthropogen geprägte Aggregate				
Umgeformte Aggregate:				
Bröckel	Br	3-5	1-3	2-4
Klumpen rund	Klr	5-7	1-3	3-5
Klumpen kantig	Klk	5-7	3-5	3-5
Platten	Pl	5-7	2-5	3-5
Zerschlagene Aggregate:				
Fragmente	Fr	2-4	1-2	2-5
Zersetztes Gefüge				
Restgefüge locker	Rg	<1	1	
Restgefüge verkrustet	Rgk	3-7	2-5	
Grundgefüge				
Kohärent	Ko		2-5	
Einzelkorn	Ek		1	

Anhang 1: Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abbildungen		Seite
Abbildung 1a	Wichtige Gefügeformen, Aggregattypen und Umwandlungsvorgänge	12
Abbildung 1b	Aggregattypen und Gefügeformen: Kurzbeschreibung und Vorkommen im Bodenprofil	14 - 15
Abbildung 2a	Ablauf der visuellen Gefügeansprache	73
Abbildung 2b	Aufnahme- und Auswertungsformular visuelle Gefügeansprache (mit Beispiel)	76
Abbildung 2c	Vorschlag zur pflanzenbaulichen Bewertung des Gefüges aufgrund von Aggregattyp und -grössenklasse	79
In Anhang 4:		
Abbildung 4a	Zeitliche Veränderung der Aggregatverteilung nach Typ und Grösse	93
Abbildung 4b	Einfluss des Befahrens mit schweren Maschinen auf die Aggregatgrössenverteilung	93
Tabellen		
Tabelle 1a	Fachausdrücke zum Thema Bodengefüge	11
Tabelle 2a	Schlüssel zur Bestimmung des Aggregattyps aufgrund visueller Merkmale	72
Tabelle 2b	Bewertungskorrektur für ungünstige mechanische Eigenschaften des Gefüges bzw. der Aggregate	78
Tabelle 3a	Beschreibung der Gefügeformen: 1. Natürliche Aggregattypen, 2. Anthropogen geprägte Aggregattypen, 3. Weitere Formen	81 - 83
Tabelle 3b	Beurteilung der pflanzenbaulichen Gefügequalität	87
Tabelle 3c	Klassenabgrenzung der Merkmale «Grösse der Aggregate», «Zusammenhalt des Gefüges» und «Festigkeit der Aggregate»	88
Tabelle 3d	Typische Ausprägungen der Merkmale «Grösse der Aggregate», «Zusammenhalt des Gefüges» und «Festigkeit der Aggregate»	89

Anhang 2: Verzeichnis der Bildtafeln in Kapitel 2.2

Aggregattyp	Grössen- klasse	Seite	Aggregattyp, Gefügestufe	Grössen- klasse	Seite
Fünf Aggregattypen der Grössenklasse 3 im Vergleich	3	18	Mittlere Bröckel	4	43
Fünf Aggregattypen der Grössenklasse 5 im Vergleich	5	19	Kleine Polyeder	4	45
Kleine Krümel und Granulate	1	21	Grosse Fragmente	4	47
Mittlere Krümel	2	23	Sehr grosse Subpolyeder	5	49
Kleine Subpolyeder	2	25	Grosse Bröckel	5	51
Extrem kleine Polyeder	2	27	Mittlere Polyeder	5	53
Kleine Fragmente	2	29	Kleine Prismen	5	55
Grosse Krümel	3	31	Kleine Klumpen	5	57
Mittlere Subpolyeder	3	33	Grosse und sehr grosse Polyeder	6/7	59
Kleine Bröckel	3	35	Mittlere und grosse Prismen	6/7	61
Sehr kleine Polyeder	3	37	Mittlere und grosse Klumpen	6/7	63
Mittlere Fragmente	3	39	Kohärentgefüge		65
Grosse Subpolyeder	4	41	Einzelkorngefüge		67
			Restgefüge		69

Anhang 3: Literaturverzeichnis

- AG Boden, 1994. Bodenkundliche Kartieranleitung 4. Aufl., 392 S. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Becher H. H., 2000. Gefüge/Morphologie. In: Blume et al., Handbuch der Bodenkunde Kapitel 2.6.2.1., 19 S. ecomed, Landsberg/Lech.
- Blume H.P., 1992. Handbuch des Bodenschutzes 2. Auflage, 794 S. ecomed Landsberg/Lech.
- Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit, Band 2 Bodengefüge 1991. Berichte über Landwirtschaft 204. Sonderheft, 152 S. Paul Parey, Hamburg und Berlin.
- De Freitas P.L., Zobel R.W. and Snyder V.A., 1996. A method for studying the effects of soil aggregate size and density. Soil Sci. Soc. Am. J., 60, 288-290.
- De Freitas P.L., Zobel R.W. and Snyder V.A., 1999. Corn root growth in soil columns with artificially constructed aggregates. Crop Science, 39, 725-730.
- Diez Th., 1991. Beurteilung des Bodengefüges im Feld. In: Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit, Band 2 Bodengefüge 1991. Berichte über Landwirtschaft 204. Sonderheft, S. 96-103. Paul Parey, Hamburg und Berlin.
- FAL, 1997. Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden. Schriftenreihe der Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, 24, 133 S. Zürich-Reckenholz.
- Hasinger G., Keller L., Marendaz E., Neyroud J.-A., Vökt U. und Weisskopf P., 1993. Bodenbeurteilung im Feld 15 S. Landwirtschaftliche Beratungszentrale CH-Lindau.
- Horn R., Stork J. und Dexter A. R., 1987. Untersuchungen über den Einfluss des Bodengefüges für den Eindringwiderstand in Böden. Z. Pflanzenernährung Bodenk., 150, 342-347.
- Misra R. K., Dexter A. R. and Alston A. M., 1988. Root growth and phosphorus uptake in relation to the size and strength of soil aggregates. Soil & Tillage Research, 11, 117-132.
- Mückenhausen E., 1985. Bodenkunde, 3. Aufl., 579 S. DLG-Verlag, Frankfurt (Main).
- Scheffer/Schachtschabel, 1998. Lehrbuch der Bodenkunde, 14. Aufl., 494 S. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart.
- Tisdall J.M. and Oades J.M., 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. Journal of Soil Science, 33, 141-163.

Anhang 4: Beispiele zur Anwendung der visuellen Gefügeansprache

Die folgenden Beispiele von Anwendungen der visuellen Gefügeansprache an Versuchstandorten der FAL zeigen Einsatzmöglichkeiten auf. So lassen sich etwa Veränderungen der Grössenverteilung von Aggregaten durch die Einwirkung von Bodenbearbeitungsgeräten, aber auch als Folge der Gefügeregeneration in der Zeit zwischen zwei Bodenbearbeitungen («Reaggregation») interpretieren (Abbildung 4a).

Abbildung 4a. Zeitliche Veränderung der Aggregatverteilung nach Typ und Grösse: Gefügeentwicklung durch Umformung, Desaggregation und Neubildung von Aggregaten in der Ackerkrume Ahp einer typischen Braunerde; Rümliang ZH.

Ein zweites Anwendungsgebiet sind Belastungsvergleiche. So nahm etwa in einem Befahrungsversuch mit einem sechsreihigen Zuckerrübensvollernter die mittlere Grösse der Aggregate mit der Anzahl Überfahrten stark zu (Abbildung 4b).

Abbildung 4b. Einfluss des Befahrens mit schweren Maschinen auf die Aggregatgrössenverteilung. 2 Wiederholungen jeweils «blind» beurteilt, das heisst die visuelle Gefügeansprache erfolgte ohne Kenntnis des Verfahrens. Alluviale Kalkbraunerde; Frauenfeld, November 1999.

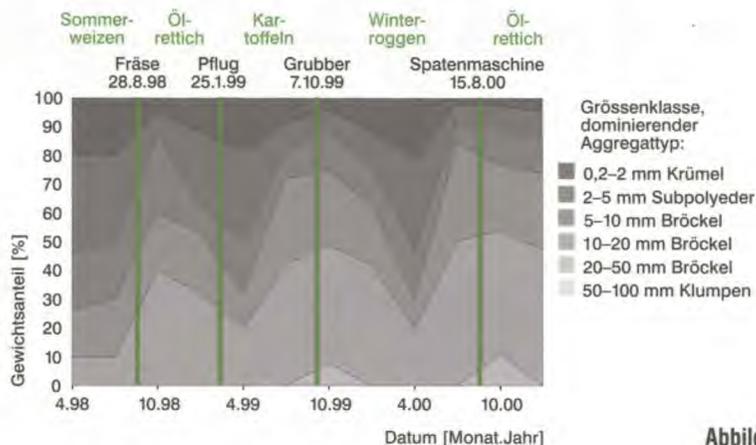


Abbildung 4a

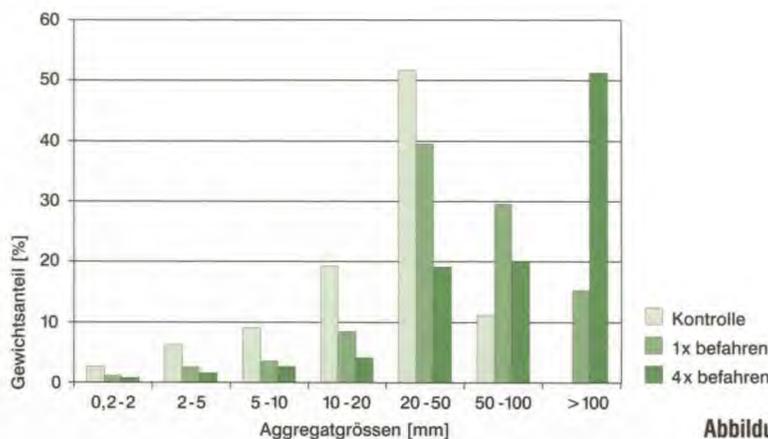


Abbildung 4b