

Zum Stand der Bewertung des Zerkleinerungsergebnisses bei der Saatbettbereitung

Siegfried Anisch, André Grosa, Tim Bögel, Thomas Herlitzius

Gegenwärtig existieren für die Zielgrößen der zu erreichenden Arbeitsergebnisse der Bodenbearbeitung nur ungenaue und kaum physikalisch messbare Parameter. Dadurch werden sowohl das Prüfen, Vergleichen und Bewerten der Arbeitsqualität der Maschinen als auch das Entwickeln der dafür geeigneten Sensoren erschwert. Bis 1990 wurden an der TU Dresden Forschungsarbeiten zu den Gesetzmäßigkeiten und der Ermittlung der Aggregatgrößenzusammensetzung des Ackerbodens durchgeführt. Auf Grundlage dessen werden in dieser Studie Vorschläge zum Ermitteln, Darstellen und Bewerten des Zerkleinerungsergebnisses sowie zur Kennzeichnung der Feldbedingungen aufgezeigt.

Schlüsselwörter

Saatbettbereitung, Aggregatgrößenzusammensetzung, Siebanalyse, Klutenbruchkraft, Punkt-Last-Index

Die Zerkleinerung des Ackerbodens ist auf schwer bearbeitbaren bindigen Böden eine Hauptaufgabe bei der Saatbettbereitung. Sie wird mit passiven (gezogenen) und/oder aktiven (von der Traktorzapfwelle angetriebenen) Werkzeugen vorgenommen.

In der landwirtschaftlichen Praxis wird visuell abgeschätzt, ob ausreichend Feinboden für das Einbetten der Saat und grobe Gefügeaggregate, die der Verschlammung und dem Oberflächenabfluss entgegenwirken, vorhanden sind (DIEZ et al. 2012).

Bei der Maschinenprüfung wird die visuelle Beurteilung des Saatbettes durch die Analyse mit einem Rundloch-Schwingsiebsatz unterstützt und das Zerkleinerungsergebnis durch die Aggregatgrößenzusammensetzung des Bodens gekennzeichnet (BREHM 2009, SCHUCHMANN 2014). Vor diesem Hintergrund können vergleichende Bewertungen der Maschinen vorgenommen werden, wenn die Untersuchungen unter den gleichen Feldbedingungen stattfinden. Es entstehen jedoch größere Messfehler infolge Prallzerkleinerung und Abrieb auf dem Schwingsiebsatz. Bis zum Erhalt eines Ergebnisses ist ein beträchtlicher Arbeits- und Zeitaufwand erforderlich.

Zur Bewertung des Zerkleinerungsergebnisses werden aber auch der Aufwand, die Fruchtarten- und standortspezifischen Zielp Parameter sowie vergleichbare Bodeneigenschaften benötigt. Hierfür sind einfach anwendbare, objektive und reproduzierbare Methoden erforderlich.

Gesetzmäßigkeit der Aggregatgrößenzusammensetzung des Bodens

Bei der Aufbereitung von Grundstoffen (Kohle, Gestein usw.) wird seit Jahrzehnten das Zerkleinerungsergebnis mit dem Siebrückstand R als prozentualer Gemisch-Masseanteil anhand einer doppelten Exponentialfunktion dargestellt, die in einem doppelt logarithmisch geteilten Diagramm (RRSB-Diagramm nach Rosin/Rammler/Sperling/Bennett) eine Gerade ergibt (RAMMLER 1937).

Davon ausgehend konnte mit ausgewählten Bodenbearbeitungswerkzeugen auf unterschiedlichen Standorten (über 500 Proben) der Nachweis erbracht werden, dass diese Gesetzmäßigkeit auch für die Aggregatgrößenzusammensetzung des Ackerbodens nach der mechanischen Bodenbearbeitung gilt (HILLIG 1987, SOUCEK und PIPPIG 1990).

Die Auswertung von 79 Prüfergebnissen von Grubbern und Scheibeneggen aus 21 Prüfberichten (5207F bis 5217F; 5897F; 6029F; 6110F; 6151F; 6153F; 6166F; 6255F bis 6257F) des DLG-Testzentrums Technik und Betriebsmittel bestätigt die vorhandene Gesetzmäßigkeit für Böden, die zur Saatbettbereitung zerkleinert werden müssen. Das ist beispielhaft in Abbildung 1 zu erkennen (ANISCH 1990, BREHM 2009).

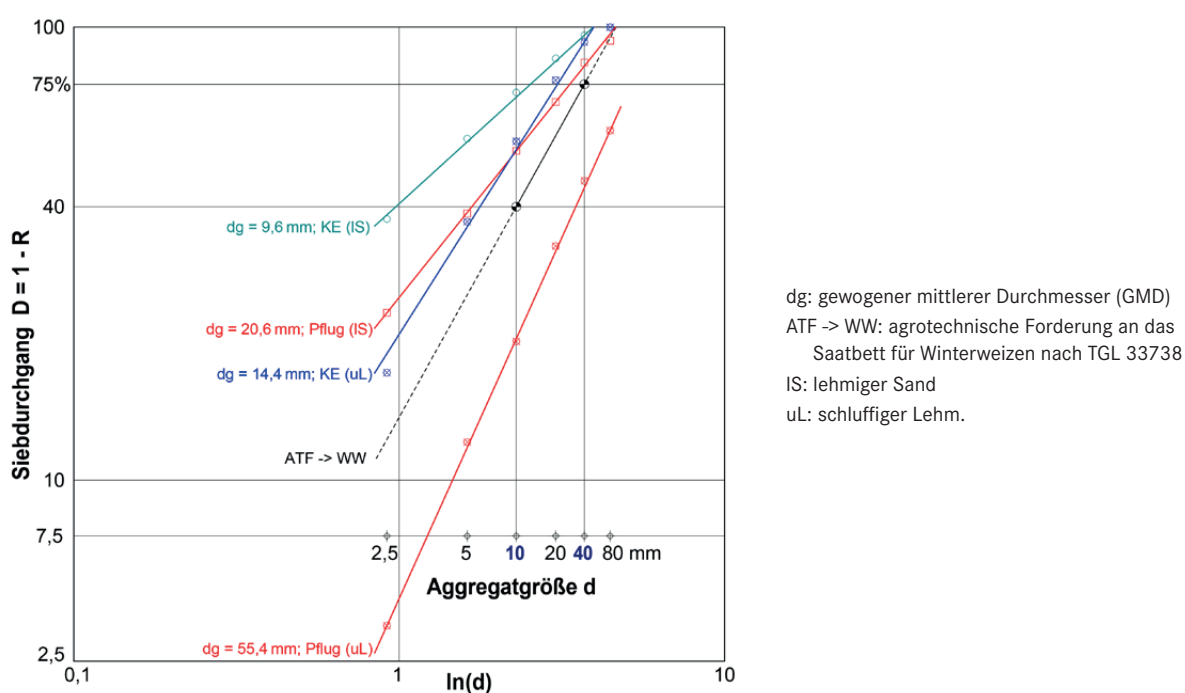


Abbildung 1: Zerkleinerungsergebnis der Kreiselegge KE 3000S nach DLG-Prüfbericht 5897F (BREHM 2009) im doppelt logarithmisch geteilten Diagramm nach RAMMLER (1937)

Unter Anwendung dieser Gesetzmäßigkeit sind für das Ermitteln eines auf dem Acker vorliegenden Zerkleinerungsergebnisses nur noch zwei Messwerte für den Siebdurchgang oder Siebrückstand erforderlich.

Diese lassen sich dann mit den geforderten Zielgrößen, wie sie beispielsweise in den Forderungen des ehemaligen Standards TGL 33738 (1984) enthalten sind, vergleichen (Tabelle 1).

Tabelle 1: Aggregatgrößenzusammensetzung für ein Saatbett

Siebdurchgang	Agrotechn. Forderung nach TGL 33738 [%]			Prüfergebnis DLG 5897F (BREHM 2009) [%]		Bodenart
	Weizen	Roggen & Gerste	Raps	Pflug	Kreiselegge	
D10	> 40	> 45	> 75	20,4 53,4	56,3 72,1	uL IS
D40	> 75	> 80	> 90	46,3 84,3	93,3 94,6	uL IS

Ermittlung des Zerkleinerungsergebnisses

Bei der experimentellen Untersuchung und Prüfung von Saatbettbereitungsgeräten wird immer noch die Siebanalyse benutzt, um reproduzierbare Werte zu erhalten (ANKEN 1996, BREHM 2009). Das ist mit hohen Aufwänden durch Entnahme und Transport der Bodenproben, deren Trocknung und dem Klassieren mit dem mechanischen Schwingsiebsatz verbunden. Zudem entstehen durch Abrieb und Zerkleinerung der Bodenaggregate in den zahlreichen Fallstufen des Siebsatzes größere Fehler. Mit dem errechneten „gewogenen mittleren Durchmesser“ (GMD; dg) können keine Bezüge zu einer erforderlichen Aggregatgrößenzusammensetzung des Saatbettes hergestellt werden.

Die Kenntnis der oben festgestellten Gesetzmäßigkeit der Aggregatgrößenzusammensetzung des Ackerbodens ermöglichte die Erstellung eines tragbaren, leicht handhabbaren Gerätes (Abbildung 2). Mit ihm wird eine Bodenprobe schaufelartig entnommen und die auf zwei Siebflächen verbleibenden Rückstände $R > 10$ mm und $R > 40$ mm werden sofort als Anteil der Probenmasse ermittelt (ANISCH 1990). Die Gesamtmasse wird auf 100 % kalibriert, danach R10 sowie R40 herausgesiebt und deren relativer Masseanteil bestimmt.

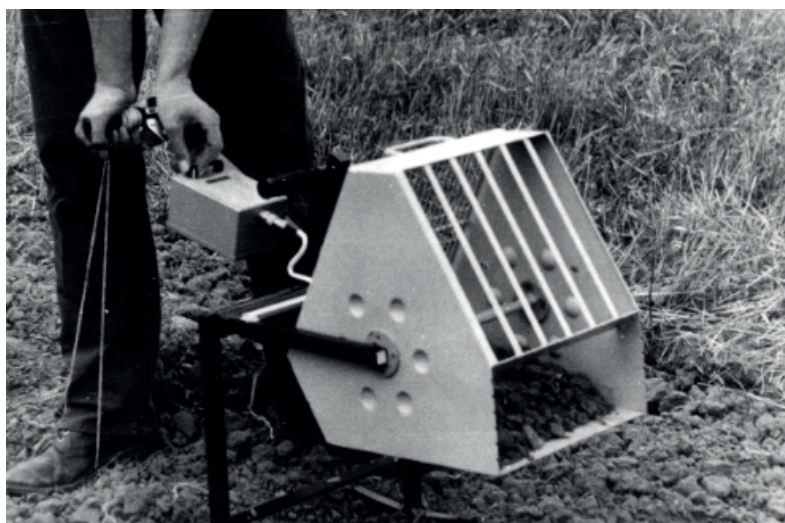


Abbildung 2: Siebschaufel beim Wiegen der Bodenprobe

In Abbildung 3 wird eine einfache Schürf- und Siebvorrichtung vorgeschlagen, mit welcher die Anteile der Aggregatgrößen $d > 10$ mm und $d > 40$ mm bei Verwendung einer digitalen Waage mit geringem Aufwand auf dem Feld ermittelt werden können.

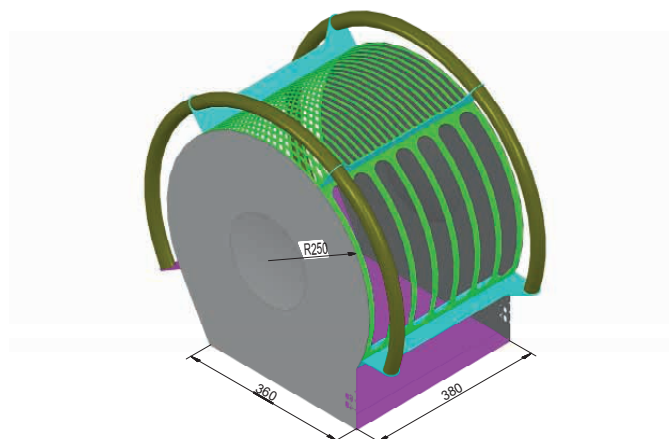


Abbildung 3: Schürf- und Siebvorrichtung für R10 und R40; Maßangaben in mm

Mit den in Abbildung 2 und 3 gezeigten Vorrichtungen ist ein Versuchstechniker bereits während der Felderprobung/Prüfung von Saatbettbereitungsmaschinen in der Lage, statistisch gesicherte Ergebnisse über die erzielte Zerkleinerung in weniger als einer Stunde zu ermitteln.

Ermittlung des Zerkleinerungsergebnisses aus Kenngrößen der Saatbettoberfläche

Die in der oberen Schicht befindlichen Bodenaggregate gestalten die optischen und geometrischen Eigenschaften der Oberfläche. RIEGLER et al. (2014) untersuchten mit einem Stereo-Vision-System (SVS) die Veränderung der Ackeroberfläche durch die Bodenbearbeitung (Rauheit, Volumenänderung). Bezüglich der Zerkleinerung werden keine Aussagen gemacht.

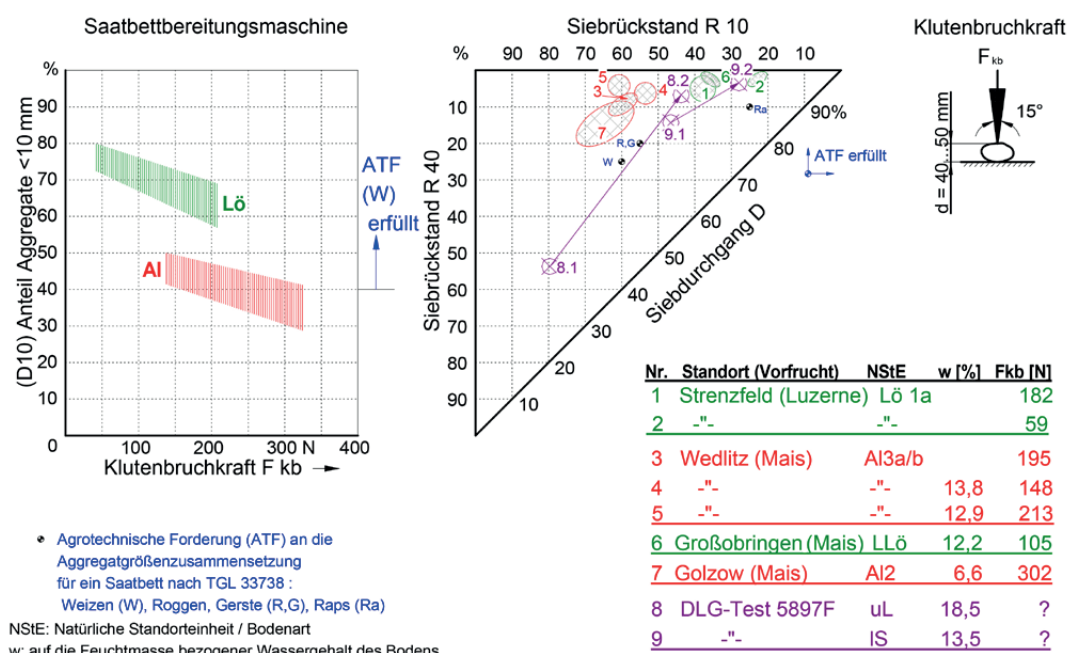
Mit der Bonitur werden die Anzahl oder Flächenanteile ausgewählter Aggregatgrößen (z. B. $d > 40$ mm) visuell ermittelt („Fünfliberprobe“ nach ANKEN 1996). Die Ergebnisse sind nur geschätzt und nicht reproduzierbar.

Über die mittels Profilmeter (Laser-Profilmeter) gemessene Rauigkeit der Feldoberfläche lassen sich Korrelationen zur Siebanalyse herstellen, wenn der finale Bearbeitungsschritt mit zinkenförmigen Werkzeugelementen erfolgte. Dabei können Bestimmtheitsmaße von $R^2 = 0,64$ erreicht werden (ANKEN 1996).

Bessere Beziehungen zur Siebanalyse weist die optische Beurteilung der Saatbettoberfläche mit einer von der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT) entwickelten digitalen Bildanalyse auf (ANKEN 1996). Hierbei werden die Schattenflächen der mit vier orthogonal versetzten Blitzrichtungen in der Draufsicht fotografierten Bodenaggregate ausgemessen, als kreisförmig angenommen und deren Durchmesser klassiert. Der daraus berechnete „mittlere Durchmesser“ korreliert mit $R^2 = 0,81$ zum „gewogenen mittleren Durchmesser“ (GMD) aus der Siebanalyse. Zur Bewertung der erreichten Saatbettfeinheit wird der GMD nicht verwendet. Es ergeben sich aber wesentlich bessere Korrelationen ($R^2 = 0,88$) zum Anteil der Aggregate mit $d > 40$ mm.

Darstellung des Zerkleinerungsergebnisses im Schaubild des Siebrückstands

Werden die bei der Felderprobung ermittelten Siebrückstände *R10* und *R40* in das Siebrückstandsschaubild (Abbildung 4, Mitte) eingetragen, lassen sich die Ergebnisse der Bodenzerkleinerung übersichtlich darstellen und vergleichen. Sind die diesbezüglichen Forderungen an ein Saatbett (z. B. die agrotechnischen Forderungen (ATF) nach TGL 33738) bekannt, können schnell reproduzierbare Schlussfolgerungen gezogen werden (ANISCH 1990).



[8.1 und 9.1 => Zerkleinerungsergebnis des Pfluges vor dem Einsatz der Kreiselegge]

[8.2 und 9.2 => Zerkleinerungsergebnis der Kreiselegge]

Abbildung 4: Zerkleinerungsergebnis einer Saatbettbereitungsmaschine (Nr. 1–7) und einer Kreiselegge (Nr. 8 und 9) auf gepflügtem Feld

Kennzeichnung der Feldbedingungen durch die Festigkeit der Bodenaggregate

Soll ein Körper zerkleinert werden, spielen seine Festigkeitseigenschaften (Zug-, Biege-, Scherfestigkeit, usw.) sowie die anzuwendenden Werkzeuge eine große Rolle. Bei der Saatbettbereitung sind größere Bodenaggregate zu zerkleinern, wobei die Parameter Bodenart, Feuchtigkeit, Humusgehalt, Durchwurzelung, Porenanteil, usw. die Festigkeit bzw. die Zerfallsbereitschaft bestimmen. Eine reproduzierbare, physikalisch messbare Größe für das Bewerten des Aufwandes bei der mechanischen Zerkleinerung kann aus diesen Parametern des Ackerbodens nicht ermittelt werden.

Die in der Bodenkunde verwendete „Krümel- oder Aggregatstabilität“ bezeichnet den Widerstand von Bodenaggregaten gegenüber zerstörenden Umwelteinflüssen. Mittels Nasssiebung kann der Einfluss des Wassers ermittelt werden (KOLBE 2011). Auch mit der „Fallprobe“ (HARTGE und HORN 1992) zum Ermitteln des Verfestigungsgrades der Aggregate lassen sich keine vergleichbaren Werte für den Zerkleinerungsaufwand zugrunde legen. Mit dem Penetrometer wird der Eindringwiderstand eines Konus in den Boden, insbesondere zum Bestimmen von Lagerungsdichte, Pflugsohlen usw., gemessen (DIN 19662). In der oberen Schicht befindliche Bodenaggregate (Kluten) werden dabei verschoben und/oder zerstört. Auch aus den in diesem Bereich ermittelten Werten können kaum Rückschlüsse auf die Festigkeit der zu zerkleinernden Aggregate gezogen werden. In der Geotechnik werden in felsmechanischen Labor- und Feldversuchen mittels Punktlastversuchen zwischen zwei Lasteinleitungskegeln die Bruchlast F_B an Gesteinsproben ermittelt, woraus sich nach THURO (2010) der auf die Querschnittsfläche A der Probenkörper bezogene Punkt-Last-Index (PLI) i_s berechnet:

$$i_s = F_B / A \text{ [MPa]} \quad (\text{Gl. 1})$$

Aus den Ergebnissen wird für die Bemessung von Bauwerken die einaxiale Druckfestigkeit von Baustoffen abgeleitet.

Bei eigenen Feldversuchen mit einer Saatbettbereitungsmaschine auf unterschiedlichen Standorten wurde die Festigkeit der zu zerkleinernden Bodenaggregate durch die „Klutenbruchkraft“ F_{kb} gekennzeichnet. Dabei wurde an einer größeren Anzahl von Kluten mit dem kleinsten Durchmesser zwischen 40 und 50 mm aus dem Siebrückstand $R40$ auf einer ebenen, harten Unterlage mit einem keilförmigen Werkzeug (Keilwinkel = 15° ; Breite = 30 mm) die Bruchkraft F_{kb} bestimmt (Abbildung 4). Die Spannungsart und auch die Bruchfläche waren dabei nicht eindeutig definierbar. Es ließen sich aber die unterschiedlichen Standorte hinsichtlich ihrer Bedingungen für das mechanische Zerkleinern ausreichend reproduzierbar kennzeichnen und vergleichen.

Bewerten des Zerkleinerungsergebnisses

Das Zerkleinerungsergebnis muss bezüglich des Erreichens einer geforderten, definierten Zielgröße und des dazu getätigten Aufwands bewertet werden. Während die Aufwendungen (Kosten, Zeit, usw.) exakt messbar sind, gibt es für die Zielgröße „Zerkleinerungsergebnis“ zurzeit keine reproduzierbaren Festlegungen.

BOSSE und KALK (1988) haben für den Vergleich experimentell untersuchter Bodenbearbeitungswerkzeuge und -geräte die komplexe Bewertungskenngröße „Vergleichsenergie“ als Quotient aus Energieaufwand (vom Traktormotor erzeugte mechanische Energie) und Bearbeitungsergebnis vorgeschlagen. Dabei wird das Bearbeitungsergebnis aus gewichteten, dimensionslosen Bewertungszahlen für Bodenzustand (Boniturnote), Einebnung (Streuung der Rauigkeit), Zerkleinerung (bonitierter Anteil der Aggregate < 40 mm) sowie Lockern/Verdichten (Differenz der Oberflächenhöhe vor und nach der Bearbeitung) mit geforderten Zielwerten verglichen. Diese aufwendige Bewertung lässt sich nur bei wissenschaftlich geführten Untersuchungen anwenden.

Mit dem Eintragen der Zerkleinerungsergebnisse in das Schaubild des Siebrückstands nach Abbildung 4 wird deutlich, dass auf fast allen Standorten das nach TGL 33738 für die Weizenbestellung empfohlene Zerkleinerungsergebnis (Anteil der Aggregate < 40 mm; Siebdurchgang $D40$) mit einer untersuchten Saatbettbereitungsmaschine in einem Arbeitsgang erzielt wurde (Nr. 1 bis 6). Diese Standorte waren durch die Klutenbruchkraft $F_{kb} < 200$ N gekennzeichnet. Es ist aber auch festzustellen, dass bei gleich großen Festigkeitswerten auf den Lö-Standorten ein feineres Saatbett als auf den Al-Standorten erzeugt wurde. Lediglich auf dem trockenen, harten Al-2-Boden von Nr. 7 konnte der geforderte Anteil von Aggregaten < 10 mm nicht erreicht werden.

Bei der visuellen Einschätzung der Saatbettqualität (BREHM 2009) wird auf „ausreichend vorhandene“ feine Krümel ($d < 10$ mm) geachtet. Dieser Anteil ($D10 = 1 - R10$) lässt sich reproduzierbar bestimmen und darstellen (Abbildung 4; links). Er kann als Zielgröße für das Saatbett im Vergleich mit den agrotechnischen Forderungen und dem Energieaufwand unter den vorgefundenen Standortbedingungen verwendet werden.

Schlussfolgerungen

Bei der mechanischen Zerkleinerung des Ackerbodens entstehen Bodenaggregate, deren Größenzusammensetzung bestimmten Gesetzmäßigkeiten (ANISCH 1990, HILLIG 1987, RAMMLER 1937) folgen. Das ermöglicht für die Entwicklung und Prüfung von Bodenbearbeitungsmaschinen eine einfache und schnelle, auf dem Feld ausführbare sowie reproduzierbare Analyse mit einer Siebvorrichtung für die Aggregatgrößen $d > 10$ und $d > 40$ mm. Wird die Klutenbruchkraft bzw. der Punkt-Last-Index (PLI) als Kennwert für die Festigkeit, Härte bzw. Zerfallsbereitschaft des Bodens (unterhalb der bearbeitbaren maximalen Bodenfeuchte) bestimmt, können unterschiedliche Zerkleinerungsergebnisse objektiv bewertet werden. Für den bewertenden Vergleich müssen die standort- und fruchtartenbezogenen agrotechnischen Forderungen als Zielgröße definiert sein.

Ausgehend von den Empfehlungen der früheren TGL 33738 sollten Vorschläge für den Anteil der Bodenaggregate $d < 10$ mm und $d > 40$ mm im Saathorizont für Feldfrüchte auf unterschiedlichen Standorten als Bestandteil agrotechnischer Forderungen an ein Saatbett als Zielgröße erarbeitet werden. Für die Kennzeichnung der Festigkeit (Zerfallsbereitschaft) der Bodenaggregate ist eine praktikable Methode zur Ermittlung der Klutenbruchkraft (Punkt-Last-Index) unter Anwendung von digitalen Druckkraft-Messgeräten mit einer definierten Kegelspitze zu entwickeln. Für die Kontrolle des Zerkleinerungsergebnisses und die Steuerung von Saatbettbereitungsmaschinen werden kontinuierlich arbeitende Sensoren benötigt (GROSA 2014).

Literatur

- Anisch, S. (1990): Schnellbestimmung des Zerkleinerungsergebnisses bei der Saatbettbereitung. *Agrartechnik* 40(7), S. 303-304
- Anken, T.; Hilfiker, T.; Sandri, R.; Sartori, L. (1996): Saatbettbereitung- Feines Saatbett: Hoher Energiebedarf und Feldaufgang, aber kein Mehrertrag bei Winterweizen. FAT-Bericht Nr. 484, Hrsg. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarwirtschaft und Landtechnik (FAT), Tänikon
- Bosse, O.; Kalk, W-D. (1988): Kenngröße zum Bewerten von Bodenbearbeitungswerkzeugen und -geräten bei experimentellen Vergleichen. *Grundlagen der Landtechnik* 38(4), S.106–113
- Brehm, D. (2009): Amazone KE 3000 Super, Leistungsbedarf und Arbeitsqualität. DLG-Prüfbericht 5897F, Fokus-Test 10/2009, DLG e.V. Testzentrum Technik und Betriebsmittel, Groß-Umstadt
- Diez, T.; Weigelt, H.; Brandhuber, R. (2012): Bodenstruktur erkennen und beurteilen. LfL-Info, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising-Weihenstephan
- DIN 19662 (2011): Bodenbeschaffenheit-Felduntersuchungen-Bestimmung des Eindringwiderstandes von Böden mit dem Penetrometer. Beuth-Verlag, Berlin
- Grosa, A. (2014): Wege zur Wirkungsgradverbesserung von Bodenbearbeitungswerkzeugen. 1. VDI-Kolloquium "Herausforderungen an die Bodenbearbeitung", 25–26.09.2014, Dresden
- Hartge, K.H.; Horn, R. (1992): Die physikalische Untersuchung von Böden. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart
- Hillig, U. (1987): Ermittlung der Gesetzmäßigkeit des Zerkleinerungsergebnisses durch ausgewählte Bodenbearbeitungswerkzeuge auf unterschiedlichen Standorten. Dissertation, TU Dresden
- Kolbe, H. (2011): Bodenfruchtbarkeit im Öko-Betrieb - Untersuchungsmethoden. Informationsschrift, Hrsg. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden
- Rammler, E. (1937): Gesetzmäßigkeiten in der Kornverteilung zerkleinerter Stoffe. *Zeitschrift VDI, Beihefte Verfahrenstechnik*, Nr. 5
- Riegler, T.; Rechberger, C.; Handler, F.; Prankl, F. (2014): Bildverarbeitungssystem zur Qualitätsbeurteilung von Bodenbearbeitung. *Landtechnik* 69(3), S.125–131, <http://dx.doi.org/10.15150/lt.2014.180>
- Schuchmann, G. (2014): Prüfmethode zur Erfassung der Arbeitsqualität an Bodenbearbeitungsgeräten und Entwicklung von alternativen Prüfverfahren. 1. VDI-Kolloquium "Herausforderungen an die Bodenbearbeitung", 25–26.09.2014, Dresden
- Soucek, R.; Pippig, G. (1990): *Maschinen und Geräte für die Bodenbearbeitung, Düngung und Aussaat*. Verlag Technik, Berlin, S. 56
- TGL 33738 (1984): Gütevorschriften für Arbeiten der Pflanzenproduktion. Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, Berlin
- Thuro, K. (2010): Empfehlung Nr. 5 „Punktlastversuche an Gesteinsproben“ des Arbeitskreises 3.3 „Versuchstechnik Fels“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik. *Bautechnik* 87(6), S. 322–330, <http://dx.doi.org/10.1002/bate.201010025>

Autoren

Dr.-Ing. Siegfried Anisch war wissenschaftlicher Oberassistent und Forschungsgruppenleiter „Bodenbearbeitung“ am Wissenschaftsbereich Landmaschinenkonstruktion der TU Dresden (1971 bis 1991) und Leiter Konstruktion bei der Eberhardt Maschinenfabrik GmbH, der Eberhardt-Mengele productions GmbH und der Bohnacker AG/Mengele Agrartechnik (1991 bis 2004)

Dipl.-Ing. André Grosa und **Dipl.-Ing. Tim Bögel** sind wissenschaftliche Mitarbeiter und **Professor Dr.-Ing. habil. Thomas Herlitzius** ist Inhaber des Lehrstuhls für Agrarsystemtechnik der TU Dresden, Bergstraße 120, 01062 Dresden, E-Mail: herlitzius@ast.mw.tu-dresden.de.