

Evaluierung der schlaginternen Bodenbelastung durch Befahrung und Ableitung von Optimierungshilfen für den Praktiker

Rainer Duttmann*, Joachim Brunotte** und Michaela Bach***

Zusammenfassung

Ziel der hier vorgestellten Untersuchung ist die Quantifizierung des im Zuge einer Silomaisernnte anfallenden Transportstreckenaufwandes und die räumliche Abbildung der feldinternen und -externen Befahrungsintensität. Zu diesem Zweck wurde jedes Fahrzeug mit einem GPS-Empfänger ausgestattet, der die Positionsdaten kontinuierlich aufzeichnete. Basierend auf den erfassten Daten wurde ein Schätzverfahren zur Bestimmung des Wegeaufwandes bei der Silomaisernnte entwickelt. Es kann einerseits der Optimierung der Transportdistanzen dienen und andererseits zur Vorkalkulation der Maschinenbetriebskosten beitragen.

Der zweite Teil der Untersuchung beschäftigt sich mit der Erfassung der feldinternen Befahrungsintensität. Als Indikatoren werden neben dem Spurflächenanteil und der Überrollhäufigkeit die spurbezogen berechneten Radlasten verwendet.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Spurflächenanteil der Ernte- und Transportfahrzeuge je nach Größe und Form des Ackerschlagel mehr als 60 % der Schlagfläche ausmachen kann, wobei einzelne Spurabschnitte in den Vorgewenden und den Feldzufahrten mehr als vierzig Mal überrollt werden können. Ein erheblicher Flächenanteil mit hohem Lasteintrag entfällt auf die Abfuhr des Erntegutes. Mit Blick auf die Reduzierung der mechanischen Bodenbelastung und des Verdichtungsrisikos liegt hier erhebliches Optimierungspotenzial.

Schlüsselwörter: *Ackerverkehr, Biomasselogistik, Spurflächenanteil, Überrollhäufigkeit, Verdichtung*

Abstract

Evaluation of soil stress due to field traffic and development of a decision support tool

This study aimed at the quantification of the transportation effort during a silage maize harvest and at the spatial analysis of traffic intensity on and off a field. In the first part of this study we introduce an easy to handle method for estimating the transportation effort during harvest. This method may assist in optimizing the transport distances prior to tillage and estimating the operational costs in advance. The second part of this study focused on the assessment of traffic intensity due to the harvest, using the wheel track area and the number of rolling overs as indicators. We also modeled the spatial patterns of field traffic within a Geographical Information System. It was found that more than 60 % of the field area had been wheeled by the harvester and the transportation vehicles, where two thirds of the total track area had been rolled over more than twice. Moreover the results reveal that some wheel track sections in the headlands and close to the field gate had been rolled over more than 40 times. A considerable track area percentage trafficked at high wheel load is related to the return routes of fully loaded transport vehicles, which can cover about 25 % of the field area. This share could be reduced by adapting the load of the transporters to the actual soil properties or by rearranging the field geometry.

Keywords: *field traffic, biomass logistics, wheel track area, rolling-over frequency, soil compaction*

* Christian Albrechts-Universität, Geographisches Institut, Lehrstuhl für Physische Geographie – Landschaftsökologie und Geoinformation
Ludewig-Meyn-Straße 14, 24098 Kiel

** Thünen-Institut für Agrartechnologie, Bundesallee 50,
38116 Braunschweig

*** Thünen-Institut für Agrarklimaschutz, Bundesallee 50,
38116 Braunschweig

Kontakt: michaela.bach@ti.bund.de

1 Einleitung

Die aus erneuerbaren Ressourcen erzeugte Energie nimmt derzeit einen Anteil von 12,2 % am Gesamtenergieverbrauch der Bundesrepublik Deutschland ein (BMU, 2011). Eine wachsende Bedeutung kommt dabei der aus Biogas erzeugten elektrischen Energie zu. Wurden im Jahr 2010 etwa 14,5 TWh elektrischer Energie aus Biogas produziert, so waren es im Jahr 2011 bereits 15,5 TWh. Dies entspricht einem Anteil von ca. 2,9 % am gesamten Stromverbrauch (BMU, 2011). Das mengenmäßig wichtigste Co-Substrat für die Biogasproduktion ist Silomais. Dessen Anbaufläche wuchs im Zeitraum von 2005 bis 2011 um 62 % auf 2,03 Mio. Hektar (Statistisches Bundesamt). Etwa ein Viertel dieser Fläche dient der Erzeugung von Biogas. Da die erneuerbaren Energien spätestens 2020 einen Anteil von mindestens 35 % an der Stromproduktion in Deutschland erreichen sollen (BMU, 2011), kann von einer weiteren Expansion der Anbaufläche für Silomais ausgegangen werden.

Eine nachhaltige und ressourcenschonende Land- und Biomassenutzung muss auch die Ernährungssicherung einer stetig wachsenden Weltbevölkerung im Blick behalten. Das Umweltbundesamt kommt daher in seinem jüngsten Positionspapier zu dem Schluss: „Der Anbau von Biomasse eignet sich für die energetische Nutzung als Beitrag zur Deckung der hohen Energieverbräuche in den Industrieländern beansprucht unverhältnismäßig große Anteile produktiver Ackerflächen“ (Jering et al., 2012, S. 84).

Während die Auswirkungen eines intensivierten Anbaus von Silomais auf Biodiversität, Bodennährstoffhaushalt und Wasserqualität in zahlreichen Studien untersucht worden sind (s. Ahl et al., 2007; Scholz et al., 2001; Senbayram, 2009; Svoboda, 2011; WBGU, 2009; Wilms et al., 2007), beschäftigen sich nur wenige Arbeiten mit den Umweltwirkungen des bei der Energiemaisenernte stattfindenden Ernte- und Transportverkehrs. So ist zwar bekannt, dass Bodenverdichtungen im Silomaisanbau vor allem durch die hohen Lasteinträge der Erntefahrzeuge verursacht werden, die wegen des späten Erntetermins häufig auf (zu) feuchten Böden zum Einsatz kommen (s. Nevens u. Reheul, 2003). Über die feldinternen Befahrungsdichten und die damit verbundenen Lasteinträge bei der Silomaisenernte liegen dagegen so gut wie keine

Kenntnisse vor. Ebenfalls nur wenige Arbeiten wie die von Blazej und Soucek (2011) beschäftigen sich mit dem im Einzugsgebiet von Biogasanlagen stattfindenden erntebezogenen Transportverkehr, dessen Quantifizierung sowohl aus betriebswirtschaftlicher als auch aus umweltökonomischer Sicht von Bedeutung ist.

Die vorliegende Untersuchung stellt einen Ansatz zur Bilanzierung des Befahrungsaufwandes auf Straße und Feld vor und untersucht die feldinterne Befahrungsdichte durch die Ernte- und Transportfahrzeuge. Folgende Fragen sollen beantwortet werden:

1. Welche Gesamtdistanzen werden für die Ernte und den Transport zurückgelegt?
2. Wie häufig werden welche Teilflächen des Schlages überrollt?
3. Wo finden besonders hohe Lasteinträge durch wiederholte Überrollungen statt?

Als Beratungshilfe für die Praxis entwickelt die Untersuchung ein einfaches Schätzverfahren zur Bestimmung der Transportstreckenlänge bei Silomaiserntekampagnen.

2 Untersuchungsgebiet und Methoden

Die Untersuchungen wurden im Rahmen einer Silomaisenernte für zwei Biogasanlagen im Raum Lamspringe-Sehlem (Landkreis Hildesheim) durchgeführt. Eine Übersicht über die Lage der beiden Biogasanlagen, die Verteilung der Ernteschläge und das beim Transport des Erntegutes befahrene Wegenetz gibt Abbildung 1.

Bei der Erntekampagne wurden ein Maishäcksler und drei Abfuhrgespanne eingesetzt. Die für die Berechnung der Spurflächen und Radlasten relevanten Fahrzeugeigenschaften sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Häcksler und Zugmaschinen waren jeweils mit einem GPS-Empfänger (Trimble JunoST) ausgestattet, deren Antennen über der Achsmitte auf dem Kabinendach montiert wurden. Die Positionen aller Fahrzeuge wurden während der gesamten Kampagne in 1-Sekunden-Intervallen mit einer Lagegenauigkeit von 1 bis 3 m erfasst und die aufgezeichneten Daten nach Abschluss der Fahrten in ein Geographisches Informationssystem (ArcGIS Vers. 9.3.1; ESRI) überführt und dort weiterverarbeitet.

Tabelle 1

Technische Daten der eingesetzten Fahrzeuge

Fahrzeug	Ladevolumen	Reifentyp vorne hinten	Luftdruck	Spurweite vorne / hinten	Reifenbreite	Radlast leer	Radlast beladen
	m ³		kPa	mm	mm	kN	kN
Häcksler		800/65R32 700/50R26,5	110 / 100	2.800 / 2.600	800 / 700	59,4 / 18,6	59,4 / 18,6
Traktor		600/70R34 710/65R32	100 / 100	2.000 / 2.000	650 / 710	16,7 / 29,4	15,2 / 34,3
Silowagen (Tandem)	50	750/45R26,5	100 / 100 230 / 230 Straße	2.100 / 2.100	750 / 750	22,1 / 22,1	54,0 / 54,0

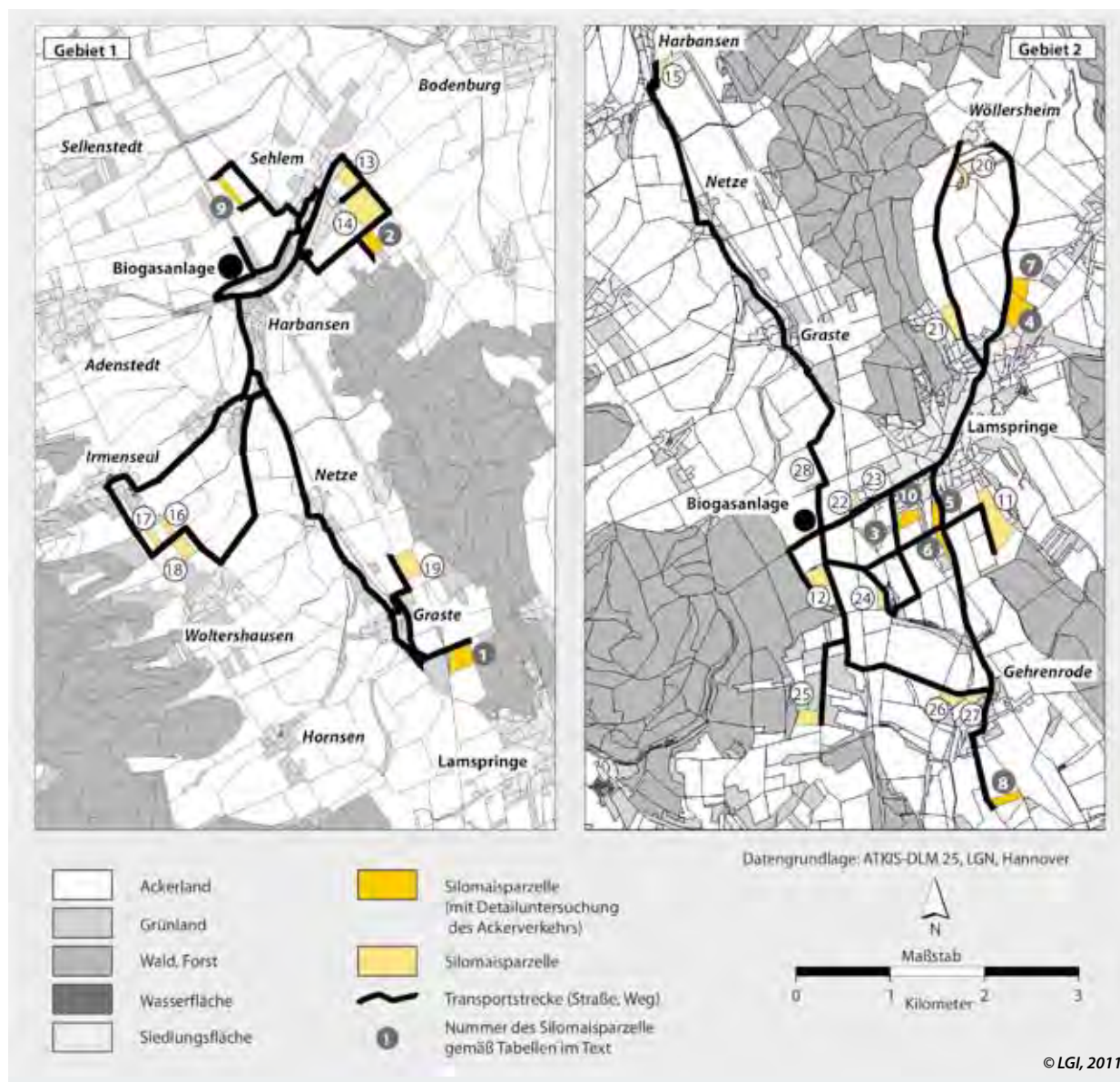


Abbildung 1 Übersicht über die untersuchten Testparzellen und Transportstrecken (grau hinterlegte Parzellennummern beschreiben Intensivuntersuchungsflächen)

Das prinzipielle Vorgehen bei der Modellierung des Ernte- und Transportverkehrs auf Straße und Feld stellt Abbildung 2 dar.

Berechnung des gesamten Wegeaufwandes im Einzugsgebiet von Biogasanlagen mit GIS

Die zurückgelegten Gesamtdistanzen können aus den GPS-Daten für alle Ernte- und Transportfahrten berechnet werden. Hierfür ist zunächst der Aufbau einer Netzwerktopologie aus den als Punktinformation aufgezeichneten Fahrzeugkoordinaten notwendig. Aus dem Streckennetzwerk und der zeitlichen Abfolge der GPS-Daten können Distanzen, Fahrtrichtung und Geschwindigkeit der eingesetzten Maschinen für unterschiedliche Streckenanteile ermittelt werden.

Räumliche Abbildung und Bestimmung der schlaginterne Befahrungsdichte

Zur Bestimmung der Spurfächenanteile wurden die jeweils in Achsmitteln erfassten xy-Positionsdaten der einzelnen Fahrzeuge zunächst in Linienzüge überführt (s. Abbildung 2). In einem weiteren Schritt wurden die Verläufe der Achsmittellinien der Einzelfahrzeuge entsprechend der Spurweite ihrer Vorder- und Hinterachse und der Reifenbreite ihrer Vorder- und Hinterräder (s. Tabelle 1) in Fahrspurpolygone überführt. Auf diese Weise können die Fahrspuren der einzelnen Fahrzeuge lagegetreu abgebildet und deren Spurfäche berechnet werden. Durch die Verschneidung der Fahrspuren aller auf dem Schlag eingesetzten Fahrzeuge lassen sich schließlich Gesamtspurfäche, Spurfächenanteile und Überrollhäufigkeiten berechnen.

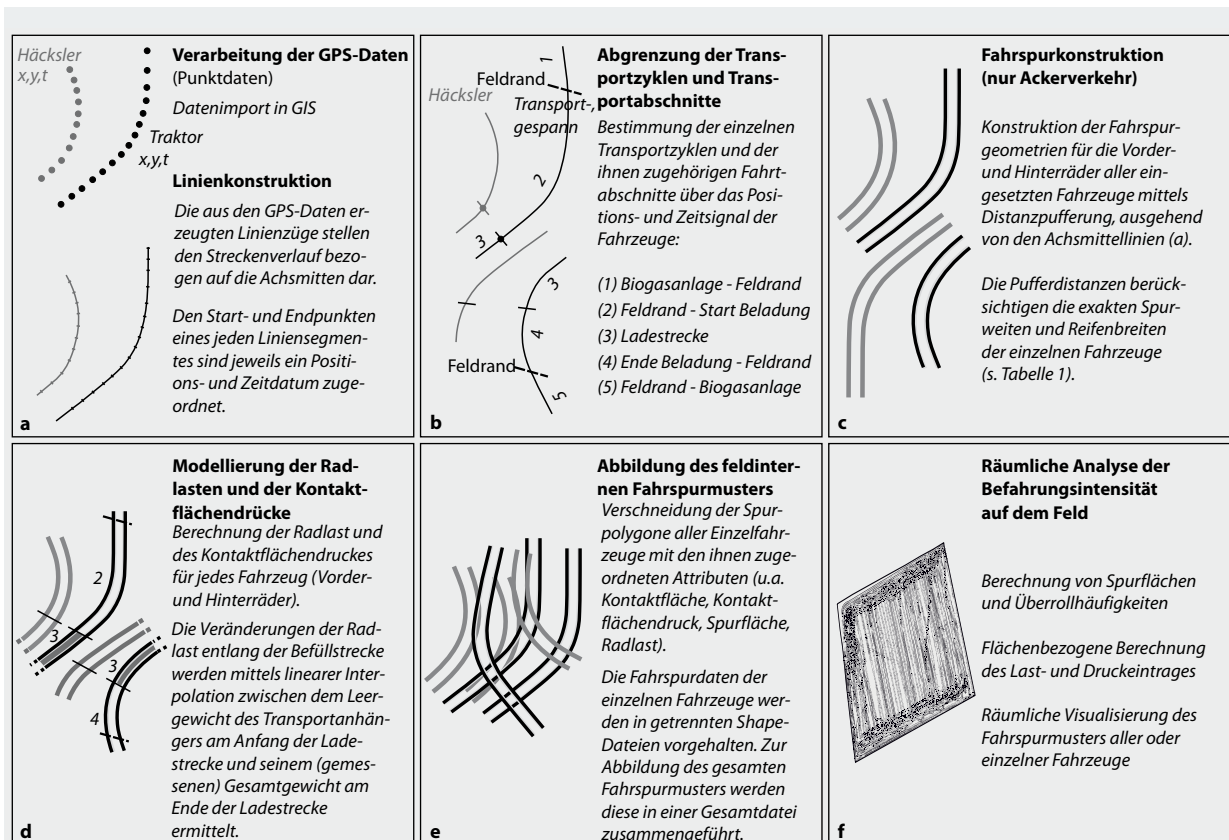


Abbildung 2

Modellierung des Ernte- und Transportverkehrs in einem Geographischen Informationssystem (Duttman et al., 2013, S.103)

In Verbindung mit den technischen Fahrzeugeigenschaften, wie Reifeninnendruck und Radlast kann auf die mechanische Belastung der betrachteten Teilfläche des Schlages geschlossen werden. Die Auswirkungen auf die mit unterschiedlicher Intensität befahrenen Feldabschnitte können anschließend sowohl mit punktuellen bodenphysikalischen Methoden als auch mit einer ganzflächigen Ertragskartierung quantifiziert werden.

Begriffsbestimmungen

Der Begriff *Transport- oder Abfuhrgespann* wird für die Kombination aus Traktor mit angehängtem Silowagen verwendet. Die *Gesamtstrecke* der Transportgespanne beschreibt die bei Beladung auf dem Schlag, im Transfer zwischen Schlagzufahrt und Ladebeginn/-ende sowie beim Transport zwischen Substratlagerplatz und Erntefläche gefahrene Strecke.

Die *Gesamtstrecke* der Transportfahrzeuge wird in *Erntestrecke* und *Transportstrecke* untergliedert. Mit dem Begriff *Erntestrecke* wird der Streckenanteil der Beladung des Silowagens auf dem Schlag beschrieben. Die *Transportstrecke* der Abfuhrgespanne umfasst die auf der Straße zurückgelegten Distanzen und die feldinternen Fahrten von der Feldzufahrt zum Ladebeginn am Häcksler und zwischen Ladeende und Feldausfahrt.

Die Fahrstrecken des Häckslers werden in die *Erntestrecke* und die *Umsetzfahrten* unterteilt. Als *Umsetzfahrt* wird die

Fahrt des Häckslers von einer Erntefläche zur nächsten bezeichnet.

Der Zeit- und Streckenabschnitt zwischen Verlassen des Substratlagerplatzes (Silowagen leer), Fahrt zur Erntefläche, Transferfahrt auf dem Schlag zum Häcksler, Beginn der Überladung bis Ladeende, Transferfahrt auf dem Schlag zur Feldausfahrt und Rückfahrt zum Substratlagerplatz (Silowagen voll) wird als *Transportzyklus* bezeichnet. Als *Erntezyklus* oder *Beladungszyklus* wird die im Transportzyklus enthaltene Teilstrecke der Beladung des Silowagens mit dem Erntegut verstanden, sie entspricht also der Distanz, die notwendig ist, um den Silowagen mit Maishäcksel zu befüllen.

3 Bilanzierung des erntebezogenen Transportverkehrs

Die bei der Ernte zurückzulegende Transportstrecke ist abhängig von der angebauten Kultur, dem Biomassertrag und dem eingesetzten Ernteverfahren sowie von der Entfernung zwischen der Erntefläche und dem Lager- oder Umschlagplatz. In Bezug auf die Silomaiserte lassen sich folgende Verkehrsanteile voneinander unterscheiden: der eigentliche Erntevorgang durch den Häcksler und der Verkehrsanteil der Abfuhrgespanne. Letzterer lässt sich weiter untergliedern in

(a) den flächenexternen Verkehr zwischen Substratlagerplatz und Schlag, (b) den flächeninternen Verkehr unterteilt in Ladeverkehr und Transferstrecke sowie (c) den flächenexternen Streckenanteil zurück zum Substratlagerplatz.

3.1 Transportaufwand auf Straße und Feld

Eine Übersicht über die hier im Detail untersuchten Ernte- und Transportfahrten gibt Tabelle 2. Diese Intensivuntersuchungsflächen sind in Abbildung 1 durch die grau hinterlegten Parzellenummern gekennzeichnet.

Der Anteil des durch die Transportfahrzeuge feldintern zurückgelegten Streckenanteils an der Gesamtfahrstrecke ist abhängig von der Entfernung der Erntefläche zum Substratlagerplatz. Je kürzer die Distanz zwischen Substratlagerplatz und

Erntefläche, desto größer der Anteil des feldinternen Transportverkehrs. Wie Tabelle 2 zeigt, hat Schlag 8 eine einfache Distanz zum Substratlager von 4,85 km. Auf den feldinternen Transportverkehr (Summe (b)) entfallen 12,48 km (8 %) der Gesamtfahrstrecke der Transportfahrzeuge, mit 135,73 km (92 %) trägt der feldexterne Verkehr ((a)+(c)) jedoch den weitaus größeren Teil zur Gesamtfahrstrecke bei. Vergleicht man diese Werte mit Schlag 3, dessen einfache Distanz zum Substratlagerplatz lediglich 1,02 km beträgt, entfallen hier 34 % des Verkehrs auf den feldinternen Transport, der feldexterne Streckenanteil macht hingegen 66 % (57,3 km) aus. Im Mittel der untersuchten Fahrten ist der feldinterne Transportverkehr mit rund 18 % an der Gesamtfahrstrecke der Abfuhrgespanne beteiligt. Mehr als 80 % der Fahrstrecke entfallen auf die Fahrten zwischen Erntefläche und Substratlagerplatz.

Tabelle 2

Gesamtstrecken und absolute bzw. relative Streckenanteile von Ernte- und Transportfahrten für ausgewählte Intensivuntersuchungsflächen

Nr.	Schlag		Transportfahrzeuge					Gesamtstrecke (a)+(b)+(c)	Häcksler Gesamtstrecke
	Fläche ha ¹⁾	einfache Distanz Substratlager – Schlag m	Teilstrecken ²⁾						
			Straße (a) Substratlager bis Feldgrenze m	Feld (b) Feldgrenze bis Ladebeginn m	Ladeende bis Ladeende m	Straße (c) Feldgrenze bis Substratlager m			
1	6,4	6.180	138.210	6.460	14.720	4.690	145.730	309.810	14.640 ²⁾ 14.160 ³⁾
			45 %	2 %	5 %	1 %	47 %	100 %	
2	4,1	3.530	56.260	2.980	10.360	2.880	42.610	115.090	10.700 ²⁾ 9.070 ³⁾
			49 %	3 %	9 %	2 %	37 %	100 %	
3	6,3	1.020	29.500	10.070	13.070	6.750	27.800	87.190	12.740 ²⁾ 14.080 ³⁾
			34 %	11 %	15 %	8 %	32 %	100 %	
4	6,5	3.440	84.440	5.600	15.930	6.080	87.430	199.480	15.360 ²⁾ 14.520 ³⁾
			42 %	3 %	8 %	3 %	44 %	100 %	
5	2,3	1.890	24.140	3.920	5.260	1.550	21.190	56.060	5.160 ²⁾ 5.200 ³⁾
			43 %	7 %	9 %	3 %	38 %	100 %	
6	2,8	1.940	31.310	5.560	5.700	4.060	24.070	70.700	5.750 ²⁾ 6.320 ³⁾
			44 %	8 %	8 %	6 %	34 %	100 %	
7	3,4	3.680	50.970	2.960	8.010	2.430	43.910	108.280	7.640 ²⁾ 7.480 ³⁾
			47 %	3 %	7 %	2 %	41 %	100 %	
8	2,7	4.850	66.170	2.900	6.160	3.420	69.560	148.210	6.930 ²⁾ 6.080 ³⁾
			45 %	2 %	4 %	2 %	47 %	100 %	
9	2,7	2.200	27.610	6.730	6.780	3.300	27.630	72.050	7.030 ²⁾ 6.000 ³⁾
			38 %	9 %	10 %	5 %	38 %	100 %	
10	3,6	1.460	23.770	5.150	8.300	2.650	27.310	67.180	8760 ²⁾ 8070 ³⁾
			35 %	8 %	12 %	4 %	41 %	100 %	

¹⁾ gerundet

²⁾ aus GPS-Daten berechnete Strecke

³⁾ berechnet aus Schlaggröße ÷ Arbeitsbreite (hier 4,5 m)

Betrachtet man die Gesamttransportstrecke in Relation zur Erntefläche, so zeigt sich, dass im Falle des hier untersuchten Gebietes, die Transportfahrzeuge im Mittel 30,27 km/ha Erntefläche zurücklegen. Die pro Hektar Erntefläche zurückzulegende Distanz für den Transport des Erntegutes verhält sich umgekehrt proportional zum feldinternen Streckenanteil an der Gesamttransportstrecke und korreliert direkt mit der Arbeitsbreite des Häckslers.

3.2 Feldinterner Transportaufwand

Die Streckenlänge für die feldinternen Zu- und Abfahrten der Transportgespanne wird beeinflusst durch die Schlagfläche, die Schlaggeometrie und den Biomassertrag, letzterer hier dargestellt anhand der mittleren einfachen Länge einer Erntefahrt. Auch der Ausbau des landwirtschaftlichen Wegenetzes und die Anzahl der Feldzufahrten haben einen Einfluss auf den feldinternen Transportanteil. Dieser Aspekt soll in der hier vorgestellten Untersuchung jedoch vernachlässigt werden.

Wie in Tabelle 3 dargestellt beträgt das Verhältnis von Transport- zu Erntestrecke bei Schlag 8 näherungsweise 1 (1,03), d. h. die feldintern zurückgelegte Wegstrecke teilt sich zu etwa gleichen Teilen auf in den Ladeverkehr und die Transferfahrten zwischen Schlagzufahrt und Beginn bzw. Ende der Beladung. Betrachtet man Schlag 6 im Vergleich, beträgt der Quotient aus Transport- zu Erntestrecke 1,69, d. h. Transport- und Erntestrecke stehen im Verhältnis 2:1, der feldinterne Transportaufwand ist doppelt so hoch wie die für die Ernte zurückgelegte Wegstrecke.

Hohe Transportstreckenanteile stehen in engem Zusammenhang mit einer ungleichmäßigen Schlaggeometrie, bzw. einer ungünstigen Erschließung des Schlages durch das landwirtschaftliche Wegenetz. Je unregelmäßiger ein Schlag geformt ist und je weiter sein Längen-Breiten-Verhältnis,

desto größer ist die pro Erntefläche (ha) zurückzulegende gesamte, flächeninterne Fahrtstrecke. Dies verdeutlicht Abbildung 3.

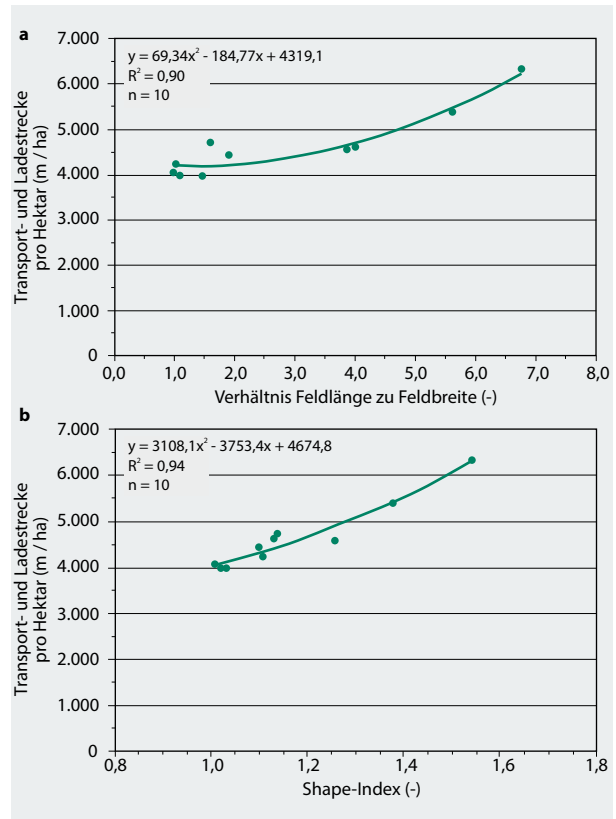


Abbildung 3
Zusammenhang zwischen der Länge der feldinternen Transportstrecke und der Schlaggeometrie (a: Verhältnis Schlaglänge/Schlagbreite; b: Formindex)

Tabelle 3

Feldinterner Verkehr in ausgewählten Schlägen, differenziert nach Teilstrecken für Transport und Beladung

Nr.	Schlag		Erntefahrten		Teilstrecken auf dem Schlag				Streckenverhältnis Transport- zu Erntestrecke (1+3) : (2)
	Fläche ha	mittlere, einfache Länge m	Anzahl n	Feldgrenze bis Ladebeginn (1) m	Ladebeginn bis Ladeende (2) m	Ladeende bis Feldgrenze (3) m	Gesamtstrecke (4) m		
1	6,4	640	23	6.460	14.720	4.690	25.870	0,76	
2	4,1	740	14	2.980	10.360	2.880	16.230	0,57	
3	6,3	480	27	10.070	13.070	6.750	29.890	1,29	
4	6,5	640	25	5.600	15.930	6.080	27.610	0,73	
5	2,3	440	12	3.920	5.260	1.550	10.730	1,04	
6	2,8	410	14	5.560	5.700	4.060	15.320	1,69	
7	3,4	570	14	2.960	8.010	2.430	13.400	0,67	
8	2,7	470	13	2.900	6.160	3.420	12.480	1,03	
9	2,7	570	12	6.730	6.780	3.300	16.810	1,48	
10	3,6	460	18	5.150	8.300	2.650	16.100	0,94	

Der in Abbildung 3 verwendete Formindex f (in Anlehnung an Hulshoff, 1995) setzt den Flächenumfang eines Schlages mit dessen Flächengröße in Beziehung und drückt die Verlängerung der Umrisslinie im Verhältnis zu derjenigen eines Quadrates aus. Er errechnet sich aus

$$f = \frac{\text{Umfang}[m]}{\sqrt{\text{Fläche}[m^2]} \times 4}$$

Ackerschläge mit Formindizes nahe „1“, d. h. annähernd gleichlangen Seitenverhältnissen, weisen den geringsten feldinternen Transportaufwand in Bezug auf die abzuerntende Fläche auf, während zunehmende Formindizes mit einem wachsenden Streckenaufwand einhergehen (Abbildung 3b). Gleiches gilt für die Zunahme des Verhältnisses von Feldlänge zu Feldbreite. Ergibt sich für ein Längen-Breiten-Verhältnis von „1“ rechnerisch eine feldinterne Transportstrecke von etwa 4,2 km/ha, so nimmt diese bei Annahme eines Verhältniswertes von „5“ auf ca. 5,1 km/ha zu (s. Abbildung 3a).

3.3 Schätzverfahren zur Ermittlung der Transportstreckenlänge bei Erntekampagnen

Die zurückzulegende Gesamtstrecke ist ebenso wie die feldinterne Fahrstrecke von der Anzahl der Transport- und Erntezyklen abhängig. Letztere steht ihrerseits in direktem Zusammenhang mit dem Flächenertrag an Biomasse, der Arbeitsbreite des Häckslers und der Ladekapazität des Transportanhängers.

Bei gegebener Maisgebissbreite und bekannter Ladekapazität lässt sich die Anzahl der Ernte- und Transportzyklen unter Berücksichtigung des erwarteten Flächenertrages und der Schüttdichte des Häckselgutes für einzelne Schläge abschätzen. Die mittlere Länge der einfachen Erntestrecke ergibt sich dabei näherungsweise aus der Division der Schlaggröße (m^2) durch die Arbeitsbreite (m) und durch die Anzahl der Erntezyklen (s. Abbildung 4). Die auf diese Weise zu ermittelnde durch den Häckslers zurückgelegte Gesamtstrecke stimmt in der Größenordnung gut mit den im Rahmen der Untersuchungen gemessenen GPS-Strecken überein (Tabelle 2).

Basierend auf den Ergebnissen dieser Untersuchungen wurden für den Praktiker Nomogramme abgeleitet, die eine Abschätzung des Gesamtstreckenaufwandes mit Hilfe der beiden Größen „einfache Entfernung zum Ernteschlag“ und „Größe des Ernteschlages“ gestatten (Abbildung 5 und 6).

Ihnen liegen die folgenden Bedingungen und Annahmen zugrunde:

1. die Arbeitsbreite des Maishäckslers beträgt 4,5 m (Abbildung 5) bzw. 6 m (Abbildung 6),

2. das Ladevolumen des Transportanhängers beträgt $50 m^3$,
3. die Schüttdichte für Silomaishäcksel wird mit $276 kg/m^3$ angenommen (vgl. Leurs, 2006, S. 42 und DLZ-Agrar-magazin 06/2010, S. 4),
4. ein zu erwartendes Ertragsniveau für Silomais von gering (40 t FM/ha), mittel (50 t FM/ha) und hoch (60 t FM/ha) (s. KTBL, 2009, S.973),
5. die Ernteschläge besitzen annähernd gleiche Seitenlängen bzw. quadratische Form. Für Schläge mit abweichendem Längen-Breiten-Verhältnis oder ungleichmäßiger Form sind Zuschläge nach Tabelle 4 vorzunehmen:

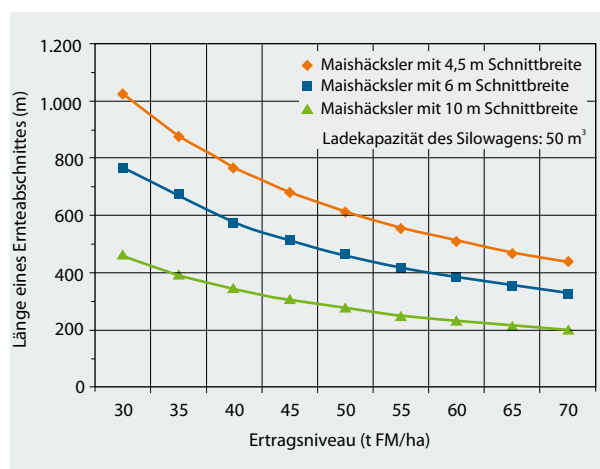


Abbildung 4 Abschätzung der Streckenlängen eines Ernteabschnittes in Abhängigkeit vom Ertragsniveau und der Arbeitsbreite für ein Transportvolumen von $50 m^3$ (angenommene Schüttdichte der Maishäcksel: $276 kg/m^3$)

Tabelle 4 Zuschläge für nicht-quadratische Schlagformen basierend auf dem Quotienten Feldlänge zu Feldbreite oder auf dem Formindex f (siehe Kapitel 3.2)

Verhältnis Feldlänge/ Feldbreite	Zuschlag auf Gesamtstrecke (m/ha)	Formindex	Zuschlag auf Gesamtstrecke (m/ha)
3	400	1,2	600
4	900	1,3	1.000
5	1.600	1,4	1.500

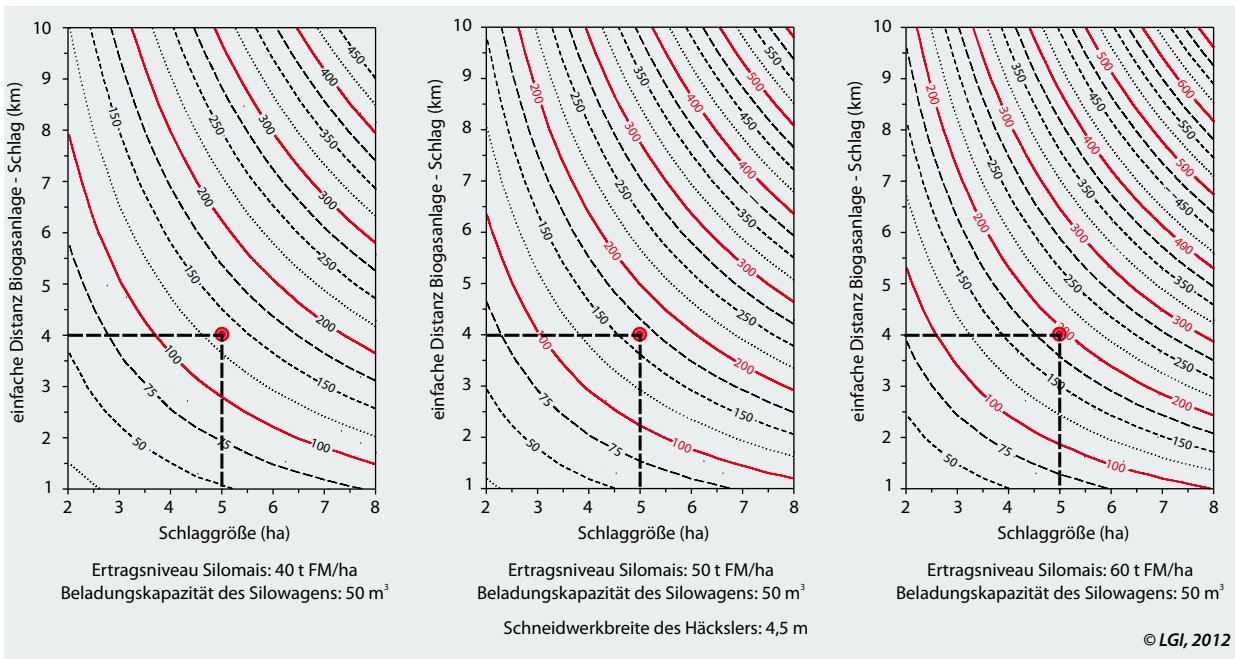


Abbildung 5

Nomogramm zur Abschätzung der Gesamttransportstrecke (km) (Straßen-, Wege- und Feldbefahrung) bei der Silomais-ernte in Abhängigkeit von Ertragsniveau, Entfernung zur Biogasanlage und Schlaggröße für eine Arbeitsbreite von 4,5 m (Markierung: Beispiel für die Bestimmung des Befahrungsaufwandes bei einer Schlaggröße von 5 ha und einer Entfernung von 4 km zwischen Erntefläche und Substratlagerplatz bzw. Biogasanlage sowie dem Flächenertrag: 134 km (bei 40 t/ha), 166 km (bei 50 t/ha) und 198 km (bei 60 t/ha))

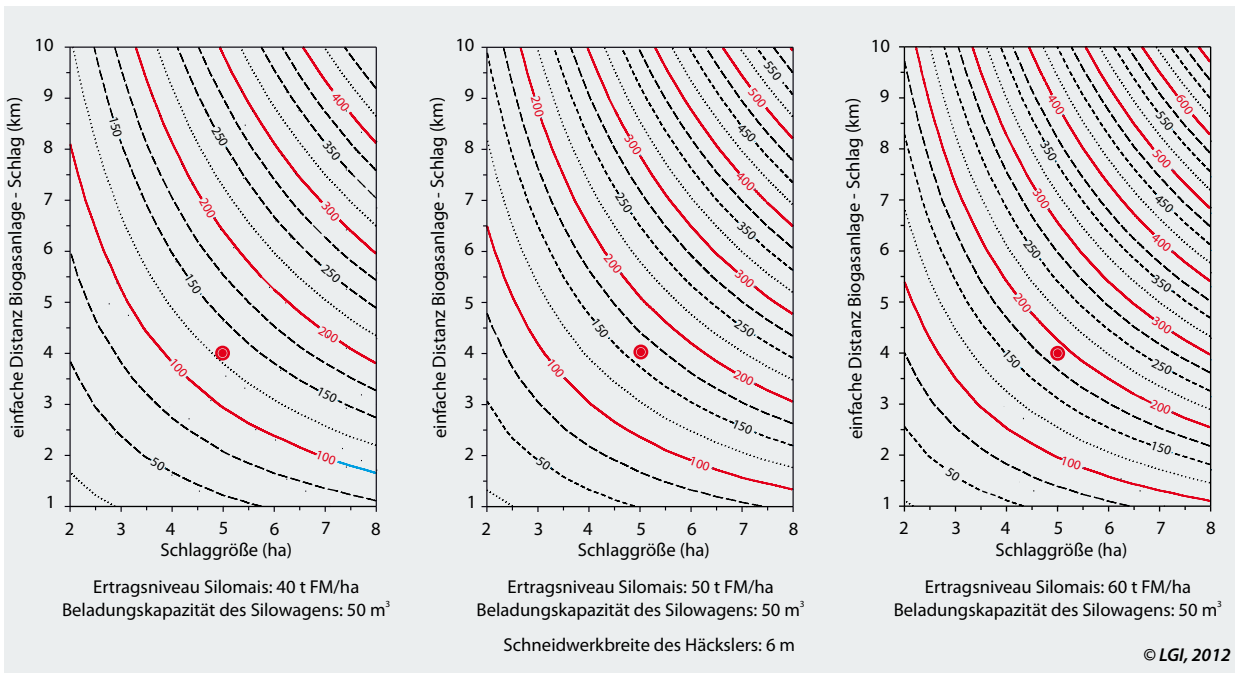


Abbildung 6

Nomogramm zur Abschätzung der Gesamttransportstrecke (km) (Straßen-, Wege- und Feldbefahrung) bei der Silomais-ernte in Abhängigkeit von Ertragsniveau, Entfernung zur Biogasanlage und Schlaggröße für eine Arbeitsbreite von 6 m (Markierung: Beispiel für die Bestimmung des Streckenaufwandes bei einer Schlaggröße von 5 ha und einer einfachen Entfernung zwischen Erntefläche und Substratlagerplatz bzw. Biogasanlage von 4 km))

3.4 Abschätzung der Gesamtfahrstrecken von Ernte- und Transportfahrten im Einzugsgebiet von Biogasanlagen

Die für die beiden Biogasanlagenstandorte „Sehlem“ (Gebiet 1) und „Lamspringe“ (Gebiet 2; vgl. Abbildung 1) ermittelten Streckenbilanzen sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Die Standorte unterscheiden sich durch die Größe ihres Einzugsgebietes sowie durch die räumliche Verteilung und die Gesamtfläche ihrer Silomaisschläge. Für die Anlage des Gebietes Sehlem wurden rund 42 ha Maisfläche geerntet, demgegenüber 71 ha Fläche für die Anlage am Standort Lamspringe (Tabelle 5).

Anlagenkonzepte mit dezentralen Substratlagerplätzen verlagern einen Teil des anfallenden Transportverkehrs aus der Erntekampagne heraus in den täglichen Anlagenbetrieb. Das Konzept der dezentralen Biogasanlage wurde hier nicht näher differenziert untersucht und beurteilt.

Entsprechend der größeren Distanzen zwischen den Schlägen und der Biogasanlage zeichnet sich das Gebiet Sehlem durch einen vergleichsweise hohen Streckenaufwand, d. h. durch ein deutlich ungünstigeres Verhältnis von Transportstrecke zu Erntefläche aus (s. Tabelle 5). Dieses liegt unter Annahme eines mittleren Flächenertrages von 50 t FM/ha bei etwa 35 km/ha. Dagegen ergibt sich für das Gebiet Lamspringe aufgrund der stärkeren Arrondierung der Schläge um die Biogasanlage herum ein wesentlich günstigerer Befahrungsaufwand von 24 km/ha. Bei einem für beide Gebiete angenommenem Silomaisertrag von 60 t FM/ha nimmt der Streckenaufwand im Gebiet Sehlem auf 41 km/ha und im Gebiet Lamspringe auf 29 km/ha zu. Die Werte machen deutlich, dass sich durch eine stärkere Konzentration der Silomaisschläge um die Biogasanlage herum eine deutliche Verringerung des Wege-, Zeit- und Kostenaufwandes erreichen ließe.

Unter Annahme eines mittleren bis hohen Flächenertrages ergeben sich für das Gebiet Sehlem rechnerisch Gesamttransportdistanzen von 1.473 km bis 1.728 km. Die gesamte vom Erntefahrzeug (Häcksler mit 4,5 m Arbeitsbreite) zurückgelegte Strecke beträgt 118 km. Entsprechend der größeren Anzahl und Fläche der Ernteschläge variiert die Transportdistanz im Gebiet Lamspringe in Abhängigkeit vom Ertragsniveau zwischen 1.724 km bei mittlerem Flächenertrag (50 t FM/ha) und

2.018 km bei einem hohem Ertrag von 60 t FM/ha. Für den Maishäcksler ergibt sich eine Gesamtstrecke von etwa 197 km.

4 Befahrungsintensitäten und Befahrungsmuster in ausgewählten Ernteschlägen

4.1 Spurfläche und Überrollhäufigkeiten

Die räumliche Verteilung der Spuren und die mit dem Ackerverkehr verbundenen Überrollhäufigkeiten sind in Abbildung 7 und Abbildung 8 für zwei Schläge mit unterschiedlicher Form und Größe dargestellt. 14,6 % der Fläche des Schlages 1 (vgl. Abbildung 7) werden zwei Mal überrollt. Im Beispiel von Schlag 8 mit einem eher länglichen Grundriss gegenüber der annähernd quadratischen Schlagfläche 1, werden 21,1 % der Fläche zwei Mal überrollt (vgl. Abbildung 8). Je höher die Anzahl der Überrollungen, desto stärker nimmt der Flächenanteil an der Gesamtschlagfläche ab. Hohe Überrollhäufigkeiten treten insbesondere im Vorgehende der Flächen, den längsseitigen Zufahrtstrecken und im Bereich der Feldzufahrten auf. Dies wird besonders in Abbildung 8 deutlich (vgl. Detailkarte rechts unten). Wie Tabelle 6 verdeutlicht, wurden mit der durchgeführten Untersuchung Maximalwerte von mehr als 40 Überrollungen aufgezeichnet und räumlich verortet.

Eine Übersicht über die Spurflächenanteile der einzelnen Fahrzeuge und des gesamten feldinternen Ernte- und Transportverkehrs gibt Tabelle 6. Danach nimmt die Gesamtspurfläche auf Schlag 8 einen Anteil von 63 % an der Schlagfläche ein. Betrachtet man die Spurfläche des Maishäckslers isoliert, so macht diese 35,7 % der Schlagfläche aus. Der alleinige Spurflächenanteil der Zugmaschinen beläuft sich auf etwa 40 %, derjenige der Transportanhänger auf rund 41 % (vgl. Tabelle 6). Die im Vergleich zum Häcksler höheren Spurflächenanteile des Abfuhrgespanns erklären sich aus den Transferfahrten auf dem Schlag. Beim Beladen begleiten Traktor und Silowagen den Häcksler, es fällt ungefähr die Wegstrecke des Erntefahrzeuges an. Hinzu kommen die Streckenanteile für die Fahrten zwischen Feldzufahrt und dem Beginn bzw. Ende der Überladung.

Tabelle 5

Gesamtfahrstrecke (km) und Streckenaufwand (km/ha Erntefläche) der Ernte- und Transportfahrzeuge in den Einzugsgebieten der Biogasanlagen Sehlem und Lamspringe in der Übersicht

Einzugsgebiet	Ernteschläge		Fahrstrecke, Transportzyklen, Transportstrecken und Streckenaufwand bei einem Ertragsniveau von						
	Anzahl	Fläche	Häcksler		50 t FM/ha		60 t FM/ha		
			Ernte- und Umsetzfahrten	Anzahl Transportzyklen	Gesamtstrecke	Streckenaufwand	Anzahl Transportzyklen	Gesamtstrecke	Streckenaufwand
n	ha	km	n	km	km/ha	n	km	km/ha	
Sehlem	9	42	118	152	1.473	35	182	1.728	41
Lamspringe	19	71	197	255	1.724	24	308	2.018	29

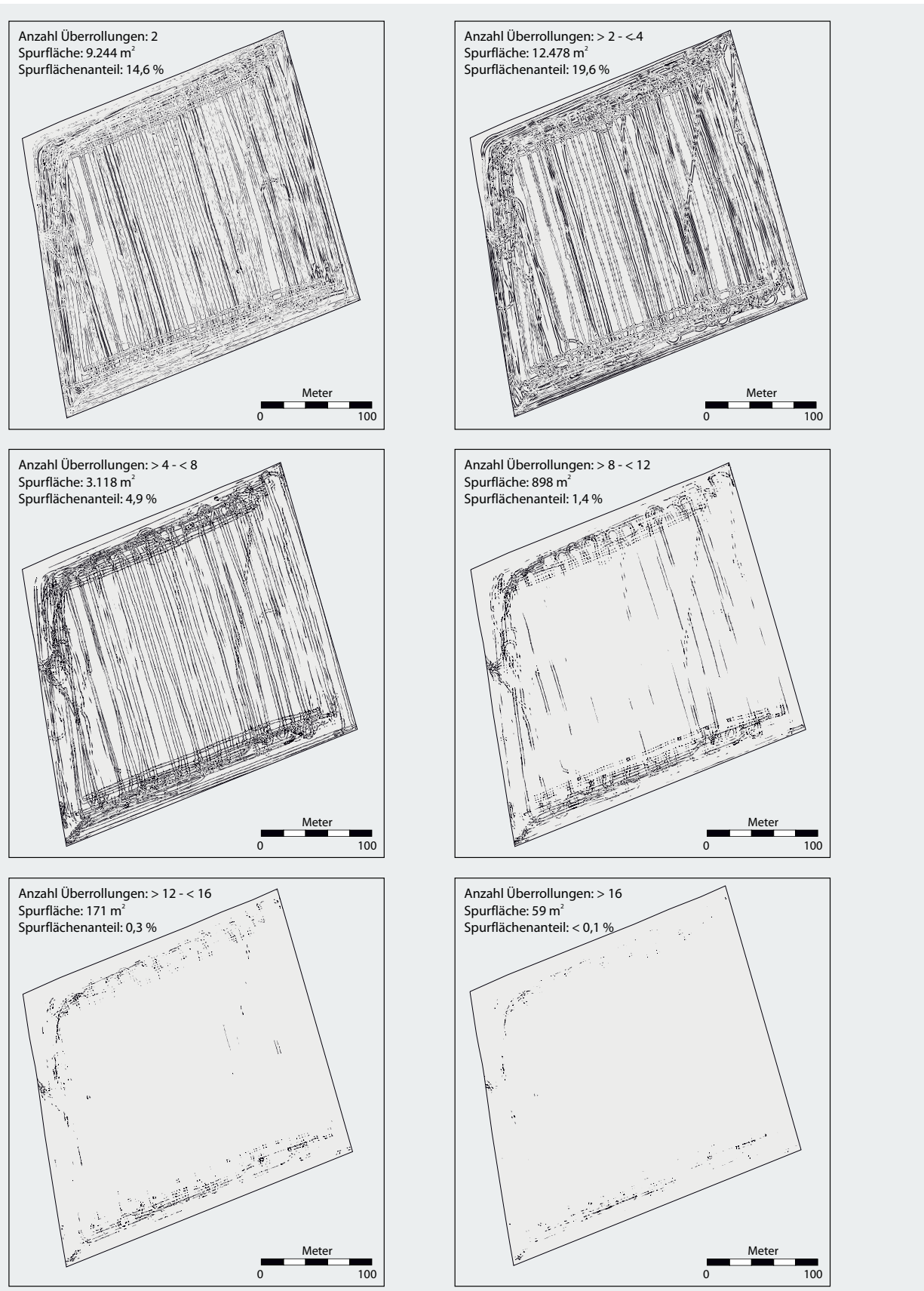


Abbildung 7

Spurfläche und Überrollhäufigkeiten von Ernte- und Transportfahrzeuge bei der Silomaiserte auf einem Schlag mit quadratischer Form (Schlag 1)

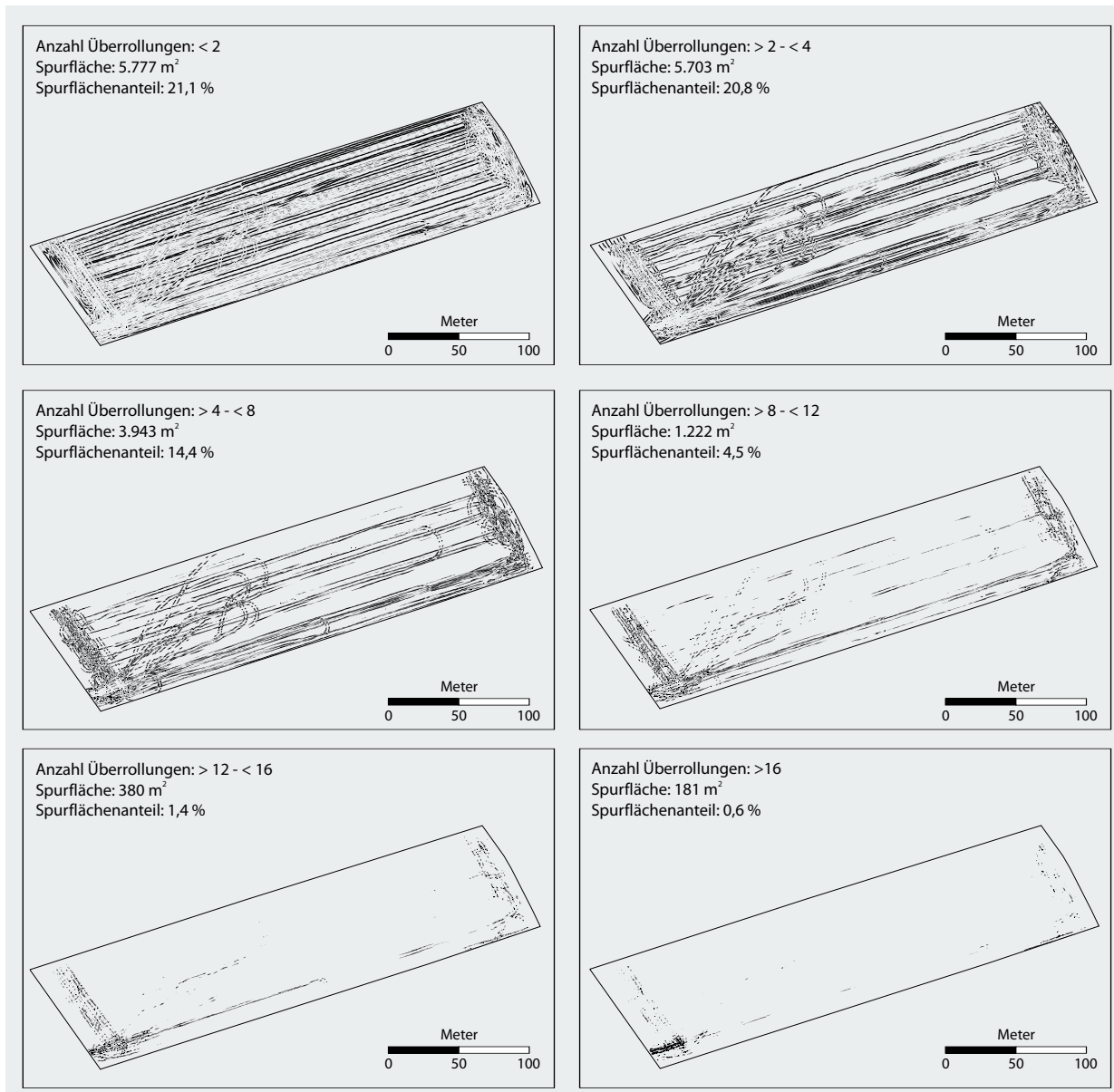


Abbildung 8

Spurfläche und Überrollhäufigkeiten von Ernte- und Transportfahrzeugen bei der Silomaiserte auf einem Schlag mit gleicher Feldlänge und Feldbreite (Schlag 8)

Die aufgezeichneten Fahrspuren und die ermittelten Überrollhäufigkeiten machen deutlich, dass mit Blick auf die Verminderung und Vermeidung von Bodenverdichtung der Optimierung des Ackerverkehrs in den genannten Bereichen somit zentrale Bedeutung zukommt. Im Fokus stehen dabei insbesondere die mit hohen Radlasten wiederholt überrollten Teilflächen.

Die in Tabelle 6 dargestellte addierte (kumulierte) Spurfläche aller Fahrzeuge erscheint insgesamt hoch. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Häcksler und Transportfahrzeuge in getrennten Spuren gefahren sind. Unter den gegebenen Bodenfeuchtebedingungen ist diese Abfuhrlogistik allerdings als sinnvoll zu betrachten, wie die parallelen Messungen von Bodenfunktionen (Luftkapazität, Wasserleitfähigkeit) im Unter-

boden belegen (s. Brunotte, 2013). Wären die Abfuhrspanne der Spur des Häckslers gefolgt, wäre es zu einer Erhöhung der Spurfläche mit 6-facher Überrollung und damit zu einer entsprechend starken Beeinträchtigung der Bodenfunktionen im Unterboden gekommen – auch wenn sich die Gesamtspurfläche des Ackerschlags reduziert hätte. Das bedeutet, dass sich die Abfuhrlogistik, d. h. die Entscheidung zur Erhöhung des Spurflächenanteils und Verringerung der Überrollhäufigkeit oder zur Konzentration des Lasteinetrages auf weniger Spurfläche immer an den aktuellen Bodenfeuchtebedingungen orientieren muss. Eine einfache Formel, welcher Weg aus Sicht des vorsorgenden Bodenschutzes sinnvoll ist, kann hier nicht gegeben werden und muss immer als Einzelfallentscheidung getroffen werden.

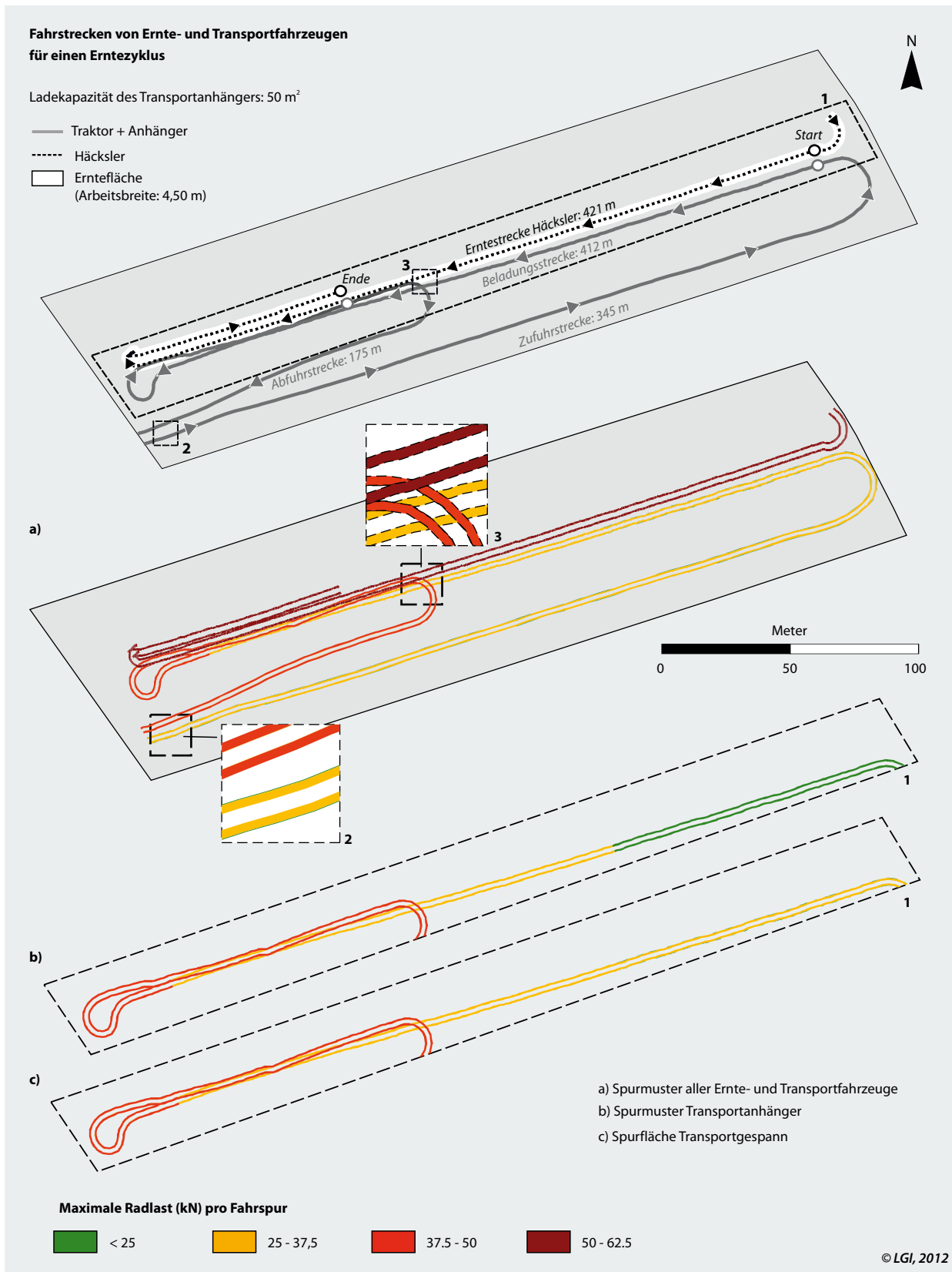


Abbildung 9 Räumliche Verteilung der maximal in einer Fahrspur auftretenden Radlast, dargestellt für einen Erntezyklus (Schlag 8)

Tabelle 6

Spurflächenanteile und Überrollhäufigkeiten der Ernte- und Transportfahrzeuge auf Schlag 8

Fahrzeug	Überrollte Fläche in % Feldfläche			Überrollungen max. Anzahl	
	Anzahl Überrollungen			Spurfläche %	n
	2	4	> 4		
Häcksler	30,7	4,2	0,8	35,7	-
Traktor	29,1	8,0	2,5	39,6	-
Silowagen	29,6	8,7	3,0	41,3	-
alle Fahrzeuge	21,1	20,8	20,9	62,8	42

4.2 Räumliche Verteilung der Radlasten

Die Radlast kann u.a. als möglicher Indikator zur Beurteilung der potentiellen Bodenfunktionsgefährdung durch den Ackerverkehr herangezogen werden. Mit Hilfe des Verteilungsmusters der Radlasten können Fahrspurabschnitte mit einer hohen mechanischen Belastung des Bodens durch den Ackerverkehr lokalisiert und räumlich sichtbar gemacht werden.

Abbildung 9 stellt die für einen Ernte- und Transportzyklus exemplarisch berechneten Radlasten fahrspurbezogen dar. Bei den dort abgebildeten Radlasten handelt es sich um die in einer Spur mindestens einmal eingetragene maximale Radlast. Sie berücksichtigen die im Zuge des Beladungsvorganges erfolgende Zunahme der Anhängerradlast (dynamische Radlastentwicklung) mit. Die Radlaständerung während der Beladung wurde unter Annahme einer gleichmäßigen Fahrgeschwindigkeit über eine lineare Interpolation zwischen dem Leergewicht des Transportanhängers am Startpunkt und dem Gesamtgewicht am Ende der Transportstrecke berechnet.

Unter den hier gegebenen Bedingungen beträgt die maximal in eine Fahrspur eingetragene Radlast etwa 60 kN. Diese Radlasten sind kennzeichnend für die Vorderräder des

Häckslers. Der Silowagen übt bei voller Beladung eine Radlast von etwa 54 kN aus. Nach van den Acker et al. (2003) sind Radlasten von mehr als 50 kN als „hoch“ anzusehen. Diserens (2009) geht davon aus, dass Achslasten von mehr als 10 t/ha (entspricht rechnerisch einer Radlast von 50 kN) mit dem Risiko einer schweren Bodenverdichtung verbunden sind. Sowohl die durch den Häcksler als auch die durch den voll beladenen Silowagen ausgeübten Radlasten können vor diesem Hintergrund als kritisch eingestuft werden. Die Auswirkungen aller technischen Parameter (Radlast, Kontaktflächen- druck, Reifeninnendruck, ...) auf die Veränderung der Bodenstruktur ist ausschnittsweise in Kapitel 5 (Abbildung 12, 13) dargestellt.

Betrachtet man diejenige Spurfläche, die mindestens einmal mit einer Radlast von mehr als 50 kN überrollt wurde, wird deutlich, dass den reinen Transferfahrten der Abfuhrspanne nach Beendigung der Beladung hin zur Feldausfahrt, hinsichtlich der Reduzierung des Lasteintrages in den Boden erhebliche Bedeutung zukommt (vgl. Abbildung 10). Sowohl in Abbildung 10a als auch in Abbildung 10b sind für die Radlastklasse ≥ 50 kN die orangenen Balken (Spurfläche ohne Zu- und Abfahrten auf dem Schlag) deutlich kleiner als die braunen Balken der Klasse (Spurflächen für gesamten Transportzyklus).

Wie Tabelle 7 zu entnehmen ist, wirken auf 28,1 % der durch die Abfuhrspanne feldintern belasteten Spurfläche maximale Radlasten von ≥ 50 kN. Legt man eine lineare Entwicklung der Radlast zugrunde, entspricht dies einem Fahrtstreckenanteil von circa 300 m. Betrachtet man die während der Beladung durch die Abfuhrspanne zurückgelegte Wegstrecke, reduziert sich der mit maximaler Radlast (≥ 50 kN) belastete Spurflächenanteil auf 12,8 % bzw. einen Wegstreckenanteil von rund 80 m. Bezogen auf die im Verlaufe eines Ernte- und Transportzyklus von allen Fahrzeugen erzeugte Spurfläche, beläuft sich der Anteil der mit Radlasten von ≥ 50 kN befahrenen Fläche auf 55,9 %. Mehr als ein Drittel davon entfällt auf den reinen Abtransport.

Wiederholtes Befahren einer Spur mit gleicher oder höherer Last entspricht einer stufenweisen Erhöhung der Radlast

Tabelle 7

Fläche der in einer Fahrspur auftretenden maximalen Radlasten für einen Erntezyklus auf Schlag 1

Art der Befahrung	Spurfläche (m ²) und Spurflächenanteile (%) ¹⁾ folgender Radlastklassen							Spurfläche gesamt m ²	Fahrstrecke gesamt m
	< 25 kN	25 - 30 kN	30 - 35 kN	35 - 40 kN	40 - 45 kN	45 - 50 kN	≥ 50 kN		
	m ²								
Transportfahrten – ohne feldinterne Zu- und Abfahrt –	12	10	379	135	135	120	116	908	639
Transportgespann	1,3 %	1,1 %	41,7 %	14,9 %	14,9 %	13,2 %	12,8 %	100 %	
Transportfahrten – mit feldinterner Zu- und Abfahrt –	12	10	719	135	135	120	455	1.586	1.104
Transportgespann	2,8 %	0,6 %	44,4 %	8,3 %	8,3 %	7,4 %	28,1 %	100 %	
Ernte- und Transportfahrten	45	10	702	95	109	120	1.370	2.451	1.743
Transportgespann und Häcksler	1,8 %	0,4 %	28,6 %	3,9 %	4,4 %	4,9 %	55,9 %	100 %	

¹⁾ bezogen auf die Spurfläche der beteiligten Fahrzeuge

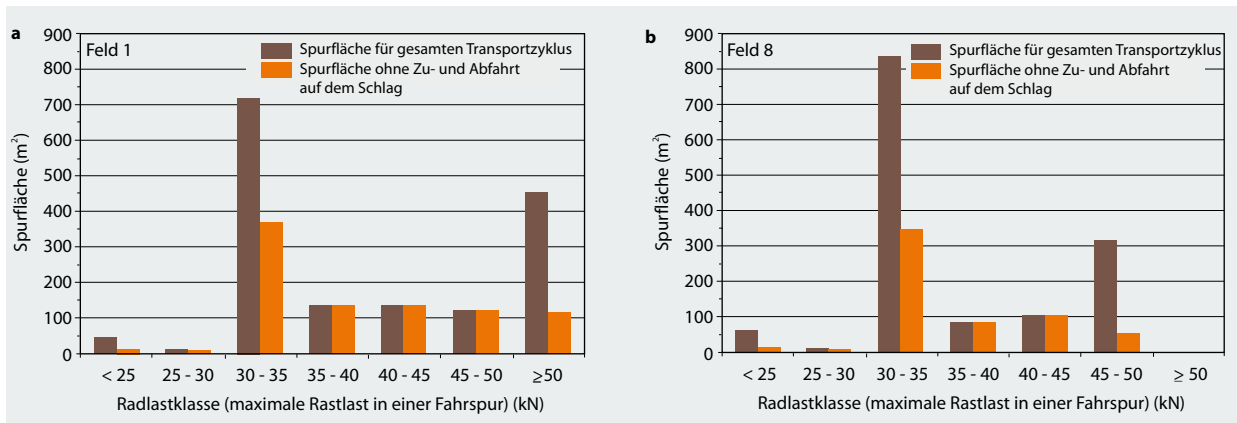


Abbildung 10
Spurflächenanteile einzelner Radlastklassen, dargestellt für je einen Transportzyklus in Schlag 1 und 8

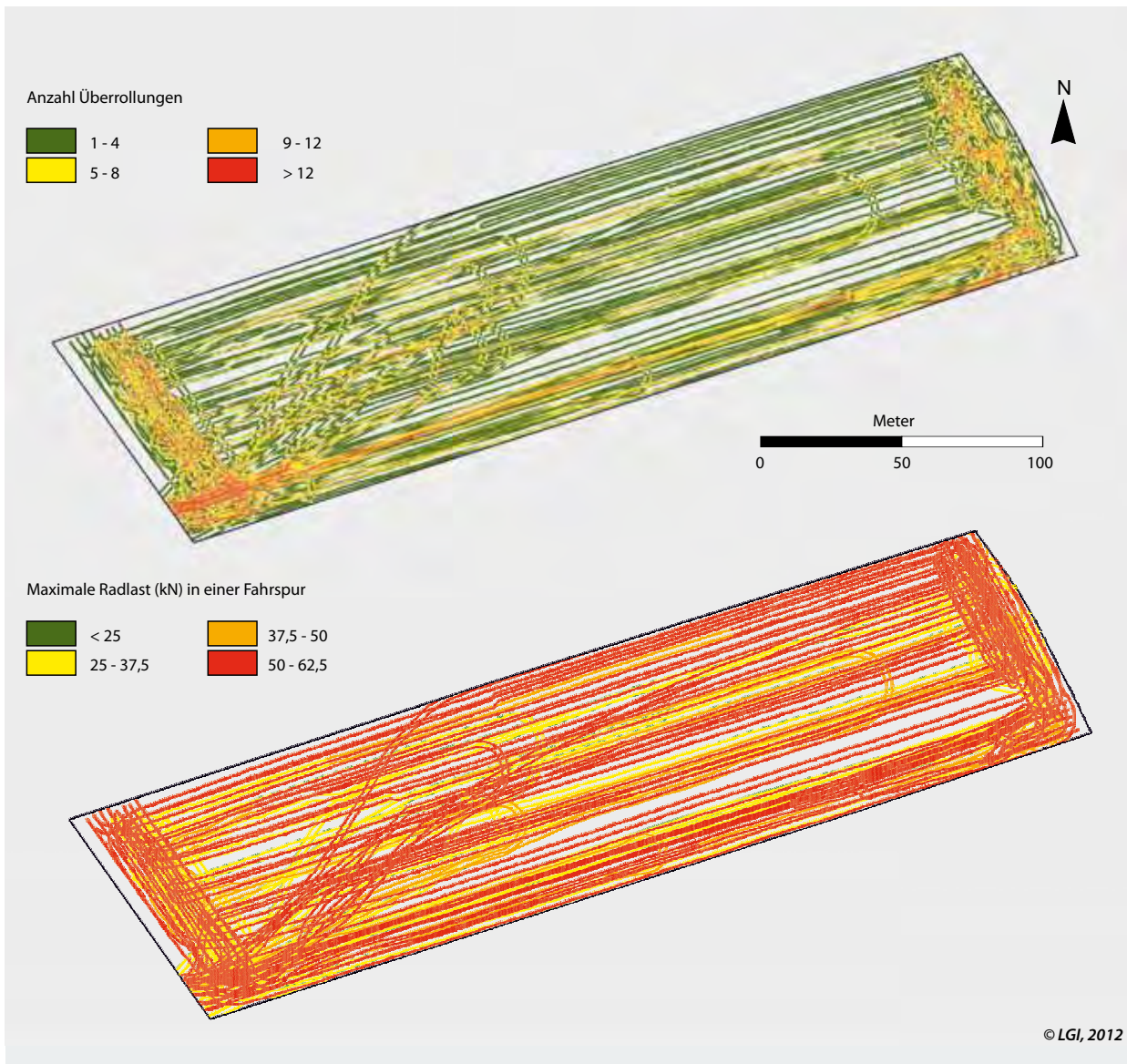


Abbildung 11
Spurmuster der Überrollhäufigkeiten und Radlastverteilung aller auf einem Ernteschlag eingesetzten Fahrzeuge (Duttmann et al., 2013, S.105f, verändert)

und führt damit zu einer zunehmenden Beanspruchung des Unterbodens (s. Brunotte und Sommer, 2007). Wie die für ein Feld (Schlag 8) dargestellten Befahrungsmuster zeigen, treten Spurabschnitte, die mehrfach unter hoher Radlast überrollt werden, konzentriert in den Vorgewenden und im Bereich der Feldauffahrt auf (Abbildung 11). Ein größerer Anteil an Spurfläche, die wiederholt mit hoher Radlast überrollt wird, entfällt zudem auf die Rückfahrten des beladenen Transportgespanns. Die in Tabelle 8 dargestellte Spurflächenbilanz macht deutlich, dass etwa 70 % der Gesamtspurfläche im Minimum zweimal mit einer Radlast von über 50 kN überrollt werden. Hieran sind die Transferfahrten der beladenen Transportgespanne mit mehr als einem Viertel beteiligt. Nur rund 30 % der Gesamtspurfläche wird mit einer als weniger kritisch betrachteten maximalen Radlast von < 50 kN befahren. Eine Optimierung des Ackerverkehrs mit dem Ziel, schädliche Veränderungen von Bodenfunktionen durch Belastung zu vermeiden, muss also insbesondere die mit hohen Radlasten befahrene Fläche auf ein notwendiges Maß beschränken (Abbildung 12, 13).

Tabelle 8
Spurflächenanteile differenziert nach Überrollhäufigkeiten und Radlasten auf einem Feld (Schlag 8)

Überrollungen	Spurflächenanteil (%) ¹⁾			
	n	überrollt mit einer maximalen Radlast (kN) von		
	< 25	25 - 37,5	37,5 - 50	50 - 62,5
≤2	0,8	1,9	0,8	30,1
> 2 - ≤ 4	-	13,8	7,6	11,8
> 4 - ≤ 6	-	0,5	0,6	12,7
> 6 - ≤ 8	-	1,3	2,2	5,6
> 8 - ≤ 10	-	< 0,1	0,1	4,5
> 10 - ≤ 16	-	0,2	0,4	4,0
> 16 - ≤ 20	-	-	-	0,7
> 20	-	-	-	0,4
Summe	0,8	17,8	11,7	69,8

¹⁾ bezogen auf die Gesamtspurfläche (17.206 m²)

5 Maßnahmen zur Optimierung des erntebezogenen Transportverkehrs auf Ackerschlägen

Grundsätzlich unterliegen die Arbeitsgänge zur Ernte von Silomais dem Zielkonflikt Feldhygiene/Bodenschutz. Damit ein der Ernte folgender Mulcharbeitsgang möglichst viel stehende Maisstoppeln zerkleinern kann, sollten Häcksler und Transportfahrzeug derselben Spur folgen. Dies bedeutet allerdings eine Erhöhung der Überrollhäufigkeit, die insbesondere bei feuchten Bodenzuständen mit einer zunehmenden Bodenverdichtungsgefahr verbunden ist. Die Empfehlungen, die hier gegeben werden, beziehen sich ausschließlich auf den Aspekt Bodenschonung.

Durch die Untersuchung zur Ernte- und Transportlogistik auf dem Acker ist deutlich geworden, dass Spurflächenanteile und Überrollhäufigkeiten reduziert werden können. Hierzu können Informationssysteme an Häcksler und Transportfahrzeug direkt beitragen. Heutige Techniken, wie Steuerung des Auswurfkrümmers, sorgen mithilfe einer digitalen 3-D-Bildanalyse für eine automatische Befüllung der Transporteinheiten bei Tag, Nacht und Dunst, wodurch der Silowagen optimal befüllt wird. Zukünftig sollte diese Information an die anderen Transportfahrzeuge übermittelt werden, so dass dann gezielt der Wechsellpunkt zweier Fahrzeuge angesteuert werden kann. Dies würde eine Minderung des Spurflächenanteils und der Überrollhäufigkeit bedeuten. Da das ablösende Transportfahrzeug just-in-time auf günstigstem Weg erst dann zum Häcksler fährt, wenn der vorherige Silowagen maximal befüllt ist.

Bei jeglicher Befahrung muss im Vorfeld eine Anpassung der Häcksel- und Transporttechnik an die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens erfolgen. Zu diesem Zweck wurde ein Planungsinstrument entwickelt, dem 15-jährige Belastungsversuche, Stuserhebungen und Ergebnisse aus Bodendauerbeobachtungsflächen (=BDF) zugrunde liegen (Brunotte et al., 2011a). Die Experten gestützte Entscheidungsmatrix (siehe Abbildung 12) nimmt nach einer Plausibilitätsanalyse die Einstufung der Maschinen in Abhängigkeit ihrer „mechanischen Bodenbelastung“ in Krume und nahem Unterboden bzw. ihrem „Beitrag zum Boden schonenden Befahren“ vor.

Die Matrix ist gekennzeichnet durch ein Quadratraster mit 5 Stufen. Auf der X-Achse wird die standortabhängige Verdichtungsempfindlichkeit abgetragen. Sie kann entweder sehr schnell mithilfe der Zustandsformen des Bodens nach der KA 5 (Ad-Hoc-AG Boden, 2005) oder aufwendiger mit einer Feldgefügeansprache (Brunotte et al., 2011b) festgestellt werden. Auf der Y-Achse der Entscheidungsmatrix ist die mechanische Bodenbelastung durch den Maschineneinsatz klassifiziert.

Dem Vorsorgegedanken des Bodenschutzes wird dann Rechnung getragen, wenn der Maschineneinsatz sich der zum Zeitpunkt der geplanten Befahrung aktuell herrschenden Verdichtungsempfindlichkeit des Standortes anpasst. Würde umgekehrt der Boden auf die nicht angepasste mechanische Belastung durch die Maschinen reagieren, kann es schnell zu einer erhöhten Gefährdung der Bodenfunktionen kommen. Als Belastungsparameter wurden berücksichtigt: die Radlast, die Kontaktfläche, der mittlere Kontaktflächendruck, der Reifeninnendruck, der Spurflächenanteil, die Überrollhäufigkeit, die Schlaglänge und die Bodenbearbeitung.

(1) Bewertung des Verfahrens

Am Beispiel der Silomaisernte wird die Bewertung der mechanischen Belastung auf den Boden mithilfe bodenphysikalischer Parameter (vgl. bodenphysikalische Kennwerte nach KA 5; Ad-Hoc-AG Boden, 2005) vorgenommen. Als Kontrolle wird die unbefahrene Ausgangsvariante z. B. in 30 cm Tiefe mit einer Wasserleitfähigkeit (kf) von 35 cm/d, also der Stufe „kf3 - mittel“ (siehe Abbildung 13) herangezogen.

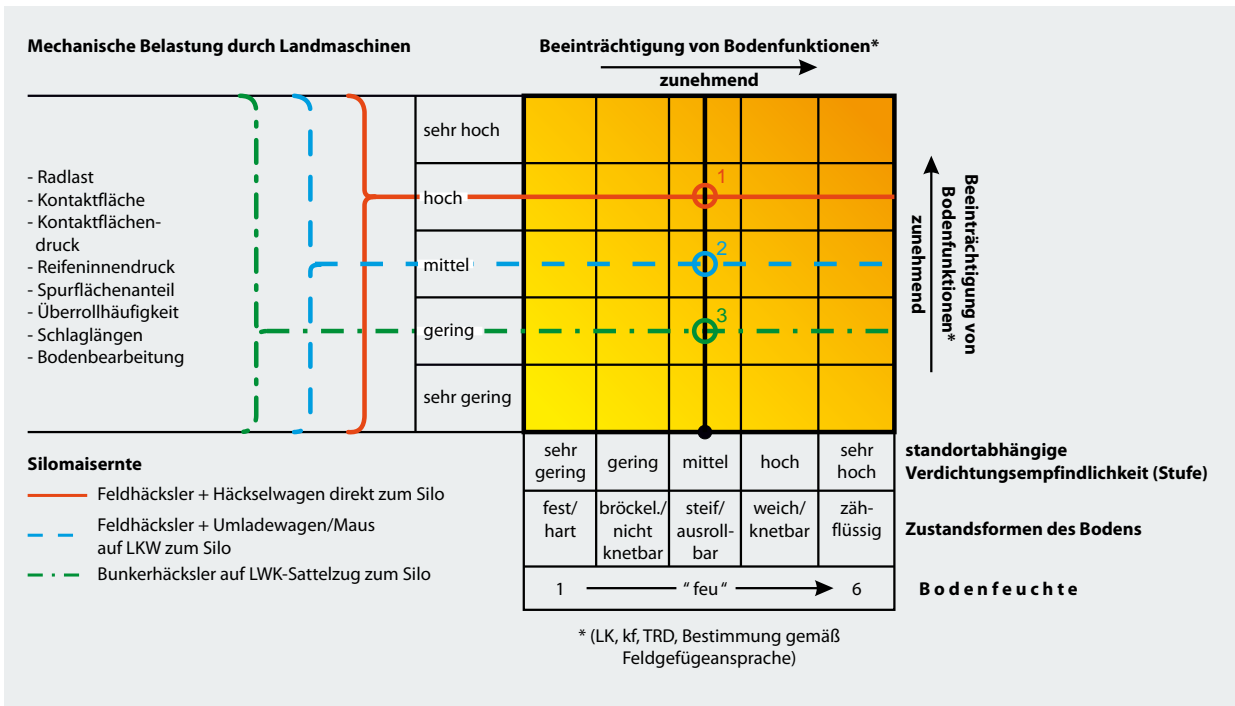


Abbildung 12
 Expertengestützte Entscheidungsmatrix zur Einstufung von standortabhängiger Verdichtungsempfindlichkeit (X-Achse) und mechanischer Bodenbelastung (Y-Achse) am Beispiel der Silomaisernte (Brunotte et al., 2011a, erweitert)

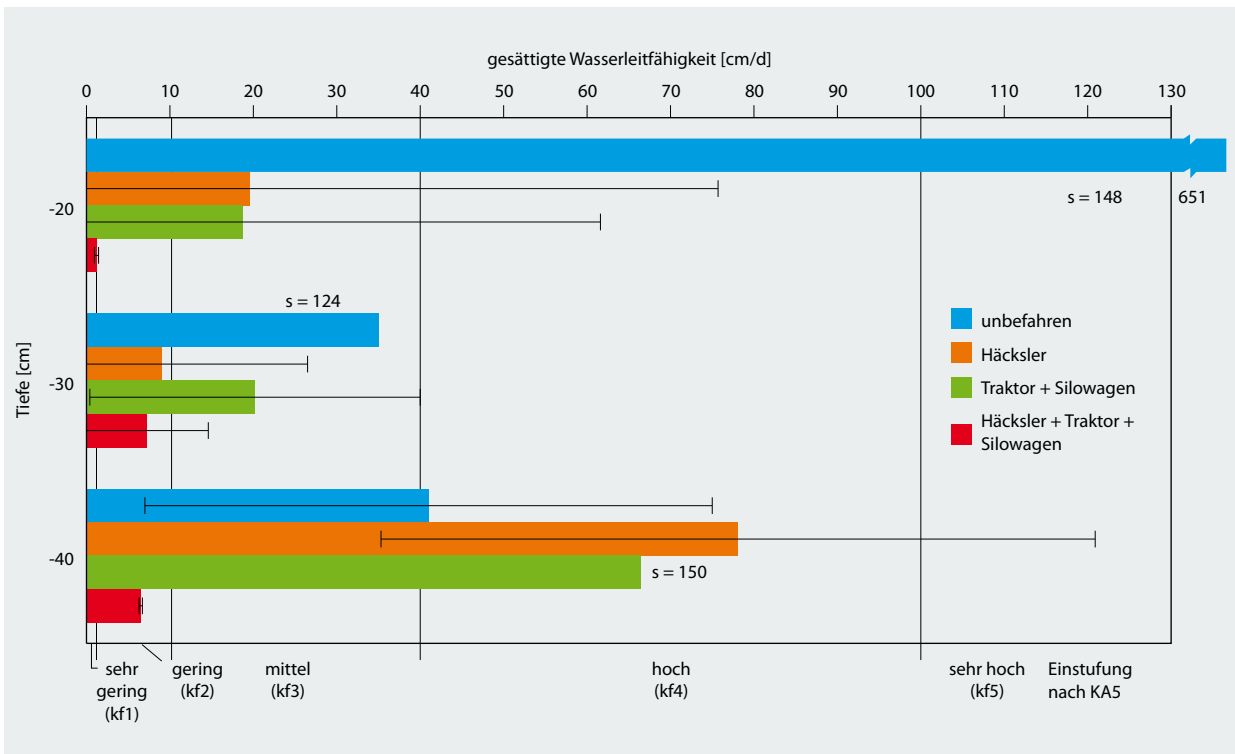


Abbildung 13
 Änderung der gesättigten Wasserleitfähigkeit durch Befahrung bei der Silomaisernte (Ut2-3, Lö), (Brunotte et al., 2011a)

Erfolgt durch die Befahrung mit Silomaishäcksler + parallel-fahrendem Transportfahrzeug (= hohe Überrollhäufigkeit und hoher Reifeninnendruck von 3 bar für die Straßenfahrt) eine Reduzierung der gesättigten Wasserleitfähigkeit in 30 cm Tiefe auf 8 cm/d, so liegt nur noch die Stufe „kf2 – gering“ vor. Die mechanische Belastung der Verfahrenskette Silomaiserte wird als reziproker Wert der kf-Stufe gebildet; in diesem Beispiel ist die mechanische Belastung folglich als „hoch“ zu klassifizieren. Diese Einstufung wird auf die Y-Achse der Entscheidungsmatrix übertragen. Der Schnittpunkt mit der standörtlichen Verdichtungsempfindlichkeit erlaubt Aussagen über die Gefährdung von Bodenfunktionen durch die Befahrung. Der zu betrachtende Beispielstandort toniger Schluff (Ut 2-3, Lö) mit 700 mm/a Niederschlag und der Bodenfeuchte „feu 3-4“ während der Erntezeit, ist in seiner Verdichtungsempfindlichkeit in der Stufe „mittel“ einzuordnen (=schwarze vertikale Gerade in Abbildung 12).

Der Schnittpunkt 1 der durchgezogenen horizontalen Maschinengeraden in Abbildung 12 (rot = Häcksler + parallel-fahrendes Transportfahrzeug) mit der vertikalen Standortgeraden liegt im „kritischen“ Bereich (dunkel gelb). Infolgedessen kann die Verfahrenskette im Mittel der Fälle kaum Boden schonend auf dem skizzierten Standort eingesetzt werden. Ein Befahren im „günstigen“ Bereich (Schnittpunkt 2, Abbildung 12) gelingt nur, wenn die mechanische Belastung in die Stufe „mittel“ (blau) verschoben wird. Dies kann durch eine Trennung von Feld- und Straßentransport erzielt werden: der Silowagen fährt in versetzten Spuren auf dem Acker mit um mehr als 1 bar reduziertem Reifeninnendruck, das Erntegut wird mittels stationärer oder mobiler Verladestation am Feldrand auf LKWs überladen. Der Einsatz von speziellen breit bereiften Überladewagen würde die Situation weiter entspannen. Eine weitere Verbesserung der

Bodenschonung kann mit einem Bunkerhäcksler erzielt werden, der am Feldrand direkt auf LKW-Züge überlädt. Der dann erreichte Schnittpunkt 3 (grün, Abbildung 12) zeigt eine weitere Schonung der Bodenfunktionen an und würde einen Einsatz auch bei zunehmender Feuchte („feu 4-5“) zulassen. Durch die Hundeganglenkung dieser Technikvariante (Räder der Vorder- und Hinterachse fahren räumlich gegeneinander versetzt) wird die Überrollung auf ein- bis zweimal reduziert. Durch die größere Bereifung wäre ein Reifeninnendruck $< 1,5$ bar möglich. Voraussetzung ist, dass die Schlaglänge an die Bunkerkapazität angepasst wird (Brunotte und Fröba, 2007; Brunotte et al., 2011a). Bei der vorgestellten Entscheidungsmatrix handelt es sich um ein expertengestütztes Planungsinstrument, mit dem eine grobe Voreinschätzung der Maschinenbelastung in Krume und nahem Unterboden möglich ist. Dies hilft, die Investitionen in die auf dem Betrieb vorgehaltene Technik und deren Einsatz zur Ernte genauer zu planen. Die tatsächliche Veränderung der Bodenstruktur durch die Befahrung wird dann mithilfe der Erfolgskontrolle festgestellt.

(2) Akzeptanz für das Planungsinstrument

Die Entscheidungsmatrix zur Planung von Maschineninvestitionen und – einsetz ist ein relativ neues Instrument für die Praxis. Erste Praxisanwendungen zeigen, dass die Herangehensweise durch den Praktiker als plausibel beurteilt wird. Die Einschätzung der Verdichtungsempfindlichkeit der eigenen Ackerschläge mithilfe der Feldgefügeansprache (Brunotte et al., 2011b) wird in Seminaren und auf Felddagen gut angenommen. Die Einstufung der Mechanisierungsketten durch wissenschaftliche Untersuchungen und Befahrungsversuche wird in der Praxis geteilt – eigene Messergebnisse für die mechanische Belastung liegen den Landwirten

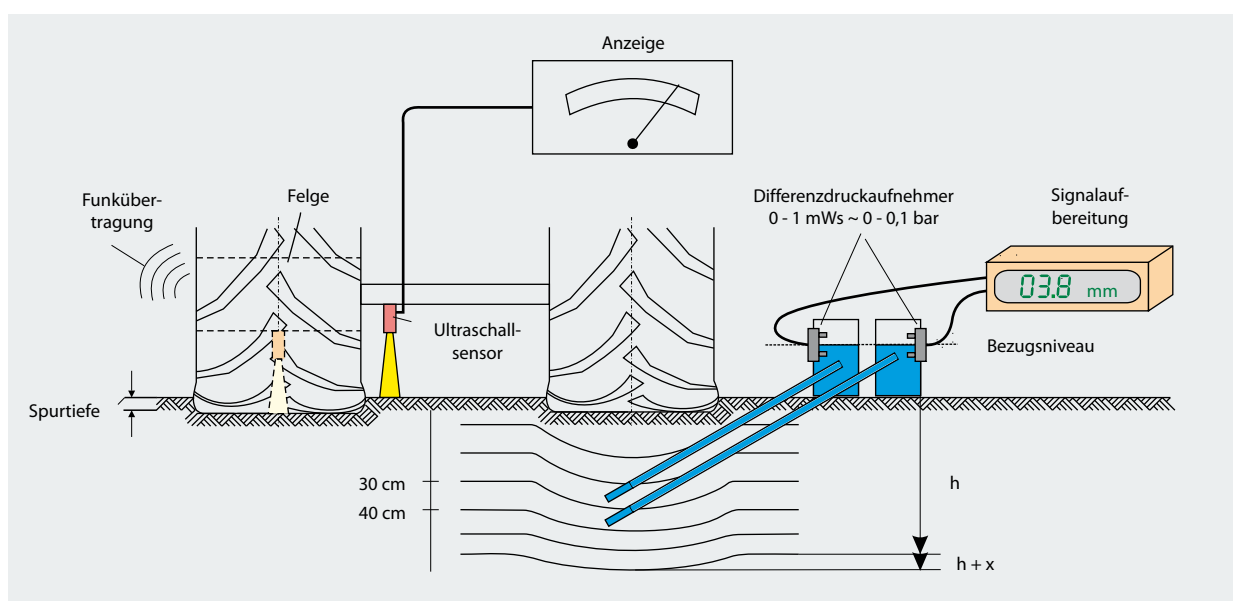


Abbildung 14

Multisensorsystem mit hydrostatischer Setzungsmessung und Ultraschallsensoren an landwirtschaftlichen Maschinen – Prototyp (Nolting et al., 2006)

nicht vor. Zukünftig wird es darauf ankommen, die Entscheidungsmatrix bei Kaufgesprächen in der Beratung mit einzusetzen. Nur so können Kriterien zur Maschinenauslastung auf Standort und Betrieb abgestimmt werden.

Eine sorgfältige Planung zum Maschineneinsatz berücksichtigt zwar Bodenart und Niederschlagsmenge, nicht aber den aktuellen Bodenzustand zum Zeitpunkt des Befahrens. Zu diesem Zweck ist ein Multisensorsystem zur Erfolgskontrolle der Befahrung hilfreich. Um dynamische Befahrungseffekte abzubilden, sind „in-situ“-Messungen erforderlich. Eingesetzte starre bzw. flexible Sonden (Bolling, 1987; Stahl et al., 2005; Lebert, 2010) zur Messung des Bodendruckes geben nur einen indirekten Hinweis auf die im Boden unter Last auftretenden Verformungsprozesse, da durch den Bodendruck induzierte Setzungen nicht erfasst werden – es wird eher die Fähigkeit des Bodens gemessen, Druck zu übertragen.

Die Verformung des Bodens unter Last wird an der Bodenoberfläche durch Ausbildung einer Fahrspur sichtbar. Aus dem Bestreben, die Fortsetzung dieser vertikalen Bodenbewegung von der Oberfläche in die Tiefe des Bodens zu verfolgen, entstand die grundlegende Idee zur „in situ“ Messung der Bodensetzung in unterschiedlichen Tiefen (Danfors, 1974; Arvidsson et al., 2001). Da der Aufwand zur Errichtung derartiger Messstellen sehr hoch war, haben Nolting et al. (2006) eine Schlauchwaage modifiziert und ein hydrostatisches Niveau-Messgerät entwickelt, das den 1. Baustein des Multisensorsystems darstellt (siehe Abbildung 14, Brunotte et al., 2011a). Die Setzungen im Boden können als Höhenunterschiede mit einer Auflösung von 0,1 mm gemessen werden. Durch die Messung der Bodensetzung allein kann noch keine direkte Aussage über den aktuellen Zustand der Funktionalität des Gefüges getroffen werden. Es kann jedoch eine Prognose erfolgen, ob durch die Befahrung mit einer Verschlechterung der Ausgangssituation zu rechnen ist. Die nachgeschalteten bodenphysikalischen Untersuchungen geben dann Auskunft, ob es zu einer Beeinträchtigung von Bodenfunktionen im Sinne § 17 BBodSchG gekommen ist. Den 2. Baustein des Multisensorsystems stellt ein Ultraschallsensor unter der Maschinenachse dar (Abbildung 14) – er ermöglicht eine online-Messung der Spurtiefe. Eine Verknüpfung mit der Setzung erfolgt, indem die vertikale Bodenbewegung nach unten mithilfe der hydrostatischen Niveaumessung erfasst wird. Zeigt diese eine bleibende Bodensetzung (= plastische Verformung) an, müssen Fahrzeugparameter an den kritischen Bodenzustand angepasst werden. Hier ist der 2. Ultraschallsensor in der Felge (3. Baustein des Multisensorsystems) eine Hilfe. Er misst die aktuelle Reifeneinfederung, die eng mit der dynamischen Radlast korreliert ist. Der Hersteller schreibt einen Maximalwert der Reifenabplattung fest, bis zu dem es zu keiner Schädigung des Reifens kommt und gleichzeitig eine maximale Kontaktfläche realisiert wird. Die Reifeneinfederung ist somit der Regelparameter, der eine Reifendruckverstellanlage in eine vollautomatische Reifendruckregelanlage verwandeln kann. Diese Technologie weist ohne Frage in die Zukunft und ist zurzeit auf den land-

wirtschaftlichen Betrieben noch nicht vorhanden. Sie schafft aber die Voraussetzung, dynamische Laständerungen zu messen und den erforderlichen Reifeninnendruck anzupassen im Sinne von „maximalen Bodenschutz gewährleisten“ und „Reifen schonen“.

Fazit: Der Einsatz hochmoderner Traktoren und hochspezialisierter Erntemaschinen unterliegt der Gratwanderung zwischen Rentabilität und Bodenschonung. Die Auslastung der Maschinen ist eine Frage der Betriebsgröße, der Böden und der Niederschlagsverteilung. Bei der Auswahl der Mechanisierungskette spielen: (a) die zur Verfügung stehenden Befahrbarkeitstage, (b) die Fahrlogistik auf dem Acker und (c) die Auswirkungen auf die Bodenstruktur eine Rolle. Nur die gleichzeitige Berücksichtigung aller Parameter erreicht einen umfassenden Bodenschutz in der Spur und auf der Fläche.

Danksagung

Die Verfasser danken den Landwirten im Raum Lamspringe und Sehm für ihre großzügige Unterstützung. Für ihre tatkräftige Mitwirkung bei den Feld- und Auswertungsarbeiten sei folgenden Studierenden des Geographischen Instituts an der CAU Kiel gedankt: Daniel Gerken, Wolfgang Hamer, Nicole Heckroth, Lars Mallow und Maria Matthes.

Literatur

- AD-HOC-AG BODEN (2005) Bodenkundliche Kartieranleitung. Stuttgart : Schweizerbart, 438 p
- Ahl C, Lange M, Henke S (2007) Auswirkungen des Energiepflanzenbaus zur Biogaserzeugung auf die Humuswirtschaft. Mitt Dt Bodenkundl Ges 110:665-666
- Arvidsson J, Trautner A, van den Akker JJJ, Schjonning P (2001) Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvestors in southern Sweden : II. Soil displacement during wheeling and model computations of compaction. Soil Tillage Res 60:79-89
- Blazej D, Soucek J (2011) Global positioning system utilization for monitoring of energetic biomass logistic processes [online]. Zu finden in <http://tf.llu.lv/conference/proceedings2011/Papers/035_Blazej.pdf> [zitiert am 29.01.2013]
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2011) Erneuerbare Energien 2010 : Daten des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2010 auf Grundlage der Angaben der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) ; vorläufige Angaben, Stand 23. März 2011. [online]. Zu finden in <http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee_in_zahlen_2010_bf.pdf> [zitiert am 29.01.2013]
- Bolling I (1987) Bodenverdichtung und Triebkraftverhalten bei Reifen : neue Meß- und Rechenmethoden. München : Selbstverl, 274 p, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft für Agrartechnik133
- Brunotte J (2013) Bodenschonendes Befahren bei der Silomaisenernte . In: KTBL (ed) Logistik rund um die Biogasanlage. Darmstadt : KTBL, 498:49-62
- Brunotte J, Vorderbrügge T, Nolting K, Sommer C (2011a) Mechanische Verdichtungsempfindlichkeit für Ackerflächen (Unterboden) - Validierung von Pedotransferfunktionen zur Ableitung der Verdichtungsempfindlichkeit bzw. zur Ausweisung „sensibler Gebiete“ in Europa und ein praxisorientierter Lösungsansatz zur Guten fachlichen Praxis : Teil IV: Ein praxis-

- orientierter Lösungsansatz zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtungen. *Landbauforsch* 61(1):51-74
- Brunotte J, Senger, M, Haaren M von, Heyn J, Brandhuber R, Voßhenrich H, Epperlein J, Vorderbrügge T, Ortmeier B, Lorens M (2011b) Einfache Feldgefügeansprache für den Praktiker. Braunschweig : vTI, 1 Tafel
- Brunotte J, Fröba N (2007) Schlaggestaltung - kostensenkend und bodenschonend. Darmstadt : KTBL, 178 p, KTBL-Schrift 460
- Brunotte J, Sommer C (2007) Maschineneinsatz unter Berücksichtigung der Befahrbarkeit landwirtschaftlich genutzter Böden. Berlin : Beuth Verlag, 68 p, VDI-Richtlinien 06101
- Danfors B (1974) Packning i alven. *Specialmeddelande / Jordbrukstkniska institutet* 24
- Diserens E (2009) Calculating the contact area of trailer tires in the field. *Soil Tillage Res* 103:302-309
- DLZ-Agrarmagazin (2010) Auf die Länge kommt es an. *DLZ-Agrarmagazin* 2010(6):2-5
- Duttmann R, Brunotte J, Bach M (2013) Spatial analysis of field traffic intensity and modeling of changes in wheel load and ground contact pressure in individual fields during a silage maize harvest. *Soil Tillage Res* 126:100-111
- Hulshoff RM (1995) Landscape indices describing a Dutch landscape. *Landscape Ecol* 10:101-111
- Jering A, Klatt A, Seven J, Ehlers K, Günther J, Ostermeier A, Mönch L (2012) Globale Landflächen und Biomasse nachhaltig und ressourcenschonend nutzen [online]. Zu finden in <<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/4321.htm>> [zitiert am 28.01.2013]
- KTBL (2009) Faustzahlen für die Landwirtschaft. Darmstadt : KTBL, 1180 p
- Lebert M (2010) Entwicklung eines Prüfkonzeptes zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden. Berlin : Umweltbundesamt, 96 p, Texte / Umweltbundesamt 51/10
- Leurs K (2006) Einfluss von Häcksellänge, Aufbereitungsgrad und Sorte auf die Siliereigenschaften von Mais. 159 p, Forschungsbericht Agrartechnik des Arbeitskreises Arbeitskreises Forschung und Lehre der Max-Eyth-Gesellschaft für Agrartechnik 438
- Nevens F, Reheul D (2003) The consequences of wheel-induced soil compaction and subsoiling for silage maize on a sandy loam soil in Belgium. *Soil Tillage Res* 70:175-184
- Nolting K, Brunotte J, Lorenz M, Sommer C (2006) Bodenverdichtung: bewegt sich was? Setzungsmessungen im Unterboden unter hoher Radlast. *Landtechnik* 61(4):190-191
- Scholz V, Krüger K, Höhen A (2001) Vergleichende Untersuchungen zum umweltverträglichen und energieeffizienten Anbau von Energiepflanzen. *Arch Agron Soil Sci* 47:333-361
- Senbayram M (2009) Greenhouse gas emission from soils of bioenergy crop production systems and regulating factors. Kiel : Inst Pflanzenern Bodenkunde, 129 p, SchrR Inst Pflanzenern Bodenkunde Univ Kiel 86
- Stahl H, Marschall K, Götze H (2005) Bodendruck und Bodenbelastbarkeit : Abschlussbericht zum Projekt „Risomanagement Bodengefüge“. Dresden : Sächsische Landesanst Landwirtsch, 127 p, SchrR Sächs Landesanst Landwirtsch 10,15
- Svoboda N (2011) Auswirkungen der Gärrestapplikation auf das Stickstoff-Auswaschungspotential von Anbausystemen zur Substratproduktion. Kiel : Inst Pflanzenbau Pflanzenzüchtung, 157 p, SchrR Inst Pflanzenbau Pflanzenzüchtung 76
- Van den Akker JJH, Arvidsson J, Horn R (2003) Introduction to the special issue on experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Union. *Soil Tillage Res* 73: 1-8
- Wiss Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (ed) (2009) *Welt im Wandel : zukunftsfähige Bioenergie und nachhaltige Landnutzung*. Berlin : WBGU, 388 p
- Willms W, Hufnagel J, Eulenstein F, Wagner B, Vetter A (2007) Humus- und Stickstoffbilanzen beim Anbau von Energiepflanzen. *Mitt Dt Bodenkundl Ges* 110:635-636

