

# Grundlagen der Landtechnik

VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE

Herausgegeben mit Unterstützung durch die  
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft  
Braunschweig-Völkenrode (FAL)

Schriftleitung: Dr. F. Schoedder, Institut  
für landtechnische Grundlagenforschung

Grundl. Landtechnik Bd. 30 (1980) Nr. 6, S. 181 bis 212

## Die Festigkeit der Samenschale von Rapskörnern bei mechanischer Druckbelastung

Von E. Davison, A.G. Meiering und F.J. Middendorf,  
Guelph, Kanada\*)

DK 633.004.12:620.173:582.683.2

Das Schälen von Rapssamen durch Anwenden von Druck- oder Scherkräften führt zu einer Qualitätsverbesserung bei den erzeugten Produkten. Der Einfluß von Druckkräften auf die Verformung der Rapssamenschale wird mit einem einfachen theoretischen Modell beschrieben. Die Elastizität von Körnern und Schale, die maximale Verformung an der Bruchgrenze des Schalenmaterials und das Fließverhalten des Sameninhaltes werden durch Messungen bestimmt. Diese Werte werden im Rechenmodell benutzt, um Rückschlüsse auf den Einfluß des Feuchtegrades auf die Temperaturerhöhung der Körner und die maximal erforderliche Verformung in einem mit Druckkräften arbeitenden Schälgerät zu gewinnen.

### 1. Einführung

Rapssamen dienen als Rohstoff zur Herstellung von technischen Ölen, Speiseölen und hochwertigen Futtermitteln [1]. Durch Entfernen der Schale vor der Verarbeitung des Sameninhaltes läßt sich der Gehalt an unverdaulicher Rohfaser vermindern und somit über die Erhöhung des Nährwertes ein besserer Marktwert erzielen. Die Schälverfahren beruhen zum Teil auf der Anwendung von Druck- und Scherkräften, um die Schalen aufzubrechen und danach in einem Sieb- und Aspirationsverfahren vom Sameninhalt zu trennen. Der allen Verfahren mit einer Druck- oder Prallbeanspruchung gemeinsame Vorgang der Schalenverformung bis zum Bruch wurde am Einzelkorn in der School of Engineering der University of Guelph näher untersucht, um Informationen über die maximale Verformung, den Energiebedarf und die Gutserwärmung zu finden.

Forschungsmittel für Arbeiten über die Entschalung von Rapskörnern wurden vom Canada Department of Agriculture und vom Ontario Ministry of Agriculture and Food zur Verfügung gestellt.

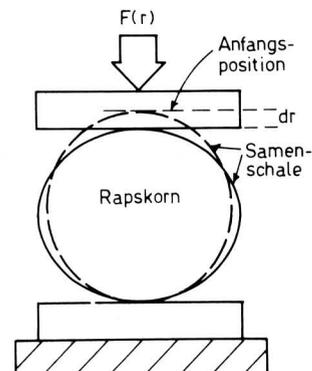
Bearbeitung und Übersetzung von A.G. Meiering.

\*) Dr. E. Davison ist Professor für Systems Analysis und Dr. A.G. Meiering ist Professor für Food Engineering an der School of Engineering der University of Guelph, Ontario, Kanada. F.J. Middendorf ist Vertriebsmanager bei der Fa. Borg-Warner, Stieber Division in Heidelberg.

### 2. Modell der Schalenverformung

Die bei Druck- oder Prallbeanspruchung angreifenden Kräfte führen prinzipiell zu der in **Bild 1** schematisch dargestellten Abflachung der kugelförmigen Rapskörner. Daraus resultiert eine Druckerhöhung im Sameninhalt, die mit entsprechenden Zugspannungen in der Samenschale zum Gleichgewicht kommt. Die Bruchspannungen lassen sich als Funktion der biotechnischen Stoffeigenschaften der Schale und der am Korn geleisteten Verformungsarbeit am Modell eines dünnwandigen Druckbehälters definieren, wenn für die Analyse folgende Annahmen getroffen werden:

1. Der Inhalt der Samenschale verhält sich wie ein aus zwei Phasen bestehendes Fluid. Kotyledonen und Keimling verformen sich unter dem Einfluß von Scherkräften wegen ihrer hohen Flüssigkeitsanteile von 40–48 % Öl, 7–17 % Wasser und ca. 38 % Rohprotein [1] wie eine Suspension hoher Viskosität. Die zwischen den einzelnen Organen des Samens und in den Interzellularen eingeschlossenen Gas-komponenten folgen den Gesetzen idealer Gase.
2. Die Samenschale verhält sich während der Verformung wie ein homogenes, elastisches Material, dessen Biege-widerstand wegen der geringen relativen Wandstärke von  $z/r \approx 1/18$  ohne Bedeutung ist [2]. Ihre Durchlässigkeit für Gase und Flüssigkeiten kann während der Zeitspanne der Verformung vernachlässigt werden.
3. Vor Beginn der Verformung bestehen keine Temperatur- und Druckunterschiede zwischen den Körnern und ihrer Umgebung.



**Bild 1.** Abflachung eines Rapskornes bei Druckbeanspruchung zwischen zwei ebenen Platten (schematisch).

Die Änderung der Enthalpie bei der in Bild 1 dargestellten Verformung eines einzelnen Rapskornes beträgt

$$dH = dQ + dW \quad (1)$$

Ein Teil der zugeführten Verformungsarbeit setzt sich in Wärme um und verursacht damit eine Temperaturerhöhung der Körner. Diese Wärmezufuhr ist dem Zerkleinerungsgrad oder der Oberflächenvergrößerung proportional und kann in Mühlen zum Beispiel signifikante Werte erreichen. Bei der in Bild 1 beschriebenen Verformung bleibt der Zerkleinerungsgrad und somit die Temperaturerhöhung jedoch vergleichsweise unbedeutend, so daß die Annahme isothermer Bedingungen das Ergebnis der Analyse nicht wesentlich beeinträchtigen dürfte. Ferner ist die Wärmeabgabe bei dem geringen Temperaturgefälle vom Samen zu seiner Umgebung während des recht kurzen Verformungsvorganges sehr gering. Folglich kann  $dQ = 0$  gesetzt werden, ohne die Energiebilanz wesentlich zu beeinflussen. Wird weiterhin davon ausgegangen, daß die von der Kraft  $F(r)$  über die Strecke  $dr$  geleistete Arbeit sich auf die Kompression der von der Samenschale eingeschlossenen Bestandteile und auf die Ausdehnung der Samenschale selbst verteilt, so läßt sich die Energiebilanz von Gl. (1) in

$$dH = dW_k + dW_s = F(r) dr \quad (2)$$

umformen. Die am Phasengemisch des Sameninhaltes geleistete Kompressionsarbeit beträgt

$$dW_k = p dV \quad (3)$$

wobei unter den angenommenen isothermen Bedingungen

$$dV = \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T dp \quad (4)$$

Nach Substitution des isothermen Kompressibilitätskoeffizienten

$$\chi = \frac{1}{V_0} \left( \frac{\partial V}{\partial p} \right)_T \quad (5)$$

in Gl. (4) folgt

$$dV = \chi V_0 dp \quad (6)$$

Die am Einzelkorn geleistete Verformungsarbeit ergibt sich nach Einsetzen von Gl. (6) in Gl. (3) als

$$\int_{W_0}^W dW_k = V_0 \chi \int_{p_0}^p p dp \quad (7)$$

Mit den Anfangsbedingungen  $W_0 = 0$  und  $p_0 = 0$  folgt

$$W_k = \frac{V_0 \chi}{2} p^2 \quad (8)$$

Der im Sameninnern herrschende Druck  $p$  kommt in dünnwandigen, kugelförmigen Behältern, wie sie die Rapskörner darstellen, mit der Zugspannung in der Schale

$$\sigma = \frac{1}{2} \frac{r}{z} p \quad (9)$$

zum Gleichgewicht [3]. Einsetzen von Gl. (9) in Gl. (8) führt zu

$$W_k = \frac{2 V_0 \chi z^2}{r^2} \sigma^2 \quad (10)$$

Die in der Samenschale induzierte Zugspannung führt zu einer entsprechenden Dehnung, wobei eine Verformungsarbeit von insgesamt

$$W_s = \frac{\sigma^2}{E} (1 - \mu) \frac{3 V_0 z}{r} \quad (11)$$

aufgenommen wird [3]. Einsetzen der Gln. (10) und (11) in die integrierte Form von Gl. (2) ergibt

$$\int_{r_0}^r F(r) dr = \left[ \frac{2 V_0 \chi z^2}{r^2} + \frac{3 V_0 z}{E r} (1 - \mu) \right] \sigma^2 \quad (12)$$

Die Umstellung dieser Gleichung in die Form

$$\chi = \frac{r^2}{2 V_0 z^2 \sigma^2} \int_{r_0}^r F(r) dr - \frac{3 r}{2 E z} (1 - \mu) \quad (13)$$

ergibt einen Ausdruck für den Kompressibilitätskoeffizienten, sowie in der Form

$$\sigma = \left[ \frac{E r^2 \int_{r_0}^r F(r) dr}{2 E V_0 \chi z^2 + 3 V_0 z r (1 - \mu)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

einen Ausdruck für die Spannung. Aus der Verformungsenergie läßt sich schließlich auch die maximal mögliche Temperaturerhöhung nach folgender Gleichung ermitteln:

$$\Delta T = \frac{\int_{r_0}^r F(r) dr}{1000 V_0 \rho c} \quad (15)$$

Zur Lösung der Gln. (12) bis (15) wurden die biotechnischen Materialeigenschaften, Bruchspannungen und Verformungsenergien durch Versuche bestimmt.

### 3. Versuchsergebnisse

Die Elastizität und Zugfestigkeit der Rapsamenschale wurde an Materialproben in einer Zug-Druck-Prüfmaschine der Marke Instron ermittelt. Aus der Schale herausgeschnittene Streifen wurden an der Stirnseite der Probe mit einem Spezialzement für Dehnungsmeßstreifen an einer Glasplatte befestigt. Diese Platte wurde nach der Härtung des Bindemittels in die untere Halterung und eine weitere Glasplatte in die obere Halterung der Prüfmaschine eingesetzt. Die obere Platte wurde dann in die Nähe der Materialprobe gefahren und nach Aufbringen des Spezialzementes mit dem freien Ende des Schalenstreifens in Kontakt gebracht. Nach dem Härten wurde die Länge des nicht in das Bindemittel eingelassenen Probenteils gemessen. Schließlich wurden in einem typischen Materialtest die Zugkraft und die Dehnung des Schalenstreifens bis zum Bruch kontinuierlich aufgezeichnet. Nach dem Bruch wurden die Beschaffenheit und der Querschnitt der Bruchfläche zwecks Bewertung der Elastizität und Berechnung der Zugspannungen unter Berücksichtigung der an den zementierten Enden auftretenden Abweichungen bestimmt [4].

Das Dehnungsverhalten des Schalenmaterials ist in Bild 2 dargestellt. Sowohl der lineare Kurvenverlauf in den Spannungs-Dehnungs-Diagrammen als auch die mikroskopischen Bruchbilder, die keinerlei plastische Verformung erkennen ließen, weisen auf rein elastisches Verhalten hin. Der Bruch lag in allen Versuchen zwischen den in das Bindemittel eingetauchten Enden und verlief etwa rechtwinklig zur Längsrichtung der Materialprobe. Elastizitäts- und Festigkeitswerte aus 8 Versuchen mit lufttrockenem Material sind in Tafel 1 angegeben. Sie unterliegen deutlichen Schwankungen, die teilweise von Unregelmäßigkeiten bei der recht schwierigen Probenvorbereitung abhängen mögen, größtenteils aber auf die biologischen Stoffen eigenen Unterschiede in der Materialbeschaffenheit zurückzuführen sind. Die Bruchspannung der Schalenproben von luftgetrockneten Körnern mit einem durchschnittlichen Feuchtegrad von 7,2 % hatte einen Mittelwert von  $\sigma = 49,03 \text{ N/mm}^2$ . Die entsprechende maximale elastische Dehnung betrug  $\epsilon = 2,96 \%$  bei einem mittleren Elastizitätsmodul von  $E = 2183 \text{ N/mm}^2$ .

Die zum Bruch der Samenschale erforderliche eindimensionale Stauchung und die Druckbelastung ganzer Rapskörner wurde ebenfalls mit der Zug-Druck-Prüfmaschine ermittelt. Dazu wurden Körner verschiedenen Feuchtegrades zwischen zwei Glasplatten durch einmalige Anwendung von Druckkräften bis zum Bruch belastet. Die aus diesen Versuchen resultierenden Last-Dehnungskurven sind in Bild 3 für die Mittelwerte der Meßergebnisse von jeweils 15 Einzelkörnern dargestellt. Das Integral der Verformungsarbeit ließ sich durch graphische Auswertung der Flächen unterhalb der einzelnen Kurven bestimmen. Diese Werte sind zusammen mit den aus der Steigung der Kurven ermittelten Elastizitätswerten in Tafel 2 angegeben.

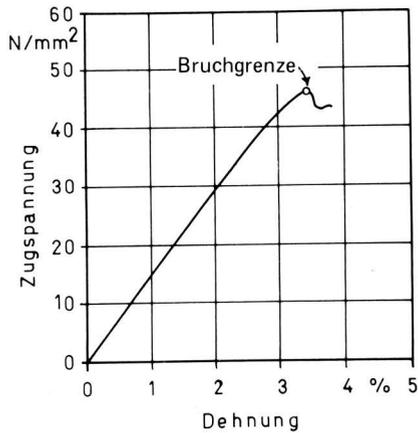


Bild 2. Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer Samenschalenprobe.

Versuch Nr.	Bruchspannung N/mm	Bruchdehnung %	Elastizitätsmodul E N/mm <sup>2</sup>
1	59,33	4,84	1226
2	42,36	2,26	1874
3	46,29	1,15	4025
4	45,70	1,67	2737
5	58,84	2,62	2246
6	62,76	6,71	935
7	30,50	1,00	3050
8	46,48	3,40	1367
Durchschn.	49,03	2,96	2183

Tafel 1. Zugfestigkeit der Rapssamenschale von luftgetrockneten Körnern mit einem durchschnittlichen Feuchtegrad von 7,2 % [4].

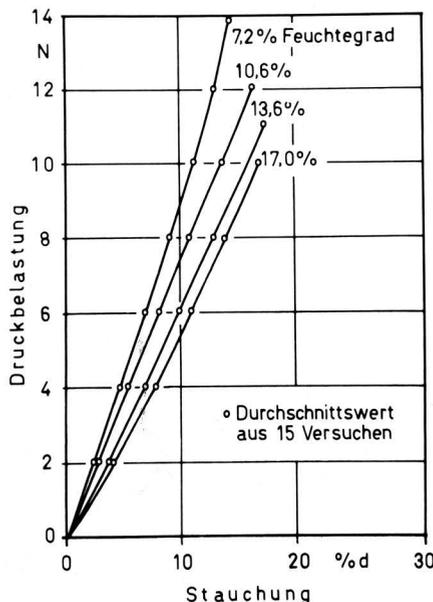


Bild 3. Last-Dehnungs-Kurven und Bruchgrenze von Rapskörnern verschiedenen Feuchtegrades [4].

Feuchtegrad der Körner %	Bruchlast N	Bruchdehnung %	E <sub>Schale</sub> N/mm <sup>2</sup>	Verform.-arbeit N mm	Bruchspannung N/mm <sup>2</sup>	Temp.-erhöhung °C
7,2	14,00	14,06	2183	1,53	49,04	0,65
10,6	12,00	16,25	1619	1,56	48,44	0,60
13,6	11,00	17,38	1388	1,53	47,32	0,55
17,0	10,05	16,75	1315	1,35	44,22	0,44

Tafel 2. Elastizität und Bruchgrenze von Rapskörnern im Kompressionstest.

Der Kompressibilitätskoeffizient lufttrockener Körner wurde mit den in Tafel 1 angegebenen Durchschnittswerten der Bruchspannung und des Elastizitätsmoduls sowie mit den in Tafel 2 angegebenen Werten der Verformungsarbeit nach Gl. (13) errechnet. Dabei wurde die Poissonsche Zahl des Schalenmaterials in Anlehnung an Werte für Weizen und Mais mit  $\mu = 0,4$  in Rechnung gestellt und lag damit zwischen  $\mu = 0,3$  für Stahl und  $\mu = 0,49$  für Weichgummi [5]. Für die Rapskörner mit einem Feuchtegrad von 7,2 % ergab sich damit ein Kompressibilitätskoeffizient von  $\chi = 0,0506 \text{ mm}^2/\text{N}$ , der nur unwesentlich von den Werten für Wasser mit  $\chi = 0,045 \text{ mm}^2/\text{N}$  und für Pflanzenöl mit  $\chi = 0,049 \text{ mm}^2/\text{N}$  abweicht und sich daher bei zunehmendem Feuchtegrad nur wenig ändern dürfte. Daraus folgt, daß der Sameninhalt sich praktisch wie eine inkompressible Flüssigkeit verhält und daß die gesamten geometrischen Änderungen des Kornvolumens in vollem Umfang in eine Schalendehnung umgesetzt werden.

Wird unterstellt, daß die Scherspannungen an der Fließgrenze des nichtnewtonschen Schaleninhaltes im Vergleich zu den Zugspannungen in der Schale gering sind, dann dürfte die Elastizität der Samenschale eine ähnliche Abhängigkeit vom Feuchtegrad der Körner aufweisen wie das Steigungsmaß der in Bild 3 dargestellten Funktionen. Mit dieser Relation ließen sich dann für konstante Werte von  $\mu$  und  $\chi$  sowie mit den in Tafel 2 angegebenen Werten der Verformungsarbeit und des Elastizitätsmoduls nach Gl. (14) auch die Bruchspannungen bei höheren Feuchtegraden berechnen, die mangels einer Kontrolleinrichtung für die Wasserverdunstung der winzigen Schalenproben unter den gegebenen Bedingungen nicht zu ermitteln waren. Gl. (14) bezieht sich zwar auf die Geometrie idealer Kugeln, dürfte aber bei den gemessenen Abflachungen von 14,06 % bis 17,38 % noch gute Näherungswerte ergeben. Neben den Bruchspannungen sind auch die nach Gl. (15) ermittelten, maximal möglichen Temperaturerhöhungen der Körner in Tafel 2 angegeben.

Tafel 2 zeigt, daß mit der Zunahme des Feuchtegrades um ca. 10 % der Energiebedarf und die Bruchspannung der Schale um ca. 12 % bzw. 10 % abnehmen. Gleichzeitig erhöht sich jedoch der Kompressionsweg um ca. 16 %, und es verringert sich wegen der höheren spezifischen Wärme die Temperaturerhöhung um ca. 33 % [6]. Alle Temperaturänderungen blieben jedoch so gering, daß die eingangs angenommenen isothermen Bedingungen praktisch erfüllt waren. Bei kontinuierlichem Körnerdurchsatz in einer Schälmaschine würde sich ein Netto-Energiebedarf von 620–700 Nm/kg bzw. eine Wärmeproduktion von maximal 0,62–0,7 kJ/kg ergeben. Auch bei der zusätzlichen Erzeugung von Reibungswärme dürfte diese Energiemenge keine besonderen Kühlungsmaßnahmen erfordern.

#### 4. Zusammenfassung

Das Verhalten der Rapssamenschale bei Druckbeanspruchung läßt sich mit dem Modell eines dünnwandigen, kugelförmigen Druckbehälters, in dem sich der Sameninhalt wie eine Flüssigkeit verhält, beschreiben [7].

Lufttrockene Rapskörner mit einem Feuchtegrad von 7,2 % erfordern eine eindimensionale Stauchung von ca. 14 %, um die Samenschale zum Zerreißen zu bringen. Bei 17 % Feuchtegrad steigt dieser Wert auf ca. 17 % an.

Die theoretische Temperaturerhöhung beim Bruch lag selbst bei luftgetrockneten Körnern unter 1 °C, so daß auch bei Berücksichtigung zusätzlicher Reibungswärme eine Schälmaschine ohne besondere Kühlung auskommen kann.

### Schrifttum

Bücher sind durch • gekennzeichnet

- [ 1 ] Huff, H.B. u. E. Hatley: Soybeans and rapeseed crops. Proceedings of Challenge for Agriculture Conference, University of Guelph, Ontario, 1972.
- [ 2 ] • Timoshenko, S. u. D. Young: Elements of strength of materials. New York: D. Van Nostrand Co., 1968.
- [ 3 ] • Warnock, F.V.: Strength of materials. London: Pitman & Sons Ltd., 1955.
- [ 4 ] Middendorf, F.J.: Physical and mechanical properties of rapeseed. M. Sc.-Thesis, School of Engineering, Guelph, 1972.
- [ 5 ] Narayan, C.V.: Behavior of wheat grains in bulk under high pressure. M. Sc.-Thesis, School of Engineering, Guelph, 1966.
- [ 6 ] • Earle, R.L.: Unit operations in food processing. Oxford, London: Pergamon Press, 1966.
- [ 7 ] Davison, E., A.G. Meiering u. F.J. Middendorf: A theoretical stress model of rapeseed. Can. Agr. Eng. J., Bd. 21 (1979) Nr. 1, S. 45/46.

### Verwendete Formelzeichen

c	Spezifische Wärme
d	Korndurchmesser
E	Elastizitätsmodul
F(r)	Druckkraft
H	Enthalpie
p	Druck innerhalb der Samenschale
Q	Wärmemenge
r	Kornradius
T	Korntemperatur
$\Delta T$	Erhöhung der Korntemperatur
V	Volumen des Sameninhaltes
$V_0$	Anfangsvolumen des Sameninhaltes
W	Gesamtverformungsarbeit
$W_k$	Verformungsarbeit des Sameninhaltes
$W_s$	Verformungsarbeit der Samenschale
z	Dicke der Samenschale
$\epsilon$	Dehnung der Samenschale
$\mu$	Poissonsche Zahl des Schalenmaterials
$\rho$	Dichte der Rapskörner
$\chi$	Kompressibilitätskoeffizient des Sameninhaltes
$\sigma$	Zugspannung in der Samenschale

## Zur Technologie des Ausbringens von Flüssigmist und Klärschlamm

Von Rüdiger Krause, Heiko Lübbers und Thomas Michaelen, Braunschweig\*)

DK 631.862:631.333.4

Durch eine geordnete, umweltneutrale Rückführung landwirtschaftlicher ebenso wie kommunaler Rest- und Abfallstoffe in die pflanzliche Produktion werden teure und ökologisch fragwürdige Formen der Beseitigung überflüssig. Voraussetzung für eine landwirtschaftliche Verwertung ist die Verfügbarkeit geeigneter Gerätesysteme, die bei einwandfreier Funktion auch den arbeitswirtschaftlichen und produktionstechnischen Anforderungen gerecht werden. Der mobilen Ausbringung flüssiger Substrate wie Klärschlamm und Flüssigmist mit Hilfe von Tankwagen wird wegen der hohen Flexibilität in vielen Fällen der Vorzug gegeben. Eine hinreichend genaue Dosierung und Verteilung der Substrate auf der Fläche ist jedoch im allgemeinen nicht sichergestellt. Die vorliegenden Untersuchungen einzelner Elemente und ihrer Funktion sollen daher neue Impulse geben zur Entwicklung verbesserter und alternativer Lösungen.

\*) Dr.-Ing. R. Krause ist wissenschaftlicher Oberrat am Institut für Technologie (Leiter: Prof. Dr.-Ing. W. Baader) der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Braunschweig-Völkenrode, cand. mach. H. Lübbers und cand. mach. Th. Michaelen sind Studenten des Maschinenbaus der TU Braunschweig und haben die Untersuchungen am Prallteller unter Leitung des Erstgenannten durchgeführt.

### 1. Einleitung – Anforderungen an die Ausbringung

Steigende Preise für Mineräldünger machen eine bessere Nutzung der in Wirtschaftsdüngern und Klärschlamm enthaltenen Nährstoffe wünschenswert. Häufig fehlt es jedoch an einer entsprechenden Betriebsorganisation ebenso wie an geeigneten technischen Mitteln, so daß wertvolle Rohstoffe auch heute noch weitgehend ungenutzt bleiben.

Der Ausbringetermin wird vorwiegend vom verfügbaren Speicherraum bestimmt. Spezifische Anforderungen der Fruchtfolgen, Beschränkungen innerhalb der Vegetationsperioden, klimatische Bedingungen und die Anforderungen des Umweltschutzes beschränken die verfügbare Zeit häufig auf ein Minimum und machen schlagkräftige Verfahren zum Ausbringen erforderlich.

Während bei der Ausbringung von Flüssigmist und Klärschlamm zu Stoppel oder Gründung im Herbst, teilweise auch zu Mais im Frühjahr, zulässige Aufwandmengen nur durch die mögliche Belastung von Boden, Grund- und Oberflächenwasser begrenzt werden und keine besonderen Anforderungen an die Genauigkeit der Verteilung auf der Fläche gestellt werden, dürfen bei Gaben zu Futterzwischenfrucht wegen der Nitrat-Akkumulation in der Pflanze bestimmte Grenzen nicht überschritten werden. Flüssigmistgaben zu Getreide im Frühjahr müssen wegen der Gefahr von Lagergetreide niedrig gehalten werden (teilweise unter 10 m<sup>3</sup>/ha) und gut verteilt sein. Die Transportkapazität bestimmt die Schlagkraft. Die arbeitswirtschaftlichen und ökonomischen Zusammenhänge von Transportentfernung, Transportgeschwindigkeit und Behältervolumen sind im Schrifttum behandelt [1]. Einer hohen Transportleistung stehen neben der begrenzten Tragfähigkeit des landwirtschaftlichen Wegenetzes besonders bei der Frühjahrsausbringung die Gefahren tiefer Spuren und von Strukturschäden auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen entgegen. Durch Reifenwahl und