

FORSCHUNGSBERICHT AGRARTECHNIK

des Fachausschusses Forschung und Lehre der
Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik im VDI (VDI-MEG)

513

Martin Holpp

Untersuchungen zu Controlled Traffic Farming und satellitenbasierten Lenksystemen

Dissertation

Witzenhausen 2012

Universität Kassel / Witzenhausen
Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften
Fachgebiet Agrartechnik
Prof. Dr. sc. agr. Oliver Hensel

Untersuchungen zu Controlled Traffic Farming und satellitenbasierten Lenksystemen

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)

von
Dipl.-Ing. (FH) Martin Holpp
aus Rottweil

2012

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich für Ökologische Agrarwissenschaften der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Agrarwissenschaften angenommen.

Tag der mündlichen Prüfung: 06.09.2012

Hauptberichter: Prof. Dr. sc. agr. Oliver Hensel

Mitberichter: Dr. sc. ETH Thomas Anken

Mündliche Prüfung: Prof. Dr. sc. agr. Oliver Hensel

Dr. sc. ETH Thomas Anken

Prof. Dr. Jürgen Heß

Prof. Dr. Stephan Peth

Alle Rechte vorbehalten. Die Verwendung von Texten und Bildern, auch auszugsweise, ist ohne Zustimmung des Autors urheberrechtswidrig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzung, Mikroverfilmung sowie die Speicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© 2012

Im Selbstverlag: Martin Holpp

Bezugsquellen: Forschungsanstalt Agroscope

Bibliothek

Tänikon 1

CH - 8356 Ettenhausen

Universität Kassel

Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften

Fachgebiet Agrartechnik

Nordbahnhofstr. 1a

DE - 37213 Witzenhausen

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsbereich Agrarökonomie und Agrartechnik an der Eidgenössischen Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART.

Mein Dank gilt

- meinen Betreuern Oliver Hensel und Thomas Anken für die optimalen Promotions- und Arbeitsbedingungen sowie guten Rat zur rechten Zeit.
- Jan Rek, Viktor Stadelmann, Hansruedi Oberholzer, René Reiser, Urs Zihlmann, Peter Weisskopf, Marlies Sommer, Andrea Bonvicini und Susanne Müller von der Forschungsgruppe Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz sowie Peter Schwab von der Nationalen Bodenbeobachtung für ihren engagierten und arbeitsintensiven Einsatz in der Erhebung und Aufarbeitung bodenphysikalischer und -biologischer Parameter.
- unseren Versuchstechnikern Jakob Heusser, Isidor Schiess und Matthias Hatt sowie Andreas Rohner vom Technischen Dienst für die tatkräftige und immer mitdenkende Unterstützung in der Durchführung des Feldversuches.
- August Sidler, Christian Schenk, Marc Wiemann und Stefan Mathis vom Versuchsbetrieb für die zuverlässige Durchführung der landwirtschaftlichen Arbeiten im Feldversuch.
- Silvio Schöneberger, Thomas Hämmerli und Hansruedi Ott von der Werkstatt für ihre Unterstützung in mechanischen und holztechnischen Belangen.
- Beat Kürsteiner und Hubert Bollhalder von der Messtechnik für ihren Elektroniksupport.
- Milan Kroulik und Zdenek Kviz an der Uni Prag für die Durchführung der Lenksystemmessungen unter erschwerten Bedingungen.
- Monika Sauter aus meiner Forschungsgruppe Agrartechnische Systeme für die aufwändige Datenaufarbeitung der Ernten und der Lenksystemmessungen.
- allen weiteren ARTisten, die zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen haben.
- meinem Arbeitgeber für die Möglichkeit, die Dissertation berufs begleitend zu erstellen.
- Peter Burgsmüller für das Lektorat.
- und natürlich meiner Partnerin Nike Burgsmüller für ihre Motivation und Ermutigung vor allem während des Schreibens der Arbeit.

Ein herzliches Merci Euch allen!

Kurzfassung

Diese Arbeit behandelt Controlled Traffic Farming (CTF) Anbausysteme, bei denen für alle Arbeitsgänge satellitengesteuert immer dieselben Fahrspuren benutzt werden. Lässt sich mit CTF die Belastung des Bodens verringern und die Effizienz von Direktsaat-Anbausystemen steigern? Neben agronomischen und bodenphysikalischen Parametern wurden Auswirkungen von Lenksystemen und Umsetzungsmöglichkeiten von CTF in die Praxis untersucht.

Die Analyse einer CTF-Umsetzung unter europäischen Bedingungen mit der Verwendung von Standardmaschinen zeigte, dass sich CTF-Anbausysteme mit den heute zur Verfügung stehenden Maschinen für Dauergrünland, Mähdruschfrüchte und Mais auf kleiner und grösser strukturierten Flächen relativ einfach mechanisieren lassen. Bei Zuckerrüben und Kartoffeln können Kompromisse notwendig sein. Generell erfordern CTF-Anbausysteme eine sorgfältige Planung und Umsetzung in die Praxis.

Im dreijährigen Feldversuch (Winterweizen, Wintergerste, Kunstwiese mit Klee-gras-mischung) auf einem Lehmboden wurde CTF-Direktsaat mit konventionell zufällig befahrenen Direktsaat- und Pflugverfahren verglichen. Unter CTF zeigte sich eine Differenzierung der nicht-, gering und intensiv befahrenen Varianten. Auf dem vorliegenden kompakten Boden mit 1150 mm Jahresniederschlag waren die Unterschiede zwischen den nicht befahrenen Flächen und den mit niedrigem Kontaktflächendruck befahrenen Flächen eher gering. In den nicht befahrenen Flächen entwickelten Eindringwiderstand und Kohlendioxidgehalt der Bodenluft nach drei Jahren signifikant bessere Werte. Bodendichte und Porosität zeigten hingegen keinen eindeutig interpretierbaren Trend. Aufgrund teils suboptimaler Feldaufgänge liess sich keine generelle agronomische Tendenz ableiten. Die intensive Befahrung der Pflegefahrgassen zeigte allerdings klar negative bodenkundliche und pflanzenbauliche Auswirkungen. Es bietet sich daher an, vor allem für Pflegearbeiten permanent dieselben Fahrspuren zu nutzen.

In der Untersuchung zu den Auswirkungen von Lenksystemen zeigten sich signifikante Vorteile von Lenksystemen in einer Verminderung der Fahrerbelastung und einer höheren Lenkgenauigkeit vor allem bei grossen Arbeitsbreiten ohne Spuranreisser. Die meisten anderen Messparameter waren mit Lenksystem leicht vorteilhafter als ohne, unterschieden sich aber nicht signifikant voneinander. Fahrer und naturräumliche Gegebenheiten wie die Schlagform hatten einen wesentlich grösseren Einfluss.

Gesamthaft betrachtet erweitert CTF in Kombination mit weiteren Bodenschutzmassnahmen die Möglichkeiten, Bodenverdichtungen zu vermeiden, den Bedarf an energieintensiver Bodenlockerung zu reduzieren und die Entwicklung einer stabileren Bodenstruktur mit höherer Tragfähigkeit zu fördern. Zusammen mit einer an Kultur und Anbausystem angepassten Saatbettbereitung und den in geraden Reihen einfacher durchführbaren mechanischen Pflegemassnahmen ergeben sich gute Voraussetzungen für die Gestaltung agronomisch leistungsfähiger und ökologisch nachhaltiger Anbausysteme.

Abstract

This thesis deals with Controlled Traffic Farming (CTF) cropping systems based on permanent, satellite-guided tramlines for all farming operations. Can CTF reduce soil stress and improve the efficiency of direct drilling cropping systems? Besides agronomic and soil physical parameters, the effects of guidance systems and possibilities of implementing CTF in practice were examined.

Analysis of a CTF implementation under European conditions with the use of standard machinery show that it is possible to mechanise CTF cropping systems for permanent grassland, combinable crops and maize with currently available machinery and with relative ease on both smaller and larger fields. With sugar beet and potatoes, trade-offs may be necessary. In general, CTF cropping systems require careful planning and implementation in practice.

In a three-year field trial (winter wheat, winter barley, temporary ley with a clover-grass mixture) on a loamy soil, CTF direct drilling was compared with conventional randomly trafficked direct-drilling and ploughing cropping systems. CTF was shown to differentiate into non-, medium and intensively trafficked variants. On the available compact soil with an annual precipitation of 1150mm, the differences between non-trafficked surfaces and those trafficked with low contact-surface pressure were fairly slight. After three years, penetration resistance and carbon dioxide content in the soil air exhibited significantly improved values, although soil density and porosity did not show a clearly interpretable trend. Because of suboptimal emergence rates in some cases, no general agronomic trends could be deduced. Nevertheless, intensive spraying-and-spreading traffic on tramlines produced clearly negative soil physical and agronomic effects. It would therefore be appropriate to use permanent tramlines in particular for spraying and spreading operations.

The examination of guidance-system effects revealed significant advantages in stress relief for the driver and a higher guidance accuracy, especially when driving with large working widths without track markers. Most other measuring parameters were slightly more advantageous with guidance systems than without, but did not differ significantly. The tractor drivers and properties of the natural environment such as field shape had a substantially higher impact.

Overall, CTF in combination with further soil-protection measures enhances the ability to prevent soil compaction, reduces the need for energy-intensive soil tillage, and promotes the development of a stable soil structure with a higher bearing strength. Together with seedbed preparation adapted to crops and cropping systems and with the mechanical cultivation operations that are more easily performed in straight rows, favourable conditions arise for the design of agronomically more efficient, more ecologically sustainable cropping systems.

Inhalt

1	Einleitung.....	1
1.1	Problemstellung	3
1.2	Zielsetzung.....	3
2	Stand des Wissens.....	5
2.1	Bodenschutz, Erosion und Bodenverdichtung	5
2.1.1	Bedeutung Bodenschutz	5
2.1.2	Erosionsschutz	6
2.1.3	Entstehung und Auswirkung von Bodenverdichtung	6
2.1.4	Bodenzustand	8
2.1.5	Belastungsgrenzen.....	9
2.1.6	Massnahmen gegen Bodenverdichtung	10
2.1.7	Vorsorgemassnahmen versus Praxisnutzung	12
2.2	Controlled Traffic Farming.....	14
2.2.1	Entwicklung von CTF.....	14
2.2.2	Agronomische und bodenphysikalische Auswirkungen von CTF	16
2.2.3	CTF in Europa	18
2.3	Lenksysteme.....	20
2.3.1	Entwicklung der Lenksysteme	20
2.3.2	Verfahrenstechnische und arbeitswirtschaftliche Auswirkungen	20
2.3.3	Ergonomische Auswirkungen	22
2.3.4	Wirtschaftlichkeit.....	23
3	CTF-Umsetzung	25
3.1	Dauergrünland	25
3.2	Mähdruschkulturen	27
3.3	Mais	28
3.4	Kunstwiese.....	29
3.5	Rüben/Kartoffeln	30
3.6	Planungshilfen	32
3.7	Schlussfolgerung	32
4	CTF-Feldversuch.....	33
4.1	Material und Methoden	33
4.1.1	Standort.....	33
4.1.2	Witterung	34
4.1.3	Anlage Feldversuch.....	36
4.1.4	Fruchtfolge	37

4.1.5	Verfahrenstechnik.....	38
4.1.5.1	Auswahl CTF-Spursystem.....	38
4.1.5.2	Verwendete Maschinen.....	39
4.1.5.3	Kontaktflächendruck.....	40
4.1.5.4	Befahrungsmuster.....	42
4.1.5.5	Parallelfahren.....	42
4.1.5.6	Pflegemassnahmen.....	42
4.1.6	Untersuchungsparameter.....	43
4.1.6.1	Bodendeformation.....	46
4.1.6.2	Penetrometrie.....	47
4.1.6.3	Porometrie.....	47
4.1.6.4	Saugspannung.....	49
4.1.6.5	Volumetrischer Bodenwassergehalt.....	49
4.1.6.6	Bodenluft.....	49
4.1.6.7	Bodenbiologische Aktivität.....	50
4.1.6.8	Feldaufgang.....	50
4.1.6.9	Zwischenernte.....	50
4.1.6.10	Vegetationsindex.....	51
4.1.6.11	Ernte.....	51
4.1.6.12	Spatenprobe und Blaufärbung.....	51
4.1.7	Datenauswertung und statistische Verfahren.....	51
4.2	Ergebnisse.....	53
4.2.1	Bodendeformation.....	53
4.2.2	Penetrometrie.....	54
4.2.3	Porometrie.....	56
4.2.4	Zusammenhang Bodendeformation, Penetrometrie und Porometrie.....	58
4.2.5	Saugspannung.....	60
4.2.6	Volumetrischer Bodenwassergehalt.....	62
4.2.7	Bodenluft.....	64
4.2.8	Saugspannung, volumetrischer Wassergehalt und Bodenluft.....	66
4.2.9	Zusammenhang Bodenluft, Saugspannung, volumetrischer Wassergehalt, Penetrometrie und Grobporenvolumen.....	70
4.2.10	Bodenbiologische Aktivität.....	72
4.2.11	Feldaufgang.....	74
4.2.12	Zwischenernte.....	75
4.2.13	Vegetationsindex.....	76
4.2.14	Ernte.....	78
4.2.15	Zusammenhang NDVI und Ernte.....	80

4.2.16	Zusammenhang Ernteerträge, Bodenparameter und Witterungsverlauf	82
4.2.17	Spatenprobe und Blaufärbung	85
4.3	Diskussion.....	88
4.3.1	Bodendeformation, Penetrometrie und Porometrie	88
4.3.2	Saugspannung, volumetrischer Bodenwassergehalt, Bodenluft.....	90
4.3.3	Bodenbiologische Aktivität.....	91
4.3.4	Feldaufgang, Zwischenernte, Vegetationsindex und Ernte	92
4.3.5	Spatenprobe und Blaufärbung.....	95
4.4	Schlussfolgerung	97
5	Messungen Lenksysteme	98
5.1	Material und Methoden	98
5.1.1	Versuchssdesign	98
5.1.2	Untersuchungsparameter	101
5.1.3	Messtechnik	101
5.1.4	Datenanalyse	102
5.2	Ergebnisse	104
5.2.1	Fahrgeschwindigkeiten.....	104
5.2.2	Wendezeiten	106
5.2.3	Lenkgenauigkeit	107
5.2.4	Ausnutzung Gerätearbeitsbreite.....	108
5.2.5	Herzfrequenz.....	108
5.3	Diskussion.....	110
5.3.1	Fahrgeschwindigkeiten.....	110
5.3.2	Wendezeiten	110
5.3.3	Lenkgenauigkeit	111
5.3.4	Ausnutzung Gerätearbeitsbreite.....	111
5.3.5	Herzfrequenz.....	111
5.3.6	Interpretationshinweise.....	112
5.4	Schlussfolgerung	113
6	Synthese und Ausblick	114
7	Zusammenfassung	116
8	Literatur	118
9	Anhang	129
9.1	Maschinen im CTF-Feldversuch	129
9.2	Saatgut.....	130
9.3	N _{min} -Beprobung.....	130
9.4	Schlagkarten	131

1 Einleitung

Die Landwirtschaft steht weltweit vor grossen Herausforderungen. Zum einen prognostiziert die UN einen Zuwachs der Weltbevölkerung von heute 7 Mrd auf über 9 Mrd. im Jahre 2050 (UN 2010). Nach Untersuchungen der Weltbank wird dieses Wachstum in Verbindung mit veränderten Ernährungsgewohnheiten wie erhöhtem Fleischkonsum zu einer 50% höheren Nachfrage nach Lebensmitteln führen (Evans 2009). Zum anderen wird in Europa und Nordamerika in grossem Flächenumfang der Anbau nachwachsender Rohstoffe gefördert, die in Konkurrenz zum Nahrungsmittelanbau stehen. Die Landwirtschaft ist heute in grösserem Umfang denn je als Produzent von Food, Feed, Fuel & Fibre (Nahrungsmittel, Futtermittel, Energieträger, Materialien) gefragt (ESF/COST 2009).

Der notwendigen Erhöhung der landwirtschaftlichen Produktion steht gegenüber, dass Erosion und negative Auswirkungen des Klimawandels wie längere Trockenzeiten und häufigere Starkniederschläge die Ertragsfähigkeit der Flächen gefährden (Friedrich 2007; Fuhrer 2008).

Zur Bewältigung der Herausforderungen ist die Produktivität landwirtschaftlicher Flächen zu erhalten bzw. zu verbessern. Daher wird seit längerem die Umsetzung eines vorsorgenden Bodenschutzes gefordert und gefördert. In der Europäischen Union hat die Ressource Boden aufgrund ihrer zentralen Bedeutung heute denselben Stellenwert wie Luft und Wasser (Nievergelt 2005).

Zum Erhalt und zur Steigerung der Bodenfruchtbarkeit wird neben vielfältigen Fruchtfolgen auf eine verminderte Bodenbearbeitungsintensität gesetzt. Den verschiedenen Varianten ist gemein, dass eine eventuelle Bodenbearbeitung mit nichtwendend arbeitenden Geräten wie Grubbern und Scheibeneggen erfolgt und auf den Pflug verzichtet wird. Dadurch werden eine Bodenbedeckung und die natürliche Bodenschichtung erhalten, natürliche Regenerationsprozesse werden gefördert. Mit abnehmender Bearbeitungstiefe nehmen die Vorteile für die Bodenentwicklung zu. In Kombination mit einer möglichst durchgehenden, flächendeckenden Begrünung der Flächen ergeben sich ein effizienter Erosionsschutz und gute Voraussetzungen für eine Steigerung der Bodenfruchtbarkeit (Derpsch 2010; Friedrich 2007; Linke 1998).

Aus ökonomischen Gründen und im Sinne einer möglichst effizienten Ressourcenverwendung wird im Ackerbau auch eine Reduktion des Energieeinsatzes angestrebt. Die Umstellung von Pflug hin zur nichtwendenden Bodenbearbeitung reduziert den Treibstoffverbrauch bereits stark. Je geringer die Arbeitstiefe, desto stärker sinkt der Kraftbedarf. Direktsaatverfahren mit einem auf das absolut notwendige Minimum reduzierten Bodeneingriff kommen mit einem Treibstoffverbrauch von unter 10l/ha aus. Beim Pflug sind es etwa 30-52l/ha und bei nichtwendenden Geräten abhängig von Arbeitstiefe, Bodenart und Bodenzustand 15-47l/ha (Hörner 2010; Schäfer 2010).

Mit der Abnahme der Bearbeitungstiefe und der Anzahl der für die Bestellung erforderlichen Arbeitsgänge sinkt auch der Arbeitszeitbedarf. Im Vergleich zu Pflug und konservierender Bodenbearbeitung ist der Zeitbedarf bei Direktsaat zwischen 40-75% niedriger und führt zu einer entsprechenden Kostensenkung (Linke 1998).

Aufgrund der genannten Vorteile hinsichtlich Bodenfruchtbarkeit, Erosionsschutz, Energie-, Maschinen- und Arbeitskräfteeinsatz hat sich die Bewirtschaftung ohne Pflug weltweit verbreitet. Die besonders ausgeprägten Vorteile der Direktsaatverfahren werden auf 105 Mio. ha vorwiegend in Nord- und Südamerika sowie Australien genutzt; in Europa liegt der Anteil lediglich im niedrigen einstelligen Prozentbereich (Chamen 2011; Derpsch & Friedrich 2009).

In den klimatisch gemässigten europäischen Anbaugebieten liegt dies neben ackerhygienischen Gründen vor allem auch daran, dass die unter Direktsaat nicht behobenen Oberbodenverdichtungen sich zumindest in den ersten Jahren der Umstellung von der Keimung bis zum Ertrag negativ auf die Pflanzenentwicklung auswirken (Chamen 2011; Linke 1998). Für die Praxis wiegen diese Nachteile oft schwerer als die Vorteile und in der Regel werden deshalb meist Anbausysteme mit Bodenbearbeitung genutzt (Dölger & Jürgens 2009).

Die Behebung und Vermeidung der durch die Befahrung von Flächen entstehenden Verdichtungen ist seit langem Thema in der landwirtschaftlichen Forschung. Die Entwicklung von Fahrstrategien und Einführung von Spursystemen mit konsequenter Trennung von Fahr- und Wachstumsraum geht weit zurück (Taylor 1994), wurde in der Praxis aber nur mit Pflegefahrspuren für Pflanzenschutz und Düngung umgesetzt. Ein Grossteil der Fläche wird heute weiterhin mehr oder wenig zufällig befahren. Die dabei entstehenden Verdichtungen müssen auf ackerbaulich genutzten Flächen regelmässig energie- und zeitaufwändig wieder beseitigt werden. Auf Dauergrünland bleiben sie mit den entsprechenden negativen Auswirkungen auf Bestandeszusammensetzung und Ertrag erhalten (Würfel et al. 2002).

Eine komplette Vermeidung der Entstehung von Oberbodenverdichtung könnte Direktsaatverfahren im Ackerbau und die Bewirtschaftung von Dauergrünland wesentlich robuster und leistungsfähiger machen (Chamen et al. 1992a).

Ein Lösungsansatz kommt aus Australien. Mit der Markteinführung satellitenbasierter Lenksysteme für landwirtschaftliche Maschinen in den 1990-er Jahren wurden im semiariden Getreidebau und im subtropischen Zuckerrohranbau unter der Bezeichnung *Controlled Traffic Farming (CTF)* permanente Fahrgassensysteme für alle Arbeitsgänge eingeführt. Durch die Vermeidung von Oberbodenverdichtungen verbesserten sich Luft- und Wasserführung, die Anbausysteme wurden robuster in Trockenzeiten und bei Starkniederschlägen (Webb & Blackwell 2004).

In den letzten Jahrzehnten vor allem in Grossbritannien und den Niederlanden durchgeführte Forschungsarbeiten legen nahe, dass an die hiesigen Rahmenbedingungen angepasste CTF-Anbausysteme auch unter mitteleuropäischen Bedingungen die Effizienz des Pflanzenbaus nachhaltig verbessern könnten (Chamen 2011; Vermeulen & Korteweg 2007). Mit der zunehmenden Verbreitung satellitenbasierter Lenksysteme wäre auch eine Grundvoraussetzung für die Einführung von CTF-Anbausystemen in Europa gegeben. Die hohen Initialinvestitionen in Kombination mit fehlenden Informationen zum arbeitswirtschaftlichen und ergonomischen Nutzen sind für viele Landwirte aber Haupthindernisgründe für die Anschaffung eines Lenksystems (Hörner et al. 2009; Prem et al. 2004).

1.1 Problemstellung

Als Entscheidungsgrundlage zur Einführung von CTF-Anbausystemen unter Nutzung von Lenksystemen sind verschiedene Fragen offen: Lassen sich unter europäischen Rahmenbedingungen CTF-Anbausysteme mit Standardmaschinen implementieren? Welche bodenkundlichen und pflanzenbaulichen Auswirkungen sind durch CTF-Anbausysteme unter mitteleuropäischen Anbaubedingungen vor allem unter Flächen ohne Bodenbearbeitung wie Direktsaat und Grünland zu erwarten? Welche arbeitswirtschaftlichen und ergonomischen Auswirkungen können automatischen Lenksystemen zugeschrieben werden?

1.2 Zielsetzung

Die Ziele der Arbeit sind:

- Der aktuelle Stand des Wissens bezüglich Bodenschutz und Bodenverdichtung, Controlled Traffic Farming sowie Lenksysteme ist erarbeitet (2).
- Die Möglichkeiten einer CTF-Umsetzung unter europäischen Bedingungen mit der Verwendung von Standardmaschinen sind dargestellt (3).
- In einem dreijährigen Exaktfeldversuch sind die bodenkundlichen und pflanzenbaulichen Auswirkungen einer mit Standardmaschinen praxisnah realisierten CTF-Bewirtschaftung eines Direktsaatstandortes im Vergleich zu Parzellen mit konventioneller Befahrung unter allgemeiner Einhaltung eines Bodenschutzes nach guter fachlicher Praxis erhoben. Lässt sich durch CTF in Kombination mit weiteren technischen Vorsorgemöglichkeiten die Leistungsfähigkeit von Anbauverfahren wie Getreide unter Direktsaat und Kunstwiese (Schweizer Bezeichnung für ein- bis mehrjährigen Ackerfutterbau mit Kleegrasmischungen) verbessern? (4).
- Mit Praxismessungen sind arbeitswirtschaftliche und ergonomische Auswirkungen von Lenksystemen untersucht. Es sind Aussagen getroffen, ob und wie sich der Einsatz von Lenksystemen im Vergleich zum manuellen Lenken auswirkt (5).

2 Stand des Wissens

2.1 Bodenschutz, Erosionsschutz und Bodenverdichtung

2.1.1 Bedeutung Bodenschutz

In der Ökosphäre nehmen Böden vielfältige Funktionen wahr. Sie spielen im Wasser-, Luft- und Stoffhaushalt eine wichtige Rolle, sind Lebensraum für Pflanzen, Tiere und verschiedenste Bodenorganismen und bilden die Grundlage für eine land- und forstwirtschaftliche Nutzung (Scheffer & Schachtschabel 2002).

Eine unangepasste Nutzung beeinträchtigt Böden in ihrer Funktion. Die FAO berichtet von kritischer Bodendegradation durch Erosion und Verdichtung weltweit. Die Bodenfruchtbarkeit und damit verbunden die Ertragsfähigkeit sind gefährdet (Friedrich 2007). Auch Mitteleuropa ist betroffen. In der konzertierten Aktion *Eurocrops* wurde der Verbesserung der Bodenstruktur, dem Erosionsschutz und nachhaltigen Bewirtschaftungssystemen eine hohe Priorität eingeräumt (Nemecek et al. 2009) und in der Vision für den Schweizer Pflanzenbau 2050 ist eine nachhaltigere Ressourcenbewirtschaftung Grundlage für einen zukunftsfähigen Pflanzenbau (Kölliker et al. 2008). Die schweizerische Erosionsrisikokarte zeigt auf, dass Bodenerosion in der Schweiz ein weit verbreitetes, schlag-spezifisches Problem ist (Prasuhn et al. 2007).

Als Antwort auf den schon seit Anfang der 1990er Jahre geforderten verstärkten Schutz der Ressource Boden (Poesse 1992) verankerten Ende der 1990er unter anderem Deutschland und die Schweiz den Bodenschutz in Gesetzesform. Richtlinien zur Bewirtschaftung nach guter fachlicher Praxis wurden definiert und sollen nachhaltige Bodenverdichtung und –erosion vermeiden und die Bodenfruchtbarkeit erhalten (BBodSchG 1998/2004; SR814.12 1998).

Auf europäischer Ebene sind die von 40 Ländern über das European Soil Bureau Network koordinierten Aktivitäten im Bereich Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz (Nievergelt 2005) noch nicht soweit fortgeschritten. Die 2006 vorgelegte EU-Bodenrahmenrichtlinie BRRL, die auf eine Vermeidung der Verschlechterung des Bodenzustands, die Erhaltung der Bodenfunktionen und die Ergreifung von Vorsorgemaßnahmen zielt, ist aufgrund von Vorbehalten vieler Länder noch nicht in Kraft getreten.

Mit den zu erwartenden extremer werdenden Witterungsereignissen infolge des Klimawandels steigen die physikalischen Anforderungen der Böden an Wasserspeicherung und Erosionstoleranz. Im Nordosten Deutschlands wird mit längeren Trockenperioden mit Ertragsrückgängen bis zu Komplettausfällen gerechnet. Durch häufiger auftretende Starkregenereignisse steigt die Erosionsgefahr (Mumme 2009). Schätzungen für die Schweiz gehen davon aus, dass es im Winter zu stärkerer Verschlammung und Erosion durch Niederschläge kommen kann. Im Frühjahr kann das Risiko von Frühsommertrockenheit und Staunässe steigen und im Sommer können häufiger Trockenheitsschäden, Hitzestress und Starkregen auftreten. Die Bewässerungsbedürftigkeit der Kulturen dürfte steigen (Fuhrer 2008; Fuhrer & Jasper 2009). Vielen Auswirkungen extremer Witterungsereignisse kann mit einer intakten Bodenstruktur begegnet werden. Hohe Infiltrationsraten puffern

Starkniederschläge ab und eine hohe Kapillarität sorgt für eine gute Wasserverfügbarkeit auch in Trockenperioden.

Der Schlüssel zur Erhaltung der vielfältigen Bodenfunktionen ist also eine intakte Bodenstruktur. Grundvoraussetzung hierfür sind der Schutz des Bodens vor Erosion und Verdichtung.

2.1.2 Erosionsschutz

Wind und Wasser können zu Erosion führen, wenn Böden diesen Elementen ungeschützt ausgesetzt sind. Kritische Situationen entstehen vor allem bei der wendenden Bodenbearbeitung, wenn schützende Pflanzen und/oder Erntereste untergepflügt werden und Verdichtungshorizonte (sogenannte Pflugsohlen) mit in der Folge reduzierter Infiltration induziert werden (Friedrich 2007). Erste Erosionsschutzmassnahmen wurden nach den in den 1930er Jahren aufgetretenen grossflächigen Winderosionen im Mittleren Westen der USA eingeleitet und die Bodenbedeckung erhaltende nichtwendende, flach lockernde Anbauverfahren und Direktsaatverfahren entwickelt. Durch eine oberflächliche Mulchschicht mit mindestens 30% Flächenbedeckungsgrad werden Aufprallenergie der Regentropfen und Windangriffsfläche wirksam vermindert, eine Verschlämmung der Bodenoberfläche mit in der Folge geringerer Infiltration verhindert und das Erosionsrisiko stark reduziert. Untersuchungen von Schweizer Praxisflächen belegten den Nutzen einer reduzierten Bearbeitung: Gegenüber 88% der gepflügten Flächen waren nur 9% der nichtwendend bearbeiteten Flächen mit weniger als 30% Mulchbedeckungsgrad, 2% der Direktsaatflächen und 1% der nichtwendend bearbeiteten Flächen mit mehr als 30% Mulchbedeckungsgrad von Erosion betroffen. Neben einer reduzierten Bodenbearbeitung sind vielfältige Fruchtfolgen mit Dauerbegrünung und mehrjährigem Ackerfutterbau ein effizientes Instrumentarium zum Erosionsschutz (Anken 2003; Mosimann & Rüttimann 1996; Mumme 2009; Prasuhn 2012; Scheffer & Schachtschabel 2002; WERU). Aus der empirischen Erosionsmodellierung auf Basis der weltweit verwendeten Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG) stehen mittlerweile zum Beispiel für die Schweiz und Deutschland Karten zur Verfügung, die auf regionaler Ebene Informationen zu Erosionsanfälligkeit und Ansatzpunkte zur Verminderung geben. Die Karten zeigen auf, dass vielerorts Erosionsschutzmassnahmen umgesetzt werden müssten (2011b; Prasuhn et al. 2007; Wurbs & Steininger 2011).

Zur Förderung der Praxisverbreitung fanden erosionsmindernde Massnahmen in verschiedene landwirtschaftliche Fördermassnahmen Eingang, beispielhaft seien das bayerische „Kulturlandschaftsprogramm“ (KULAP), der schweizweite „Ökologische Leistungsnachweis“ (ÖLN) und das „Förderprogramm Boden“ des Kantons Bern genannt. Würden die oben angeführten Massnahmen ggf. in Kombination mit einer Nutzung quer zu Gefälle und Hauptwindrichtung konsequent durchgeführt, wären die Erosionsrisiken stark vermindert.

2.1.3 Entstehung und Auswirkung von Bodenverdichtung

Bodenverdichtung in Form einer dauerhaft-plastischen Bodenverformung entsteht, wenn der von den Landmaschinen induzierte Kontaktflächendruck als kombinierte Wirkung von Radlast, Bereifung und Reifeninnendruck höher ist als die Bodentragfähigkeit. Die

Bodentragfähigkeit ist neben der Bodenart vor allem von der Bodenfeuchte abhängig. Je trockener der Boden, desto tragfähiger ist er. (Alakukku et al. 2003; Chamen 2006a; van den Akker & Schjonning 2004). Hauptursache für Bodenverdichtungen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen sind Überfahrten bei zu feuchten Böden (Fleige et al. 2009). Bei einer Getreideernte unter trockenen Bedingungen im Sommer ist das Verdichtungsrisiko mit einem Mähdrescher mit 20t Gesamtgewicht wesentlich geringer als beim Einsatz eines Traktors mit 5t Gesamtgewicht im Frühjahr oder Herbst unter feuchten Bedingungen mit einem dann weniger tragfähigen Boden (Reintam et al. 2009).

In die Zeiträume mit potentiell feuchten Bodenbedingungen fallen Bestellung im Spätherbst oder Frühjahr sowie Wirtschaftsdüngerausbringung und Hackfruchternte mit grossen Erntemassen und oft schweren Erntemaschinen. Kurz vor der Getreideernte auftretende Niederschläge können aber auch im Sommer zu ungünstigen Bodenbedingungen führen. Fast abgereiftes Getreide verdunstet sehr wenig Wasser und das stehende Getreide wirkt als Wind- und Sonnenschutz, so dass das Abtrocknen der Felder sehr langsam erfolgt. Zusammen mit dem Pflügen in der Furche sind dies die Hauptursachen von häufig irreversiblen Unterbodenverdichtungen (van den Akker & Schjonning 2004).

Im **Ackerbau** werden Krümen- und Krümenbasisverdichtungen oft durch eine Bodenbearbeitung bis in die entsprechende Tiefe behoben. Die agronomischen Auswirkungen sind daher in der Regel beschränkt. Nach Erhebungen in Bayern werden Verdichtungen unterhalb der Bearbeitungstiefe in der Regel nicht als beeinträchtigend wahrgenommen (Brandhuber 2007). Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass bei Bodenverdichtungen tiefer 25cm bei der Nährstoffversorgung keine negativen Auswirkungen feststellbar sind und das reduzierte Wasseraufnahmevermögen nur bei seltener auftretenden trockenen Bedingungen zum Tragen kommt.

Allerdings führen im Oberboden einerseits die im Saisonverlauf induzierten Verdichtungen und das jährliche Wiederauflockern der Bodenstruktur zu einer starken Beanspruchung und Verschlechterung der Aggregate. Mit der Bodenbearbeitung ist es nicht möglich, die einzelnen Aggregate zu lockern sondern nur den Boden wieder in seine Aggregate zu zerteilen. Statt feine, krümelige Aggregate, die von den Pflanzen durchwurzelt werden können, sind häufig polyedrische, verdichtete Aggregate die Folge, die eine hohe Dichte aufweisen, schlecht durchwurzelt werden, einen verminderten Gasaustausch besitzen und das Speichervermögen an Wasser und Nährstoffen einschränken (Scheffer & Schachtschabel 2002).

Oberbodenverdichtungen führen bei Mulchsaaten mit flacher Bearbeitungstiefe und bei Direktsaat zu Einschränkungen. Verdichtungen und durch Radschlupf verursachte Verschmierungen an der Bodenoberfläche führen häufig zu verminderten Feldaufgängen, verzögerter Jugendentwicklung und Ertragsreduktionen. Aus Grossbritannien werden Ertragseinbussen verschiedener Kulturen aufgrund Bodenschadverdichtungen von 10 bis 81% berichtet (Chamen 2007). Neben eingeschränkter Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit steigt das Risiko von Denitrifikationen und Lachgasemissionen. Durch die verminderte Wasserleitfähigkeit werden auch Nährstoffabschwemmung und Bodenerosion gefördert (Anken et al. 2007; Chamen 2011; Scheffer & Schachtschabel 2002; Vermeulen & Korteweg 2007).

Diese Verdichtungsfolgeerscheinungen sind mit ein Grund, weshalb in Deutschland nur 25-30% Fläche konservierend bearbeitet werden und weniger als 1% unter Direktsaat ist (2011a; Mumme 2009). In der Praxis wird unter Mulchsaat noch immer tief gelockert und gelegentlich auch gepflügt. Der Optimierungsbedarf ist gross (Dölger & Jürgens 2009).

Im **Grünland** kommt es durch Verdichtung und anaerobe Verhältnisse im Boden ebenfalls zu negativen agronomischen Auswirkungen. Die Bestandsentwicklung in Fahrspuren ist suboptimal, da sich Graswurzeln in verdichtetem Boden schlechter ausbilden (Trunkmann et al. 2009; Würfel et al. 2002). Auch das Auftreten von im botanischen Bestand unerwünschten Pflanzen wie der Gemeinen Risppe ist ein Kennzeichen für eine Oberbodenverdichtung (Elsässer & Grund 2005). In einem vierjährigen bayerischen Versuch wurden 12% Minderertrag durch Befahrung festgestellt (Diepolder et al. 2009).

Zusammengefasst führen Bodenverdichtungen in der Krume und Krumbasis im Ackerbau mit flacher Bearbeitung und bei Direktsaat sowie in der Dauerkultur Grünland, wo im allgemeinen keine Bodenlockerung durchgeführt werden (kann), zu agronomischen und ökologischen Nachteilen. Die Vorteile konservierender Anbausysteme kombiniert mit stabilen, hohen Erträgen, lassen sich nur mit einer Vermeidung von Bodenverdichtungen erfolgreich umsetzen. Dem vorbeugenden Bodenschutz ist also besondere Wichtigkeit beizumessen (Weisskopf & Keller 2007; Würfel et al. 2002).

2.1.4 Bodenzustand

Im **Ackerbau** sind vor allem Verdichtungen unterhalb der Bearbeitungstiefe im Unterboden ab 35cm kritisch, da sie in dieser Tiefe, wenn überhaupt, nur mit grossem Aufwand behoben werden können. Verschiedene Untersuchungen konzentrierten sich daher auf den Zustand des Unterbodens. Nach dem Indikatorenmodell (Lebert et al. 2004) mit den Parametern Luftkapazität, gesättigte Wasserleitfähigkeit und Gefügeansprache nach Packungsdichte in Niedersachsen, Sachsen, Bayern, Schleswig-Holstein, Nordrhein-Westfalen und Thüringen durchgeführte Untersuchungen ergaben keine erkenn- und nachweisbaren Anzeichen für generelle, grossflächige Schadverdichtungen im Unterboden. Die Funktionen hinsichtlich Luft- und Wasserführung waren erfüllt. Kritische Werte wurden vor allem im Bereich von Pflegefahrgassen, im Vorgewende und in Zufahrten sowie im Bereich von Rübenmieten erreicht (Brandhuber 2007; Lorenz 2007; Stahl 2007; Weyer 2007). Die Krumbasis im Bereich von 10/15cm bis 30/35cm neigte eher zur Verdichtung. In Nordrhein-Westfalen wurden 20% der Böden in der Krumbasis als schadverdichtet geschätzt (Weyer 2007), in Bayern und Niedersachsen wurde generell von Werten nahe einer Schadverdichtung berichtet (Brandhuber 2007; Lorenz 2007). Nach Vergleichen von 2002/03 mit historischen Daten aus den 1950er und 1980er Jahren sei die Bodenbelastung trotz schwererer Maschinen eher rückläufig (Lorenz 2007). Dies wurde auf bessere Fahrwerke und Reifen wie auch den vermehrten Einsatz von konservierenden Anbauverfahren zurückgeführt.

Im **Grünland** wurde erst in den vergangenen Jahren die Bodenbelastung verstärkt untersucht. Im intensiv genutzten Grünland ist die Befahrungshäufigkeit etwa um Faktor 3 höher als im Ackerbau (Holpp 2006). Geerntet wird von Frühjahr bis Herbst auch unter feuchteren Bedingungen. In einem sächsischen Versuch wurden unter 2/3 der Flächen

Grobporenvolumina im kritischen Bereich <8% gefunden (Stahl et al. 2009). In einem baden-württembergischen Versuch wurden unter Grünland in den Tiefen 5 und 10cm CO₂-Werte bis 6% gemessen, die als Indikator für anaerobe Verhältnisse und potenziell wachstumsschädigend eingestuft wurden (Elsässer et al. 1999).

Gesamthaft gesehen wurde den durch die Oberbodenverdichtung verursachten negativen Effekten im Ackerbau und unter Grünland wesentlich weniger Bedeutung beigemessen als dem Schutz des Unterbodens. Im Hinblick auf eine Verbesserung der natürlichen Bodenstruktur und Steigerung der Energieeffizienz im Ackerbau wie auch die Tatsache, dass unter Grünlandböden primär nur die natürliche Regenerationsfähigkeit wirkt, sollte dem Thema Oberbodenschutz mehr Beachtung zukommen.

2.1.5 Belastungsgrenzen

Für eine Beurteilung der Bodenbelastung sind maschinenseitig Radlasten, Reifendimension, Reifenbauart, und Reifeninnendruck relevant. Diese Faktoren werden in dem Parameter Kontaktflächendruck zusammengefasst. Er beschreibt die Kraft, die vertikal auf den Boden wirkt.

Nach verschiedenen Autoren reicht die Tragfähigkeit unter standardisierten Feuchtebedingungen und in Abhängigkeit der Bodenart von etwa 70 bis 120kPa Kontaktflächendruck (Diserens & Spiess 2004; Elsässer et al. 1999). Grenzwerte für Kontaktflächendrücke zur Vermeidung von Oberbodenverdichtungen reichen von einer Beschränkung des mittleren Kontaktflächendrucks auf 100kPa bzw. bei Radlasten grösser 4000kg und Böden mit reduzierter Tragfähigkeit 60-80kPa, über <100kPa bei gelockertem oder feuchtem Boden und <200kPa auf abgesetztem trockenen Boden, bis zu einer allgemeinen Radlastbeschränkung auf 5000kg bei Begrenzung des Kontaktflächendrucks auf 50kPa bei geringer, 100kPa bei mittlerer und 150kPa bei hoher Tragfähigkeit (Fleige et al. 2009; Petelkau 1984; Stahl 2007; VDI-Richtlinie 6101 2007) (Tab. 1).

Tab. 1: Literaturangaben zu maximalen Kontaktflächendrücken zur Vermeidung von Oberbodenverdichtungen.

Autor	Bodentragfähigkeit			Bemerkung
	gering	mittel	hoch	
	Frühjahr		Sommer/ Herbst	
Petelkau, 1984	50/80/150kPa		80/150/200kPa	sandige/lehmmige/tonige Böden
Chamen, 2004	50kPa	100kPa	150kPa	Radlast max 5000kg
Stahl, 2007	60-80kPa		100kPa ¹ 60-80kPa ²	¹ bei Radlast < 4000kg ² bei Radlast >4000kg
VDI-Richtlinie 6101, 2007	100kPa		200kPa	

In einer Praxiserhebung zu Radlasten und mittleren berechneten Kontaktflächendrücken gebräuchlicher Landmaschinen in Sachsen erreichten Traktoren und Feldhäcksler niedrige Werte von 76-98kPa, Mähdrescher, Rüben- und Kartoffelroder sowie Transport-

fahrzeuge und Pflanzenschutzgeräte mittlere bis hohe Werte von 140-260kPa und Kartoffellegemaschinen sehr hohe Werte bis 460kPa (Stahl 2007).

Empfohlene Grenzwerte und in der Praxis übliche Kontaktflächendrücke differieren also zum Teil stark. Bei vielen Arbeitsgängen wird unter günstigen Boden- und Witterungsvoraussetzungen die Tragfähigkeit der Böden überschritten und die Gefahr von Bodenverdichtungen ist gross. Unter feuchten Bedingungen überschreiten viele Fahrzeuge die Grenzwerte. Der Einsatz leichterer Traktoren verursacht bedingt durch eine meist schmalere Bereifung die höchsten Kontaktflächendrücke aller Traktoren. In Kombination mit im Heckdreipunkt angebauten Düngerstreuern und Pflanzenschutzgeräten kommt es zu hohen, bodenschädigenden Kontaktflächendrücken auf der Hinterachse (Diserens & Spiess 2004; Stahl 2007). Viele leistungsfähige, schwere selbstfahrende Erntemaschinen sind bereits mit einer den Kontaktflächendruck vermindernenden Bereifung ausgestattet, überschreiten aber immer noch weit die Grenzwerte. Vor diesem Hintergrund braucht es Ansätze zur Gestaltung einer Mechanisierung mit möglichst niedrigen Kontaktflächendrücken, die neben der Vermeidung von Unterbodenverdichtungen in weitestmöglichem Rahmen auch den Oberboden schont.

2.1.6 Massnahmen gegen Bodenverdichtung

Zur Verminderung von Verdichtungen des Ober- und Unterbodens gibt es pflanzenbauliche und technische Vorsorgemöglichkeiten.

Pflanzenbauliche Vorsorgemöglichkeiten zielen auf eine Steigerung der Bodentragfähigkeit, Optimierung der Bodenertragsfähigkeit durch natürliche Bodenprozesse und Schaffung einer stabilen krümeligen Oberbodenstruktur, die gute Voraussetzungen für Pflanzeninstallation und -entwicklung bietet (Anken 2009; BBodSchG 1998/2004; Bischoff & Hofmann 2007; Brunotte & Sommer 2008; Herrmann 2010; Li et al. 2008; Tullberg 1994, 2000b; VDI-Richtlinie 6101 2007; Würfel et al. 2002; Zink et al. 2009):

- Tiefwurzelnde Kulturen und Zwischenfrüchte anbauen, die den Boden bis in die Tiefe erschliessen
- Fruchtfolgen mit positiver Humusanreicherung anlegen
- Durch Kalkung der Böden und Einstellen eines angepassten pH-Wertes den Struktur-
aufbau fördern
- Erntereststoffe als Oberflächenschutz einsetzen
- Fruchtfolgen standortabhängig gestalten, damit ausreichende Zeitfenster und geringe Bodenfeuchte bei Bodenbearbeitung und Ernte zur Verfügung stehen. Durch die schnellere Entwässerung ist beispielsweise ein leichter Schlufflehm im Frühjahr und Herbst tendenziell meist befahrbar, ein schwerer schluffiger Ton dagegen im Frühjahr nicht und im Herbst nur eingeschränkt.
- Bodenbearbeitungsintensität- und tiefe zurückfahren.

Die im Ackerbau häufig praktizierte Beseitigung von Verdichtungen mit einer tiefen, wendenden Lockerung gleicht eher einer Nachsorge denn Vorsorge. Einerseits erhöhen diese stark die Verdichtungsgefahr bei anschliessenden Überfahrten (Lorenz 2007).

Andererseits ist beim Pflügen in der Furche das Risiko gross, Unterbodenverdichtungen zu induzieren. Onlandpflüge, die die Bodenoberfläche gleichmässig und um ein Drittel weniger als beim Fahren in der Furche belasten (Brunotte & Sommer 2008), werden selten eingesetzt. Unterbodenverdichtungen wird dann selten eine zweite Nachsorge in Form einer Tiefenlockerung zuteil, die hinsichtlich des Energieverbrauchs, der Erhöhung des Erosionsrisikos und des Aufbaus einer sich natürlich entwickelnden Bodenstruktur Nachteile hat (Grund 2003). Generell sollten Unterbodenlockerungen nur nach sorgfältiger Feldgefügeansprache durchgeführt werden, eine Regeneration der Krumbasis durch die entsprechende Gestaltung von Fruchtfolge und Verfahrenstechnik ist aber vorzuziehen (Lorenz 2007).

Technische Vorsorgemöglichkeiten zielen mit verschiedenen Massnahmen auf eine Senkung der Bodenbelastung durch Befahrung (Ansorge & Godwin 2007, 2008, 2009; BBodSchG 1998/2004; Brunotte 2007; Brunotte & Sommer 2008; Diserens & Spiess 2006; Geischeder et al. 2008; Höner 2010; Li et al. 2008; Stahl et al. 2009; van den Akker & Schjonning 2004; VDI-Richtlinie 6101 2007; Weissbach 2001a; Weisskopf & Keller 2007; Würfel et al. 2002; Zink et al. 2009):

- Erhöhung der Reifenkontaktfläche durch grossvolumige, breite Reifen und durch Absenken des Reifeninnendruck: Verwendung von Breitreifen, Terrareifen, Zwillingsbereifung, Doppelpendel-Fahrwerke und Band-/Raupe Laufwerke, Reifendruckregelanlagen.
- Absenken der Achslast durch Senkung Ladevolumina/-massen, ggf. in Kombination mit absätzigen Systemen mit Überladewagen oder Gülleverschlachung; bei Düngung und Pflanzenschutz Nutzung angehängter anstatt angebauter Geräte.
- Berücksichtigung des Befahrbarkeitszustands des Bodens beim Einsatzzeitpunkt durch dynamische Anpassung der Ausnutzung von Ladekapazitäten in Kombination mit einer Anpassung des Reifeninnendruck. Der Befahrbarkeitszustand wird vor Ort mit Schraubenziehertest oder Onlinesensoren bzw. mit Internettools bestimmt.
- Reduktion der Anzahl der Überfahrten durch Kopplung von Arbeitsgängen und neue Fahrwerke.
- Einführung von Befahrungssystemen mit Feldfahrverboten für Fahrzeuge mit ungeeigneter Bereifung, Anlegen von Pflegefahrgassen für Düngung und Pflanzenschutz.

In der Gülleausbringung kann bereits durch eine Anpassung des Reifeninnendruck die Bodenbelastung stark gesenkt werden. Ein Güllefass mit einer Radlast von 5.9t und einem Reifeninnendruck von 1.2bar führte bis in eine Tiefe von 40cm zu keiner signifikanten Abnahme des Grobporenvolumens – im Gegensatz zu einem Reifeninnendruck von 3bar, bei dem sich auch die Effekte durch eine Mehrfachüberrollung verstärkten (Weissbach 2001b). Im Erntemaschinenvergleich haben Mähdrescher konstruktionsbedingt die grössten Probleme mit realisierbaren Reifenbreiten und Reifeninnendrücken. Die Alternative sind Rotormähdrescher und der Einsatz von Bandlaufwerken (Brunotte & Sommer 2008). Bei der Zuckerrübenenernte kann das Ersetzen grosser Köpfrödebunker durch kleinere in Kombination mit Überladewagen, eine Senkung der Spitzenlasten bringen, was aber mit

einer Steigerung des Spurflächenanteils und der Überrollhäufigkeit einhergeht (Brunotte & Sommer 2008).

2.1.7 Vorsorgemassnahmen versus Praxisnutzung

Bei allen technischen Vorsorgemöglichkeiten ist wichtig, dass sie praxistauglich sind, über eine hohe Praxisakzeptanz verfügen und nicht in nassen Böden eingesetzt werden.

Nachrüstbare Reifendruckregelsysteme zur fallweisen Einstellung des Reifeninnendrucks sind seit langem erhältlich, werden aber nach einer 2009 durchgeführten Erhebung erst auf 4% der befragten Betriebe eingesetzt (Hörner et al. 2009). Eine standardmässige Nutzung wird erst der Fall sein, wenn sie serienmässig ab Werk angeboten werden – dies trotz des erwiesenen grossen Potenzials an Zeit- und Treibstoffeinsparung (Denker et al. 2009). 2009 wurden zwar noch von 46% der Landwirte Standardbereifung eingesetzt, 45% nutzten aber bereits Breitreifen und Mehrfachbereifung (Hörner et al. 2009). In diesen Bereich fallen auch die Reifen, die auf der Strasse und im Feld bei hohen Nutzlasten und Geschwindigkeiten mit einem generell niedrigen Reifeninnendruck gefahren werden können. Diese werden z.B. vom Hersteller Michelin mit der Ultraflex-Technologie angeboten und sind für Traktoren (XeoBib, Axiobib) und Erntemaschinen (CerexBib) erhältlich (2011c).

Zur Optimierung der Mähdrescherauslastung durch Abtanken während des Druschs werden heute anstatt herkömmlicher Transportwagen vermehrt bodenschonend bereifte Überladewagen eingesetzt. Der Grundgedanke ist gut, die Fahrzeuge erreichen jedoch mit einem Volumen von 30m³ und dem entsprechend zugstarken Traktor ein Gespanngewicht von bis zu 50t. Der Nutzen des Überladewagens für die Bodenstruktur ist daher zu hinterfragen. Auch Beschränkungen auf max. 18t Achslast und 1bar Reifeninnendruck entsprechen noch immer Mähdrescherdimensionen (Holtmann 2009).

Onlinesensoren und Planungstools zur Abschätzung der Befahrbarkeit müssen für den schnellen Einsatz im Feld bzw. für die Planung vor dem Feldeinsatz geeignet sein, sonst werden sie von der Praxis nicht genutzt. Bisher ist erst ein Onlinesensor für den Feldeinsatz verfügbar (Brunotte 2007). Planungstools wie der thüringische "Bodenschutzplaner" der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, die sächsische "Entscheidungshilfe Bodendruck" oder die Schweizer PC-Programme „Tasc“ und „TiM“ wie auch das in Entwicklung befindliche europäische „Terranimo“ veranschaulichen dem Praktiker die Verdichtungsgefahr und geben Handlungsanleitungen (Diserens & Spiess 2006; Kolbe 2007; Stahl 2006; Stettler et al. 2010), eine konsequente Nutzung in der Praxis ist aber noch nicht Standard.

Motivierend für eine Umsetzung wirken gezielte Anreize wie im Rahmen des „Förderprogramm Boden“ des Kantons Bern. In diesem rege genutzten Programm gibt es Beiträge unter anderem für die bodenschonende Gülleausbringung, bei der der Grenzwert von 100kPa in 15cm Bodentiefe nicht überschritten wird.

Schaut man sich die Praxiseignung der wichtigsten Vorsorgemöglichkeiten im Überblick an, so stellt man fest, dass es noch beträchtliches Optimierungspotenzial gibt (Tab. 2).

Tab. 2: In der Praxis lassen sich technische Vorsorgemöglichkeiten heute gut (V), zum Teil (O) oder nur ungenügend (X) umsetzen.

Vorsorge- möglichkeiten	Praxis- eignung	Erklärung
Erhöhung Reifenkontaktfläche	V	Entsprechende Fahrwerke und Reifen stehen zur Verfügung.
Absenken Achslast entsprechend Bodentragfähigkeit	X	Einsatzzeiträume sind oft knapp und Maschinenauslastung ist hoch. Die mit einer Achslastreduktion verbundene zusätzliche Zeit steht nicht immer zur Verfügung.
Berücksichtigung Bodenfeuchte	X	Berücksichtigung der Bodenfeuchte und der Tragfähigkeit bereits bei der Einsatzplanung ist komplex. Häufig sind die zeitlichen Erntefenster so eng, so dass auch unter feuchten Bedingungen geerntet wird.
Reduktion Überfahrten	V	Die Kopplung von Arbeitsgängen und Erhöhung der Arbeitsbreiten ist üblich.
Einführung Befahrungssysteme	O	Pflegefahrgassen sind in den meisten Kulturen etabliert. Darüber hinaus werden kaum Verkehrsbeschränkungen implementiert.

Die Hauptherausforderung für die landwirtschaftliche Praxis ist es, genügend bodenschonend ausgestattete Maschinenschlagkraft vorzuhalten, um eine Bewirtschaftung in den zur Verfügung stehenden Arbeitszeitfenstern durchführen zu können. Dies muss auch in niederschlagsreichen Jahren mit weniger zur Verfügung stehenden Feldarbeitstagen gewährleistet sein. Es entsteht ein Spagat aus ökonomischen Überlegungen und ökologisch-verantwortlichem Handeln, der, wie oben angeführt, nicht immer gut gelingt. Gefragt sind Umsetzungsstrategien, die ohne viele Einschränkungen möglichst auch unter kritischen Einsatzbedingungen gut funktionieren. Ökologisch vorteilhafte Anbausysteme mit flacher Lockerung und Direktsaat lassen sich nur dann erfolgreich realisieren, wenn auch bei einem gelegentlich unvermeidlichen Maschineneinsatz bei ungünstiger Witterung keine nachteiligen Verdichtungen in der Krume und Krumenbasis entstehen. Aus heutiger Sicht sind neue Ansätze für praxisnahe und realisierbare Bodenschutzmassnahmen gefragt.

2.2 Controlled Traffic Farming

Neben den oben aufgeführten technischen Vorsorgemöglichkeiten wird im Zusammenhang mit der Einführung von Befahrungssystemen auch die Möglichkeit der konsequenten Trennung von Fahr- und Wachstumsraum genannt (Brandhuber 2008; Brunotte & Sommer 2008; Hamza & Anderson 2005). Diese permanenten, über die Jahre beibehaltenen Fahrgassensysteme für alle Arbeitsgänge sind unter der Bezeichnung Controlled Traffic Farming (CTF) bekannt (Chamen 2006a; Webb & Blackwell 2004).

2.2.1 Entwicklung von CTF

Der im vorangehenden Kapitel angeführten negativen Auswirkungen von Befahrung ist man sich bereits seit Generationen bewusst. Sie wurden schon zu Zeiten des Pferdezuges genannt (Volkart 1944). Seit Beginn des Ackerbaus wurde der Bodenlockerung grosses Gewicht beigemessen und eine hohe Krumentiefe als Garant für hohe Erträge gesehen (Demmel 2007). Seit langem wurden aber auch Alternativen zu den zu Verdichtung führenden Anbausystemen gesucht. Die Entwicklung von Geräteträgern mit grosser Arbeitsbreite, sogenannten Gantries, begann bereits Mitte des 19. Jahrhunderts (Taylor 1994). Die Grundidee war, durch den Einsatz grosser Arbeitsbreiten und die Verwendung schmaler Reifen den Anteil befahrener Fläche möglichst gering zu halten. Von den 1970ern bis heute wurde die Technologie weiterentwickelt und in kleineren Maschinenserien auf den Markt gebracht (Abb. 1).

Die aussenliegenden Reifen reduzieren den Fahrspuranteil grösstmöglich, er beträgt abhängig von der Arbeits- und Reifenbreite 5-10%. Der Wachstumsraum der Pflanzen wird nicht befahren. Im Vergleich dazu hat ein Traktor mit 600mm breiten Reifen und 6m Arbeitsbreite 20% Spurflächenanteil – und die liegen mitten im Wachstumsraum. Ähnlich geringe Fahrspuranteile wie mit Gantries werden in der heute praktizierten Landwirtschaft nur bei Pflanzenschutz und Düngung mit Arbeitsbreiten von 12m und mehr erreicht.



Abb. 1: Links die israelische "Field Power Unit" (FPU) mit 5.80m Arbeitsbreite, rechts ein Dowler Gantry mit 12m. Die Räder lassen sich um 90° schwenken. Im Feld wird in Quer- und auf der Strasse in Längsrichtung gefahren. Quelle: CTF Europe

Der Einsatz von Gantries hatte positiven Einfluss auf Bodenstruktur und Pflanzenentwicklung, Bodenverdichtungen wurden effizient vermieden (Chamen et al. 1992b; Schäfer 2003; Taylor 1994). Anbausysteme mit flacher Lockerungstiefe und Direktsaat konnten nachhaltig erfolgreich realisiert werden. Die lockeren Bodenstrukturen ermöglichten bereits bei verhältnismässig geringen Antriebsleistungen grosse Arbeitsbreiten.

Gantries setzten sich bis heute aber nicht in der Praxis durch. Ein Hauptgrund war, dass das Befahrungskonzept für ein Funktionieren der Anbausysteme konsequent bis zur Ernte umgesetzt werden musste. Es existierten denn auch Prototypen von Gantries mit Mähdrescheraufsätzen (Abb. 2), die landtechnische Industrie setzte diesen prototypischen Ansatz bis heute nicht in die Praxis um. Zu aufwändig erschien es, bestehende, ausgefeilte Maschinenkonzepte komplett zu überdenken und neu zu konstruieren. Zu ungewiss waren die Lösungsansätze für die Hackfruchternte von Silomais, Zuckerrüben und Kartoffeln. Die Gantry-Idee wird bis heute weiterverfolgt, aktuell mit der Konstruktion eines Fahrzeugs für die Zwiebelernte in Dänemark (Pedersen 2011). Die Zukunftsaussichten für das Gantry-Konzept scheinen ohne ein Engagement potenter landtechnischer Unternehmen aber eher als gering einzuschätzen zu sein.

Demselben Ansatz kleiner Spurflächenanteile folgte das Konzept, bei Traktoren die Spur zu verbreitern. In Beet- und Dammkulturen lassen sich alle Arbeitsgänge von Anbau, Pflege und Ernte bis zum Transport von denselben Fahrspuren ausführen und die effektive Anbaufläche kann im Vergleich zu Fahrzeugen mit schmälere Spuren ausgeweitet werden (Abb. 2).

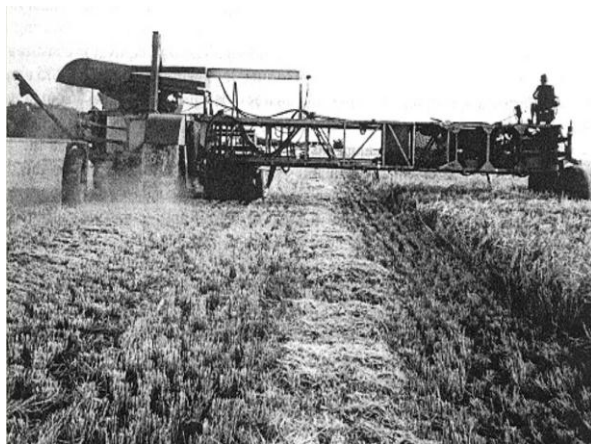


Abb. 2: Links Gantry mit 12m Gesamtbreite und Mähdrescheraufsatz über eine Teilbreite. Rechts Traktoren mit verbreiterter Spur im holländischen Gemüsebau, vermutlich Ende der 1960er, Anfang 1970er. Quellen: Chamen, Vermeulen

Über lange Zeit wurde auch dieses Konzept nicht breit in die Praxis eingeführt. Für eine konsequente Umsetzung der permanenten Trennung von Fahr- und Wachstumsraum über die Jahre hinweg fehlte nämlich noch ein wichtiges Element: Ein Lenksystem, mit dem zuverlässig die je nach Kultur kaum sichtbaren Fahrspuren gefunden werden konnten und welches das Fahrzeug automatisch auf Spur hält. Erst mit dem Markteintritt der ersten satellitenbasierten Lenksysteme für Traktoren Mitte der 1990er Jahre war der entscheidende Impuls für die Praxisverbreitung von CTF gegeben (2.3).

1995 begann in Australien in den beiden Kulturen Getreide und Zuckerrohr die Praxiseinführung von CTF-Systemen mit einheitlichen Spurweiten für Traktoren und Erntemaschinen und angepassten Arbeitsbreiten (Abb. 3). Auf den gross strukturierten Flächen wird Getreide arbeitszeit- und kostensparend direkt gesät. Trotz des semiariden Klimas, unter dem die Böden meist trocken und tragfähig sind, kam es zu Oberbodenverdichtungen und zu einer Verminderung des Infiltrationsvermögens auf Grund des Reifenschlupfs, der die Poren abschert (Tullberg et al. 2007). Dies führte einerseits zu einer beeinträchtigten Pflanzenentwicklung, andererseits bei schlechter Niederschlagsverteilung mit Extremereignissen zu erhöhtem Erosionsrisiko. Auf feuchten, subtropischen Standorten mit Zuckerrohr im Beetanbau kam es durch die schweren Erntemaschinen ebenfalls zu sich negativ auswirkenden Bodenverdichtungen, die sich mit CTF vermeiden liessen. Die Auswirkungen der konsequenten Trennung von Fahr- und Wachstumsraum waren so gross, das bereits 2005 eine Million Hektar unter CTF bewirtschaftet wurden (Chamen 2006b). Die Tendenz in den folgenden Jahren war stark steigend und beträgt heute mehrere Millionen Hektar.



Abb. 3: Traktor und Überladewagen mit verbreiterter Spur und schmaler Bereifung, Mähdrescher mit verlängerter Überladeschnecke. Quelle: Anken

2.2.2 Agronomische und bodenphysikalische Auswirkungen von CTF

Wichtigste Auswirkung von CTF ist die Vermeidung von Verdichtungen durch Befahrung. Dadurch werden die Bodenstrukturen lockerer, die Wasserinfiltration erhöht sich und gleichzeitig sinkt die Erosionsanfälligkeit. Feldaufgänge verbessern sich, im Wurzelraum sind Nährstoffe inklusive Wasser und Sauerstoff besser verfügbar, die Durchwurzelung wird intensiver und die Erträge werden stabiler (Chamen et al. 2003b; Raper et al. 1994; Tullberg et al. 2003; Tullberg et al. 2007; Webb & Blackwell 2004).

Chamen berichtet in seinen Literaturstudien zu Versuchen weltweit bei nicht befahrenen Böden von 5-20% geringeren Lagerungsdichten und in der Regel 30 bis 80% geringeren Bodeneindringwiderständen (Chamen 2006). In eigenen Versuchen erhöhte sich in befahrenen Böden die Lagerungsdichte um 15% und der Bodeneindringwiderstand um 47%,

während die Bodenporosität um 10% und das Infiltrationsvermögen um 75% sanken (Chamen 2011).

Die Erträge unbefahrener Flächen lagen in europäischen Versuchen bei etwa 80-160% des Ertrags von befahrenen Flächen. Unter semiariden Bedingungen in Australien lagen sie bei 100-190% (Chamen 2006). Nach seinen eigenen Versuchen kann im Ackerbau unter mitteleuropäischen Bedingungen ein CTF-Mehrertrag von etwa 5-8% erzielt werden (Chamen 2007). Unbefahrene Flächen erzielten bis zu 36% mehr Ertrag als zufällig befahrene; permanente Fahrspuren lagen unter dem Ertrag von nicht und zufällig befahrenen (Chamen 2009, 2011).

Bereits in den 1970er und 1980ern durchgeführte Feldversuche im Gemüsebau in Holland zeigten, dass mit CTF im Frühjahr drei Mal mehr Feldarbeitstage zur Verfügung stehen, 15 bis 50% weniger Energie für die Bodenbearbeitung benötigt wird, auf Feldkapazität gesättigter Boden 40% mehr Luft führt und Wurzelfrüchte bis zu 10% Mehrertrag bringen. Diese Ergebnisse wurden in Mitte der 2000er durchgeführten Versuchen bestätigt (Vermeulen & Korteweg 2007).

In Dänemark Mitte der 2000er durchgeführte Feldversuche im Grünland zeigten, dass der Grasertrag auf befahrenen Flächen im Schnitt etwa 10% geringer ist. In früheren Versuchen wurden abhängig von Anzahl der Überfahrten und Reifeninnendruck 10-60% Mindererträge im Vergleich zu unbefahrenen Flächen erzielt (Pedersen 2008).

Zusammengefasst lassen die Ergebnisse darauf schließen, dass CTF ein zusätzlicher Baustein für einen praktikablen Bodenschutz und stabilisierte bis höhere Pflanzenerträge sein könnte. Mit der Aufteilung in Fahr- und Wachstumszonen und einer angepassten Bereifung können die heutigen schweren Maschinen auch unter ungünstigeren Witterungsbedingungen eingesetzt werden. Die permanenten Fahrgassen haben eine höhere Tragfähigkeit als der umgebende Boden, nach Niederschlägen kann die Fläche früher wieder befahren werden. Aufgrund der höheren Infiltrationsrate des nicht befahrenen Bodens kann dieser auch wieder schneller bearbeitet werden. Im Schnitt kann auch mit erhöhten Erträgen gerechnet werden.

Tab. 3 zeigt, dass CTF kombiniert mit anderen Vorsorgemöglichkeiten das Spektrum praxisanwendbarer Bodenschutzmassnahmen (2.1.6) erweitert. Da die Bodentragfähigkeit in den Fahrspuren unter CTF gesteigert wird, kann die Achslast höher sein. Permanente Fahrspuren sind durch ihre Vorbelastung unter feucht-nassen Bedingungen weniger zusätzlich verdichtungsgefährdet. Durch Ausdehnung des Systems der Pflegefahrspuren mit konsequenter Trennung von Fahr- und Wachstumsraum für alle Arbeitsgänge verhindert dieses Instrumentarium auch unter ungünstigen Einsatzbedingungen Verdichtungen in der Krume und Krumbasis mit den unter 2.1.3 genannten negativen Auswirkungen. Durch die Begrenzung des Verdichtungsrisikos auf die Fahrspuren und das gezielte Nichtbefahren von Flächen müssten besonders Anbauverfahren mit flacher Bearbeitungstiefe und Direktsaat robuster werden.

Tab. 3: In der Praxis lassen sich technische Vorsorgemöglichkeiten gut (V), zum Teil (O) oder nur ungenügend (X) umstellen. Controlled Traffic Farming (CTF) erweitert die Umsetzungsmöglichkeiten für die Praxis.

Vorsorgemöglichkeiten	Praxiseignung heute	Praxiseignung mit CTF	Erklärung
Erhöhung Reifenkontaktfläche	V	V	
Absenken Achslast entsprechend Bodentragfähigkeit	X	V	Bodentragfähigkeit in den Fahrspuren ist unter CTF höher, Achslast kann auf Fahrspuren höher sein als im nicht befahrenen Bereich.
Berücksichtigung Bodenfeuchte	X	V	Permanente Fahrspuren sind unter feucht-nassen Bedingungen weniger gefährdet. Die nicht befahrenen Flächen trocknen schneller ab und sind früher bearbeitbar.
Reduktion Überfahrten	V	V	
Einführung Befahrungssysteme	O	V	Das System der Pflegefahrspuren wird auf alle Arbeitsgänge ausgedehnt.

2.2.3 CTF in Europa

Unter diesem Hintergrund verwundert es, dass sich CTF in Europa bis heute kaum verbreitete. Wenige Pioniere vor allem in Grossbritannien, Holland, Skandinavien und Rumänien haben CTF-Systeme im Acker- und Gemüsebau umgesetzt. Die bewirtschaftete Fläche dürfte im Bereich von etwa 15'000ha liegen, der Grossteil davon mit Bodenbearbeitung. Für die zögerliche Umsetzung dürften miteinander zusammenhängende verfahrenstechnische und pflanzenbauliche Gründe verantwortlich sein.

Aus verfahrenstechnischer Sicht waren einerseits die für CTF benötigten präzisen Lenksysteme bisher teuer und die Rentabilität unter kleiner strukturierten Bedingungen kritisch (2.3). Andererseits basieren CTF-Systeme auf einer meist an den Massen der Erntemaschine orientierten Spurweite von 3,00-3,20 m und einer schmalen Reifenbreite von ~ 40 cm. Dies bedeutet aufwändige, teure Umbauten der Erntemaschinen, Traktoren

und Anhänger. Zum einen sinkt mit der grösseren Spurweite und den in der Regel weniger tragfähigen Reifen die zulässige Höchstgeschwindigkeit, zum anderen dürfen Fahrzeuge mit dieser Breite nicht mehr ohne weiteres im öffentlichen Strassenverkehr benutzt werden. (Chamen et al. 2003a). Die schmale Reifenbreite kann unter feuchten Bedingungen vor allem bei der Ernte dazu führen, dass die schweren Erntemaschinen von der Spur rutschen. Auch kann es in den Fahrspuren zu Rinnenerosion kommen, weshalb z.B. bei Zuckerrüben im Fahrgassenanbau der Einsatz breiter Reifen anstatt Pflegebereifung empfohlen wird (Kromer et al. 2000). Für eine verstärkte Verbreitung des Einsatzes von CTF in Europa muss das System nach Möglichkeit an die hiesigen Verhältnisse und an die Standardmechanisierung angepasst werden. Konzepte mit verschiedenen Spursystemen und unterschiedlichen Spurflächenanteilen unterschiedlicher Befahrungsintensität existieren (Chamen 2007) und werden mittlerweile auch von Pionieren in der Praxis umgesetzt (Roberts 2011). Für eine breite Praxistauglichkeit müssen sie aber noch weitergehend optimiert werden.

Auf der pflanzenbaulichen Seite gibt es derzeit noch zu wenig agronomische Erkenntnisse für den Einsatz von CTF-Anbausystemen mit der oben erwähnten Standardmechanisierung. Die Auswirkungen von Spursystemen, die neben den beiden Varianten *nicht befahren* und *intensiv befahren* noch eine Variante *mittel befahren* haben, sind in Kombination mit anderen technischen Vorsorgemöglichkeiten nicht ausreichend geklärt. Aus Befahrungsexperimenten wird berichtet, dass vielfache Überrollungen wie auf Pflegefahrgassen signifikant niedrigere Grobporenvolumina zur Folge hatten. Auf Flächen ohne und bis zu einer (Rücknagel & Dumbeck 2011) bzw. bis zu drei Überrollungen (Reintam et al. 2009) traten keine signifikanten Unterschiede auf. Es ist unklar, ob sich diese Erkenntnisse auch auf CTF-Anbausysteme übertragen lassen, die nach allen Möglichkeiten der guten fachlichen Praxis bewirtschaftet werden. Wissensbedarf besteht auch, ob sich flach bearbeitete, direkt gesäte und Grünlandböden bei einer Umstellung auf CTF auch ohne Anfangslockerung von Bodenverdichtungen erholen.

2.3 Lenksysteme

Die Nutzung automatischer Lenksysteme ist eine Voraussetzung für die Anwendung von CTF-Fahrstrategien. Neben diesen Systemen, die das Lenken in der Spur komplett übernehmen, gibt es auf dem Markt für den Einstieg in die Spurführungstechnologie auch sogenannte Parallelfahrhilfen. Bei diesen sieht der Fahrer auf einem Leuchtdiodenbalken oder Bildschirm, in welche Richtung er lenken muss. Auf diese Parallelfahrhilfen wird im Folgenden nicht eingegangen, der Fokus liegt ausschliesslich auf automatischen Lenksystemen vorzugsweise hoher Präzision von $\pm 2.5\text{cm}$, wie sie in der CTF-Bewirtschaftung verwendet werden. Für einen Überblick über das komplette Spektrum an marktgängiger Lenktechnologie inklusive detaillierter technischer Informationen sei auf die Literatur (Hufnagel et al. 2004; Niemann et al. 2007; Rüegg et al. 2011) und die kontinuierliche Berichterstattung in landwirtschaftlichen Fachzeitschriften wie DLZ Agrarmagazin, Neue Landwirtschaft, Profi, Top Agrar, Fortschrittlicher Landwirt etc. verwiesen, z.B. (Böhrnsen & Holtmann 2009, 2011; Hekkert & Lenge 2007; Mühlhausen 2009; Paar 2009; Poloni 2007).

2.3.1 Entwicklung der Lenksysteme

Die Entwicklung von Lenksystemen für Traktoren begann vor mehr als einem halben Jahrhundert. In England wurden in den 1950er Jahren Traktoren über einen im Feld verlegten Leitdraht geführt, in den 1960ern wurde mit seilzuggesteuerten, fahrerlosen Traktordrohnen experimentiert. 1961 stellte Fendt einen funkgesteuerten Traktor vor. Im damaligen Ostblock mit seiner nach industriellen Ansätzen stark rationalisierten Landwirtschaft wurden ebenfalls gezielt Entwicklungen vorangetrieben (Moitzi et al. 2007). Das Thema war aber sehr komplex und erst mit der zivilen Nutzung des satellitenbasierten Globalen Navigationssystems (GNSS) der USA mit dem Markennamen *Global Positioning System* (GPS) in den 1990ern kamen praxistaugliche Lenksysteme für Traktoren auf den Markt. Diese übernehmen den Lenkvorgang und halten den Traktor automatisch auf der Spur. Sie wurden seit 1995 in Australien zur CTF-Bewirtschaftung eingesetzt, bevor sie ab Beginn der 2000er auch langsam nach Europa kamen (Noack 2004; Webb & Blackwell 2004). Im letzten Jahrzehnt wurde die Technik leistungsfähiger, günstiger und genauer (Holpp 2006). Mittlerweile wurden auch GNSS-basierte elektronische Deichselssysteme für Traktordrohnen und kameragesteuerte Spurfolgesysteme für Überladefahrzeuge auf dem Feld vorgestellt (Peters et al. 2011; Zhang et al. 2010). Nach einer Umfrage 2004 nutzten 7% der Befragten satellitengesteuerte Systeme zur Lenkunterstützung (Prem et al. 2004), 2009 waren es 11%, davon etwa die Hälfte in der höchsten Genauigkeitsklasse von $\pm 2.5\text{cm}$ (Hörner et al. 2009).

2.3.2 Verfahrenstechnische und arbeitswirtschaftliche Auswirkungen

Der verfahrenstechnische Nutzen von auf Traktoren und Erntemaschinen verwendeten Lenksystemen ist primär in einer optimalen Ausnutzung der Gerätearbeitsbreiten zu sehen. Diese führt im Vergleich zu manuellem Lenken zu weniger Überlappung und Doppelbearbeitung, verringerten Pflanzenschutz- und Düngemittelmengen und

reduzierten Feldarbeitszeiten. Die Wendezeiten können durch ein optimiertes Spurmanagement reduziert werden und das Arbeiten in der Dunkelheit wird wesentlich erleichtert. (Macak & Nozdrovicky 2011; Niemann et al. 2007; Rüegg et al. 2011; Schulten-Baumer et al. 2009). Mit Lenksystemen ist beim Wenden auch das Überspringen einer Fahrspur möglich. Der Wendevorgang wird mit Fahren eines Halbkreises durchgeführt. Ohne Lenksystem wird in der Regel in einer längeren Omegaform oder, um Vorgewende klein zu halten, durch Vor- und Rückwärtsrangieren in Schwalbenschwanzform gewendet (Demmel 2007) (Abb. 4).

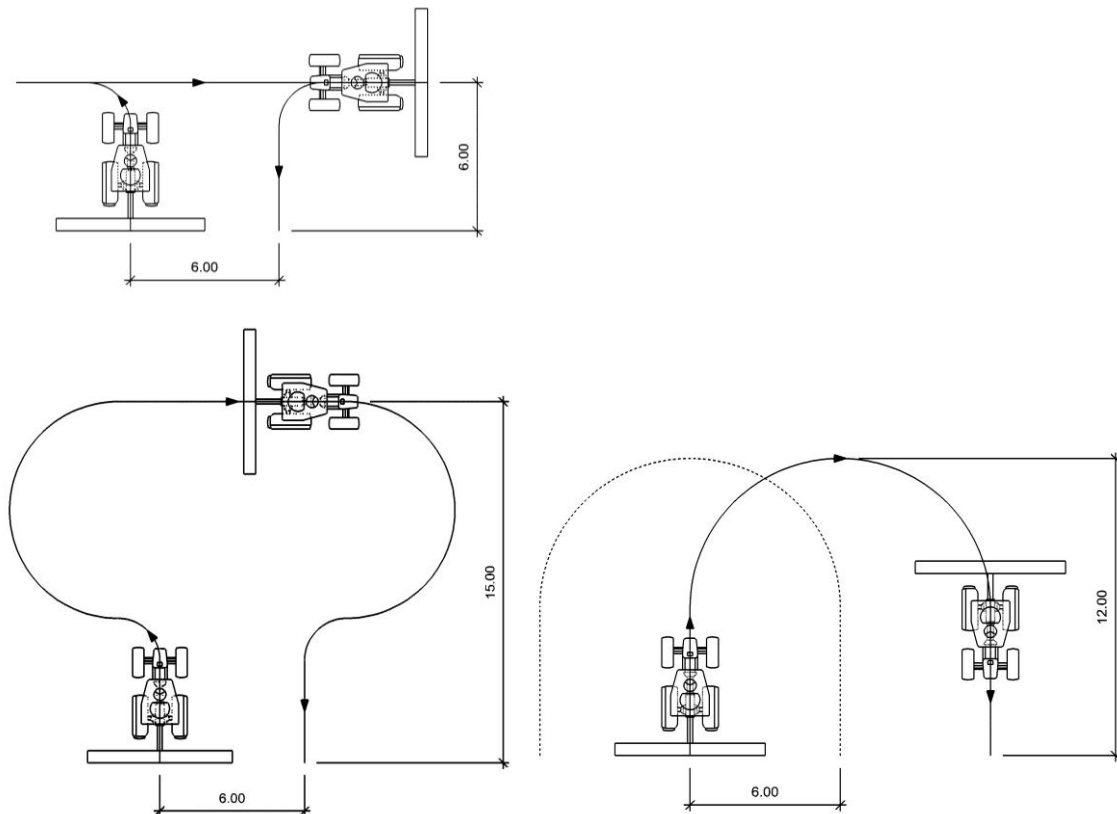


Abb. 4: Links oben Wenden in Schwalbenschwanzform, links unten Wenden in Omegaform jeweils mit direktem Anschluss an die letzte Fahrspur. Rechts Wenden mit Überspringen einer Fahrspur. Fahrzeug- und Spurmasse beispielhaft.

Österreichische Untersuchungen unter kleinstrukturierten Bedingungen zeigten bei der Bodenbearbeitung mit einer 4.2m breiten Scheibenegge eine Reduktion der Wendezeit von 3.3s bzw. 15% (Moitzi et al. 2007). Unter grösser strukturierten Bedingungen in Tschechien wurde die Wendezeit mit Lenksystemen um 5% reduziert (Kroulik et al. 2009). In bayerischen Studien wurde mit dem Wechsel von Schwalbenschwanzwende auf Überspringen einer Fahrspur die Wendezeit um 1/3 gesenkt (Demmel 2007).

Die Überlappung wurde im Praxistest mit einem 4m-Bodenbearbeitungsgerät und 5cm-Lenkgenauigkeit um etwa 6cm im Vergleich zur manuellen Lenkung verringert, gleichzeitig verringerte sich die Schwankungsbreite beim Lenken (Berning 2011). Ein Praxisbetrieb berichtete von einer Überlappung bei manuellem Lenken bei der Bodenbearbeitung mit

6.80m am Tag von 10-20cm, in der Nacht von 40-50cm. Mit Lenksystem kann die Überlappung um 5-9% reduziert werden (Keller 2005).

Eine Reduktion der Überlappung auf 5cm mit Lenksystem brachte 5-10% Dieseleinsparungen (Boxberger et al. 2009). In Australien wurden durch die geringere Überlappung 3-10% Kosten eingespart (Webb & Blackwell 2004). Eine deutsche Umfrage beziffert das Einsparpotenzial von Lenksystemen folgendermassen: Kraftstoff bei 5.9%, Arbeitszeit 6.7%, Pflanzenschutzmittel 8%, Dünger 4.6% und Saatgut 2.6 (Schulten-Baumer & Schmittmann 2010). Als Hauptgründe für die Nutzung eines Lenksystems wurden aufgezählt: Fahrerentlastung 72%, Zeitersparnis 44%, exaktes Anschlussfahren 42%, Verbesserung der Arbeitsqualität 30% Kraftstoffersparnis 26%, Nacharbeit 14%, Beetfahren 9%, Umweltschutz 5% (Schulten-Baumer et al. 2009). Als erweiterte Anwendungsgebiete von Lenksystemen wird neben CTF auch die Streifenbearbeitung (Strip-till) in Kombination mit der präzisen Ablage von Dünger und Pflanzenschutzmitteln genannt (Buick 2006).

Zusammenfassend lässt sich aus den oben zitierten Studien folgern, dass die verfahrenstechnischen und arbeitswirtschaftlichen Auswirkungen positiv sind. Wendezeiten werden um 5-33% verkürzt und Gerätearbeitsbreiten um 1.3% bis über 10% besser ausgenutzt. Durch die geringere Überlappung kommt es zu relevanten Einsparungen an Dünger, Pflanzenschutzmitteln und Kraftstoff.

2.3.3 Ergonomische Auswirkungen

In Praxisumfragen steht als Hauptgrund für die Nutzung eines Lenksystems die Fahrerentlastung ganz vorn (Schulten-Baumer et al. 2009). Dieses Argument wird fast auch in aller zum Thema gefundenen Literatur erwähnt: Der Fahrer, der 60% seiner Konzentration für den Lenkvorgang aufwendet (Moitzi & Heine 2006), wird entlastet und kann sich besser auf die Kontrolle der Geräte konzentrieren (Niemann et al. 2007; Rüegg et al. 2011; Schulten-Baumer et al. 2009). In der Literatur wurden aber keine Hinweise darauf gefunden, dass Belastung und Entlastung von Traktorfahrern im Zusammenhang mit der Nutzung von Lenksystemen je untersucht worden wären.

Zur Beurteilung von körperlicher Belastung bei Arbeit und Sport werden in den Arbeits- und Sportwissenschaften oft Herzfrequenzmessungen als Indikator eingesetzt (Bongwald et al. 1995). Daneben wird die Herzfrequenz auch zur Einstufung von Stressbelastung ohne direkte körperliche Anstrengung wie zum Beispiel beim Autofahren verwendet (Egelund 1982; Paridon 2006; Reimer et al. 2010; Reimer et al. 2011). Zum Teil wird die Herzfrequenz in Kombination mit weiteren physiologischen Kennwerten wie Herzfrequenzvariabilität und Hautleitfähigkeit interpretiert. Die Messgrösse Herzfrequenz ist sowohl Bestandteil in der industriellen Entwicklung nutzergerechter Mensch-Maschine-Interaktion von Fahrerassistenzsystemen (Winner et al. 2009) als auch in Fahrerüberwachungssystemen in Kraftfahrzeugen mit Fokus Ermüdungserkennung, in denen sie über Sensoren im Fahrersitz oder Lenkrad aufgenommen wird (Morawietz 2011).

In der Literatur finden sich neben vielen Informationen zur Optimierung des Trainings von Ausdauersportarten wie Joggen und Fahrradfahren in einem Herzfrequenzbereich von etwa $105-190\text{min}^{-1}$ (2008) auch etliche Arbeiten, die sich mit Grenzwerten bei körperlich belastenden Arbeiten im Stehen bzw. im Zusammenhang mit Heben und Tragen im

Bereich der Dauerleistungsgrenze beschäftigen (Bernhard & Kiene 2004; Bongwald et al. 1995; Dikow 2010; Rehme 2004). Diese Grenze berechnet sich aus dem individuellen Ruhepuls von $60\text{-}80\text{min}^{-1}$ plus 40 Arbeitspulsen und liegt im achtstündigen Mittel bei etwa $100\text{-}120\text{min}^{-1}$ (Dikow 2010; Rehme 2004). Über dieser Grenze kommt es auf Dauer trotz steigender Herzfrequenz zu einer Leistungsabnahme.

Erkenntnisse für Herzfrequenzbereiche aus den Bereichen Sport sowie Arbeit an der körperlichen Dauerleistungsgrenze können nicht unbedingt auf den beim Lenken von Traktoren erwarteten Herzfrequenzbereich $<100\text{min}^{-1}$ übertragen werden. Aussagen für diesen Bereich fanden sich in verschiedenen Untersuchungen mit Autofahrern.

Das Reagieren auf einfache Änderungen im Strassenverkehr hatte bei einer Ausgangsherzfrequenz von $71\text{-}77\text{min}^{-1}$ eine Änderung von $1\text{-}2\text{min}^{-1}$ zur Folge; bei komplexeren Situationen waren es bis zu 6min^{-1} (De Waard 1996). Bei vergleichenden Messungen zwischen manuellem und vollautomatisch gesteuertem Einparken in gemischten Altersgruppen zwischen 20 und 60 Jahren zeigte sich, dass die Herzfrequenz in den zehn Sekunden vor und nach dem manuellen Einparkprozess 2min^{-1} höher war als beim automatischen Einparken. Während des manuellen Einparkens steigerte sich die Herzfrequenz um 12min^{-1} , während sie beim automatischen Einparken sogar leicht auf etwa 72min^{-1} sank (Reimer et al. 2010). Aus Studien zum Telefonieren während dem Autofahren ging hervor, dass sich die Herzfrequenz signifikant erhöhte (NSC 2010), bzw. dass sich bei jüngeren Fahrern während des Telefonats die Herzfrequenz temporär von etwa 70 auf 74min^{-1} erhöhte (Reimer et al. 2011). Im Fahrsimulator getestete Jungfahrer im Alter von etwa 20 Jahren hatten bei einer Ausgangsherzfrequenz von etwa 92min^{-1} eine Erhöhung um 5min^{-1} , wenn sie einfache Denkaufgaben lösen, etwas ins Mobiltelefon eingeben oder eine Gefahrenbremsung durchführen mussten. Die Fahrer spürten die Änderung der Herzfrequenz nicht bzw. empfanden die Situation auch nicht anstrengender (Paridon 2006).

Die Untersuchungen zeigen, dass Entlastung/Belastung während dem Fahren in der Regel mit einer Änderung der Herzfrequenz um wenige Schläge pro Minute einhergeht, in Einzelfällen auch mehr. Die Entlastung/Belastung muss nicht als solche empfunden werden. Es ist offen, ob und wenn ja in welchem Umfang beim Fahren mit automatischen Lenksystemen in der Landwirtschaft ähnliche Effekte auftreten.

2.3.4 Wirtschaftlichkeit

Die Investitionskosten für ein automatisches Lenksystem liegen je nach Ausstattung, Genauigkeitsklasse und Vorausstufung des Traktors in einem Bereich von 10'000 bis 30'000€. Je nachdem fallen noch zusätzliche laufende Kosten für Korrektursignale an (Holpp 2006; Niemann et al. 2007). Die Auslastungsgrenze für einen wirtschaftlichen Einsatz wird abhängig von Investitions- und laufenden Kosten, Systemgenauigkeit, Arbeitsbreite und Fruchtfolge bei einem Abschreibungszeitraum von fünf bis zehn Jahren mit 200-600ha/Jahr angegeben (Holpp 2006; Niemann et al. 2007; Schulten-Baumer et al. 2009). Die Skaleneffekte sind beachtlich, bei bewirtschafteten Flächen in der Grössenordnung von mehreren tausend Hektaren kann sich die Technik bereits nach zwei Jahren bezahlt machen (Kastens et al. 2006). Für Betriebe mit zu wenig Fläche für den rentablen Betrieb von Lenksystemen bietet sich für die Arbeitsgänge Bodenbearbeitung und Aussaat

z.B. das Anmieten von Lenksystemen, die Leihe entsprechend ausgestatteter Traktoren über den Maschinenring oder die Zusammenarbeit mit Lohnunternehmern an. Alle Pflegearbeiten können dann ohne Lenksystem auf den präzise gelegten Pflegefahrgassen durchgeführt werden. Da der Grossteil der Kosteneinsparungen durch die genauere Ausbringung von Dünger und Pflanzenschutzmitteln realisiert wird, genügt bereits die Verwendung von Lenksystemen beim Säen, um von den Hauptvorteilen zu profitieren.

3 CTF-Umsetzung

In diesem Kapitel werden die Möglichkeiten einer CTF-Umsetzung unter europäischen Bedingungen mit der Verwendung von Standardmaschinen dargestellt.

Eine breite Einführung von CTF-Anbausystemen in der Praxis kann durch die Nutzung von Fahrzeugen mit Standardspurweiten und praxisüblicher Bereifung erleichtert werden. Dies vermeidet negative Auswirkungen auf Höchstgeschwindigkeit, Tragkraft und Strassenverkehrszulassung der Traktoren. Hinzu kommt, dass mit einem Umbau einhergehende Kosten und Garantieverluste durch die Maschinenhersteller vermieden werden.

Abhängig von den angebauten Kulturen gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Mechanisierung auf ein CTF-System abzustimmen. Im folgenden wurde auf Überlegungen von Chamen aufgebaut (Chamen 2007). Für eine kompaktere Darstellung der Abbildungen wurden die Maschinen vereinfacht gezeichnet und meist auf eine Achse reduziert.

3.1 Dauergrünland

Auf Dauergrünland lässt sich CTF mit einem geringen Fahrspuranteil dank der heute gängigen Arbeitsbreiten in der Grünlanderntekette recht einfach realisieren. Bei traktorgebundenen Ernteketten lässt sich bei einer 600mm breiten Bereifung mit einer Front-Heck-Mähkombination mit 6m, einem Kreiselheuer mit 6.8m und einem Schwader mit 7.5m ein Spurflächenanteil von 20% realisieren. Beim Einsatz einer Kombination mit drei Mähwerken und einer Arbeitsbreite von 8.30m sinkt der Spurflächenanteil auf etwa 15% (Abb. 5). Das Schwaden ist mit einem Grossschwader mit Mittelschwadablage einfacher als mit Seitenschwadablage zu bewerkstelligen. Der Abtransport gestaltet sich mit Ladewagen einfach. Beim Pressen muss ein Ballensammler eingesetzt werden, damit die Ballen ausserhalb des Feldes auf die Transportfahrzeuge geladen werden können.

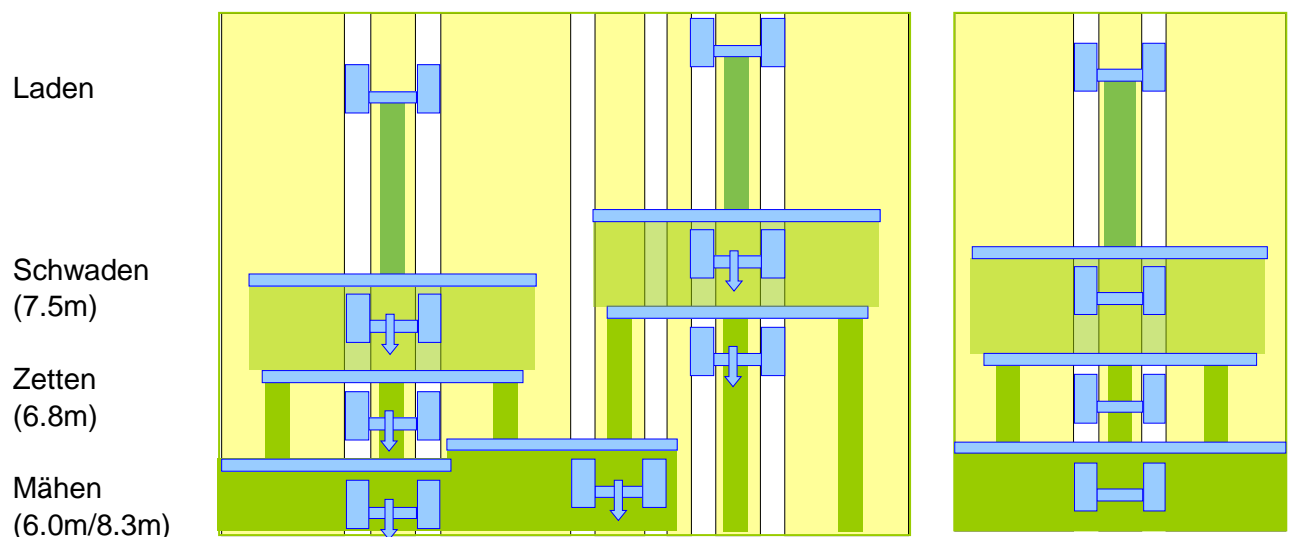


Abb. 5: Traktorbasierte Grünlandernteketten. Die befahrene Fläche beträgt links etwa 20%, rechts etwa 13%. Die Maschinen wurden vereinfacht gezeichnet.

Werden Häcksler mit breiterer Spur und Bereifung eingesetzt (3.30m Aussenbreite), beträgt der Spurflächenanteil bei einer Arbeitsbreite von 9m etwa 25%. Grössere Arbeitsbreiten, wie sie mit Grossflächenmäherwerken wie zum Beispiel dem Claas Cougar mit 14m und entsprechend abgestimmter Folgemechanisierung möglich sind, senken den Spurflächenanteil wieder auf etwa 14% (Abb. 6).

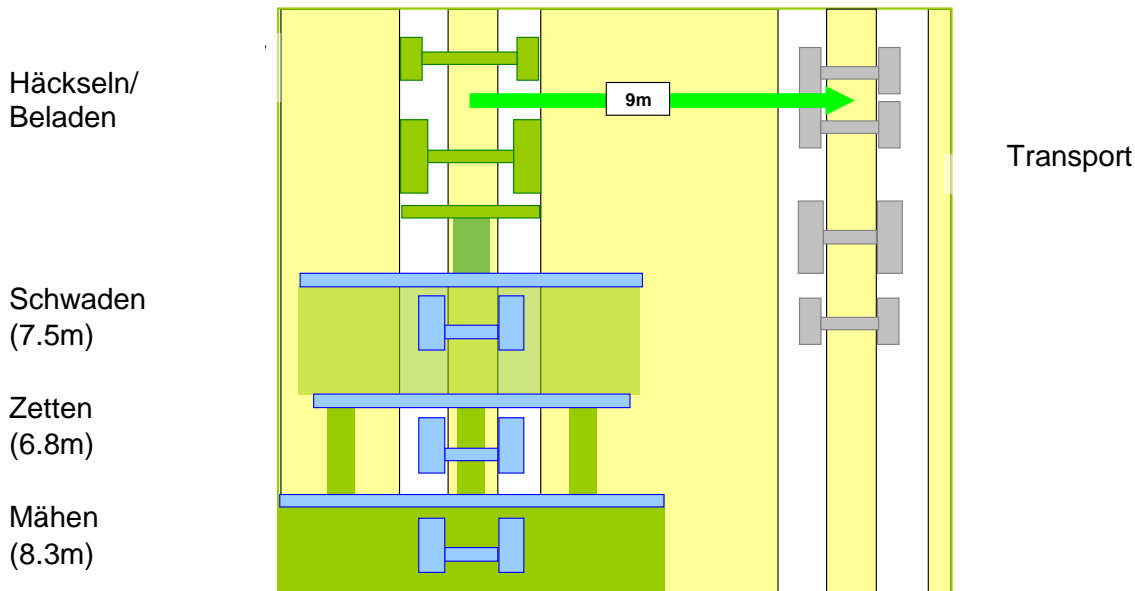


Abb. 6: Grünlanderntekette mit Häcksler (3.30m Aussenbreite). Bei 9m Mähbreite beträgt der Spuranteil aufgrund der breiteren Fahrspuren etwa 25%, bei 14m etwa 14%.

In der Regel fährt das Transportfahrzeug in naher Distanz parallel zum Häcksler. Unter CTF muss es auf der nächsten Spur fahren und der Häcksler entsprechend das Erntegut über eine ganze Arbeitsbreite werfen. Technisch ist dies möglich, eine optimale Befüllung des Transportfahrzeuges ist aber schwieriger zu bewerkstelligen. Assistenzsysteme zur Steuerung des Auswurfkrümmers (Claas, New Holland) und Lenkungssteuerung des Transportfahrzeuges von der Erntemaschine aus (Case, Fendt) können sinnvoll sein. Praxiserfahrungen aus Australien zeigen, dass das Befüllen von Anhängern den Fahrern unter CTF nicht schwerer fällt, da die Distanz zwischen Erntemaschine und Transportanhänger durch die Fahrspuren immer dieselbe ist. Der Fahrer des Transportanhängers muss sich also nur noch auf die Distanz in Fahrtrichtung zwischen Ernte- und Transportfahrzeug konzentrieren (Yule 2012).

3.2 Mähdruschkulturen

Ein auf der häufig verwendeten Grundarbeitsbreite von 3m basiertes CTF-Anbausystem benötigt eine zusätzliche Fahrspur für den Mähdrescher. Der Fahrspuranteil beträgt etwa 50% (Abb. 7). Bedingt durch die unterschiedlichen Fahrzeugspurweiten liegt er auch bei schmalerer Bereifung oder bei einer grösseren Schnittbreite von 6m in diesem Bereich. Eine Senkung des Spurflächenanteils lässt sich nur durch eine Erhöhung der Grundarbeitsbreite erreichen. Bei einer Arbeitsbreite von 6m, 650mm breiter Traktorbereifung und 800mm breiter Mähdrescherbereifung kommt man auf 40%, bei durchgängig 600mm breiten Reifen auf 36%. Bei 9m Arbeitsbreite, 650mm breiter Traktorbereifung und 800mm breiter Mähdrescherbereifung kommt man noch auf etwa 27% (Abb. 8). In allen Fällen erfolgen Pflegearbeiten wie Pflanzenschutz und Düngung mit einem ungeraden Vielfachen der Grundarbeitsbreite von der Pflegefahrgasse aus.

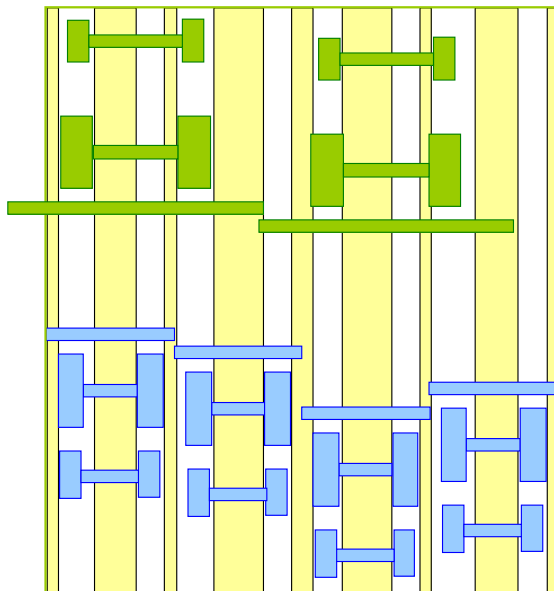


Abb. 7: Getreideanbausystem mit einer Traktorarbeitsbreite von 3m und Mähdrescherarbeitsbreite von 4.80m. Der Spurflächenanteil liegt bei etwa 50%.

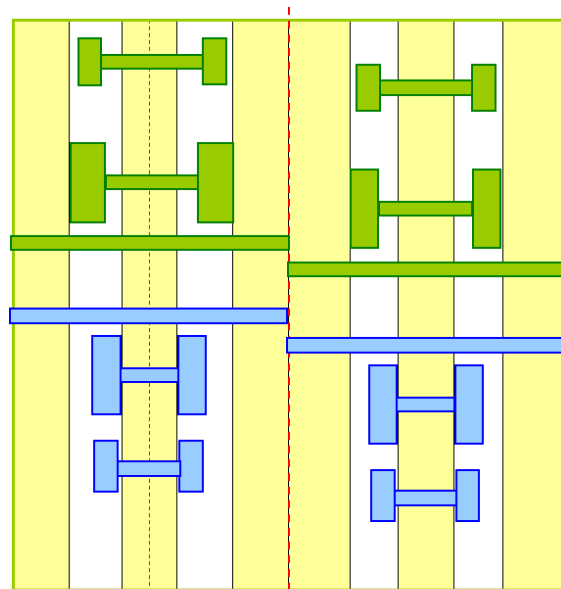


Abb. 8: CTF-System mit 6m Arbeitsbreite. Links mit gemischt 600/800mm breiter Bereifung Fahrspuranteil von 40%, rechts mit einheitlich 600mm breiten Reifen 36%.

Bei einer Kombination der Spurweiten vom Traktor (1.80m) und Mähdrescher (2.70m) kommt man auf ein CTF-Anbausystem von 4.50m (Abb. 9). Der Mähdrescher fährt um eine halbe Arbeitsbreite versetzt auf den Traktorspuren. Der Spurflächenanteil beträgt mit 600mm breiten Reifen etwa 27%. Ein geringerer Wert ist mit Standardmaschinen ohne Spuranpassung und ohne schmale Reifen kaum zu erreichen.

3.3 Mais

Ein CTF-Anbausystem mit 4.50m Arbeitsbreite passt auch in den sechsstufigen Silomaisanbau (Abb. 10). Der Häcksler fährt um eine halbe Arbeitsbreite versetzt auf den Traktorspuren. Mit 600mm breiter Bereifung auf allen Fahrzeugen liegt der Spurflächenanteil bei etwa 27%. Bei variablem Reihenabstand können alle Reihen im unbefahrenen Bereich gelegt werden. Bezüglich des 7m weiten Überladens auf die Transportfahrzeuge gelten dieselben Regeln wie beim Häckslereinsatz im Dauergrünland beschrieben.

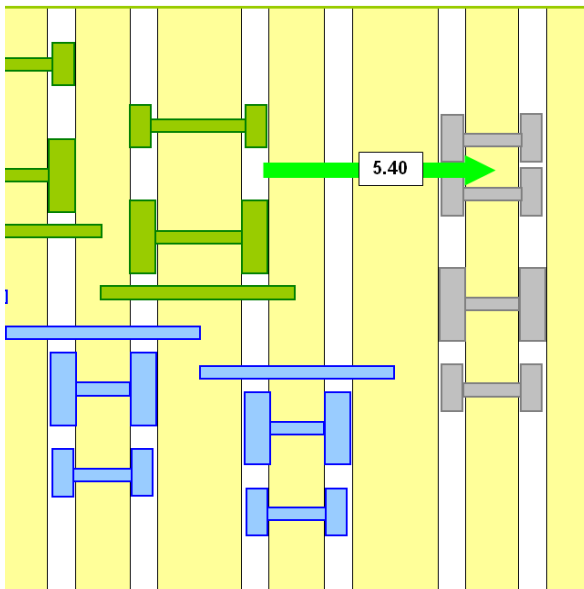


Abb. 9: Getreideanbausystem mit 4.50m Arbeitsbreite und Spurflächenanteil von etwa 27%.

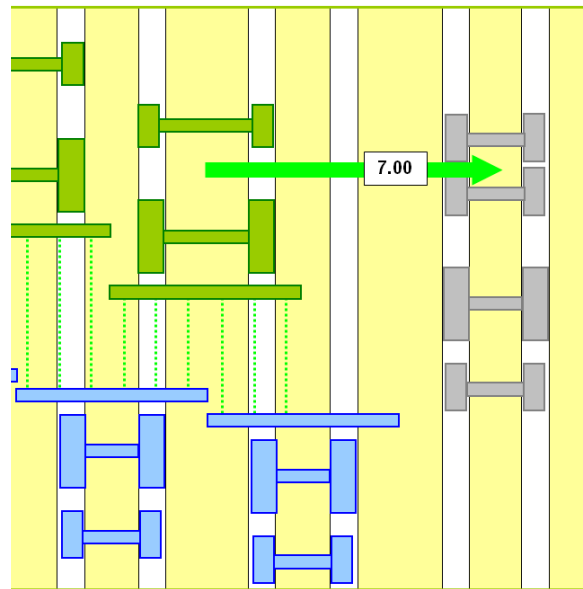


Abb. 10: Sechsstufiges Maisanbausystem mit 4.50m Arbeitsbreite und Spurflächenanteil von etwa 27%.

3.4 Kunstwiese

Kunstwiese lässt sich auf zwei Arten in ein CTF-Anbausystem mit 4.50m Arbeitsbreite integrieren. Entweder beträgt die Mäharbeitsbreite 4.50m oder 9m. In beiden Fällen haben die nachfolgenden Arbeitsgänge eine Arbeitsbreite von 9m. Mit 600mm breiter Bereifung beträgt der Spurflächenanteil 27% bzw. 13% (Abb. 11).

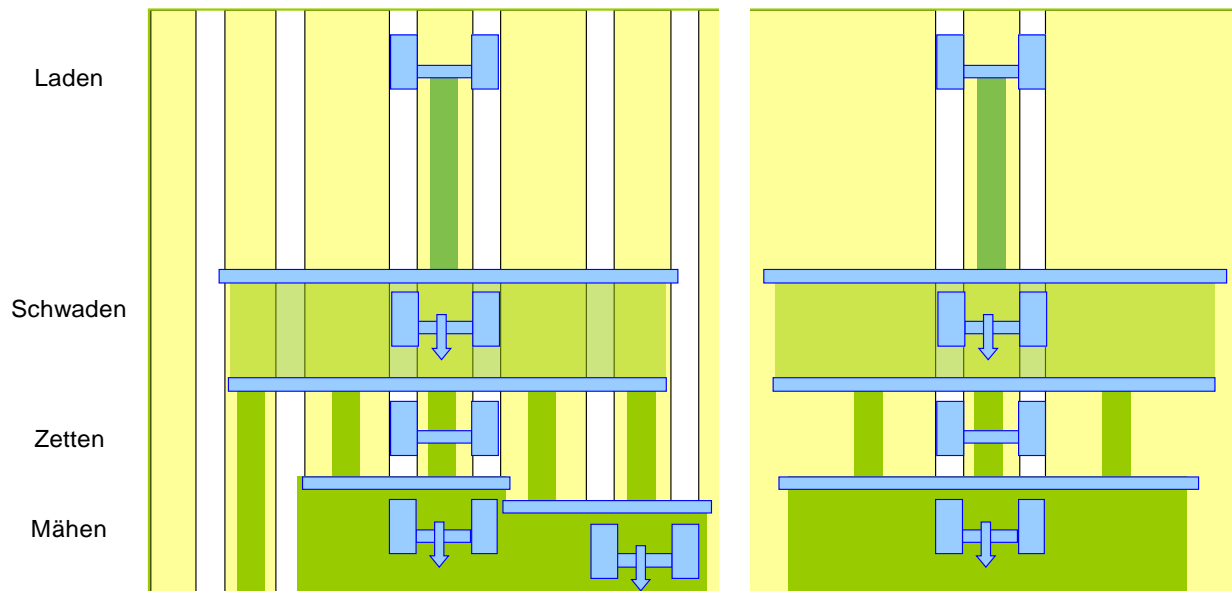


Abb. 11: Traktorbasierte Kunstwiese. Links mit 4.50m Grundarbeitsbreite liegt der Spurflächenanteil bei etwa 27%. Rechts mit 9m sinkt der Spurflächenanteil auf 13%.

Beim Häckslereinsatz muss das Futter mit einem Seitenschwader in die Häckslerspurr geschwadet werden. Die Arbeitsbreiten der Erntekette sind entsprechend abzustimmen (Abb. 12). Alternativ kann der Häckslereinsatz wie in Abb. 11 in einer Linie mit dem Mittelschwader fahren. Dies erhöht die Spurbreite und damit den Gesamtspurflächenanteil.

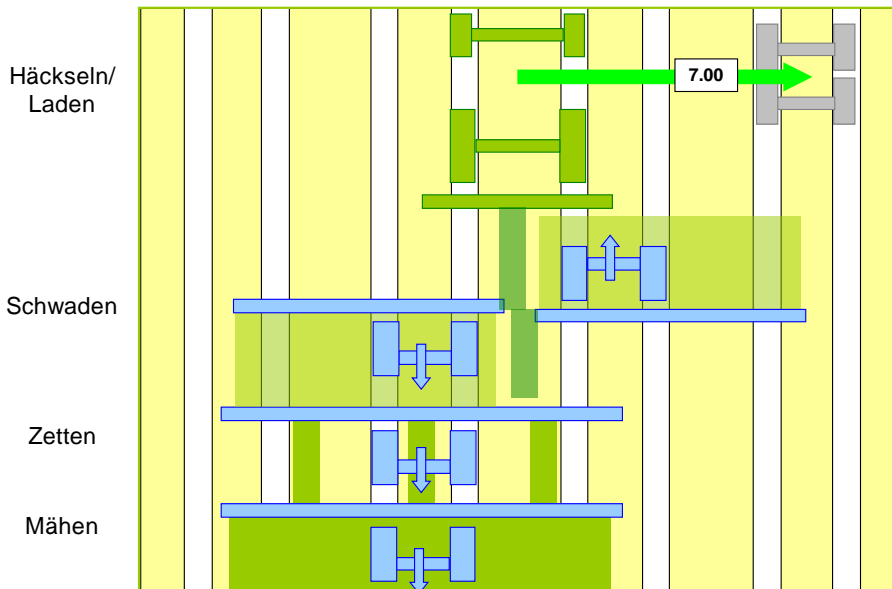


Abb. 12: Kunstwiese/Futterbau mit Häckslereinsatz. Das Futter wird mit einem Seitenschwader in die Häckslerspurr geschwadet.

3.5 Rüben/Kartoffeln

Im heute gängigen sechsreihigen Ernteverfahren lässt sich ein CTF-Anbauverfahren mit drei Meter Arbeitsbreite realisieren. Der Spurflächenanteil beim Einsatz von leichten, relativ schmal bereiften traktorgezogenen oder selbstfahrenden Köpfradeladern beträgt etwa 50-60% (Abb. 13).

Mit den am Markt verfügbaren neunreihigen Erntesystemen liesse sich theoretisch ein auf neun Reihen mit 50cm Reihenabstand basierendes CTF-Anbausystem mit einer Arbeitsbreite von 4.50m realisieren (Abb. 14). Bei den Erntemaschinen handelt es sich allerdings primär um schwere, selbstfahrende Köpfrdebunker mit gross- bis ganzflächig überrollender Bereifung. Grimme bietet mit dem Rootster 904 einen neunreihigen traktorgezogenen Köpfrdelader an. Diesen gibt es derzeit nur in einer starren Arbeitsbreite von 4.50 Meter; er entspricht primär den Anforderungen der osteuropäischen Märkte. Eine Ausführung mit drei Meter Transportbreite gibt es nicht.

Für den Kartoffelanbau gelten prinzipiell dieselben Überlegungen wie für den Rübenanbau. Heute verbreitete vierreihige Anbausysteme mit 75cm Reihenabstand und drei Meter Arbeitsbreite weisen einen Spurflächenanteil von 50-60% auf.

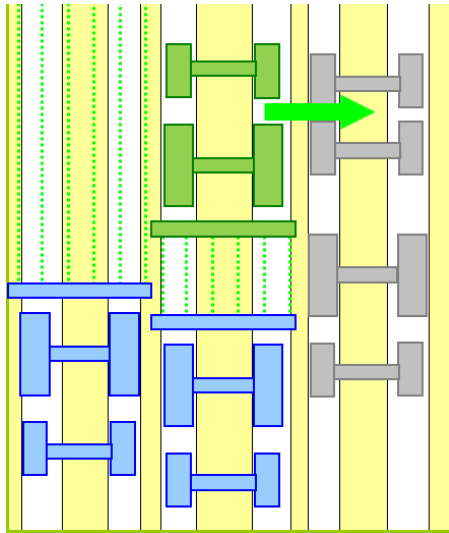


Abb. 13: Sechsstreihiges Rübenanbausystem mit Köpfrodelader. Bei 3m Arbeitsbreite liegt der Spurflächenanteil bei etwa 50-60%.

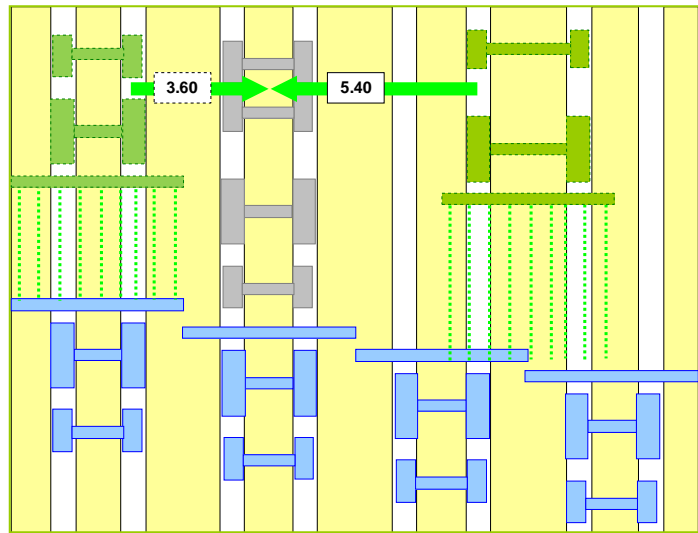


Abb. 14: Skizze eines neunreihigen Rübenanbausystems mit 4.50m Arbeitsbreite und einem traktorgezogenen (Überladedistanz 3.60m) bzw. selbstfahrenden Köpfrodelader (Überladedistanz 5.40m). Der Spurflächenanteil läge bei etwa 27%.

Für eine Einbindung von Rüben und Kartoffeln in CTF-Anbausysteme sind zwei Grundvarianten vorstellbar:

a) Die Erntetechnik für Rüben und Kartoffeln wird konsequent mit 4.50m Arbeitsbreite und entsprechenden Spurweiten und Reifenbreiten in das CTF-Anbausystem eingebunden. Angesichts der bestehenden Angebotspalette und des ungebrochenen Trends zu immer leistungsfähigeren Maschinen ist zu erwarten, dass solche Arbeitsbreiten mittelfristig in grösserer Vielfalt zur Verfügung stehen werden. Da die vom CTF-Anbausystem vorgegebenen Reifen-/Banddimensionen und der maximal tolerierte Kontaktflächendruck das Gesamtgewicht der nicht ganzflächig überrollenden Maschinen limitieren, ist die Verwendung von grossvolumigen Bunkern nicht möglich. Der Ernteguttransport auf dem Feld erfolgt absätzig wie beim Mähdrusch und Häckseln mit Transportfahrzeugen; der Überladevorgang ist jedoch komplexer, da das Erntegut nicht geworfen, sondern mit Bändern über weitere Strecken transportiert werden muss. Im Vergleich zu Bunkermaschinen mit Feldrandentladung nimmt der Logistikaufwand zu.

b) Die Erntetechnik für Rüben und Kartoffeln wird nicht in das CTF-Anbausystem eingebunden. Die Ernte erfolgt mit ganzflächig überrollenden Köpfrdebunkern ohne zusätzliche Feldtransportfahrzeuge. Die maximal tolerierten Kontaktflächendrücke, die zum Schutz der ansonsten unbefahrenen Flächenteile tendenziell niedriger als in der ersten Variante sind, begrenzen die maximalen Maschinengewichte und Schlaglängen. Die Felder müssten ggf. in auf die Maschinenkapazität angepasste Beete eingeteilt werden. Ein solches Ausklammern einzelner Arbeitsgänge aus dem CTF-Fahrschema ist aus dem holländischen Gemüsebau unter der Bezeichnung „Seasonal CTF“ bekannt. Untersuchungen zeigten, dass CTF auch dann vorteilhaft blieb (Vermeulen & Korteweg 2007).

Erfahrungsgemäss lassen sich vor allem Rüben bei späten Erntezeitpunkten nicht immer unter optimalen Bodenfeuchtebedingungen ernten. Die Gefahr der Induktion

unerwünschter Bodenverdichtungen ist wesentlich grösser als in anderen Kulturen. Die Auswirkungen dieser Bodenverdichtungen für die Folgekulturen lassen sich in Anbausystemen mit Bodenlockerung jedoch durch eine entsprechende Bearbeitung kompensieren. Da der Anbau von Zuckerrüben und vor allem Kartoffeln unter permanenten Direktsaatsystemen auf Grund der mit dem dicht gelagerten Boden oft einhergehenden verminderten Produktqualität und der starken Bewegung des Bodens während der Ernte wenig verbreitet ist, stellen sich die oben angeführten Verdichtungsrisiken unter Direktsaat nicht (Klapka & Steinert 2008; Südzucker 2002).

3.6 Planungshilfen

Weitere Informationen zur Planung von CTF Spursystemen stehen auf der Homepage der Beratervereinigung CTF-Europe (www.ctfeurope.eu) zur Verfügung. Zur Berechnung von Spurflächenanteilen eignen sich die excelbasierten Tools TASC und CCTF (Calculating Controlled Traffic Farming) zur Berechnung der Spurflächenanteile (Diserens & Spiess 2004; Nowak 2009).

3.7 Schlussfolgerung

CTF-Anbausysteme sind mit den heute zur Verfügung stehenden Standardmaschinen in vielen Bereichen realisierbar. Dauergrünland, Mähdruschfrüchte, Mais und Ackerfutterbau lassen sich relativ einfach mechanisieren. Im Grünland können mit Arbeitsbreiten ab 9m Spurflächenanteile von bis zu unter 15% erreicht werden, auf dem Acker mit 4.5m und 9m von etwa 27%. Bei Rüben und Kartoffeln ist es aufgrund der derzeit primär auf 3m Arbeitsbreite ausgelegten Erntetechnik nur schwierig möglich, ein CTF-System mit einem Fahrspuranteil von weniger als 50% zu installieren. Zum Erreichen geringerer Fahrspuranteile müsste neben der Entwicklung von Erntetechnik mit grösserer Arbeitsbreite vor allem auch der Transport der grossen Erntemassen auf dem Feld bodenschonend gestaltet werden. Alternativ kann als verfahrenstechnischer Kompromiss der Einsatz von Erntetechnik mit ganzflächig überrollenden Bunkermaschinen geprüft werden.

4 CTF-Feldversuch

Zur Quantifizierung bodenkundlicher und pflanzenbaulicher Auswirkungen von CTF wurde ein dreijähriger Feldversuch mit Getreide und Kunstwiese unter Direktsaat durchgeführt. Die Bewirtschaftung erfolgte mit praxisüblichen Standardmaschinen nach guter fachlicher Praxis im Sinne einer Ausnutzung aller üblichen technischen Vorsorgemöglichkeiten. Zur besseren Einordnung der Resultate wurden befahrene und nicht befahrene Flächenteile differenziert erhoben und CTF mit zufällig befahrenen Direktsaat- und Pflugparzellen verglichen.

4.1 Material und Methoden

4.1.1 Standort

Die Versuchsflächen liegen auf der Parzelle *Grund* der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART in Tänikon (Koordinaten E8°54'22"/N47°28'53"). Bei der um zirka 2% leicht nach Westen und Norden geneigten Parzelle handelt es sich um eine tiefgründige Parabraunerde, die auf der Grundmoräne des postglazialen Alluvion des Aadorfer Feldes entstanden war. Auf Basis von Bodenprofilen wurde der Skelettgehalt auf etwa 10% geschätzt. Die wichtigsten Bodenparameter sind in Tab. 4 dargestellt. Der Boden ist als Geschiebelehm Ls3 (deutsches Dreieckskoordinatensystem) bzw. Loam (US-amerikanische Soil Taxonomy) einzustufen (Scheffer & Schachtschabel 2002).

Tab. 4: Durchschnittliche Bodeneigenschaften des Versuchsstandortes (Anken 2003).

Eigenschaft	Tiefe 0-20 cm	Tiefe 30-50 cm
Ton	21.9%	24.9%
Schluff	33.8%	33.2%
Sand	41.5%	41.9%
org. C	1.6%	-
pH (H ₂ O)	6.6	6.8

4.1.2 Witterung

Im 40-jährigen Mittel (1970-2010) liegen die durchschnittlichen Jahrestemperaturen in Tännikon bei 8.4°C und der durchschnittliche Jahresniederschlag bei 1187mm. Der Niederschlags- und Temperaturverlauf im Versuchszeitraum sind in Abb. 15 dargestellt. 2010 regnete es im Mai verhältnismässig viel und es war kühl. Die Niederschläge im Juni 2011 gingen ebenfalls mit einer kühleren Periode einher.

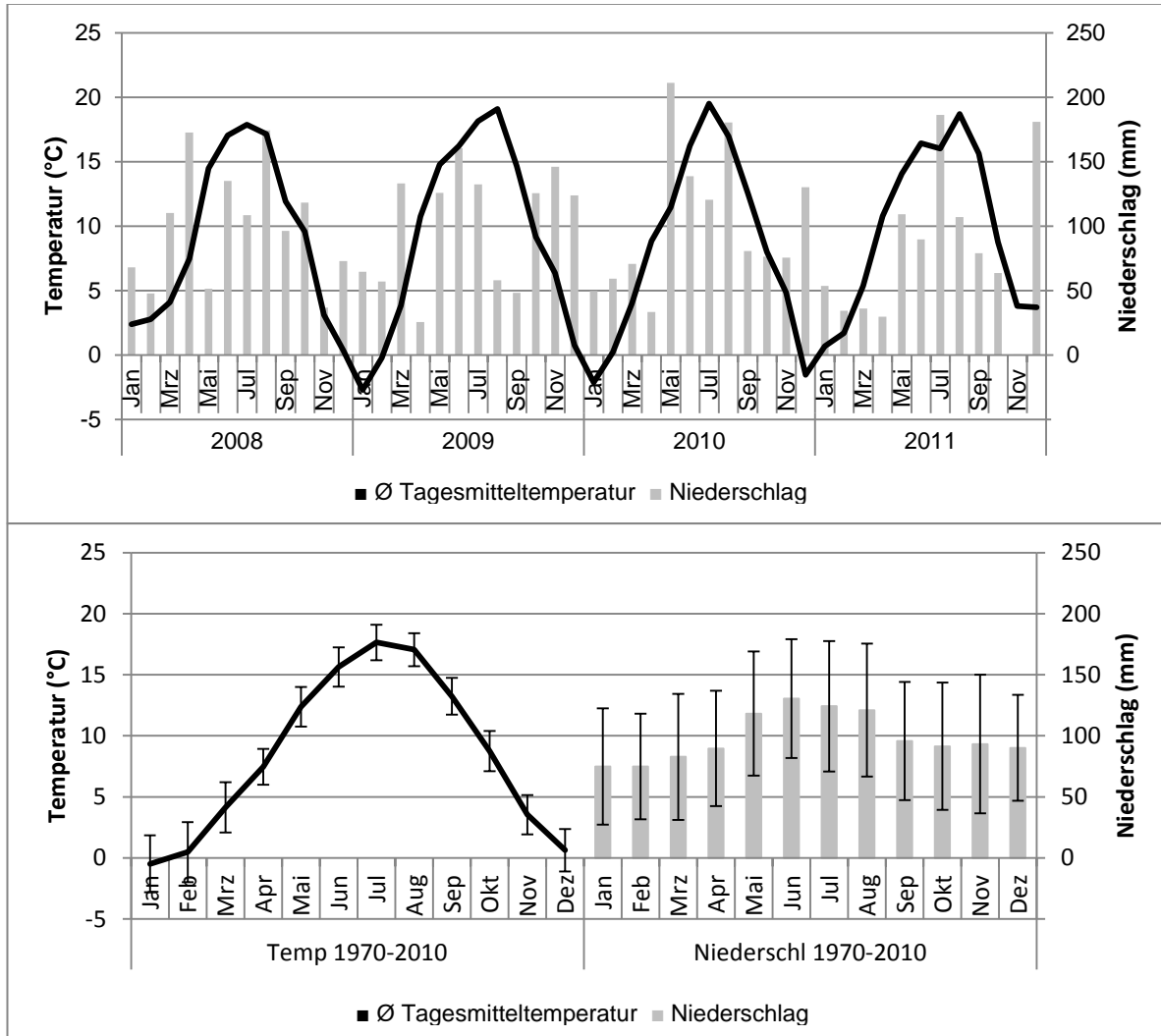


Abb. 15: Oben: Monatlicher Niederschlags- und Temperaturverlauf von 2008-2011. Unten: Langjährige Monatsmittel +/-1 Standardabweichung. Messwerte von Meteorstation Tännikon. (Quelle: Meteoschweiz, Zürich)

2008 war die Witterung 30 Tage vor der Aussaat und zwischen Aussaat und Auszählen des Feldaufgangs feuchter und es war kühler als 2009 (Tab. 5).

Tab. 5: Niederschlagssummen und $\bar{\varnothing}$ Tagesmitteltemperaturen vor der Aussaat und zwischen Aussaat und Auszählen des Feldaufgangs 2008 und 2009.

Zeitraum	Winterweizen Aussaat 20.10.2008		Wintergerste Aussaat 24.09.2009	
	Niederschlags- summe	$\bar{\varnothing}$ Tagesmittel- temperatur	Niederschlags- summe	$\bar{\varnothing}$ Tagesmittel- temperatur
30 Tage vor bis Aussaat	96 mm	12.0 °C	55 mm	15.5 °C
Aussaat bis Auszählen: 2008: 37 Tage 2009: 33 Tage	118 mm	8.9 °C	63 mm	10.1 °C

4.1.3 Anlage Feldversuch

Der CTF-Feldversuch konnte in den seit 1998 in Tänikon bestehenden Bestellsystem-Vergleich integriert werden. Von der Parzelle liegen viele Daten hinsichtlich der Schlaghistorie vor. Bisher wurden in der randomisierten Blockanlage mit vier Wiederholungen die Varianten *Pflug*, *Mulchsaat* (Bearbeitungstiefe acht Zentimeter), *Direktsaat* und *Pflug biologisch bewirtschaftet (Pflug-Bio)* untersucht.

Die untersuchten Parzellen *Direktsaat* sind seit 1998 als Direktsaatparzellen etabliert, die Parzellen *CTF-Direktsaat* wurden von 1998 bis Frühjahr 2008 als Mulchsaatparzellen mit einer maximalen Bearbeitungstiefe von 8 cm bewirtschaftet und seit Herbst 2008 mittels *Direktsaat* bestellt. Die Verfahren *Direktsaat* und *CTF-Direktsaat* haben also eine leicht unterschiedliche Historie der Bodenentwicklung.

Der CTF-Feldversuch beinhaltet die Varianten *Pflug*, *Direktsaat* und *CTF-Direktsaat*. Die weiter bewirtschafteten *Pflug-Bio*-Parzellen wurden nicht in die Untersuchungen mit einbezogen (Abb. 16). Die Parzellen sind 12m breit, drei Blöcke sind 30m und ein Block 70m lang. Die gesamte Versuchsfläche ohne Grünstreifen hat eine Fläche von 0.8ha.

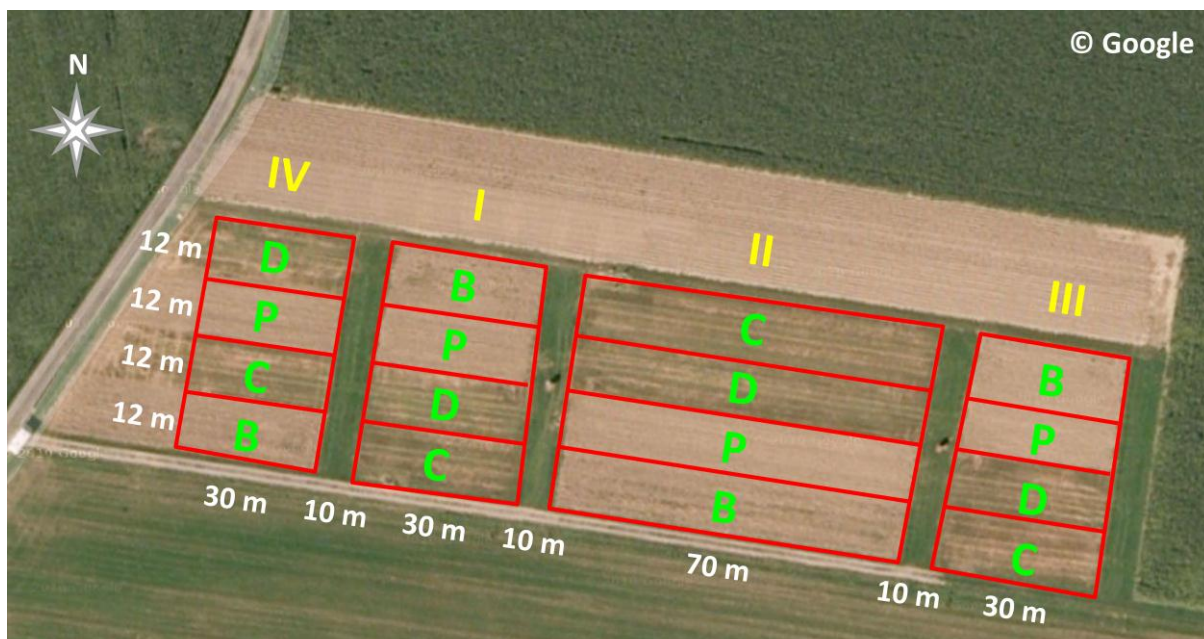


Abb. 16: Luftbild der Versuchsanlage mit den Blöcken IV, I, II, III und Versuchspartellen mit *Pflug* (P), *Direktsaat* (D) und *CTF-Direktsaat* (C). Die *Pflug-Bio*-Parzellen (B) der bisherigen Versuchsanstellung sind nicht mit einbezogen.

4.1.4 Fruchtfolge

Nach den im Sommer 2008 auf den CTF-Fahrspuren geernteten Erbsen wurden Winterweizen (Sorte Siala) (2008/09), Wintergerste (Sorte Fridericus) (2009/10) und Kunstwiese (UFA-Mischung 330) (2010/11) angebaut. Detailinformationen zum Saatgut sind im Anhang (9.1) aufgeführt, die gesamte Fruchtfolge ist in Tab. 6 abgebildet. Durch den Einbezug der Kunstwiese konnten neben den Auswirkungen der Befahrungen in Mähdruschkulturen auch die der Grünlanderntekette mit mehreren Schnitten und entsprechender Anzahl an Überfahrten untersucht werden.

Tab. 6: Fruchtfolge auf der Versuchsparzelle 2002-2011. Die Kulturen während des CTF-Feldversuches sind fett gedruckt.

Jahr	Kultur	Jahr	Kultur
2002	Winterweizen	2007	Winterweizen
2003	Wintergerste	2008	Sommererbsen
2004	Kunstwiese	2009	Winterweizen
2005	Kunstwiese	2010	Wintergerste
2006	Silomais	2011	Kunstwiese

4.1.5 Verfahrenstechnik

4.1.5.1 Auswahl CTF-Spursystem

Unter Berücksichtigung der Parzellenbreite und der Arbeitsbreiten vorhandener Maschinen wurde für den Versuch das CTF-Spursystem TwinTrac (Chamen 2007) gewählt. Der Mähdrescher fährt um eine halbe Arbeitsbreite versetzt auf zwei unterschiedlichen Traktorspuren. Aus der Spurbreite des Traktors (1.80 Meter) und des Mähdreschers (2.70 Meter) ergibt sich die Arbeitsbreite von 4.50 Meter (Abb. 17).

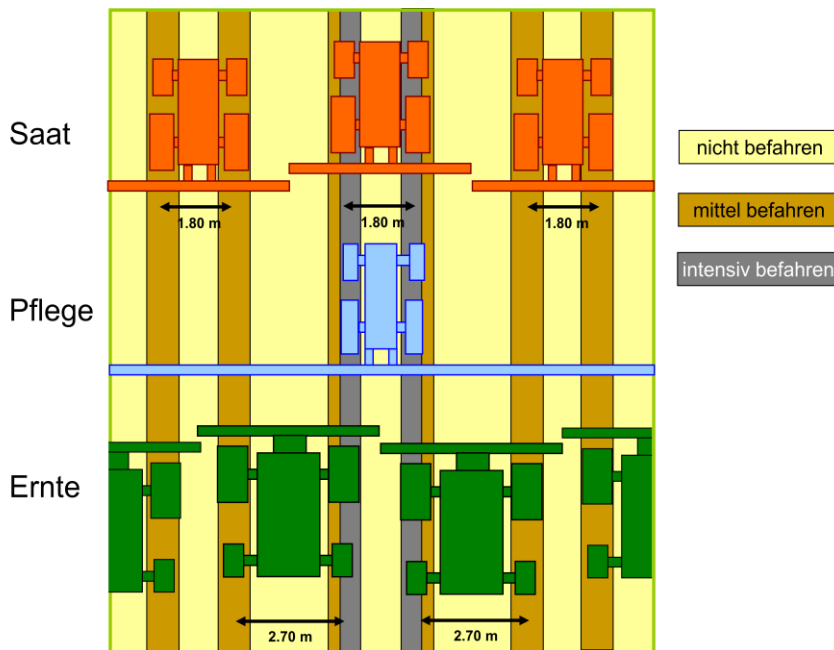


Abb. 17: CTF-Spursystem TwinTrac mit zwei Spurbreiten 1.80 / 2.70m, die zusammen 4.50m Grundarbeitsbreite ergeben.

Die Fläche wurde in Unterflächen eingeteilt. Neben den *nicht befahrenen* Bereichen sind die für Saat und Ernte benutzten Fahrspuren als *mittel befahren* und die Pflegefahrspuren, auf denen zusätzlich Pflanzenschutz und Düngung durchgeführt werden, als *intensiv befahren* definiert. Im Versuch liegt der Anteil *intensiv befahrener* Fläche bei etwa 9%, der *mittel befahrenen* bei 26% und der *nicht befahrenen* bei 65%.

4.1.5.2 Verwendete Maschinen

In der Variante *Pflug* wurden für Bodenbearbeitung und Saat ausser dem Pflug 3m breite Maschinen verwendet. Der Mähdrescher hatte eine Arbeitsbreite von 4.50m, der im Stroh eingesetzte Zetter 5.40m. In der Kunstwiese wurde eine Front-Heck-Mähkombination mit 3.85m und 1.85m genutzt. Das Schwaden von Stroh und Gras erfolgte mit einem Doppelschwader mit Seitenablage und 7.10m Arbeitsbreite und die Erntegutabfuhr mit einem Ladewagen beziehungsweise einer Rundballenpresse, die die Ballen ausserhalb der Versuchspartellen ablegte.

Für die Variante *Direktsaat* konnte keine Sätechnik mit üblichen 3m bzw. für die Variante *CTF-Direktsaat* mit der speziellen Arbeitsbreite 4.50m beschafft werden. Daher wurde eine vorhandene, selbstentwickelte Versuchssämaschine mit Gaspardo-Scheibensäaggregaten und 2m Arbeitsbreite mit einem zusätzlichen Schar und durch Anpassung der Scharabstände auf 2.25m Arbeitsbreite verbreitert. In der Variante *Direktsaat* war die Maschine gerade, in der Variante *CTF-Direktsaat* seitenversetzt angehängt. Bei Hin- und Rückfahrt auf derselben Spur kam man auf die zweifache Arbeitsbreite 4.50m (Abb. 18). Durch das Versuchsdesign mit 9m effektiver Versuchsbreite und 1.50m Randstreifen wird die Doppelbefahrung derselben Spur auf die intensiv befahrenen Pflegefahrspuren begrenzt. Die mittelbefahrenen Fahrspuren sind nicht betroffen und die Befahrungintensität der Parzelle entspricht der einer Maschine mit 4.50m Arbeitsbreite.

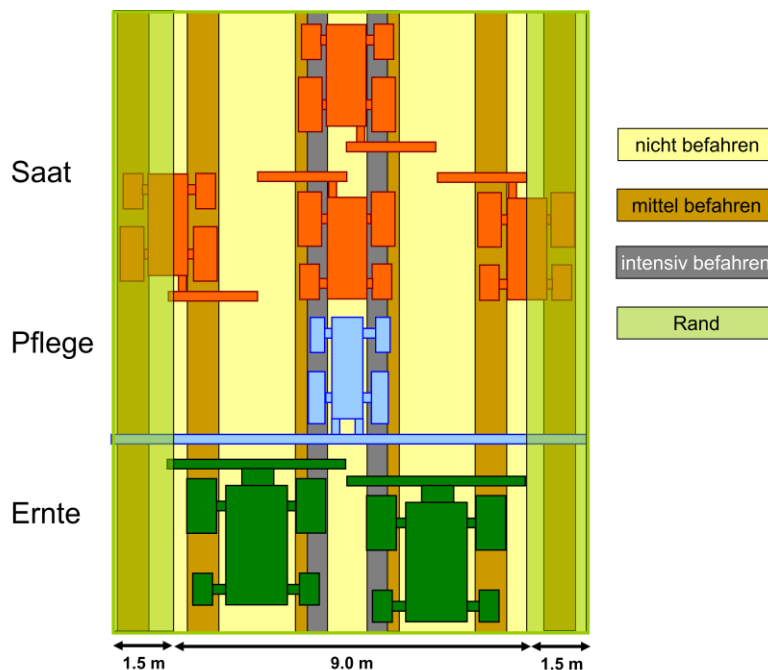


Abb. 18: Direktsämaschine in seitenversetzter Anhängung in CTF-Direktsaat. Durch das Versuchsdesign mit Randstreifen beschränkt sich die nötige Doppelbefahrung auf die intensiv befahrene Pflegefahrspure.

Details zu den verwendeten Maschinen sind im Anhang (9.1) aufgeführt, die Arbeitsabläufe während der Versuchsjahre in Tab. 7.

Tab. 7: Maschinenketten im Feldversuch.

Kultur	Variante		
	Pflug	Direktsaat	CTF-Direktsaat
Erbsen 2008	Mähdrescher 01.07.2008		
Weizen 2008/09	Pflug 29./30.09.2008	Mulchgerät 24./25.09.2008	
	Kreiselegge mit Sämaschine 01.10.2008	Direktsaat 01.10.2008	
	Mähdrescher mit Strohhäcksler 14.08.2009		
Gerste 2009/10	Pflug 19.09.2009	Direktsaat 25.09.2009	
	Kreiselegge mit Sämaschine 25.09.2009		
	Mähdrescher 13.07.2010		
	Zetter / Schwader / Rundballenpresse 14.07.2010		
Kunstwiese 2010/11	Grubber 20.07.2010	Direktsaat 26.08.2010	
	Scheibenegge 09.08.2010		
	Kreiselegge mit Sämaschine 25.08.2010		
	Mulchgerät 29.10.2010		
	Mähwerk 17.05./20.06./17.08./27.09.2011		
	Schwader 18.05./21.06./17.08./28.09.2011		
	Rundballenpresse bzw. Ladewagen 18.05./28.09. bzw. 21.06./17.08.2011		

4.1.5.3 Kontaktflächendruck

Um die Maschinengewichte nach guter fachlicher Praxis bodenschonend abzustützen, wurden alle Traktoren mit einem Reifeninnendruck von 80kPa und der Mähdrescher auf der Vorderachse mit 100kPa und auf der Hinterachse mit 120kPa gefahren. Hinsichtlich der Tragkraft sind diese Reifeninnendrucke bei voller Zuladung für den Feldeinsatz zulässig, für eine Strassenfahrt mit Höchstgeschwindigkeit sind sie gegebenenfalls zu erhöhen. Die mit der Software TASC (Version 2.0, Agroscope ART, Ettenhausen/Schweiz)

berechneten maximalen Radkontaktflächendrücke betragen etwa 75Pa für die bei Aussaat und Ernte eingesetzten Traktoren in der Leistungsklasse 65-110kW, etwa 100kPa für den 51kW-Pflegetraktor mit angebautem Düngerstreuer und Pflanzenschutzgerät, sowie knapp 140 kPa für den Mähdrescher. Der ausschliesslich auf den Pflegefahrgassen benutzte einachsige Ladewagen mit geringer Kapazität und max. 4.8t Gesamtgewicht musste mit einem Reifeninnendruck von 180kPa gefahren werden und erreichte den maximalen Kontaktflächendruck von 190kPa.

Das Risiko einer Bodenverdichtung besteht bereits unter den in der Berechnung vorgegebenen trockenen Bedingungen für Düngerstreuer, Mähdrescher und Ladewagen. In Situationen geringerer Bodentragfähigkeit steigt die Verdichtungsgefahr entsprechend. Eine detaillierte Übersicht der verwendeten Bereifungen, Reifeninnendrucke und Kontaktflächendrücke findet sich in Tab. 8.

Tab. 8: Maschinengewichte, Kontaktflächendrücke und eventuelle Verdichtungsgefahr bis in x cm Bodentiefe.

Maschine	Gesamtgewicht kg	Achse/ Achslast kg		Reifen- grösse	Reifen- innen- druck kPa	Kontakt- flächen- druck kPa	Verdich- tungs- gefahr bis x cm Tiefe
		vorn	hinten				
Same Dorado 75 mit Frontgewicht & Pflanzen- schutzgerät mit 400l Wasser	4640	vorn	1010	360/70R20	80	59	-
		hinten	3630	420/70R30	80	100	-
Same Dorado 75 mit Frontgewicht & Düngerstreuer mit 650kg Dünger	4990	vorn	850	360/70R20	80	52	-
		hinten	4140	420/70R30	80	106	4
Hürlimann H488DT	4080	vorn	1860	380/85R24	80	76	-
		hinten	2220	420/85R34	80	72	-
Fendt Vario 411	5440	vorn	2140	420/70R24	80	76	-
		hinten	3300	520/70R38	80	72	-
John Deere 6920S	7170	vorn	2850	540/65R28	80	76	-
		hinten	4320	650/65R38	80	71	-
John Deere 2254 Hillmaster Mäh- drescher mit vol- lem Korntank	18810	vorn	14850	800/65R32	100	138	28
		hinten	3960	540/65R24	120	95	-
Krone Rundbal- lenpresse	3230	-	2230	500/55-20	100	98	-
Agrar Ladewagen	4800	-	3800	11.5/80-15	180	190	20

4.1.5.4 Befahrungsmuster

Abb. 19 stellt die Befahrung im Getreidebau in den verschiedenen Varianten dar. In der randomisierten Versuchsfläche konnte an den Parzellenrändern nicht immer überlappungsfrei gefahren werden. Aus diesem Grund wurden in allen Einzelparzellen die Randstreifen von 1.50 Meter Breite nicht für Erhebungen genutzt. Der Spurflächenanteil beträgt bei *Pflug* 100%, bei *Direktsaat* ~75% und bei CTF ~35%.

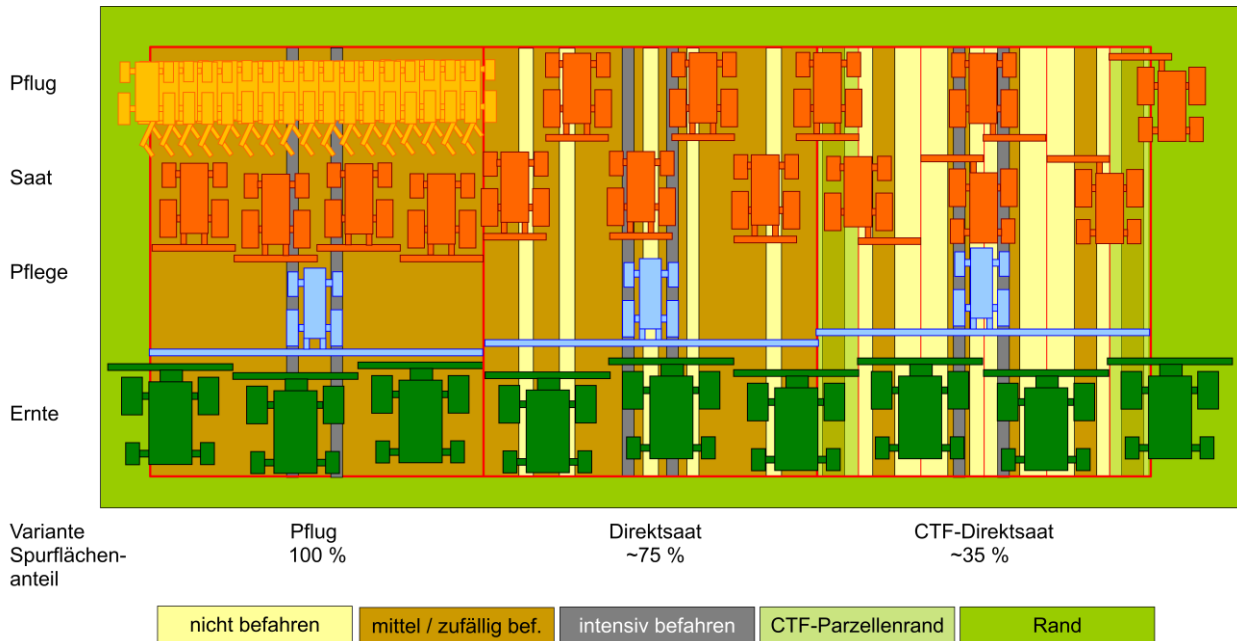


Abb. 19: Die Abbildung zeigt die Befahrungsmuster im Getreidebau. Der Spurflächenanteil beträgt bei *Pflug* 100%, bei *Direktsaat* ~75% und bei CTF ~35%.

4.1.5.5 Parallelfahren

In der klein parzellierten randomisierten Blockanlage wurde auf eine Navigation mit unter CTF üblichen GNSS-Lenksystemen verzichtet. Die Parzellen waren zu kurz und die Grünstreifen zwischen den Blöcken zu schmal, als dass vom Parzellenbeginn an ein präzises Geradeausfahren möglich gewesen wäre. Alternativ wurden mit Stöcken Leitlinien ausgesteckt und auf Sicht gefahren.

4.1.5.6 Pflegemassnahmen

In allen Varianten wurden die betriebsüblichen Pflanzenschutz- und Düngungsmassnahmen von den Pflegefahrgassen aus durchgeführt. Die Düngung wurde auf Basis der N_{\min} -Beprobung kalkuliert (9.3). Es wurde ausschliesslich Kunstdünger verwendet. Schlagkarten mit einer Dokumentation der durchgeführten Feldarbeiten finden sich im Anhang (9.4).

4.1.6 Untersuchungsparameter

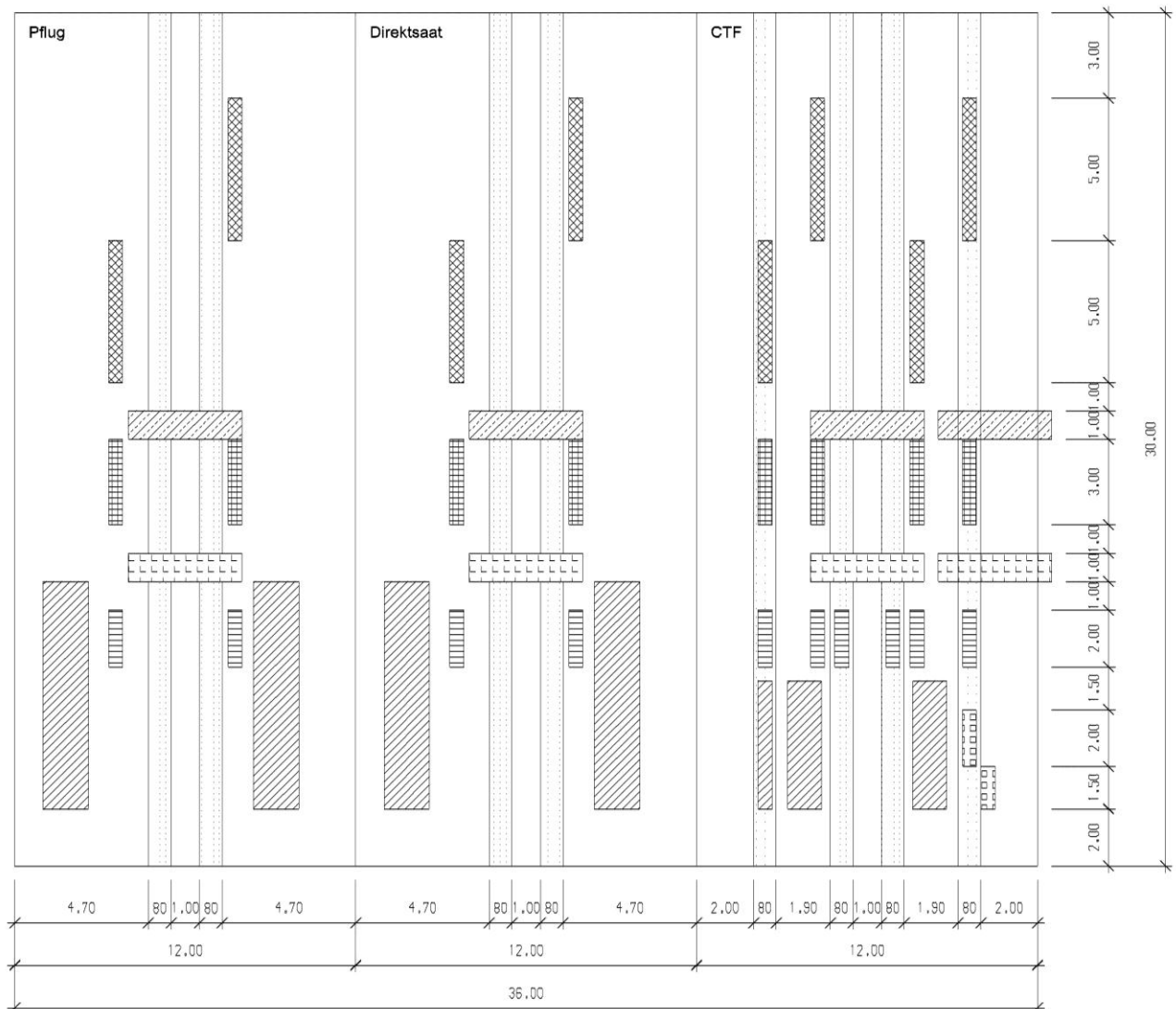
Zur Beobachtung der Boden- und Pflanzenentwicklung wurden verschiedene Parameter untersucht. Wann immer möglich, wurde dies auf allen vier Blöcken durchgeführt. Zum Teil konnten allerdings bedingt durch den Steingehalt der Versuchsfläche sowie aufgrund eingeschränkter Verfügbarkeit von Messtechnik nicht alle Varianten und Blöcke in alle Untersuchungen einbezogen werden.

Da bei den meisten Untersuchungsparametern keine ganzflächige Erhebung möglich war, wurden für jeden Parameter Erhebungszonen eingerichtet. Für eine klare Unterscheidung der unterschiedlich befahrenen Zonen wurden neben *CTF* auch die Varianten *Pflug* und *Direktsaat* in Befahrungszonen eingeteilt. *Intensiv befahren* entspricht den Pflegefahrspuren für Pflanzenschutz und Düngung und *zufällig befahren* der restlichen Fläche (Tab. 9).

Tab. 9: Übersicht über die Versuchsvarianten. *CTF nicht befahren* wird nie, *CTF mittel befahren* 2-3 mal pro Jahr bei der Aussaat und Ernte befahren. Pflegefahrspuren für Pflanzenschutz und Düngung werden als *intensiv befahren* bezeichnet. *Zufällig befahren* umfasst alle anderen Flächen in den Varianten *Direktsaat* und *Pflug*.

Anbausystem	Befahrungsintensität		
	nicht befahren	mittel befahren / zufällig befahren	intensiv befahren
CTF-Direktsaat	CTF nicht befahren	CTF mittel befahren	CTF intensiv befahren
Direktsaat	-	Direktsaat zufällig befahren	Direktsaat intensiv befahren
Pflug	-	Pflug zufällig befahren	Pflug intensiv befahren

Abb. 20 zeigt die verschiedenen Befahrungszonen und Erhebungszonen exemplarisch in Block III. In den anderen Blöcken war die Anordnung mit wenigen Ausnahmen identisch.



Legende:

bei CTF nicht befahren bei Pflug/Direktsaat zufällig befahren	Feldzugang/ Exakternte 5.0 x 0.5 m	Penetrometrie 4.0 x 1.0 m
intensiv befahren	Deformation 4.0 x 1.0 m	Porometrie 2.0 x 0.5 m
mittel befahren	Zwischenernte 3.0 x 0.5 m	Bodenbiologie
		Luft, Saugspannung, Bodenfeuchte 2.0 x 0.5 m

Abb. 20: Befahrungs- und Erhebungszonen in Block III. In den anderen Blöcken war die Anordnung mit wenigen Ausnahmen identisch. Abbildung massstäblich, Einheiten in Meter.

4.1.6.1 Bodendeformation

Zur Erhebung der durch die Feldebefahrung verursachten Bodendeformation wurde von einem Ingenieurbüro jeweils vor der Aussaat 2008-2010 und nach der letzten Kunstwiesenernte 2011 die absolute Höhe der Bodenoberfläche mit einem Tachymeter (TCRP 1202 R300, Leica-Geosystems, Heerbrugg/Schweiz) mit einer Messgenauigkeit von +/- 1.5mm bestimmt. Um das Feld herum wurde ein Fixpunktnetz mit 5 Punkten installiert. Innerhalb der Varianten wurden quer zu Spuren Messzonen definiert und mit einem 4m langen und 1m breiten Messrahmen markiert (Abb. 20). Während vier Jahren wurde je Variante und Block in 3 Repetitionen 60 (*Pflug* und *Direktsaat*) und 92 (*CTF*) Punkte gemessen. Die Deformation über die Jahre wurde auf Basis der Werte von 2008 berechnet.

4.1.6.2 Penetrometrie

In der Bodenbeobachtung und –beurteilung wird auch der Bodeneindringwiderstand als Parameter verwendet (Hemmat & Adamchuk 2008). Als offizielle Erhebungsmethode der Schweizer Bodenschutzfachstellen finden Penetrometer des Typs Panda Verwendung, mit denen nach vorgeschriebener Methodik beprobt wird (Buchter & Häusler 2009).

Im Feldversuch wurde der Bodeneindringwiderstand jeweils im Herbst 2008 bis 2011 nach der Ansaat bzw. nach der letzten Ernte mit einem Panda-Handpenetrometer (Typ Panda-1, Hersteller Sol Solution, Riom, France) untersucht. Ein 3.80m breiter Messrahmen wurde quer zu den intensiv befahrenen Pflegefahrspuren und in *CTF* zusätzlich quer zur mittel befahrenen Spur gelegt (Abb. 20). Pro Block, Variante und Befahrungszone wurden je 6, insgesamt 168 Einstiche vorgenommen.

Nach Rücksprache mit der Schweizer Nationalen Bodenbeobachtung wäre der üblicherweise in ungestörten Böden verwendete 2cm^2 -Konus für Messungen in den stark gelockerten Böden der *Pflug*-Varianten zu klein gewesen. In den direkt gesäten Varianten hätte die Schafreibung zudem zu unerwünschten Nebeneffekten geführt. Deshalb wurde ein Eindringkonus mit 4cm^2 Fläche verwendet. Die hier beschriebenen Eindringwiderstände sind damit methodenbedingt höher als die üblicherweise in der Literatur gefundenen Daten.

Der Bodeneindringwiderstand ist von der Bodenfeuchte abhängig und zwischen den Jahren kommt es zu relativ grossen Streuungen. Eine mit einer Zeitreihenreferenzierung der Schweizer Nationalen Bodenbeobachtung (Schwab 2010) auf Basis einer Referenztiefe durchgeführte Wertetransformation führte mit der im Versuch verfügbaren Referenztiefe von 30-35cm anstatt 50-55cm nicht zu einer grundlegenden Verbesserung der Datenqualität. Daher wurden in der Auswertung die Originalwerte verwendet und nur die Daten innerhalb eines Jahres und nicht zwischen den Jahren statistisch ausgewertet.

4.1.6.3 Porometrie

Zur Untersuchung der Porometrie des Bodens wurden mit Stechzylindern jeweils im April/Mai 2009/10/11 in allen Varianten ausser *Pflug intensiv befahren* und *Direktsaat intensiv befahren* Bodenproben gezogen.

Die Stechzylinder haben bei einem Durchmesser von zehn Zentimetern und einer Höhe von sechs Zentimetern ein Volumen von 471 cm^3 . Es wurden in zwei Repetitionen in der Tiefe 10-16 cm je vier Proben pro Repetition genommen (Abb. 20). Aufgrund des hohen Steingehaltes konnten nur die Blöcke II und III untersucht werden.

Die Untersuchung erfolgte nach den Schweizerischen Referenzmethoden der Eidgenössischen Landwirtschaftlichen Forschungsanstalten (FAL et al. 1998).

Diese Untersuchungen sind die Fortsetzung der langjährigen Erhebungen in den Vorgängerversuchen zu Pflug- und Direktsaatverfahren von 2000 bis 2008. Grobporenvolumen und Luftpermeabilität im Zeitverlauf sind in Abb. 21 dargestellt.

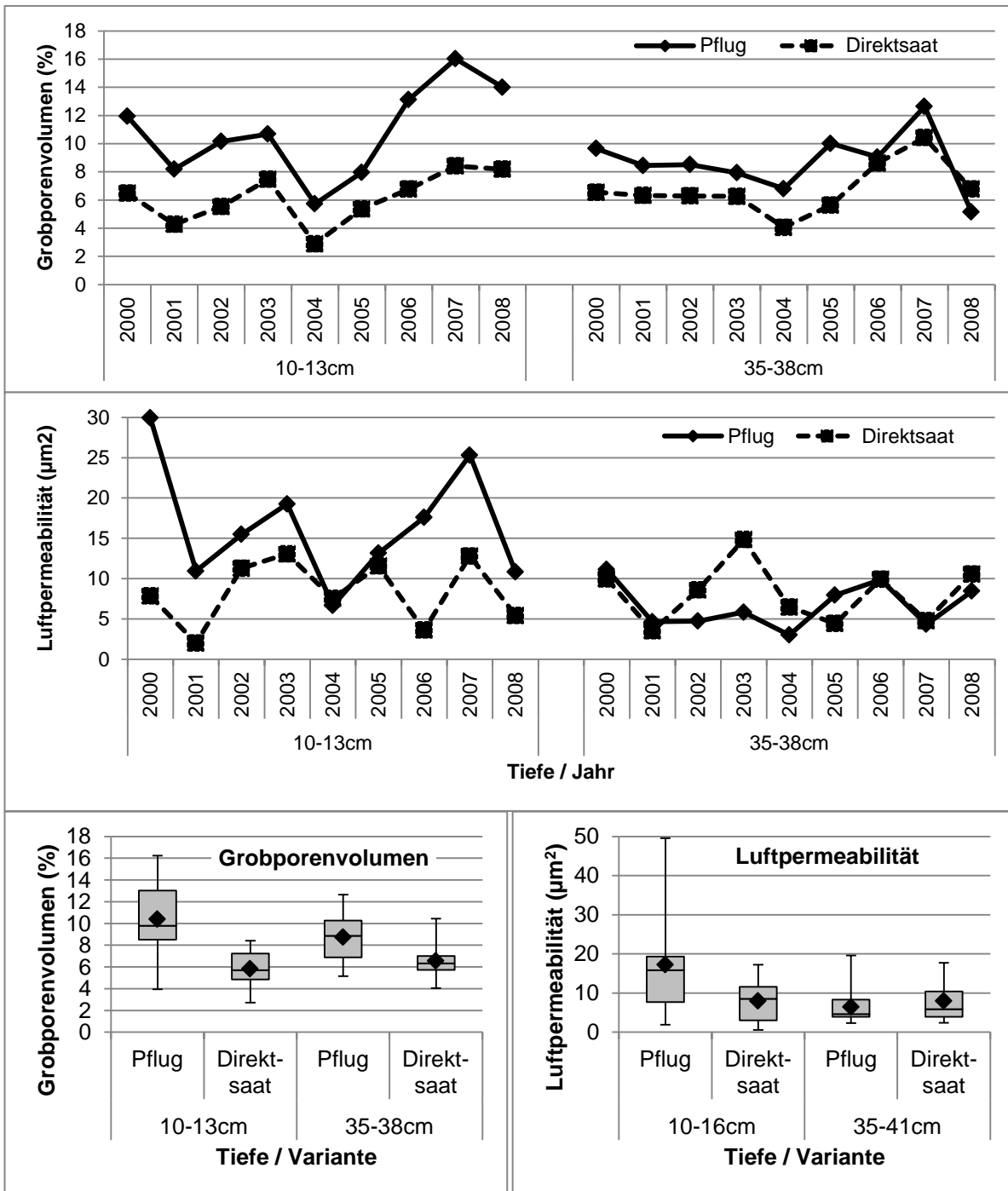


Abb. 21: Grobporenvolumen und Luftpermeabilität der Versuchsfläche im Zeitverlauf 2000-2008 und als Boxplot mit zusätzlich als Punkten eingezeichneten Mittelwerten. (Quelle: Weisskopf, Agroscope ART, 2011)

4.1.6.4 Saugspannung

In den Varianten *CTF nicht befahren* und *CTF mittel befahren* wurde mit wartungsfrei arbeitenden pF-Meter-Sensoren (ecoTech, Bonn/Deutschland) Saugspannung und Bodentemperatur (Messbereich pF 0-7 / -40 bis 80°C) gemessen. Die neu entwickelten und seit etwa 2009 am Markt verfügbaren Sensoren ersetzen bisher genutzte Tensiometer (Anken 2003). Die Sensoren mit je drei Repetitionen in den Tiefen 10/35cm wurden an Datenloggern (CR800/1000, Campbell Scientific, Logan/USA) mit einer halbstündlichen Messfrequenz betrieben. Im Erntejahr 2009/10 waren Block I und II, im Erntejahr 2010/11 zusätzlich Block III bestückt. Die Platzierung innerhalb der Parzellen ist in Abb. 20 dargestellt.

4.1.6.5 Volumetrischer Bodenwassergehalt

In den Varianten *CTF nicht befahren* und *CTF mittel befahren* wurde die Bestimmung des volumetrischen Wassergehalts mit EnviroSCAN-Sensoren (Hersteller Sentek, Stepney/Australien) berührungslos gemessen. Positive Erfahrungen mit der auf Frequency Domain Reflection (FDR) basierenden Messtechnik lagen hausintern vor und die Sensoren wurden den bisher verwendeten, auf Time Domain Reflection (TDR) basierenden, vorgezogen. Die in Kunststoffrohren geführten Sonden hatten Sensoren in den Tiefen 10/20/40cm. Die Abstände in 10cm-Schritten sind konstruktiv vorgegeben, daher konnte nicht die Tiefe 35cm wie bei der Saugspannungs- und Bodenluftmessung eingestellt werden. Die Sonden wurden an Datenloggern (CR800/1000, Campbell Scientific, Logan/USA) mit einer halbstündlichen Messfrequenz betrieben. Im Erntejahr 2009/10 waren Block I je Variante mit einer und Block II mit je zwei Repetitionen ausgestattet, ab Erntejahr 2010/11 die Blöcke I, II und III mit je zwei Repetitionen (Abb. 20).

4.1.6.6 Bodenluft

Um die Einflüsse von Bodenstruktur und Lufthaushalt besser differenzieren zu können, wurde der Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalt in der Bodenluft untersucht. Langjährige methodische und praktische Erfahrungen lagen hausintern vor (Boller 2006; Felder 2003; Piechotka 1999). In den Varianten *CTF nicht befahren* und *CTF mittel befahren* wurden in den Tiefen 10; 20; 35cm in 4 Repetitionen horizontal quer zur Fahrtrichtung 40cm lange semipermeable Polypropylenschläuche (Accurel PP V8/2 HF, Membrana GmbH, Wuppertal, Deutschland) installiert (Lokalisierung siehe Abb. 20). Mit dem mobilen Gasanalysegerät CheckMate 9900 (PBI Dan-sensor A/S, Ringsted, Dänemark) wurden wöchentlich die Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalte der Bodenluft gemessen. Im Erntejahr 2009/10 waren die Blöcke I und II, im Erntejahr 2010/11 zusätzlich Block III ausgestattet.

4.1.6.7 Bodenbiologische Aktivität

Zur Bestimmung bodenbiologischer Aktivität wurde in allen Varianten ausser *Pflug intensiv befahren* und *Direktsaat intensiv befahren* jeweils im Frühjahr 2009 bis 2011 vor der ersten Düngung in den Tiefen 0-10 und 10-20cm Bodenproben gezogen.

Es wurden die bodenmikrobiologischen Parameter mikrobielle Biomasse und Basalatmung untersucht. Die mikrobielle Biomasse beschreibt den Belebtheits- und Aktivitätszustand des Bodens und ist eine wichtige Kenngrösse, da diese Organismen sowohl für den Ab- und Umbau von organischem Material des betreffenden Bodens ausschlaggebend sind, als auch einen Vorrat schnell umsetzbarer Nährstoffe darstellen. Die Basalatmung ist ein Mass für die aerobe Atmungsaktivität aller Bodenorganismen, die beim Abbau von organischer Substanz CO₂ produzieren (Oberholzer & Scheid 2007). Die Parameter wurden gemäss den Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten untersucht (FAL et al. 1998). Für die Bestimmung der mikrobiellen Biomasse wurden die beiden Methoden Substratinduzierte Respiration sowie Chloroform-Fumigations-Extraktionsmethode angewendet. Mit Hilfe der Chloroform-Fumigations-Extraktionsmethode kann sowohl der mikrobielle Kohlenstoff- als auch der mikrobielle Stickstoffgehalt bestimmt werden.

4.1.6.8 Feldaufgang

Der Feldaufgang als erster Pflanzenentwicklungsparameter wurde bei Winterweizen (2009) und Wintergerste (2010) etwa 5 Wochen nach der Aussaat bestimmt. Pro Parzelle wurden zwei Messzonen von 50cm Breite und 5m Länge definiert. In *CTF* und *Direktsaat* entspricht dies 3 Saatreihen, im *Pflug* 4 Saatreihen. In diesen wurden insgesamt fünf je 1m lange Streifen ausgezählt. Die Erhebungsfläche pro Parzelle betrug 1m² (Abb. 20).

4.1.6.9 Zwischenernte

Für die Zwischenernte Mitte April 2009 und 2010 wurden in Verlängerung der Feldaufgangsmesszonen 50cm breite und 3m lange Bereiche bestimmt (Abb. 20). Die Pflanzen wurden in fünf je 60cm langen Streifen 2cm über dem Boden abgeschnitten. Die Erhebungsfläche pro Parzelle betrug 0.6m². Die Trockenmasse wurde nach Ofentrocknung (24h bei 105°C) bestimmt.

4.1.6.10 Vegetationsindex

Die Bestandesentwicklung zwischen Zwischenernte und Ernte wurde über den Vegetationsindex NDVI (Normalized Differential Vegetation Index) verfolgt. Im Feldversuch wurde ein Greenseeker-Handgerät (GS RT100, NTech Industries, Ukiah/USA) verwendet.

Bezüglich der NDVI-Interpretation ist zu beachten, dass bedingt durch das Messprinzip die Unterschiede beim NDVI im Vergleich zu Biomasseerhebungen mit Bestimmung der Trockensubstanz weniger ausgeprägt sind bzw. können bei allgemein guter Stickstoffversorgung und viel Biomasse auch nur noch sehr schwach ausgeprägt direkt zu sehen sein. Mit dem Einsatz statistischer Verfahren lässt sich dies jedoch kompensieren. (Shaver et al. 2007).

4.1.6.11 Ernte

Die Feldaufgangsmesszonen wurden auch für die Ernteerhebung genutzt (Abb. 20). Aufgrund starken Hagels am 26.05.2009 wurde der Winterweizen derart geschädigt, dass keine Erhebung durchgeführt werden konnte. Bei Wintergerste (2010) und Kunstwiese (2011) wurde die Exakternte immer einige Tage vor der regulären Ernte der ganzen Fläche durchgeführt. Das Getreide wurde mit einer elektrischen Heckenschere (HSE 81, Stihl, Dieburg, Deutschland) geschnitten, das Gras mit einem leichten Balkenmäher mit 50cm Arbeitsbreite (Modell 515, Ferrari, Abbiategrosso, Italien). Neben der Biomasse wurden bei Wintergerste zusätzlich Ährenanzahl, Kornertrag, und Tausendkorngewicht (TKG) bestimmt. Die Ähren wurden einzeln vom Halm geschnitten und gezählt. Anschließend wurden sie in einer stationären Druschmaschine (Saatmeister Allesdrescher K35 mit Präzisionswindsichter Typ 3, Kurt Pelz Maschinenbau, Bad Godesberg, DE) gedroschen und einem Kleinsaatgutbereiter und Laborsichter (Mini Pettkus, Röber, Minden/DE) aufbereitet. Das TKG wurde mit einem Körnerzählgerät (Contador, Pfeuffer, Kitzingen/DE) bestimmt und auf 15 % Kornfeuchte umgerechnet.

4.1.6.12 Spatenprobe und Blaufärbung

Zur qualitativen Beurteilung des Bodenzustandes wurden am 17.06.2010 stichprobenweisen in Block II Spatenproben der Varianten *CTF nicht befahren*, *CTF mittel befahren*, *CTF intensiv befahren* und *Direktsaat zufällig befahren* erhoben. Es wurde nach Agroscope-Methodik vorgegangen (Nievergelt et al. 2002). Am 29.09.2011 wurde im selben Bereich auf den CTF-Varianten auf 6m² eine Blaufärbung mit 210 Litern 0.3%iger Vitasynblaulösung (Clariant, Frankfurt/Main, Deutschland) durchgeführt und ein Bodenprofil erstellt.

4.1.7 Datenauswertung und statistische Verfahren

Zur Datenaufbereitung und –visualisierung wurde Excel 2007 (Microsoft, Redmond, USA) verwendet. Die weiteren Abbildungen wurden in Powerpoint 2007 (Microsoft, Redmond, USA) erstellt. Für statistische Analysen wurde TIBCO Spotfire S+® 8.1 for Windows (TIBCO Software Inc., Palo Alto, USA) mit den Funktionen Fixed Effects Anova und Linear Regression genutzt. Für die Anova wurden die erhobenen Daten pro Variante und Block

gemittelt und dann nach dem Randomized Block Design varianzanalytisch ausgewertet. Bei signifikanten Unterschieden von $\alpha < 0.05$ wurden die Verfahren mit dem multiplen Test von Tukey auf signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten analysiert (Anken et al. 2002). Die Gleichungen der Regressionsberechnungen sind in den entsprechenden Kapiteln beschrieben.

4.2 Ergebnisse

4.2.1 Bodendeformation

Die Werte für *Pflug* sind nicht abgebildet, da ein Grossteil der Deformation, die mittels Tachymeter erhoben wurde, auf den Lockerungseffekt des Bodenbearbeitungssystems zurückzuführen ist.

Die befahrungsbedingte Bodendeformation bewegte sich in allen Varianten auf einem niedrigen Niveau von max 1.2cm. Es wurde keine Fahrspurbildung beobachtet. *CTF nicht befahren* unterschied sich nicht von *Direktsaat zufällig befahren* und *Direktsaat intensiv befahren*. *CTF mittel befahren* und *CTF intensiv befahren* zeigten eine grössere, oft statistisch signifikante Deformation. 2009 und 2010 zeigte *CTF mittel befahren* die grösste Deformation. Nach der Kunstwiese 2011 unterschied sich *CTF mittel befahren* nicht mehr signifikant von *CTF nicht befahren* sowie *Direktsaat zufällig befahren* und *Direktsaat intensiv befahren*. *CTF intensiv befahren* verblieb auf tiefen Werten (Abb. 22).

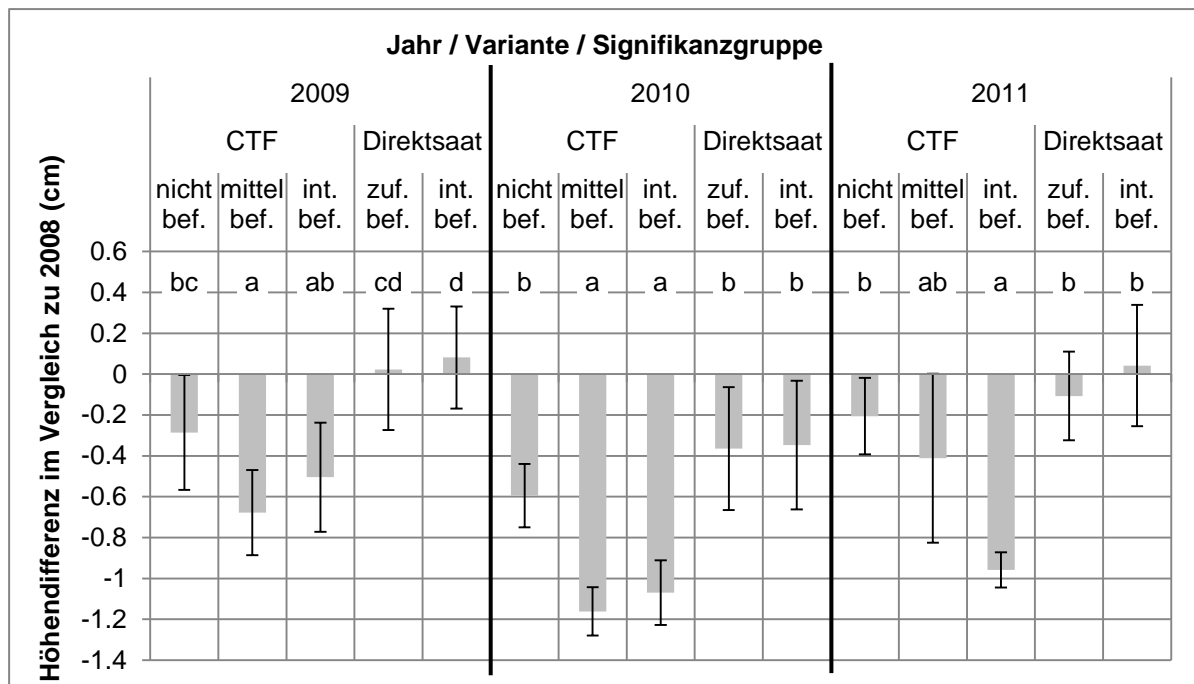


Abb. 22: Deformation der Bodenoberfläche 2009-2011 ausgedrückt als Abweichung von den 2008 (0cm) gemessenen Werten bei *CTF* und *Direktsaat*. Die bis 2007 flach bearbeiteten *CTF*-Flächen reagieren stärker auf Befahrung als langjährige *Direktsaat*-flächen. Die Buchstaben a-d charakterisieren die statistisch unterscheidbaren Gruppen.

4.2.2 Penetrometrie

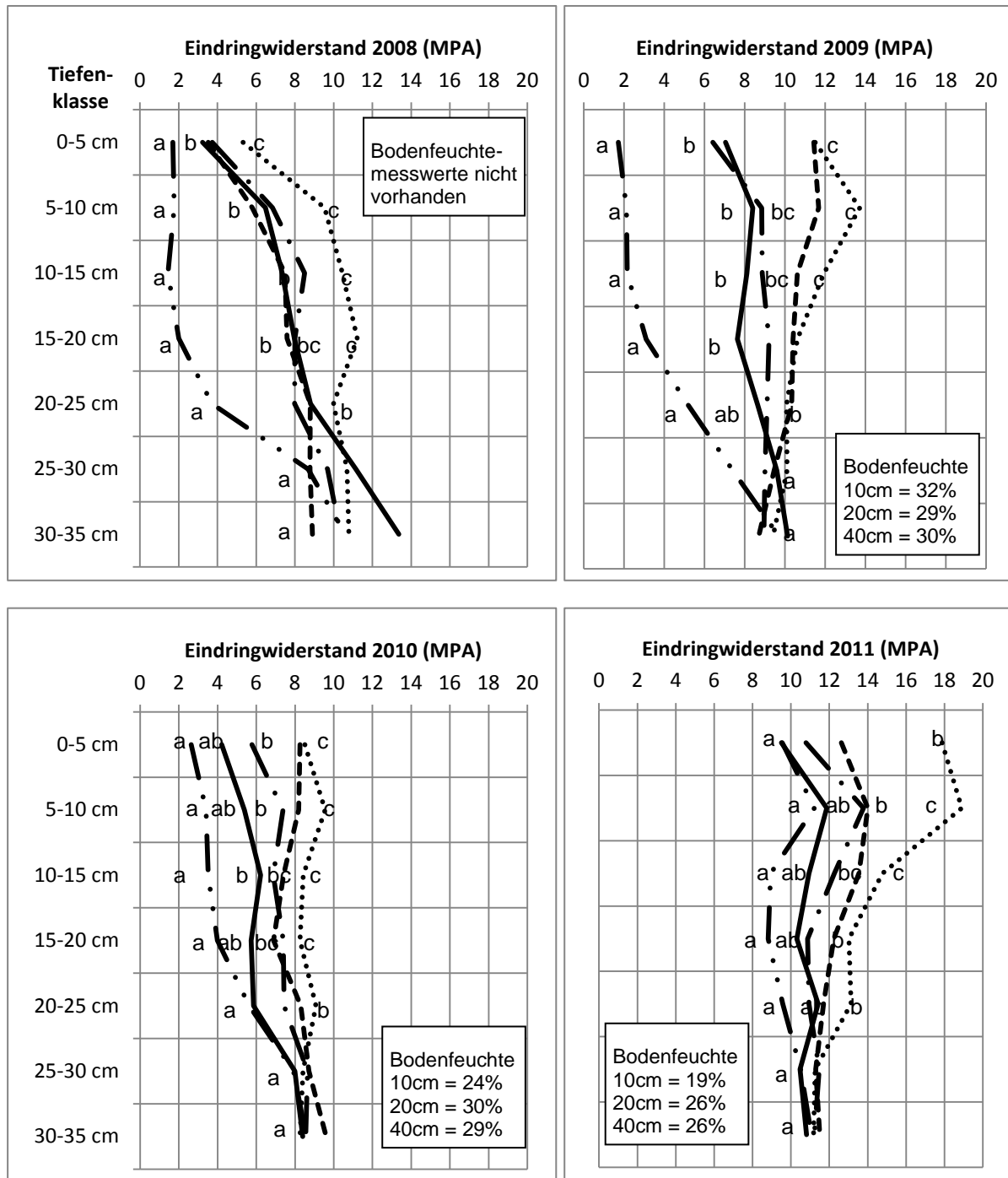
Die im Jahr 2011 durchgehend sehr hohen Eindringwiderstände in den oberen Tiefenklassen lassen sich primär durch den niedrigen volumetrischen Wassergehalt erklären. In 10cm lag er 5-13% niedriger als in den Vorjahren. Abb. 23 zeigt die Penetrometriewerte für die Varianten *CTF nicht*, *mittel* und *intensiv befahren* sowie *Direktsaat zufällig befahren* und *Pflug zufällig befahren*. Zur besseren Einordnung sind die für 2009 bis 2011 aus den Varianten *CTF nicht befahren* und *CTF mittel befahren* für die Tiefen 10, 20 und 40cm vorliegenden volumetrischen Wassergehalte angegeben.

Wie erwartet zeigt *Pflug zufällig befahren* in den Messungen nach der Aussaat 2008 bis 2010 die niedrigsten Eindringwiderstände. Nach 4 Kunstwiesenernten 2011 war der Lockerungseffekt des Pflugs bis zu einer Tiefe von 10cm zum grossen Teil nicht mehr nachweisbar.

2008 lagen *CTF nicht befahren* und *CTF mittel befahren* sowie *Direktsaat zufällig befahren* in derselben Signifikanzgruppe – obwohl für die Ernte 2008 bereits die CTF-Spuren benutzt worden waren. 2009 bis 2011 zeigen eine klare Differenzierung. Nach *Pflug zufällig befahren* hat *CTF nicht befahren* den geringsten Eindringwiderstand. Es folgen *Direktsaat zufällig befahren* und *CTF mittel befahren*. *CTF intensiv befahren* hat mit Abstand den grössten Eindringwiderstand.

Der Einfluss der Befahrungsintensität wirkte sich in den Jahren 2009-2011 bei *CTF* systematisch auf den Eindringwiderstand aus, wobei sich vor allem *intensiv befahren* und *nicht befahren* signifikant unterschieden.

Ab einer Tiefe von 15-20cm unterscheiden sich die *CTF-Varianten* und *Direktsaat zufällig befahren*, ab 25-30cm auch *Pflug zufällig befahren*, nicht mehr signifikant voneinander.



Legende

___ CTF nicht befahren / __ CTF mittel befahren / ... CTF intensiv befahren
 _ . _ Direktsaat zufällig befahren / _ . . . Pflug zufällig befahren

Abb. 23: Penetrometriewerte der Jahre 2008 bis 2011. Statistische Vergleiche innerhalb der einzelnen Jahre und Tiefenklassen.

4.2.3 Porometrie

Da nur zwei Blöcke beprobt worden waren und damit zu wenig Wiederholungen für eine Varianzanalyse zur Verfügung standen, wurden in Abb. 24 alle Mittelwerte mit +/- 1 Standardabweichung dargestellt.

Das **Grobporenvolumen** ist in *Pflug zufällig befahren* 2009 und 2010 etwa doppelt so hoch wie bei den *CTF-Varianten* und *Direktsaat zufällig befahren*.

2011 liegen alle Varianten mit Ausnahme der tieferen Werte unter *CTF intensiv befahren* auf demselben Niveau. Insgesamt sank in allen Varianten die Variation der Grobporenvolumina von 2009 bis 2011 und es ist eine generelle Tendenz zu sinkenden Werten sichtbar.

Das **Gesamtporenvolumen** in *Pflug zufällig befahren* ist 2009 und 2010 leicht höher als in den anderen Varianten. 2011 liegen alle Varianten nahe beieinander.

Die **Lagerungsdichte** ist in *Pflug zufällig befahren* am geringsten. In der Tendenz haben *CTF nicht befahren* und *CTF mittel befahren* leicht niedrigere Mittelwerte als *CTF intensiv befahren* und *Direktsaat zufällig befahren*. Die Standardabweichung ist aber hoch.

Die **Luftpermeabilität** variiert stark zwischen den Varianten und wurde mit einer logarithmischen Skala dargestellt. 2009 und 2010 hatte *Pflug zufällig befahren* die höchste Luftpermeabilität. *Direktsaat zufällig befahren* und die *CTF-Varianten* lagen 2009 einheitlich auf einem niedrigeren Niveau. 2010 differenzieren sich diese Werte, es gibt eine Abnahme der Permeabilität von *CTF nicht befahren* zu *CTF mittel befahren* zu *CTF intensiv befahren*. *Direktsaat zufällig befahren* liegt auf einem ähnlichen Niveau wie *CTF nicht befahren*, streut aber stärker. 2011 liegt *Pflug zufällig befahren* auf einem ähnlichen Niveau wie *CTF nicht befahren*. *CTF intensiv befahren* hat den niedrigsten Wert.

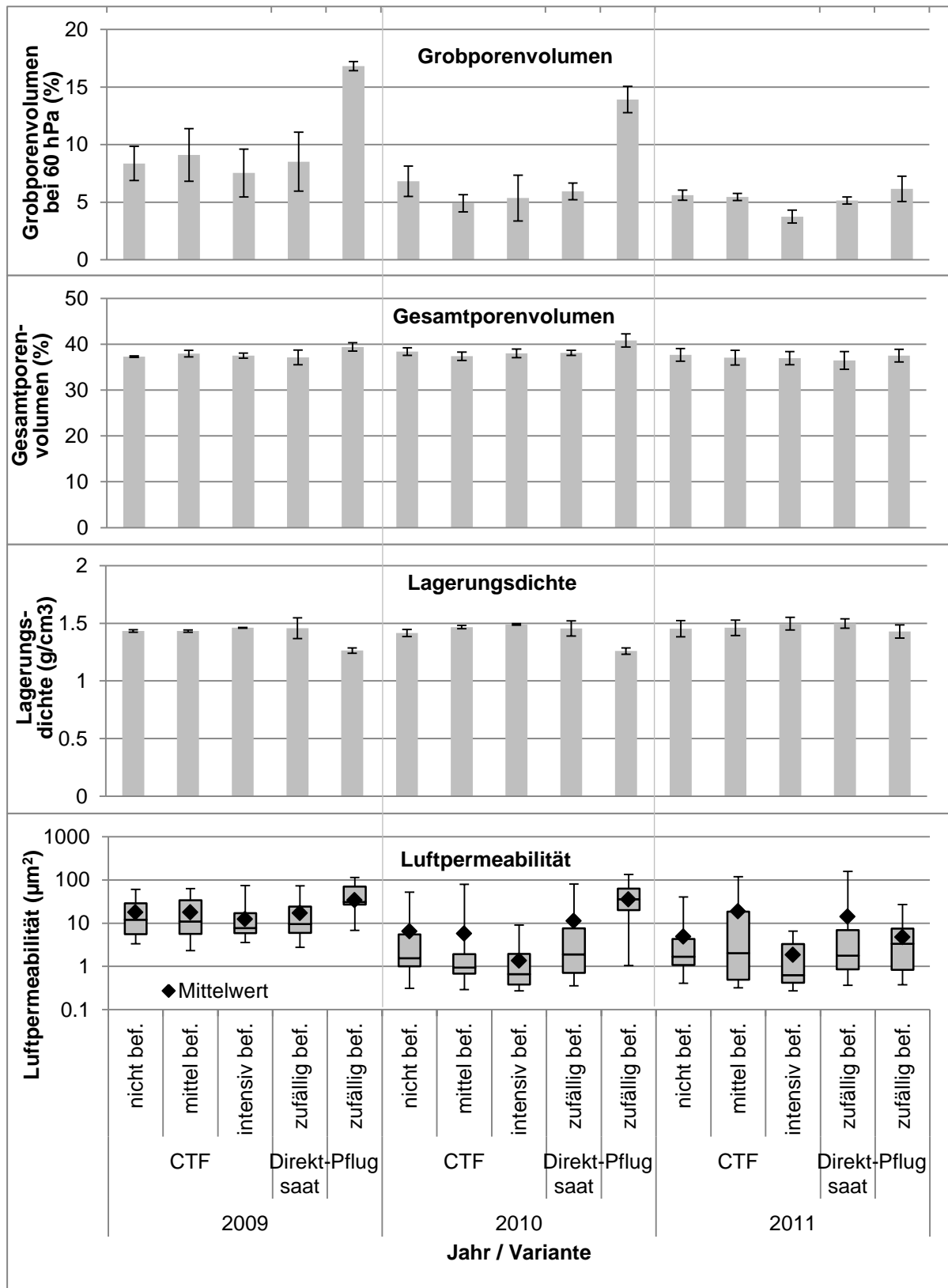


Abb. 24: Porositätsparameter im Oberboden (10-16cm) als Mittelwerte +/- 1 Standardabweichung bzw. als logarithmisch skaliertes Boxplot mit zusätzlichen Mittelwerten.

Für die beiden Parameter Grobporenvolumen und Luftpermeabilität wurden Regressionsmodelle erstellt (Tab. 11). Das Grobporenvolumen lässt sich auf Basis der Lagerungsdichte und Luftpermeabilität zu 77% erklären, die Luftpermeabilität zu 64%.

Tab. 11: Regressionsmodelle für Porositätsparameter.

Regressionsfunktion	R ²
Grobporenvolumen = 43 - 25.6*Lagerungsdichte + 0.09*Luftpermeabilität	0.77
Luftpermeabilität = -11.99 + 3.44*Grobporenvolumen	0.64

4.2.4 Zusammenhang Bodendeformation, Penetrometrie und Porometrie

Gemeinsame Werte von Bodendeformation, Penetrometrie und Porometrie liegen für die Blöcke II und III mit den Varianten *CTF nicht, mittel, intensiv befahren* und *Direktsaat zufällig* befahren vor. Die Korrelationen der verschiedenen Werte aus den Jahren 2009-2011 waren generell nur schwach ausgeprägt. Bei Verwendung lediglich der Werte 2009 und 2010 waren die Korrelationen wesentlich besser. Diese Diskrepanz könnte auf die stärkere Durchwurzelung durch Kunstwiese mit einem höheren Fehler für die Deformationsmessung und einen Einfluss durch vier Kunstwiesenernten und nicht nur eine Getreideernte zurückzuführen sein. Die Korrelationen sind in Tab. 12 abgebildet, r-Werte kleiner -0.4 und höher 0.4 sind **fett** markiert. Mit der Ausnahme von Deformation und Luftpermeabilität korrelieren die gemessenen Parameter kaum bis mittel miteinander.

Tab. 12: Korrelationen Bodendeformation, Penetrometrie und Porometrie

r-Werte	Defor- mation	Penetro- metrie	Grob- poren- volumen	Lager- ungs- dichte	Gesamt- poren- volumen	Luft- perme- abilität
Deformation	1	-0.046	0.593	-0.421	0.065	0.727
Penetro- metrie		1	0.451	0.287	-0.215	-0.168
Grobporen- volumen			1	-0.444	0.202	0.551
Lagerungs- dichte				1	-0.574	-0.473
Gesamt- porenvolu- men					1	0.084
Luftperme- abilität						1

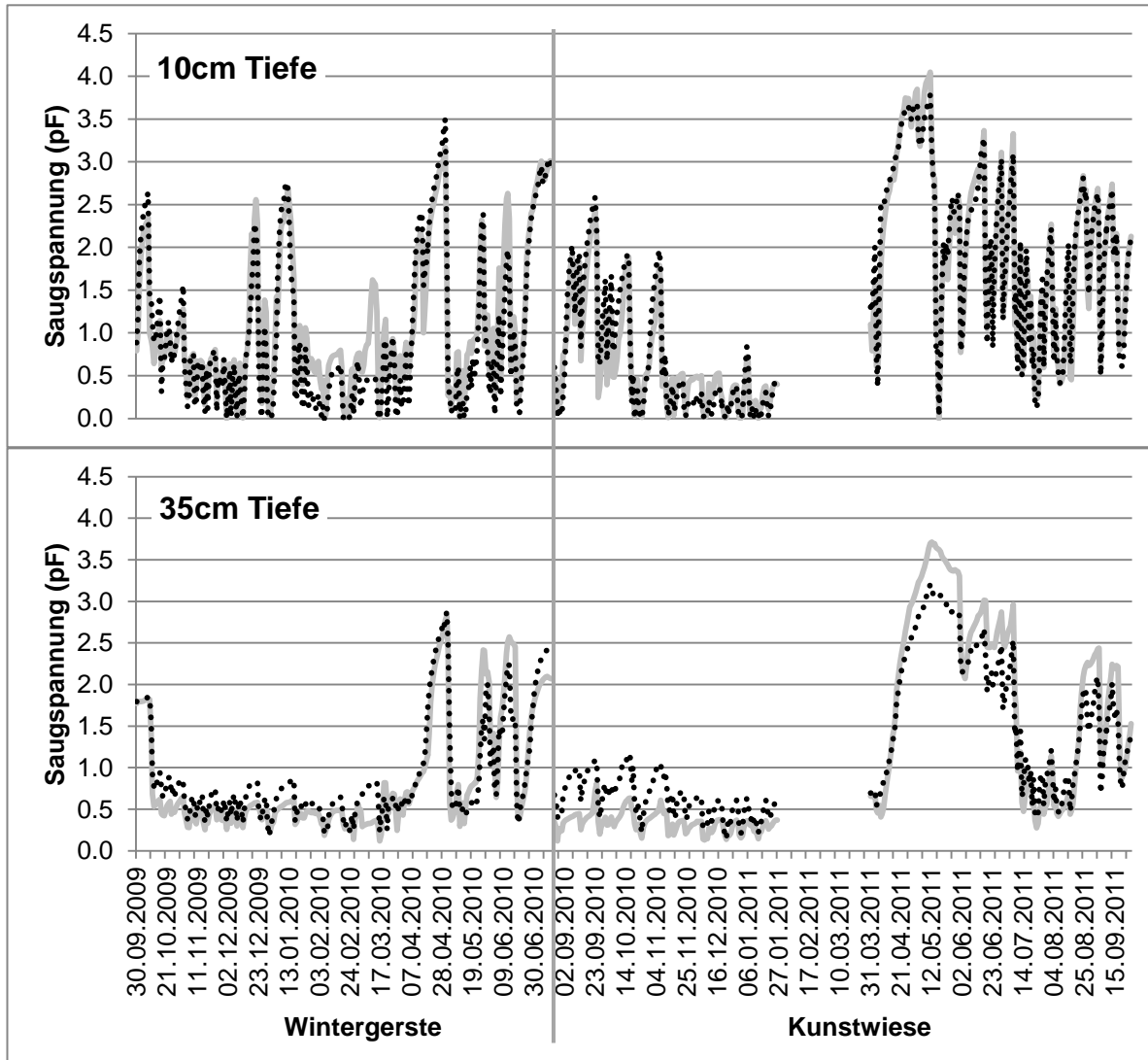
Auf diesen Korrelationen aufbauend wurden Regressionsmodelle erstellt (Tab. 13). Grobporenvolumen und Lagerungsdichte lassen sich zu einem hohen bis sehr hohen Grad erklären. Die Luftpermeabilität hat nur ein niedriges R^2 .

Tab. 13: Regressionsmodelle für Bodendeformation, Penetrometrie und Porometrie.

Regressionsfunktion	R^2
Grobporenvol. = $41.38 - 27 \cdot \text{Lagerungsdichte} + 0.14 \cdot \text{Luftpermeabilität} + 0.42 \cdot \text{Penetrometrie}$	0.87
$\log(\text{Grobporenvol.}) = 5.64 + 36.78 \cdot \text{Deformation} + 0.64 \cdot \log(\text{Penetrom.}) - 3.34 \cdot \text{Lagerungsdichte}$	0.78
$\text{Lagerungsdichte} = 2.35 + 0.007 \cdot \text{Penetrometrie} - 0.01 \cdot \text{Grobporenvol.} - 0.02 \cdot \text{Gesamtporenvolumen}$	0.93
$\log(\text{Luftpermeabilität}) = 2.99 + 171.51 \cdot \text{Deformation}$	0.42

4.2.5 Saugspannung

Abb. 25 zeigt den Verlauf der Saugspannung in 10 und 35cm Bodentiefe unter Wintergerste und Kunstwiese von 2009-2011. Unter Kunstwiese in 35cm Tiefe sind die kleinen Unterschiede am ausgeprägtesten, es sind jedoch keine verfahrensspezifischen Muster erkennbar.



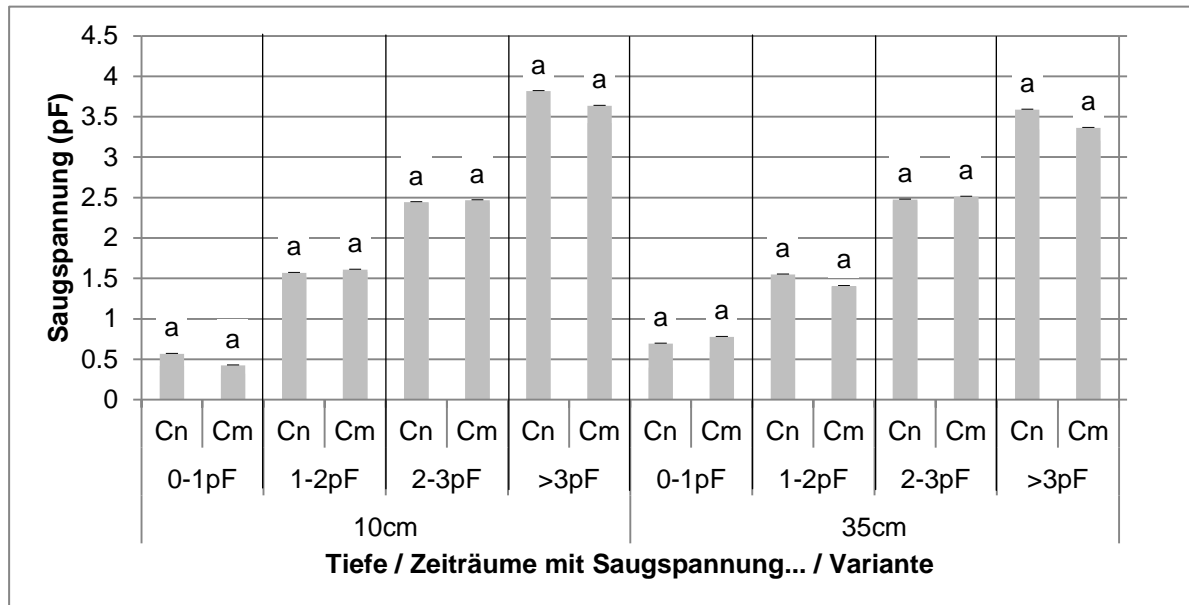
Legende

— O₂ CTF nicht befahren

.... O₂ CTF mittel befahren

Abb. 25: Verlauf der Saugspannung der beiden Verfahren *CTF nicht befahren* und *CTF mittel befahren* in 10 und 35cm Bodentiefe unter Wintergerste und Kunstwiese. Die Linienunterbrüche sind Messpausen im Sommer bzw. Wartungsunterbrüche im Frühjahr 2011.

Zur Analyse, ob sich die Saugspannung in den Varianten *CTF nicht befahren* und *CTF mittel befahren* unterscheidet, wurde die Saugspannung nach Zeiträumen mit 0-1/1-2/2-3/>3pF Saugspannung ausgewertet (Abb. 26). Die Saugspannungswerte der Varianten unterscheiden sich nicht signifikant voneinander.



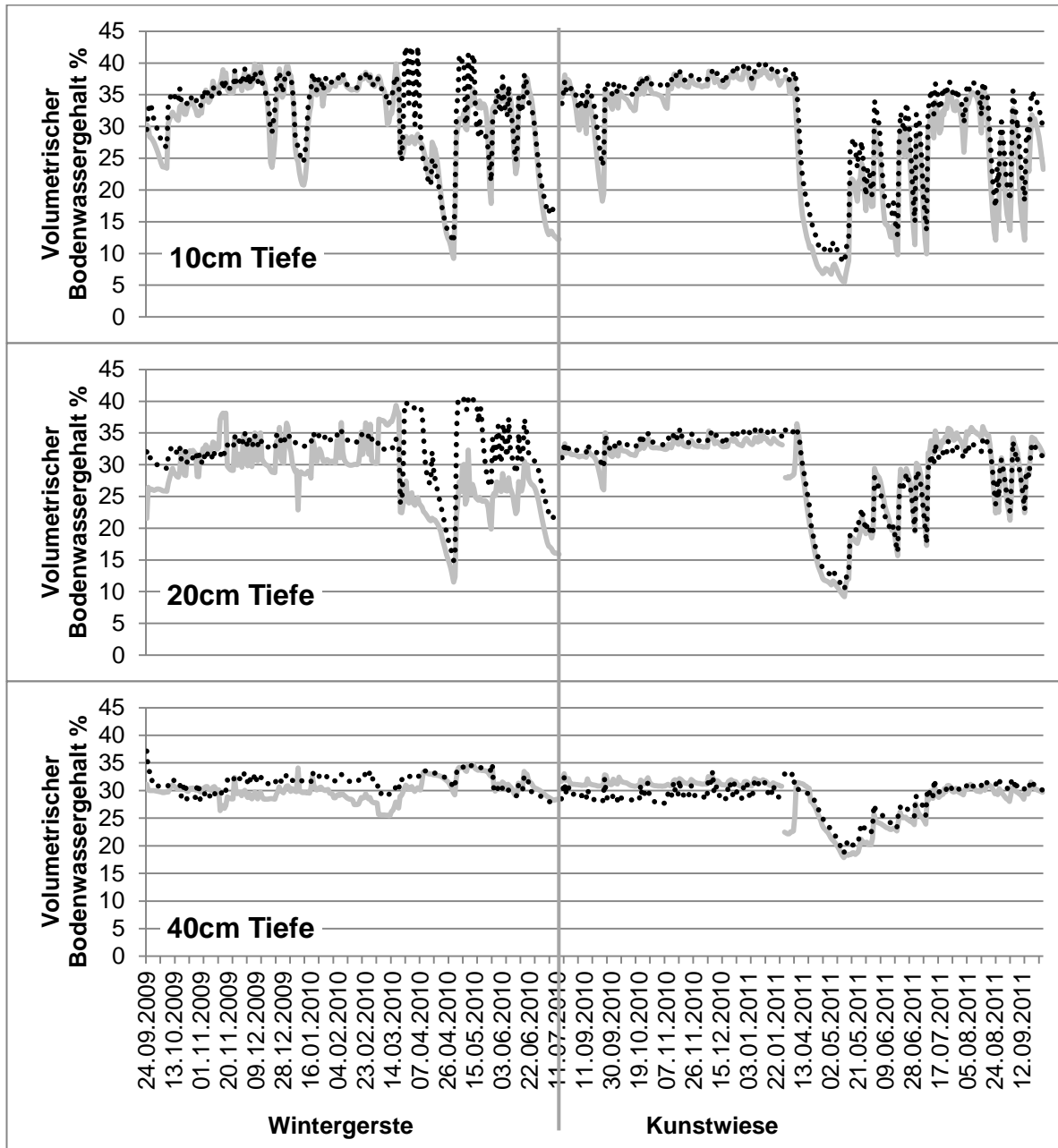
Legende

Cn = CTF nicht befahren Cm = CTF mittel befahren.

Abb. 26: Saugspannung in 10 und 35cm Bodentiefe aufgeteilt in Klassen mit Saugspannungswerten von 0-1; 1-2; 2-3; >3pF.

4.2.6 Volumetrischer Bodenwassergehalt

Der in Abb. 27 dargestellte Verlauf des volumetrischen Bodenwassergehalts in 10, 20 und 40cm Tiefe zeigt, dass sich die Varianten *CTF nicht befahren* und *CTF mittel befahren* besonders während den trockenen Perioden unterscheiden.



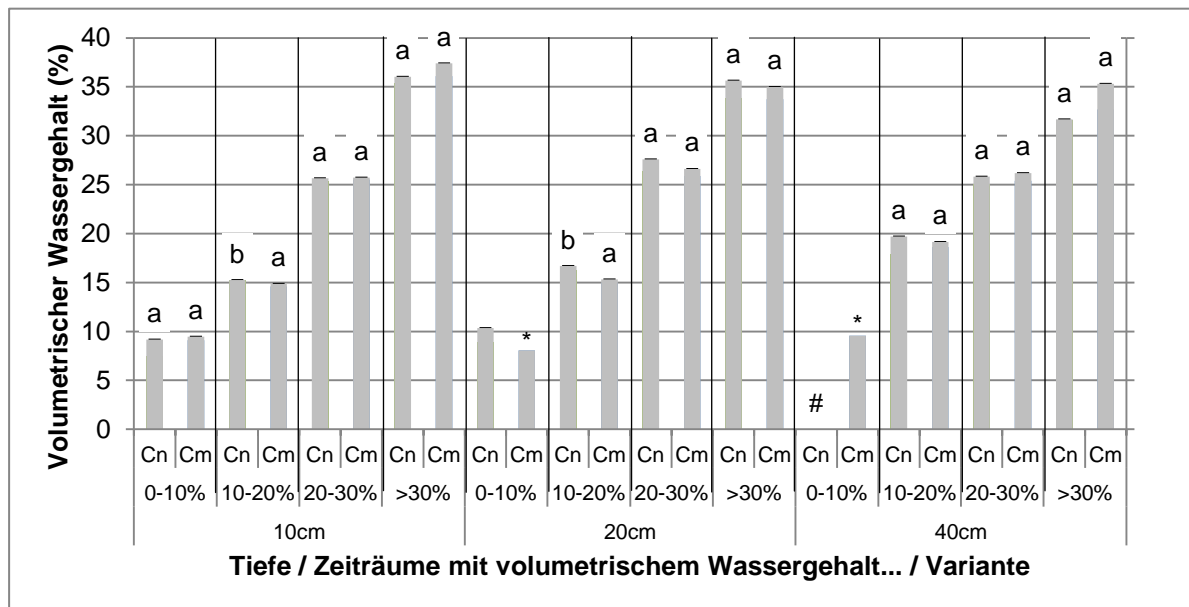
Legende

— CTF nicht befahren

.... CTF mittel befahren

Abb. 27: Verlauf des volumetrischen Bodenwassergehalts in 10; 20; 40cm Bodentiefe unter Wintergerste und Kunstwiese von 2009-2011. Die Linienunterbrüche sind Messpausen im Sommer.

Zur Analyse, ob sich der volumetrische Wassergehalt in den Varianten *CTF nicht befahren* und *CTF mittel befahren* unterscheidet, wurde der volumetrische Wassergehalt in Feuchteklassen mit 0-10; 10-20; 20-30; >30% volumetrischem Wassergehalt eingeteilt (Abb. 28). *CTF nicht befahren* hat in 10 und 35cm Tiefe in der Klasse 10-20%, einen signifikant leicht höheren volumetrischen Wassergehalt als *CTF mittel befahren*. In allen anderen Fällen unterscheiden sich die volumetrischen Wassergehalte der Varianten nicht signifikant voneinander.



Legende

Cn = CTF nicht befahren Cm = CTF mittel befahren.

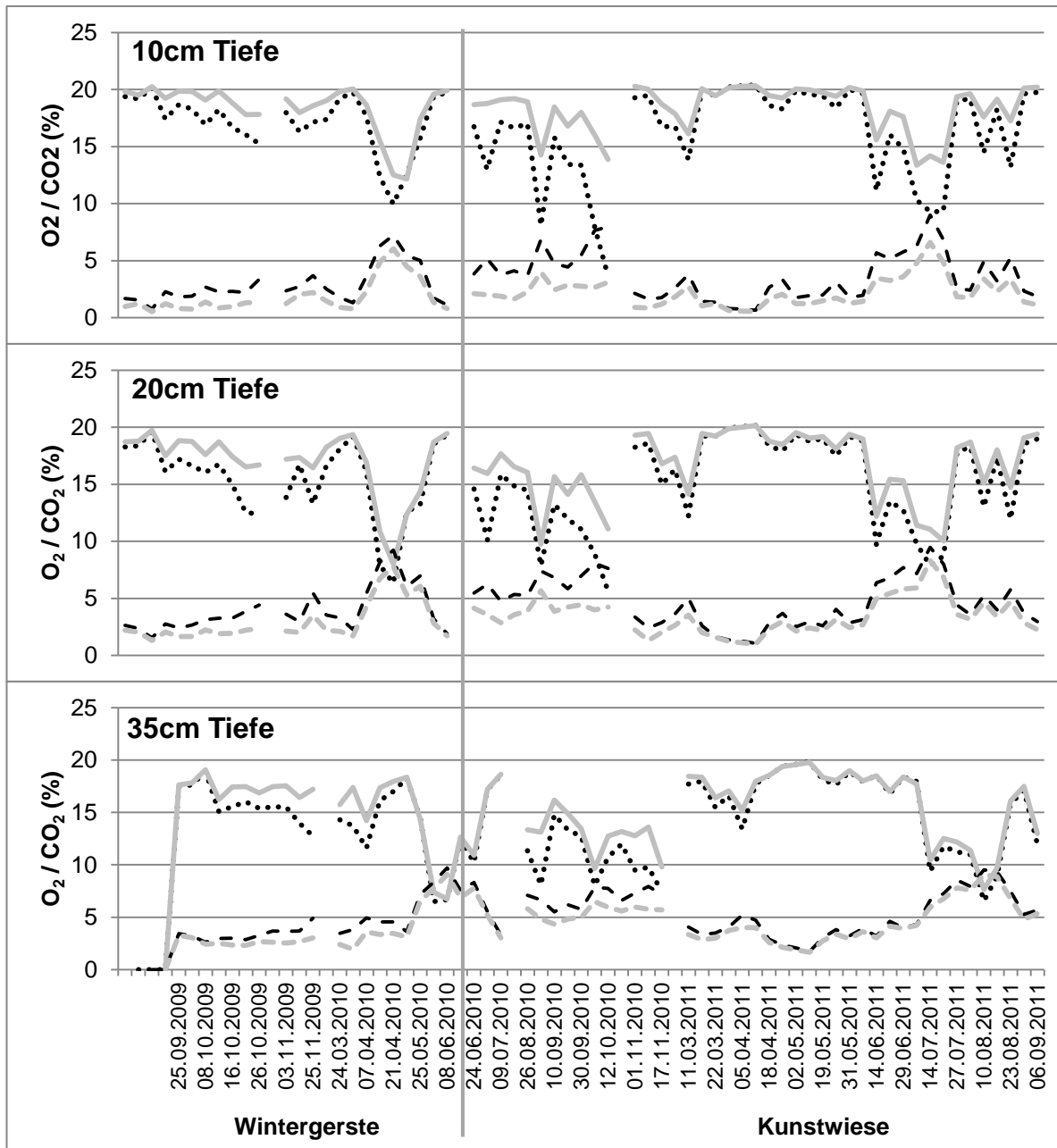
Abb. 28: Volumetrischer Wassergehalt in 10; 20; 40cm Bodentiefe aufgeteilt in Feuchteklassen von 0-10; 10-20; 20-30; >30%.

In dieser Klasse trat keine entsprechende Feuchte auf.

* In diesen Klassen lagen zu wenig Werte vor.

4.2.7 Bodenluft

Der in Abb. 29 dargestellte Verlauf der O_2 - und CO_2 -Gehalte in 10, 20 und 35cm Tiefe zeigt, dass sich die Varianten *CTF nicht befahren* und *CTF mittel befahren* unterscheiden.



Legende

— O_2 CTF nicht befahren O_2 CTF mittel befahren
 - - CO_2 CTF nicht befahren - . - . CO_2 CTF mittel befahren

Abb. 29: Verlauf des O_2 - und CO_2 -Gehalts der Bodenluft in 10; 20; 35cm Bodentiefe unter Wintergerste und Kunstwiese. Linienunterbrüche sind Messpausen im Winter und Sommer.

In 10 und 20cm ist dies ausgeprägter als in 35cm. O₂ und CO₂ verhalten sich generell disproportional ($r = -0.91$). In Perioden tieferer O₂-Gehalte unterscheiden sich die Varianten stärker als in Perioden hoher Gehalte. *CTF nicht befahren* hat generell höhere O₂-Gehalte als *CTF mittel befahren*. Umgekehrt sind die CO₂-Gehalte in *CTF mittel befahren* generell höher als in *CTF nicht befahren*.

Abb. 30 zeigt, dass es vor allem in 10 und 20cm Tiefe in *CTF nicht befahren* weniger Situationen (kürzere Zeiträume) mit das Pflanzenwachstum limitierenden niedrigen O₂- und hohen CO₂-Gehalten gibt als in *CTF mittel befahren*. In der Klasse <10% wurden generell nur sehr selten O₂-Werte <5% gemessen, in der Regel lagen die tiefsten Werte zwischen 5-10%.

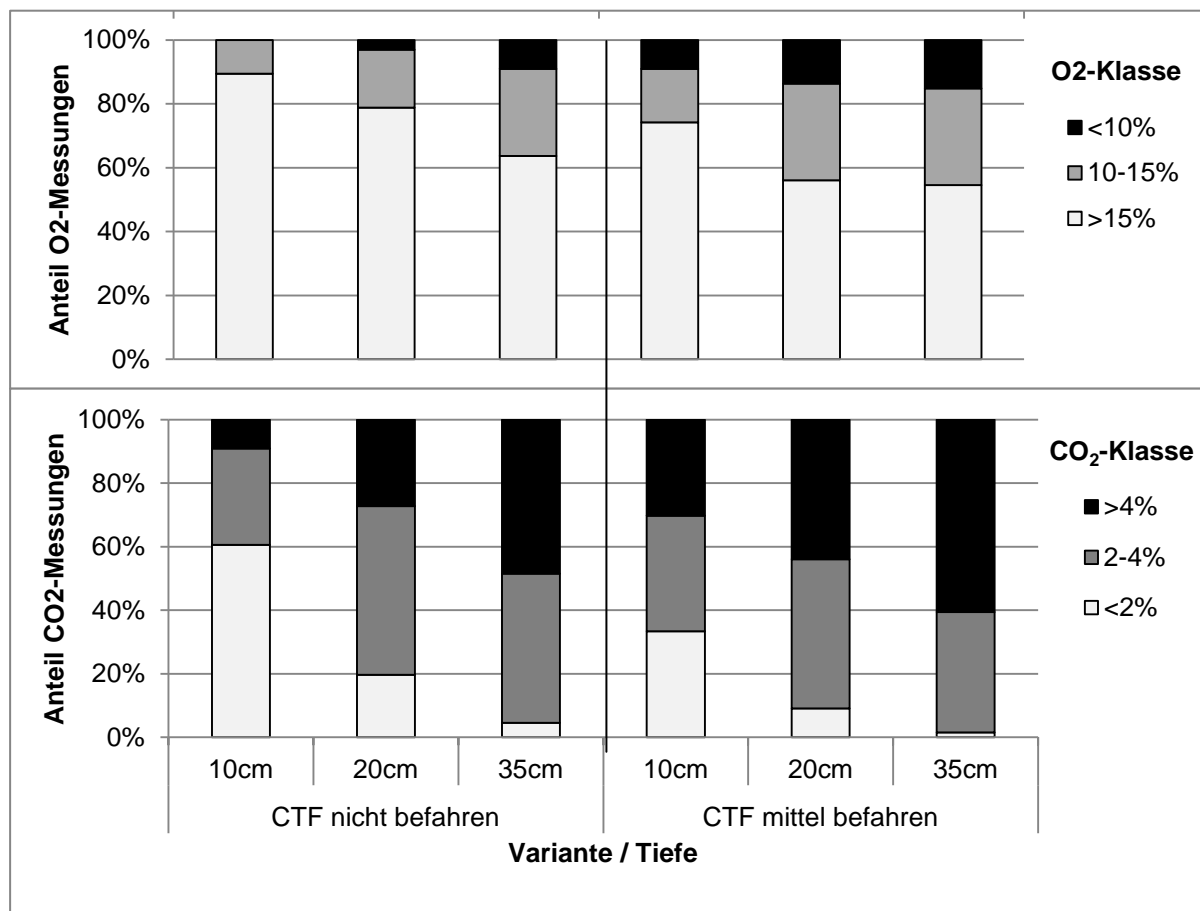


Abb. 30: Einteilung der Luftmessungen nach O₂- und CO₂-Klassen (Geisler 1978; Scheffer & Schachtschabel 2002).

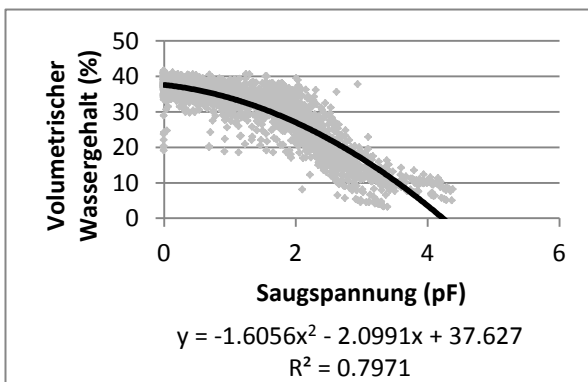
O₂-/CO₂-Bereich: □ optimal / ■ suboptimal / ■ limitierend für Pflanzenwachstum

4.2.8 Saugspannung, volumetrischer Wassergehalt und Bodenluft

Bis zum Frühjahr 2010 waren die Blöcke zum Teil nur partiell mit Sonden für Saugspannung, volumetrischen Bodenwassergehalt und Bodenluft ausgestattet. Für diesen Zeitraum wird aufgrund der suboptimalen Datengrundlage auf eine statistische Analyse verzichtet. Ab dem Spätfrühjahr 2010 waren die Blöcke I, II und III voll ausgestattet und die Anbauperiode Kunstwiese von August 2010 bis September 2011 wurde ausgewertet.

In Abb. 31 ist die Beziehung zwischen volumetrischem Wassergehalt und Saugspannung in den Bodentiefen 10 und 35cm als Desorptionskurve dargestellt. In 35 cm Tiefe verläuft die Desorptionskurve flacher als in 10 cm Tiefe, bei einer höheren Saugspannung speichert der Unterboden also mehr Wasser als der Oberboden. Die Streuung der gemessenen Werte verläuft regelmässig über das gesamte Messspektrum.

10cm Bodentiefe



35cm Bodentiefe

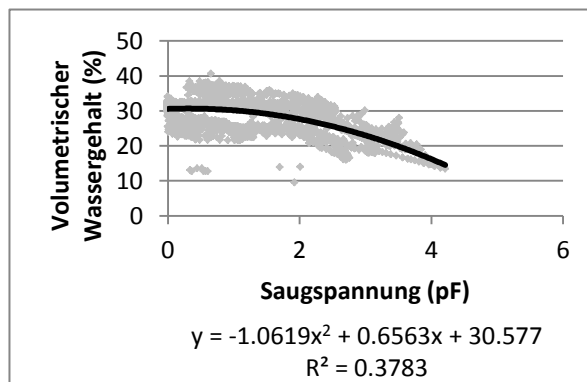
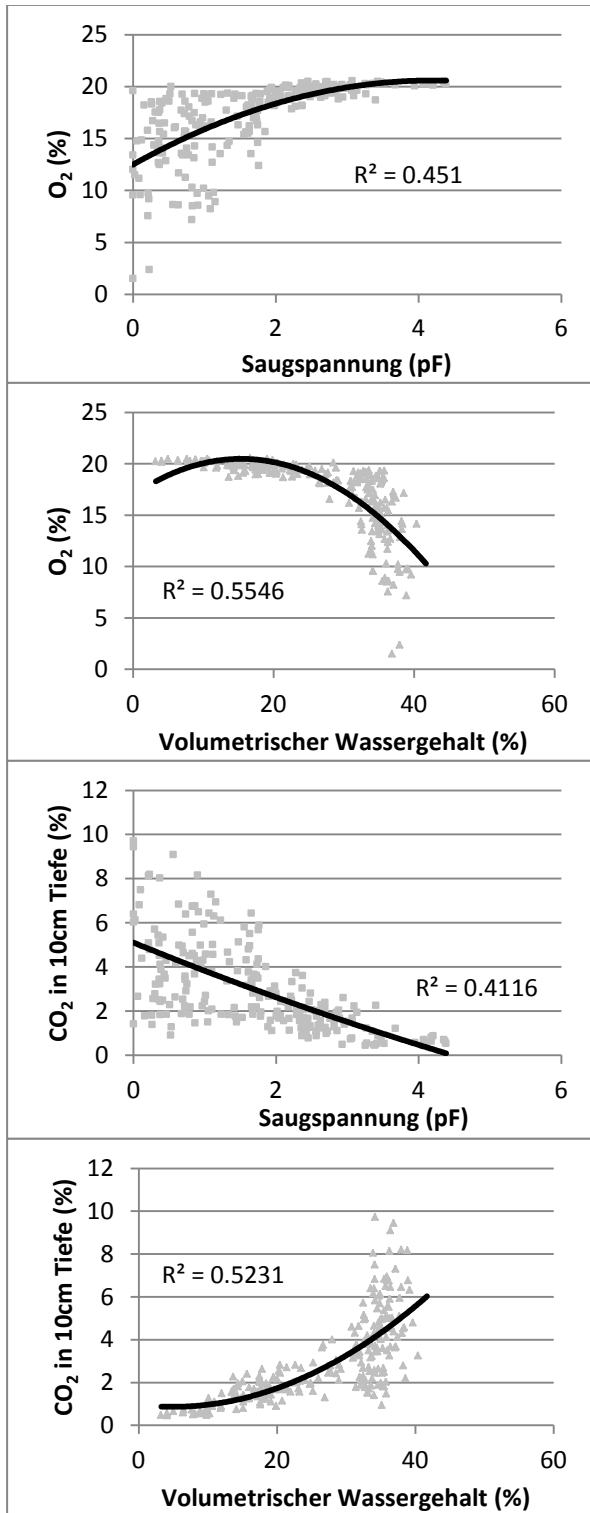


Abb. 31: Beziehung zwischen volumetrischem Wassergehalt und Saugspannung in den Bodentiefen 10 und 35cm dargestellt als Desorptionskurven.

In Abb. 32 sind die weiteren Beziehungen zwischen volumetrischem Wassergehalt, Saugspannung und O_2 -/ CO_2 -Gehalt in den Bodentiefen 10 und 35cm als Scatterplots dargestellt. Die Korrelation zwischen Saugspannung und O_2 -/ CO_2 -Gehalt liegt in 10 und 35cm im mittleren Bereich. In 10cm Tiefe sinkt ab einer Saugspannung von <2 pF bzw. einem volumetrischen Wassergehalt von $>30\%$ der durchschnittliche O_2 -Gehalt ab und der CO_2 -Gehalt steigt an. Bei feuchten Bodenverhältnissen ist die Variabilität der Werte viel höher als bei trockenen Verhältnissen, die durchwegs durch hohe O_2 -Werte charakterisiert sind.

10cm Bodentiefe



35cm Bodentiefe

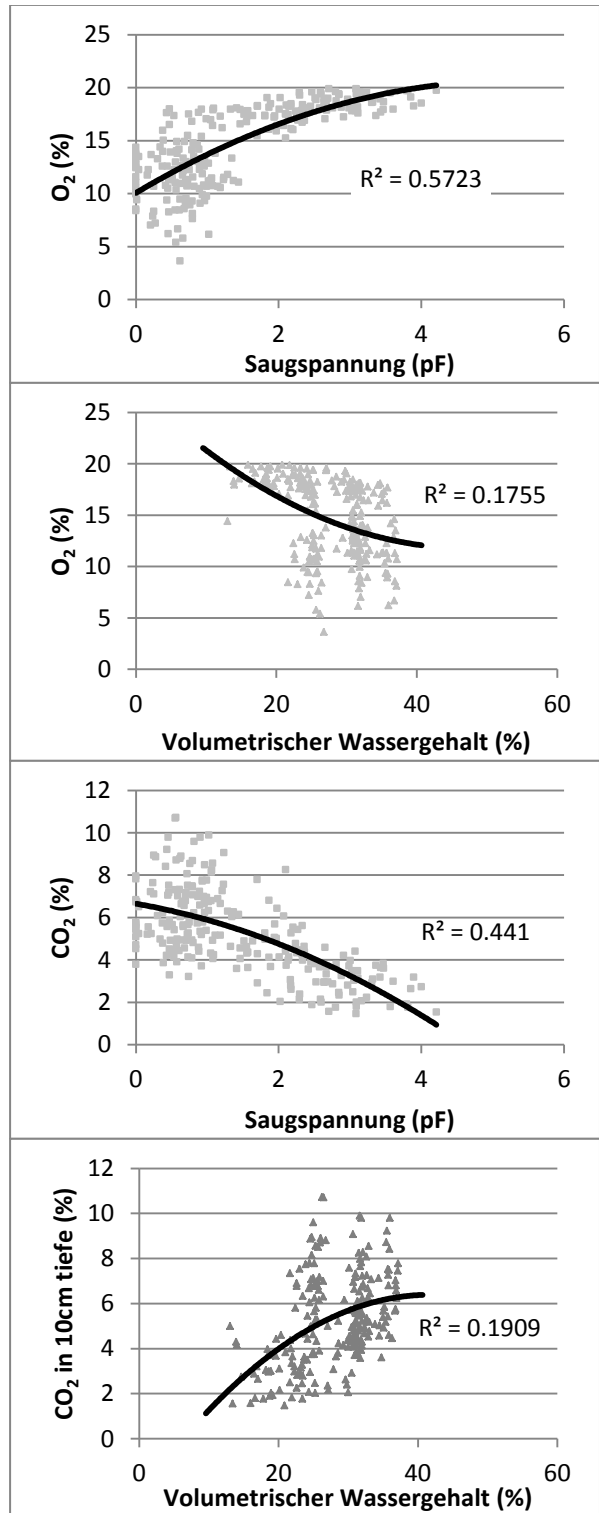
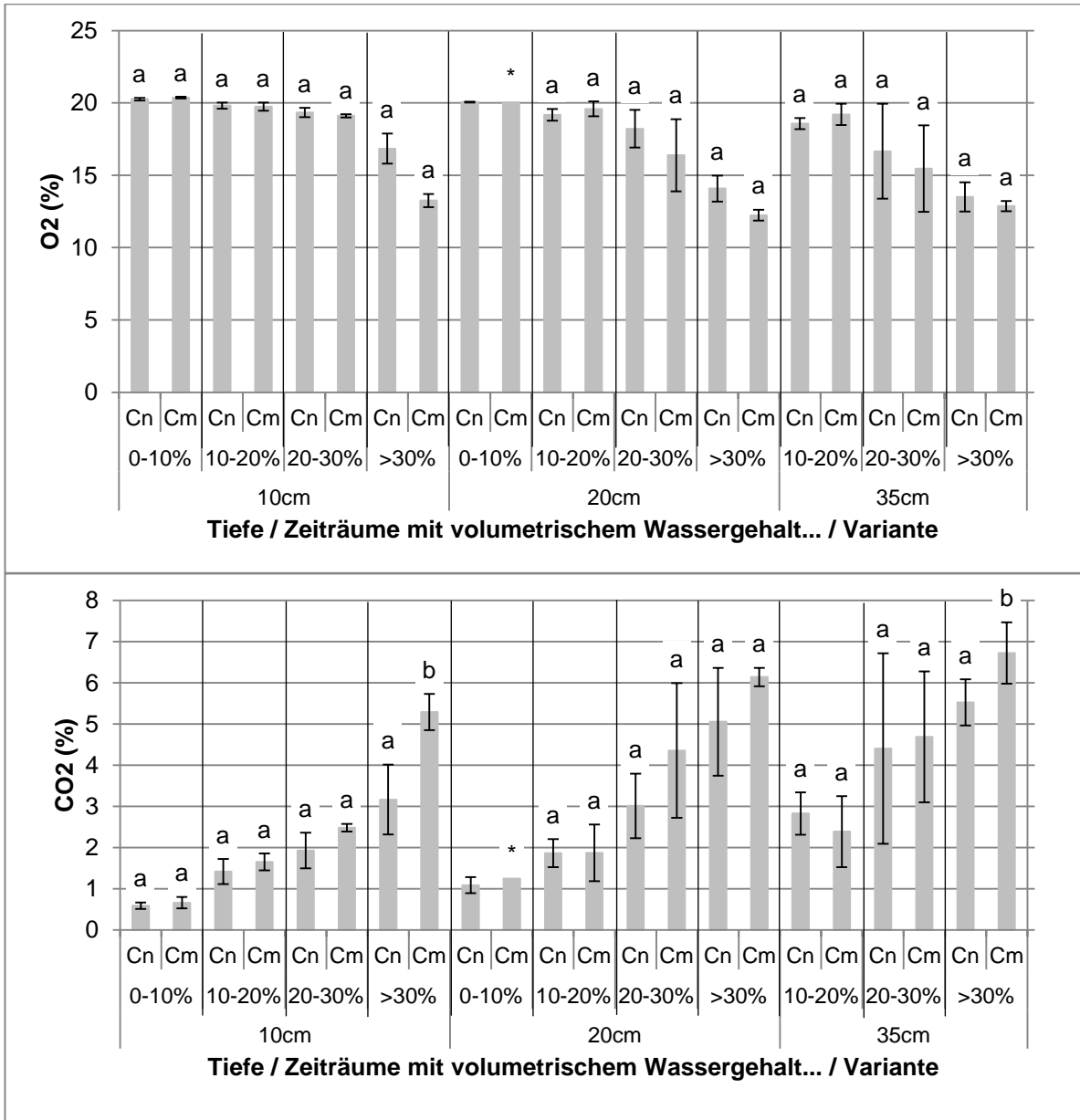


Abb. 32: Beziehung zwischen volumetrischem Wassergehalt, Saugspannung und O₂-/CO₂-Gehalt in den Bodentiefen 10/35cm dargestellt als Scatterplots.

Zum Vergleich des O₂- und CO₂-Gehalts in Abhängigkeit des volumetrischen Wassergehalts wurden die O₂- und CO₂-Werte in Klassen mit 0-10; 10-20; 20-30; >30% volumetrischem Wassergehalt eingeteilt (Abb. 33). Die O₂-Gehalte sind unter feuchteren Bedingungen in *CTF nicht befahren* tendenziell höher als in *CTF mittel befahren*, sie unterscheiden sich aber nicht signifikant. *CTF nicht befahren* hat in Zeiträumen mit einem volumetrischen Wassergehalt >30% in den Tiefen 10, 20 und 30 cm einen niedrigeren CO₂-Gehalt als *CTF mittel befahren*. In den Tiefen 10 und 30cm sind die Unterschiede signifikant, in 20cm aufgrund der hohen Datenstreuung nicht.



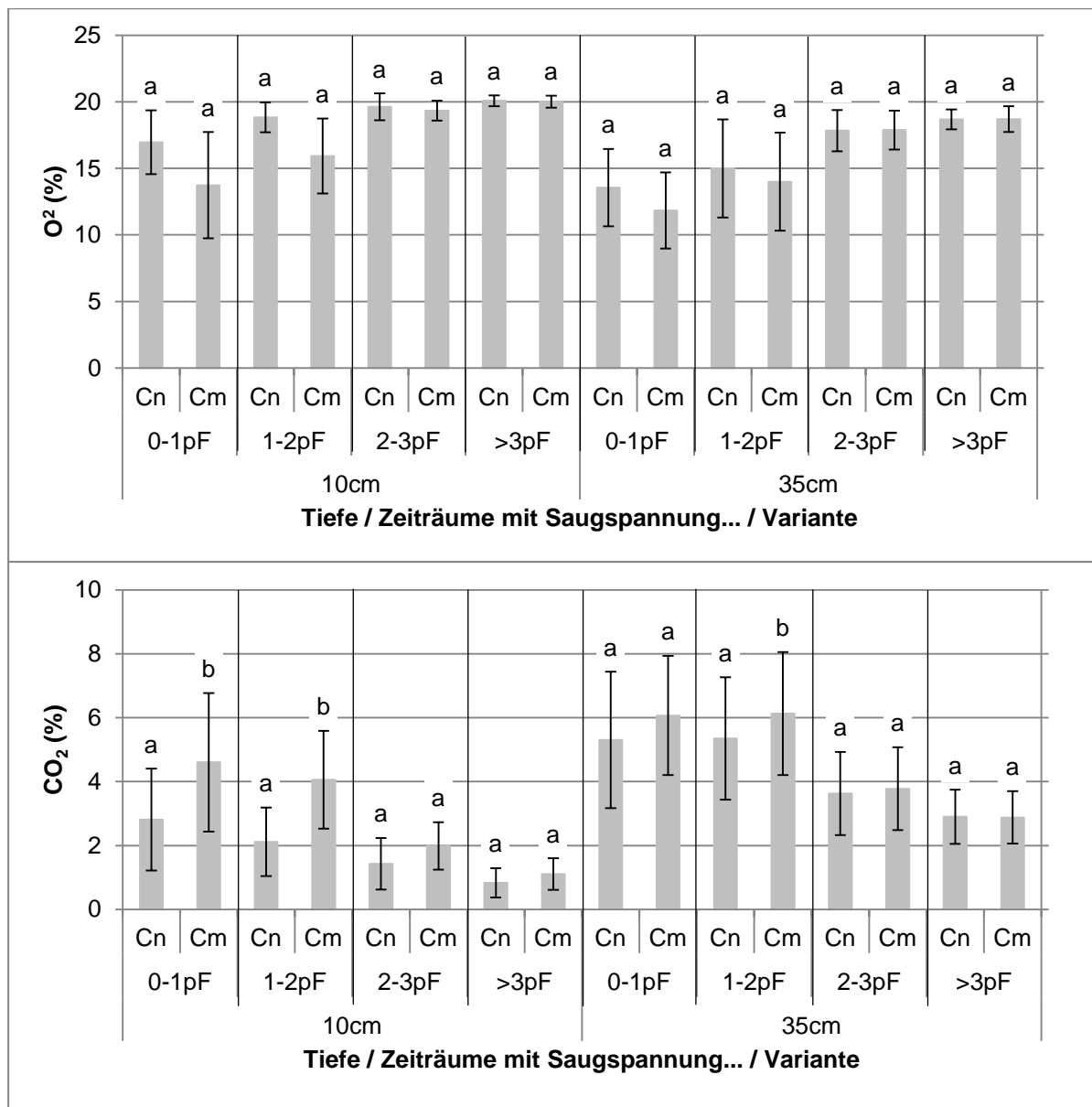
Legende: Cn = CTF nicht befahren / Cm = CTF mittel befahren.

Abb. 33: O₂- und CO₂-Gehalt in 10; 20; 35cm Bodentiefe aufgeteilt in Klassen mit 0-10; 10-20; 20-30; >30% volumetrischem Wassergehalt.

* Es lagen nicht genügend Werte für eine statistische Auswertung vor.

Ergänzend wurden zum Vergleich des O_2 - und CO_2 -Gehalts in Abhängigkeit der Saugspannung die O_2 - und CO_2 -Werte in Klassen mit 0-1; 1-2; 2-3; >3pF Saugspannung eingeteilt (Abb. 34). Die O_2 -Gehalte von *CTF nicht befahren* und *CTF mittel befahren* unterscheiden sich nicht signifikant. Generell hat *CTF nicht befahren* in Zeiträumen mit einer Saugspannung von 0-2pF in der Tiefe 10cm einen signifikant niedrigeren CO_2 -Gehalt als *CTF mittel befahren*. In 35cm Tiefe gibt es signifikante Unterschiede bei einer Saugspannung zwischen 1-2pF.

Zusammengefasst hat *CTF nicht befahren* unter feucht-nassen Bedingungen (>30% volumetrischer Wassergehalt bzw. Saugspannung <2) in 10 und 20cm Tiefe um 2-3% höhere O_2 -Gehalte als *CTF mittel befahren*, die Unterschiede sind aber nicht signifikant. In 10 und 35cm Tiefe sind die CO_2 -Gehalte 2.5% signifikant tiefer als bei *CTF mittel befahren*.



Legende: Cn = CTF nicht befahren / Cm = CTF mittel befahren.

Abb. 34: O_2 - und CO_2 -Gehalte in 10 und 35cm Bodentiefe aufgeteilt in Klassen mit 0-1; 1-2; 2-3; >3pF Saugspannung.

4.2.9 Zusammenhang Bodenluft, Saugspannung, volumetrischer Wassergehalt, Penetrometrie und Grobporenvolumen

Für die Tiefen 10cm und 35/40cm sind die Korrelationen zwischen Bodenluft, Saugspannung, volumetrischem Wassergehalt, Penetrometrie und Grobporenvolumen (nur 10cm Tiefe) in Tab. 14 dargestellt. O₂ und CO₂ korreliert sehr stark miteinander sowie stark mit der Saugspannung und dem volumetrischen Wassergehalt. Die Korrelationen mit Penetrometrie und Grobporenvolumen sind nur schwach.

Tab. 14: Korrelationen O₂, CO₂, Saugspannung, volumetrischer Wassergehalt, Penetrometrie und Grobporenvolumen in 10cm und 35/40cm Tiefe. R-Werte <0.4/>0.4 sind fett markiert.

* In 35/40cm Tiefe wurden keine Porometriewerte erhoben.

10cm Tiefe						
r-Wert	Boden-O₂	Boden-CO₂	Saugspannung	Volumetr. Wassergeh.	Penetrometrie	Grobporenvolumen
Boden-O ₂	1	-0.915	0.670	-0.698	-0.249	0.161
Boden-CO ₂		1	-0.654	0.725	0.347	-0.302
Saugspannung			1	-0.879	-0.016	0.067
Volumetr. Wassergehalt				1	0.113	-0.055
Penetrometrie					1	-0.678
Grobporenvolumen						1
35/40cm Tiefe						
r-Wert	Boden-O₂	Boden-CO₂	Saugspannung	Volumetr. Wassergeh.	Penetrometrie	Grobporenvolumen*
Boden-O ₂	1	-0.875	0.766	-0.426		-
Boden-CO ₂		1	-0.663	0.434	0.106	-
Saugspannung			1	-0.605	0.118	-
Volumetr. Wassergehalt				1	-0.252	-
Penetrometrie					1	-
Grobporenvolumen						1

Darauf aufbauend wurden Regressionen für den O₂- und CO₂-Gehalt in 10cm Bodentiefe mit den Einflussgrößen volumetrischer Wassergehalt, Saugspannung, Penetrometrie (5-10cm Tiefe) und Grobporenvolumen gerechnet (Tab. 15). Für 35cm Tiefe wurden aufgrund der nicht erhobenen Porometriewerte keine Berechnung durchgeführt.

Der O₂-Gehalt liess sich mit den Einflussgrößen zu etwa 50% erklären, der CO₂-Gehalt zu etwa 60%. Grobporenvolumen und Penetrometriewerte sind austauschbar und bringen in Kombination keine oder nur eine geringe Steigerung des Bestimmtheitsmasses. Testweise durchgeführte Berechnungen zeigten, dass sich auch volumetrischer Wassergehalt und Saugspannung weitgehend redundant verhalten. O₂- und CO₂-Gehalt haben ein Bestimmtheitsmass von 0.84.

Tab. 15: Regressionsmodelle für O₂ und CO₂ in 10cm Tiefe mit den Einflussgrößen volumetrischer Wassergehalt, Saugspannung, Penetrometrie (5-10cm Tiefe) und Grobporenvolumen.

Regressionsfunktion	R²
$O_2 = 8.98 + 1.36 \cdot pF - 0.13 \cdot FDR + 1.67 \cdot GGP$	0.49
$O_2 = 20.67 + 1.26 \cdot pF - 0.11 \cdot FDR - 0.42 \cdot Penetro$	0.52
$O_2 = pF + FDR + GGP + Penetro \rightarrow GGP$ nicht signifikant	-
$CO_2 = 12.00 - 0.54 \cdot pF - 0.10 \cdot FDR - 1.93 \cdot GGP$	0.60
$CO_2 = -0.60 - 0.48 \cdot pF + 0.09 \cdot FDR - 0.33 \cdot Penetro$	0.59
$CO_2 = -5.15 - 0.58 \cdot pF + 0.10 \cdot FDR - 0.91 \cdot GGP + 0.24 \cdot Penetro$	0.63
$O_2 = 22.03 - 1.63 \cdot CO_2$	0.84

4.2.10 Bodenbiologische Aktivität

Die Basalatmung in Abb. 35 zeigt in der Tiefe 0-10cm generell bei *Pflug zufällig befahren* die tiefsten Werte, gefolgt von *Direktsaat zufällig befahren* und den *CTF-Varianten*. Ab 2011 nehmen die signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten ab. In der Tiefe 10-20cm bewegen sich alle Varianten etwa auf Höhe von *Pflug zufällig befahren* in 10cm. Bis auf eine Ausnahme gibt es keine signifikanten Unterschiede.

Die mikrobielle Biomasse in Abb. 36, bestimmt über Substratinduzierte Respiration (SIR), Fumigationsextraktion-Kohlenstoff (FEC) und Fumigationsextraktion-Stickstoff (FEN), zeigt in der Tiefe 0-10cm generell bei *Pflug zufällig befahren* die tiefsten Werte, gefolgt von *Direktsaat zufällig befahren* und den *CTF-Varianten*. Im Lauf der Jahre nehmen die signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten ab. *Direktsaat zufällig befahren* hat die höchste Variabilität aller Varianten. In der Tiefe 10-20cm bewegen sich alle Varianten auf Höhe von *Pflug zufällig befahren* in 10cm. Es gibt keine signifikanten Unterschiede.

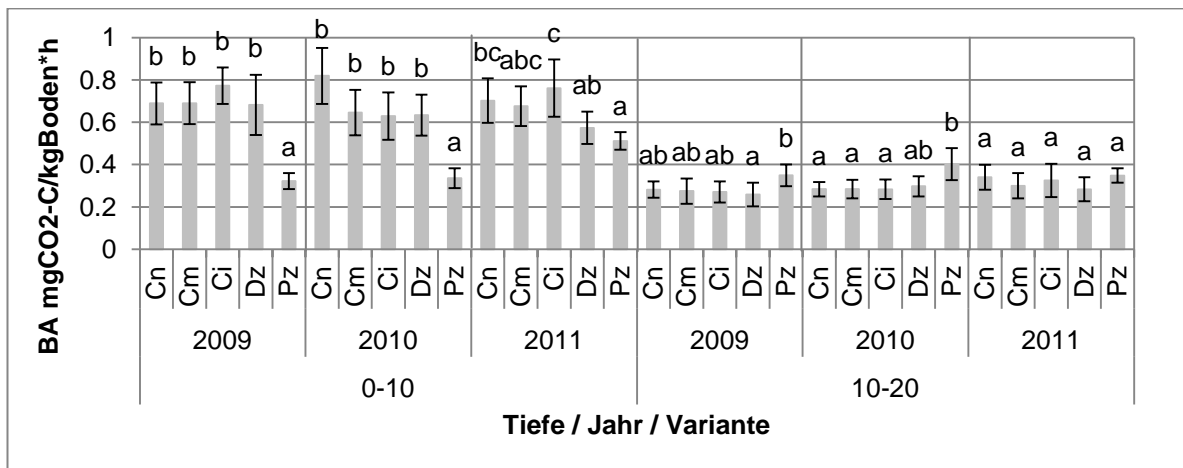


Abb. 35: Aktivität der mikrobiellen Biomasse bestimmt über Basalatmung (BA).
 Legende: Cn = CTF nicht befahren; Cm = CTF mittel befahren; Ci = CTF intensiv befahren; Dz = Direktsaat zufällig befahren; Pz = Pflug zufällig befahren

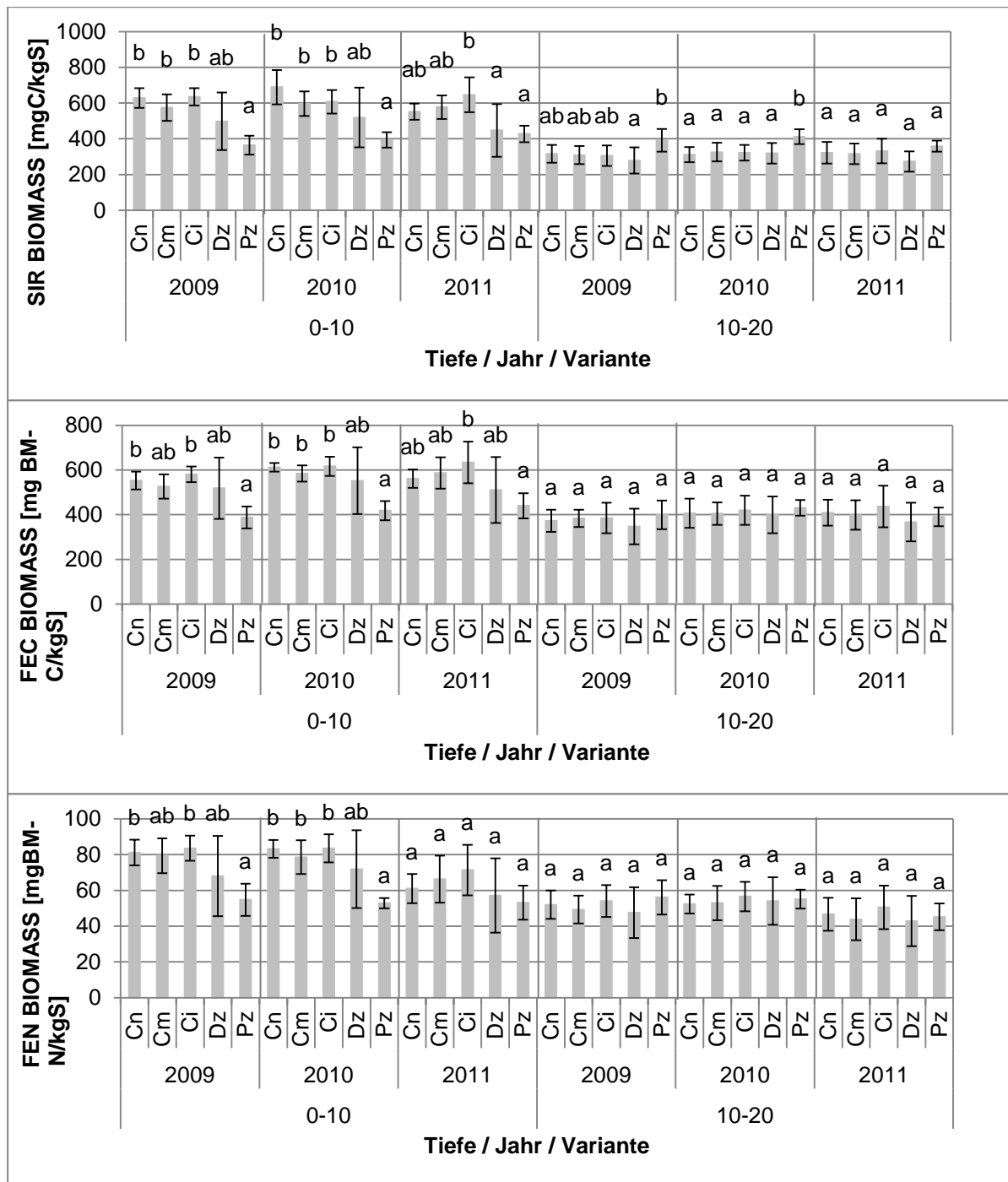


Abb. 36: Mikrobielle Biomasse bestimmt über Substratinduzierte Respiration (SIR), Fumigationsextraktion-Kohlenstoff (FEC) und Fumigationsextraktion-Stickstoff (FEN). Legende: Cn = CTF nicht befahren; Cm = CTF mittel befahren; Ci = CTF intensiv befahren; Dz = Direktsaat zufällig befahren; Pz = Pflug zufällig befahren

4.2.11 Feldaufgang

Beim Feldaufgang 2008 im Winterweizen hatten *CTF nicht befahren* und *CTF mittel befahren* die niedrigste Pflanzenanzahl pro Quadratmeter und unterschieden sich damit signifikant von *Pflug zufällig befahren* mit der höchsten Pflanzenanzahl. *Direktsaat zufällig befahren* lag dazwischen und unterschied sich nicht signifikant von den anderen Varianten. Insgesamt war der Feldaufgang mit 75% bei Pflug und 45-57% bei den direkt gesäten Varianten unterdurchschnittlich. Der Feldaufgang 2009 für Wintergerste war ausgeglichen, die Varianten unterschieden sich nicht signifikant voneinander. Mit 58-68% war der Feldaufgang ebenfalls wieder unterdurchschnittlich (Abb. 37).

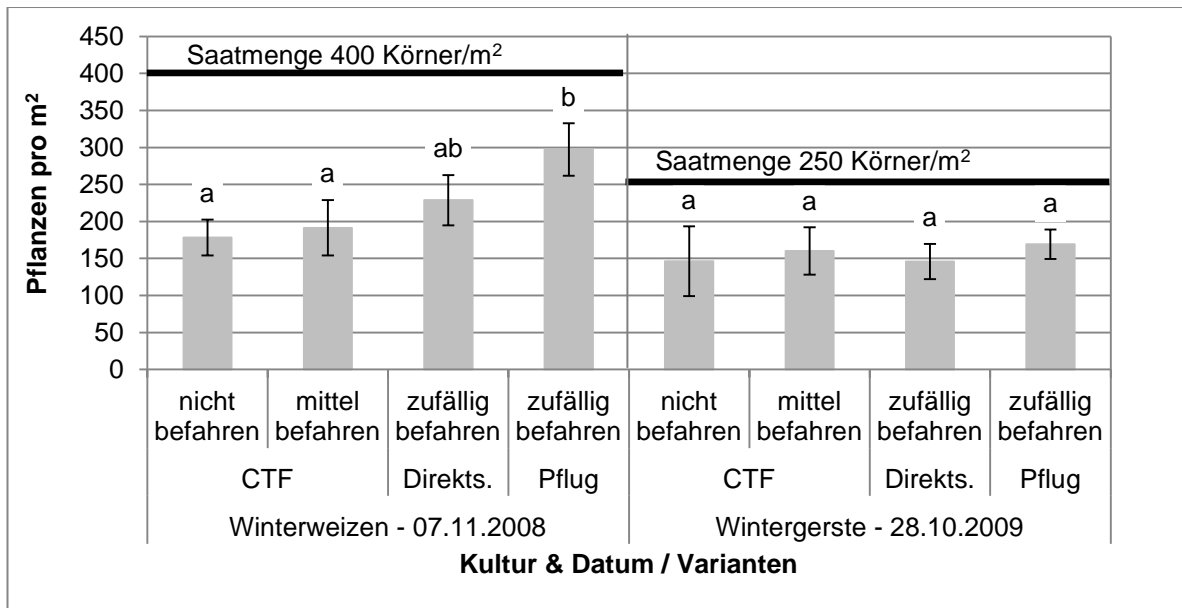


Abb. 37: Feldaufgang 2008 und 2009. Buchstaben bezeichnen die statistischen Gruppen.

4.2.12 Zwischenernte

In der Zwischenernte 2009 von Winterweizen unterschieden sich die Varianten signifikant. *Pflug zufällig befahren* hatte aufgrund starker Auswinterungsschäden nur etwa halb so viel Biomasse wie *CTF nicht befahren* und *CTF mittel befahren* sowie *Direktsaat zufällig befahren*, die auf einem Niveau lagen. In Wintergerste 2010 variierten die Werte, die Unterschiede waren aber nicht signifikant (Abb. 38).

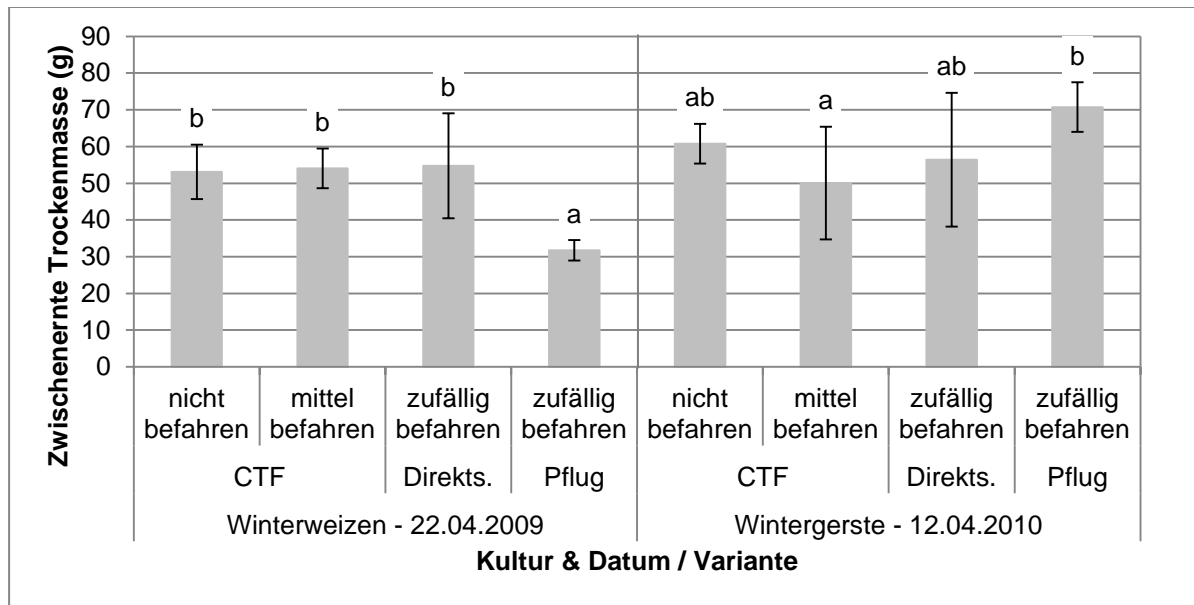


Abb. 38: Trockenmassewerte nach der Zwischenernte im April 2009 und 2010. Statistische Vergleiche innerhalb der Jahre.

4.2.13 Vegetationsindex

Im Winterweizen und in der Wintergerste wurde der Vegetationsindex NDVI im Monat nach der Zwischenernte zwei Mal gemessen, in der Kunstwiese vor den Ernten je ein Mal.

Im Winterweizen variieren am 07.05.2009 die Varianten, unterscheiden sich aber nicht signifikant. Am 25.05.2009 haben *CTF nicht befahren* und *CTF mittel befahren* sowie *Direktsaat zufällig befahren* signifikant höhere Werte als *Pflug zufällig befahren*.

In der Wintergerste am 03.05.2010 hat *Pflug zufällig befahren* den höchsten Wert, gefolgt von *CTF nicht befahren*. Beide liegen in derselben Signifikanzgruppe. *CTF mittel befahren* und *Direktsaat zufällig befahren* liegen niedriger, unterscheiden sich aber nicht signifikant von *CTF nicht befahren*. In der Messung vom 25.05.2010 unterscheidet sich dann auch *CTF mittel befahren* nicht mehr signifikant von *CTF nicht befahren* und *Pflug zufällig befahren*. Der Rückgang zwischen der ersten und zweiten NDVI-Messung ist auf die beginnende Getreideabreife mit einem Rückgang des Chlorophyllgehaltes zurückzuführen (Abb. 39).

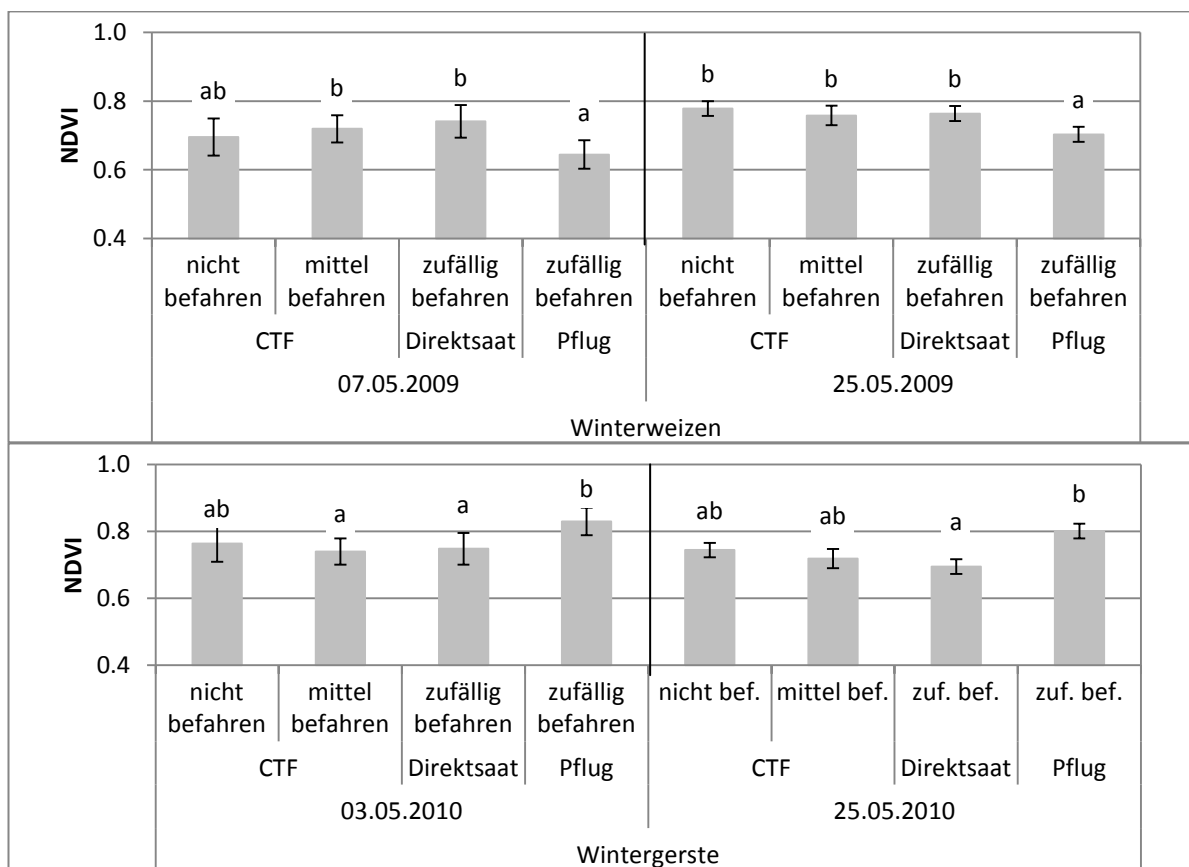


Abb. 39: NDVI-Messungen in Winterweizen (2009) und Wintergerste (2010) und Kunstwiese (2011) zu verschiedenen Zeitpunkten.

In der Kunstwiese hat *Pflug zufällig befahren* gefolgt von *Direktsaat zufällig befahren* immer die höchsten, *CTF intensiv befahren* immer die niedrigsten Werte. In der Messung vom 18.04.2011 hat *CTF nicht befahren* einen hohen Wert, sinkt im weiteren Verlauf dann aber auf ein Niveau zwischen *CTF mittel befahren* und *CTF intensiv befahren* ab (Abb. 40).

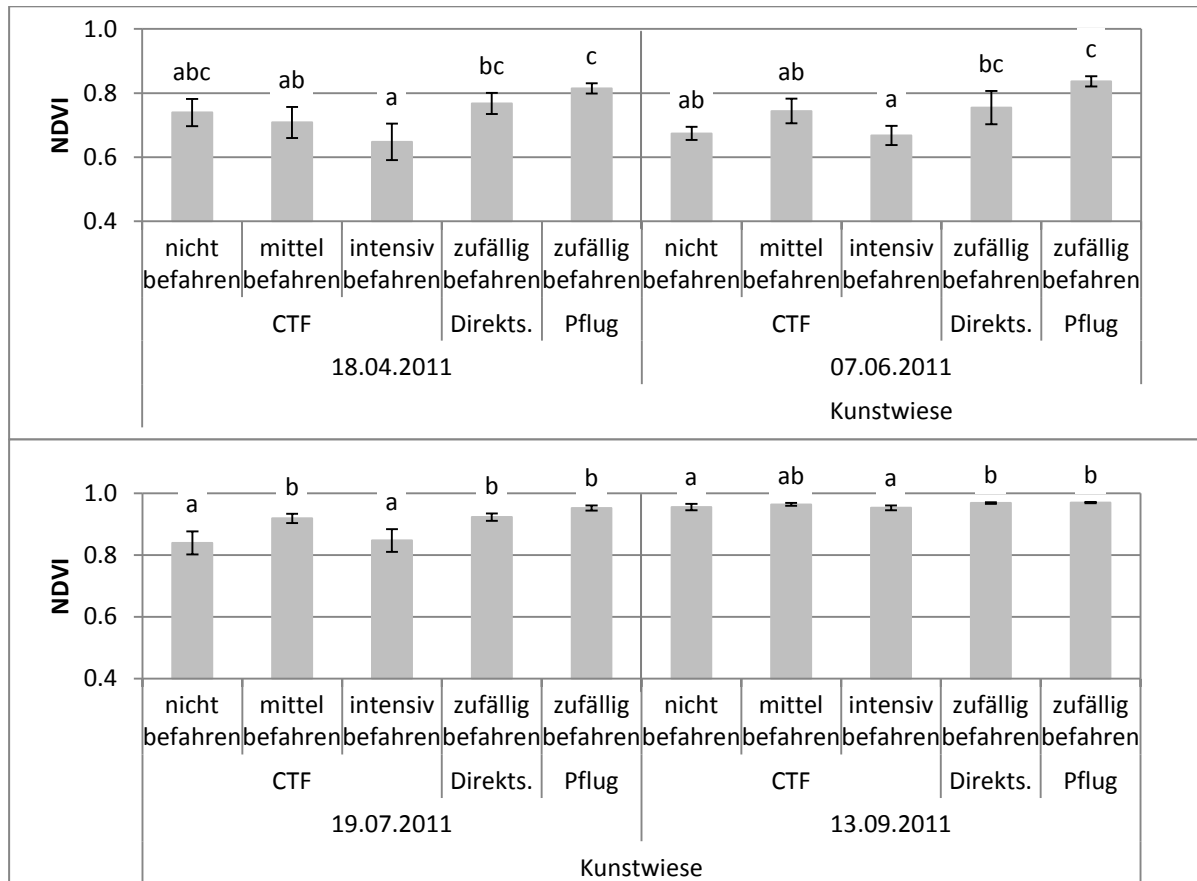


Abb. 40: NDVI-Messungen in Kunstwiese (2011) zu verschiedenen Zeitpunkten.

4.2.14 Ernte

Verschiedene Ernteparameter der Wintergerste 2010 sind in Abb. 41 dargestellt. Wie schon erwähnt, konnte die Schlussernte bei Winterweizen 2009 wegen Hagelschlag nicht durchgeführt werden.

Pflug zufällig befahren erzielte den höchsten **Kornertrag**. *CTF nicht befahren* unterschied sich aber nicht signifikant von *Pflug zufällig befahren* und *Direktsaat zufällig befahren*. *CTF mittel befahren* hatte den niedrigsten Ertrag, lag aber mit *Direktsaat zufällig befahren* in derselben Signifikanzgruppe. Die höchste **Ährenanzahl** hatte *Pflug zufällig befahren*, die niedrigste *CTF mittel befahren*. Die *CTF-Varianten* und *Direktsaat zufällig befahren* unterschieden sich nicht signifikant, *Pflug zufällig befahren* war signifikant höher. *Pflug zufällig befahren* hatte das signifikant niedrigste **Tausendkorngewicht**. Die anderen Varianten lagen leicht darüber, unterschieden sich aber nicht signifikant. *Pflug zufällig befahren* hatte den höchsten **Strohertrag**, unterschied sich aber nicht signifikant von *CTF nicht befahren*, welches auch in derselben Signifikanzgruppe wie *CTF mittel befahren* und *Direktsaat zufällig befahren* lag.

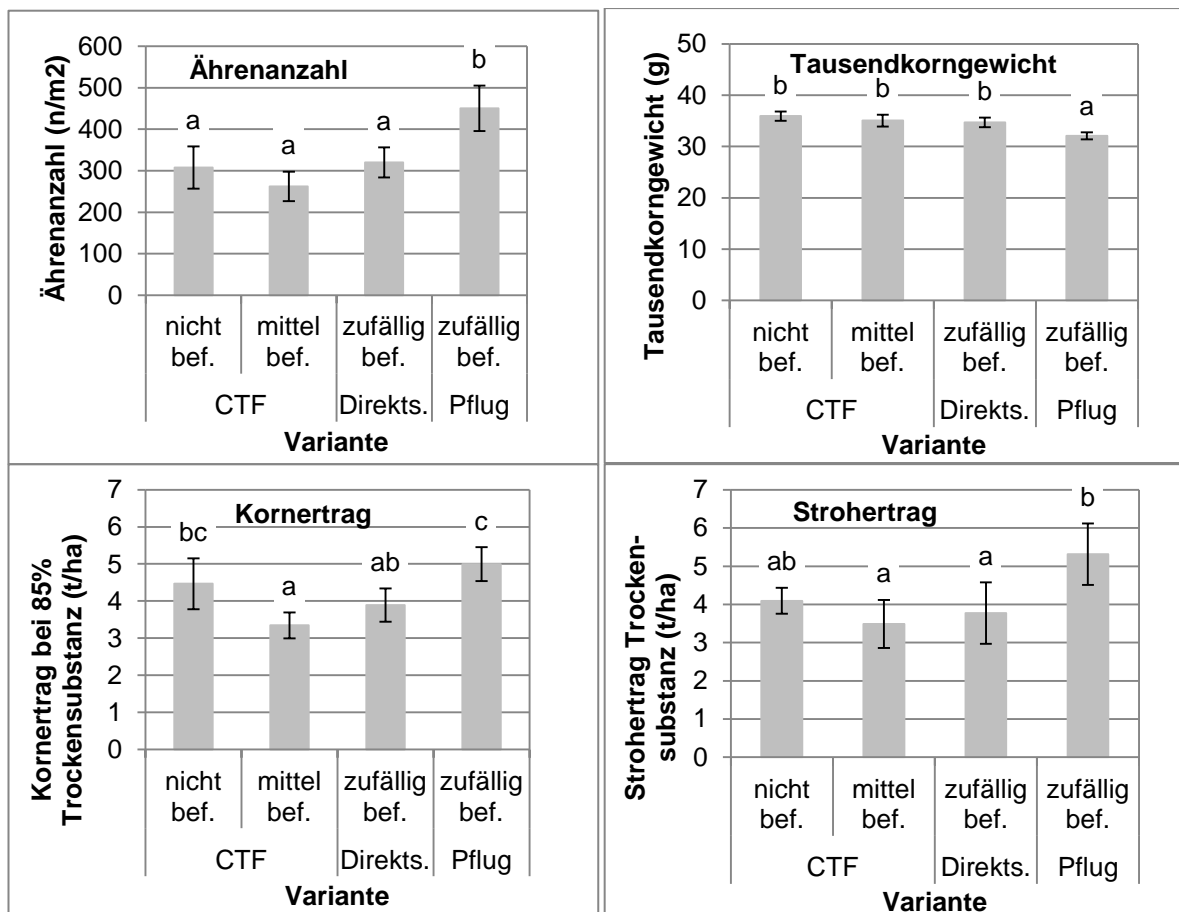


Abb. 41: Ernteparameter der Wintergerste 2010.

Die Ernteerträge der Kunstwiese sind in Abb. 42 dargestellt. Die erste Ernte lieferte den höchsten Ertrag, gefolgt von der dritten, zweiten und vierten. *CTF intensiv befahren* hatte immer den niedrigsten, *Pflug zufällig befahren* den höchsten Ertrag. *CTF nicht befahren* lag in der ersten Ernte gleichauf mit *Pflug zufällig befahren*. In der zweiten und dritten Ernte bewegte sich *CTF nicht befahren* auf einem Niveau mit *CTF mittel befahren* und *Direktsaat zufällig befahren*. In der vierten Ernte war *CTF nicht befahren* signifikant tiefer als *Direktsaat zufällig befahren* und *Pflug zufällig befahren*.

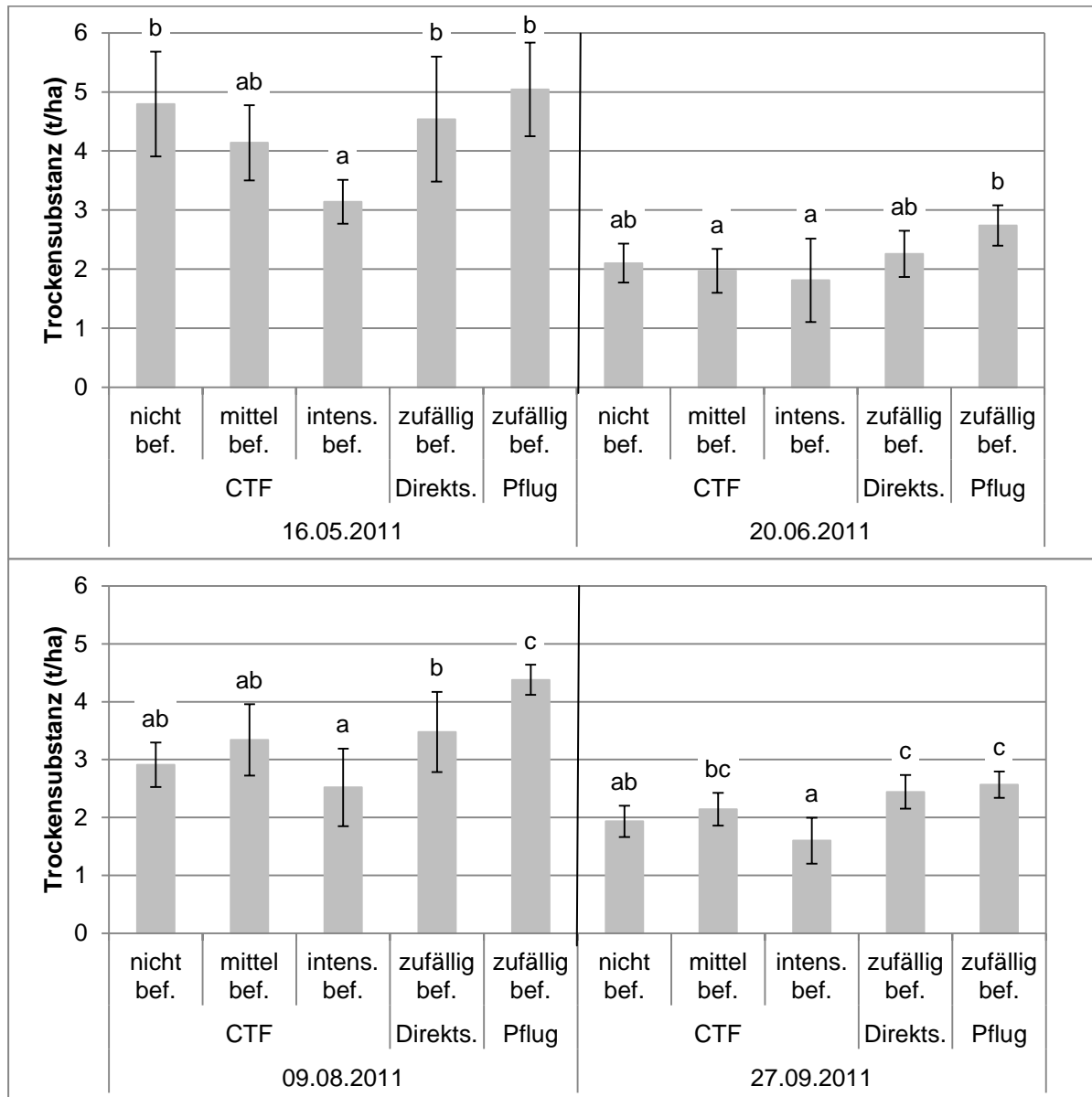


Abb. 42: Biomasseerträge (Trockenmasse) der Kunstwiese 2011.

4.2.15 Zusammenhang Vegetationsindex und Ernte

Der Zusammenhang zwischen den NDVI-Messungen und Ernteerträgen ist in Abb. 43 dargestellt. Bei der Wintergerste wurden wie bei der Kunstwiese die Biomasseerträge verwendet. Das Bestimmtheitsmass liegt zwischen etwa 0.5 und 0.74. Der Rückgang des Bestimmtheitsmasses zwischen der ersten und zweiten NDVI-Messung bei der Wintergerste ist wieder auf die beginnende Getreideabreife zurückzuführen.

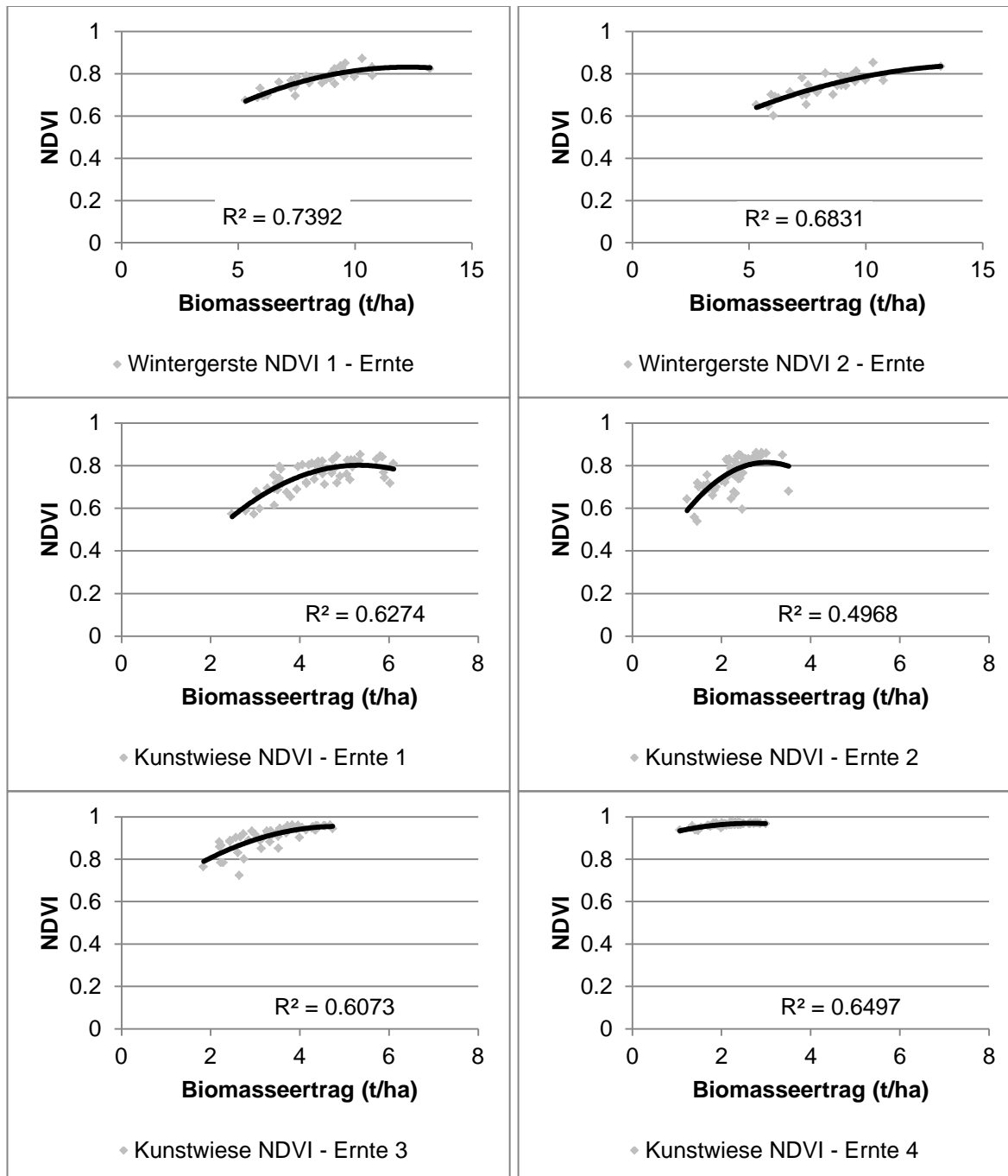


Abb. 43: Beziehung zwischen NDVI-Messungen und Ernteerträgen dargestellt als Scatterplot.

4.2.16 Zusammenhang Ernteerträge, Bodenparameter und Witterungsverlauf

Zur genaueren Untersuchung der Zusammenhänge zwischen Ernteerträgen, Bodenparametern und Witterung wurden für Wintergerste 2010 und Kunstwiese 2011 die Korrelationen zwischen Biomasseerträgen, Deformation, Penetrometrie, Porometrie, Saugspannung, volumetrischem Bodenwassergehalt, Bodenluft, Tagesmitteltemperatur und Niederschlagssummen berechnet und Regressionsfunktionen erstellt.

Die Beobachtungszeiträume gingen bei Wintergerste und erster Kunstwiesenernte vom Beginn der Luftmessungen ab dem Einsetzen der Vegetation nach der Winterpause im März bis zur Ernte; bei der zweiten bis vierten Kunstwiesenernte waren es die Zeiträume zwischen den Ernten. Für alle Parameter wurden Mittelwerte verwendet, für den Niederschlag Summen gebildet.

In einem ersten Schritt wurden die Varianten *CTF nicht befahren* und *CTF mittel befahren* auf Basis der Werte der Blöcke 1-3 untersucht. Ausgewählte Korrelationen sind in Abb. 44 dargestellt. Eindringwiderstand (10-15cm Tiefe), Tagesmitteltemperatur und Niederschlag korrelieren am stärksten. Im Regressionsmodell trug die Penetrometrie nicht zu einer besseren Erklärung der Variabilität bei und es verblieben Tagesmitteltemperatur und Niederschlag, die mit einem $R^2 > 0.9$ den Biomasseertrag erklären (Tab. 16). Mit Tagesmitteltemperatur, Bodensauerstoff, Saugspannung und volumetrischem Wassergehalt aufgebaute Modelle erklärten den Ertrag ähnlich – sobald aber die Niederschlagssummen einbezogen wurden, trugen die anderen Parameter nicht mehr signifikant zur Verbesserung des Modells bei.

Tab. 16: Regressionsmodell für den Biomasseertrag von *CTF nicht befahren* und *CTF mittel befahren* der Kulturen Wintergerste und Kunstwiese.

Regressionsfunktion	R^2
$\log(\text{Biomasseertrag}) = 2.29 - 0.11 \cdot \text{Tagesmitteltemperatur} + 0.003 \cdot \text{Niederschlag}$	0.92

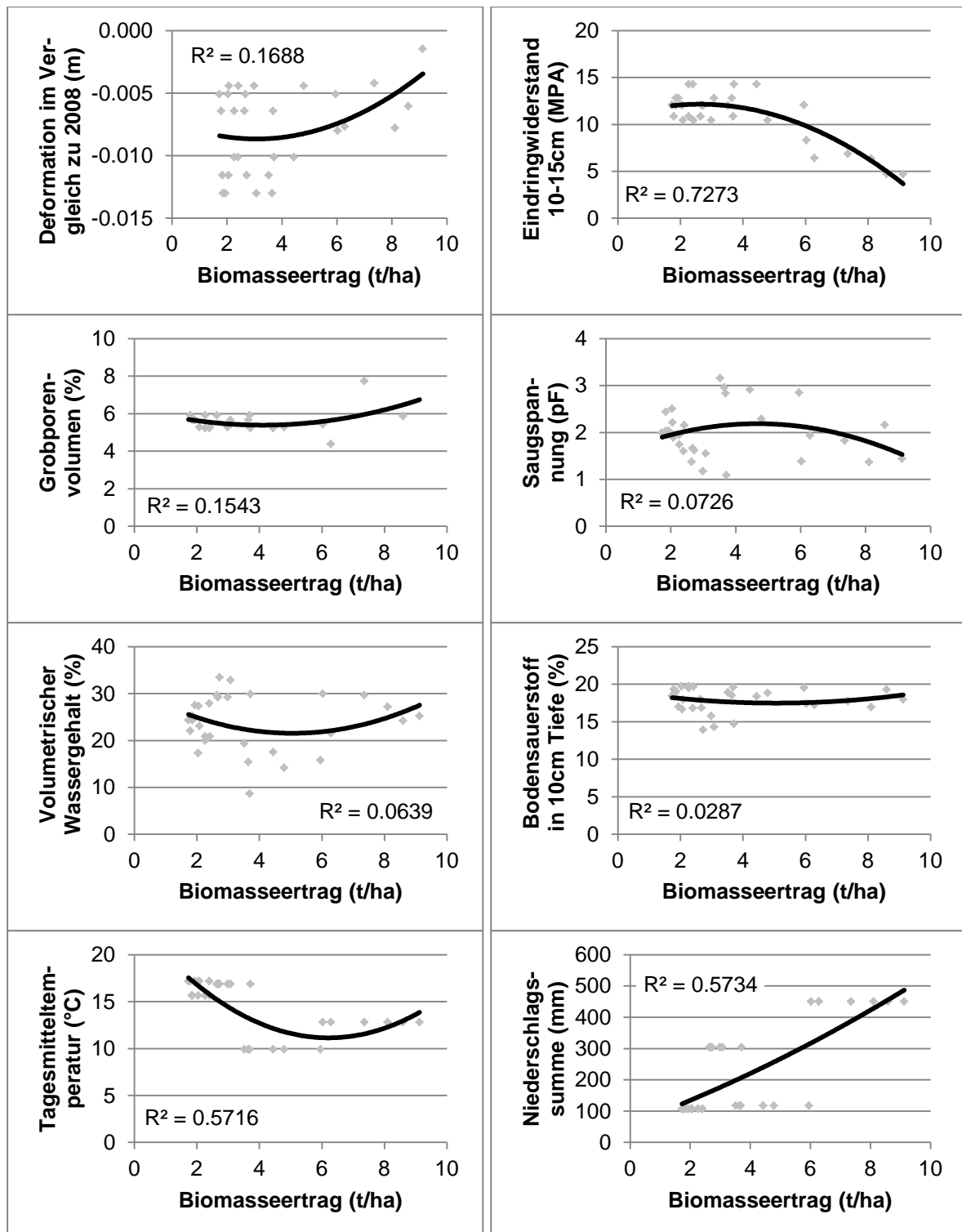


Abb. 44: Korrelation der Biomasseerträge in *CTF nicht befahren* und *CTF mittel befahren* in den Blöcken I, II und III mit Bodenparametern und Witterungsverlauf.

In einem zweiten Schritt wurden die Korrelationen der für alle Varianten und Blöcke verfügbaren Parameter untersucht; Saugspannung, volumetrischer Wassergehalt und Bodenluft wurden also nicht miteinbezogen. Ausgewählte Korrelationen sind in Abb. 45 dargestellt. Der Eindringwiderstand (10-15cm Tiefe) korreliert kaum, die Tagesmitteltemperatur mittel und der Niederschlag hoch. Testweise wurde das für die Blöcke II und III verfügbare Grobporenvolumen hinzugefügt – es korreliert ebenfalls hoch. Im Regressionsmodell dominieren wie zuvor Tagesmitteltemperatur und Niederschlag, sie erklären den Ertrag mit einem R^2 von knapp 0.8 (Tab. 17). Ein Hinzunehmen des Eindringwiderstandes oder des Grobporenvolumens führt zu einer Steigerung auf bis zu 0.84, wobei das Modell mit dem Eindringwiderstand besser angepasst ist.

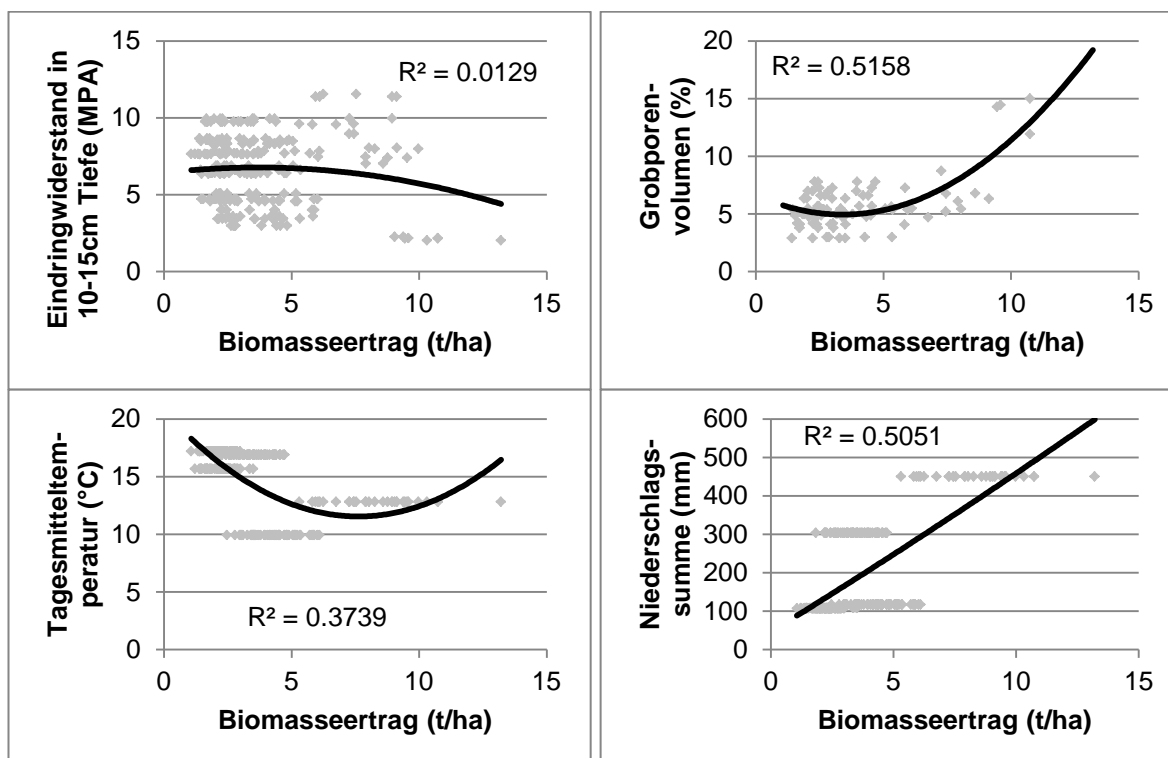


Abb. 45: Korrelation der Biomasseerträge mit Bodenparametern und Witterungsverlauf für alle Varianten. Niederschlag, Grobporenvolumen und Tagesmitteltemperatur korrelieren am stärksten, Penetrometrie kaum.

Tab. 17: Regressionsmodell für den Biomasseertrag für alle Varianten

Regressionsfunktion	R^2
$\log(\text{Biomasseertrag}) = 2.14 - 0.1 \cdot \text{Tagesmitteltemperatur} + 0.003 \cdot \text{Niederschlag}$	0.79
$\log(\text{Biomasseertrag}) = 2.4 - 0.1 \cdot \text{Tagesmitteltemperatur} + 0.003 \cdot \text{Niederschlag} - 0.04 \cdot \text{Eindringwiderstand (Tiefe 10-15cm)}$	0.83
$\log(\text{Biomasseertrag}) = 1.77 - 0.09 \cdot \text{Tagesmitteltemperatur} + 0.02 \cdot \text{Niederschlag} + 0.05 \cdot \text{Grobporenvolumen}$	0.85

4.2.17 Spatenprobe und Blaufärbung

Im Juni 2010 in der Wintergerste entnommene Spatenproben zeigten bei der *Direktsaat* qualitativ gesehen eine ausgeprägtere Ausbildung von Krümelstrukturen als bei *CTF*, die einen kompakteren Anschein hinterliess (Abb. 46). Generell war der Boden in allen Varianten in einem guten bis zufriedenstellenden Zustand, es lagen keine ausgeprägten Schadverdichtungen vor. Die Bodenstruktur ist generell als kompakt zu bezeichnen. Die Bodenstruktur der *Direktsaat* wies eine klar kleinkrümeligere und bessere Ausprägung aus als diejenige von *CTF nicht befahren*. Es waren keine Verdichtungshorizonte vorgängiger Bodenbearbeitung sichtbar. Die *CTF*-Flächen waren noch nicht so weit entwickelt.

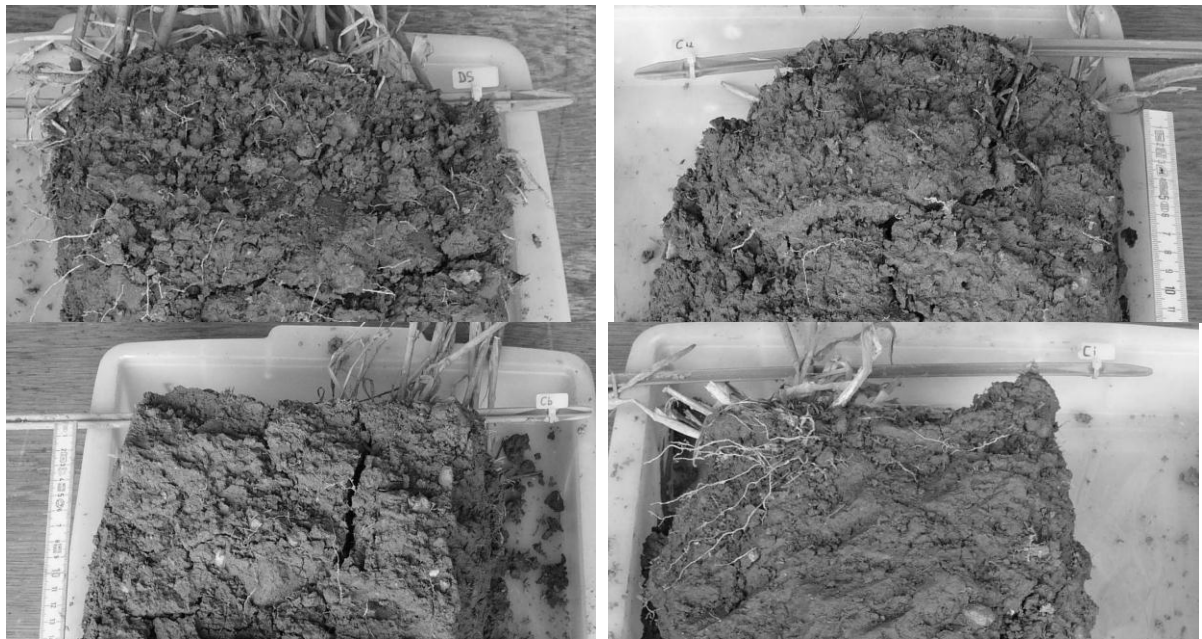


Abb. 46: Links oben *Direktsaat*: Durchgehend krümelige Bodenstruktur mit hohem Feinwurzelanteil. Keine Bodenverdichtungen erkennbar. Rechts oben *CTF unbefahren*: Keine Verdichtungen in den oberen 5cm. Links unten *CTF mittel befahren*: Verdichtungen in den oberen Zentimetern. Rechts unten *CTF intensiv befahren*: Der Boden ist relativ kompakt.

Die im Herbst 2011 unter Kunstwiese in Block II in den *CTF-Varianten* durchgeführte Blaufärbung visualisiert die Auswirkungen unterschiedlicher Befahrungsintensitäten (Abb. 47). In *CTF intensiv befahren* dringt nur in sehr geringem Umfang Wasser ein, in *CTF nicht befahren* bis zu einer Tiefe von 20cm intensiv, bis zu 40cm mittel. *CTF mittel befahren* zeigt ein ähnliches Verhalten und ist erst auf den zweiten Blick von *CTF nicht befahren* zu unterscheiden. Da es sich um eine stichprobenartige Erhebung handelte, ist die Aussagekraft beschränkt.

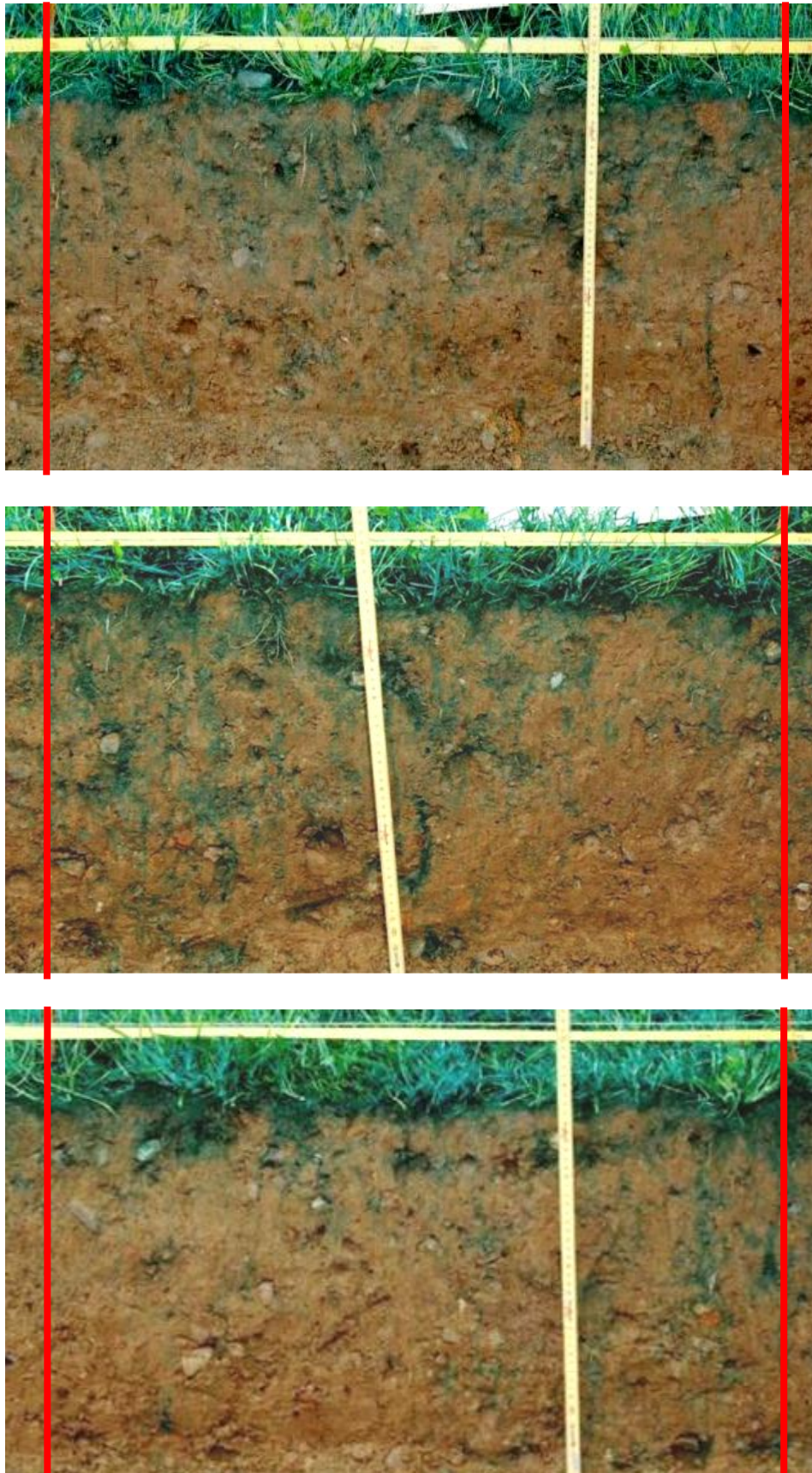


Abb. 47: Blaufärbung unter Kunstwiese im Herbst 2011. Oben CTF nicht befahren (Cn), Mitte CTF mittel befahren (Cm), unten CTF intensiv befahren (Ci).

4.3 Diskussion

4.3.1 Bodendeformation, Penetrometrie und Porometrie

Die **Deformationsmessung** (4.2.1) mit Tachymeter hatte zum Ziel, die Bodensetzung und Spurausprägung zu quantifizieren. Bei *CTF intensiv befahren*, im Bereich der Fahrgassen, traten keine ausgeprägten, tiefen Spuren auf. Dies kann auf die bewusst tief gehaltenen Reifendrucke und den gut abgesetzten Boden unter Direktsaat zurückgeführt werden. Im Gegensatz dazu konnte auch keine Bodenhebung bei *CTF nicht befahren* durch die Lockerungswirkung der natürlichen Bodenbildungsprozesse beobachtet werden.

Die 2011 in den Varianten *CTF nicht befahren* und *CTF mittel befahren* zurückgegangenen Deformation könnte auf die im Vergleich zu Getreide stärkere Durchwurzelung der Kunstwiese zwischen den Säreihen und damit verbunden einer eventuell höheren Ungenauigkeit bei der Deformationsmessung zurückzuführen sein.

Der mässige Einfluss der Deformation auf die Regressionsmodelle mit Porometrie und Penetrometrie könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Deformation im Gegensatz zu den anderen Parametern an der Bodenoberfläche gemessen wurde. Die Wirkung der Deformation ist nicht nur vertikal gerichtet und Auswirkungen können nicht eindeutig mit zwischen 10-15cm bzw. 10-16cm Tiefe gemessenen Parametern in Zusammenhang gebracht werden.

Die praktischen Erfahrungen und diese Messungen zeigten, dass befürchtete tiefe Fahrspuren verursacht durch die immer wiederkehrende Befahrung auf denselben Spuren nicht auftraten. Die Fahrspuren verhielten sich sehr ähnlich, wie dies von der Direktsaat her oder der Bewirtschaftung von Naturwiesen her bekannt ist, wo diese in der Regel nicht ausgeprägt sind. Bei Befahrung unter nicht zu hohen Bodenfeuchten und Absenken des Reifendruckes ist zu erwarten, dass auch in der breiteren Praxis keine tiefen Fahrspuren auftreten. Dass in der Literatur zu diesem Thema kaum Hinweise zu finden sind, könnte ebenfalls ein Hinweis sein, dass CTF diesbezüglich nicht zu Problemen führen sollte.

Die **Penetrometrie**-Eindringwiderstände (4.2.2) differenzierten über die Jahre und bilden die Intensität der Bodenlockerung und Befahrungsintensitäten ab. *Pflug zufällig befahren* wies die tiefsten, *CTF intensiv befahren* nach Kunstwiese 2011 die höchsten Eindringwiderstände auf.

Diese Entwicklung der CTF-Werte wird aus verschiedenen Versuchen und Ländern bestätigt (Chamen 2006b). Die sehr hohen Eindringwiderstände in *CTF intensiv befahren* bestätigen Beobachtungen, dass Fahrspuren mit der Zeit tragfähiger werden (Tullberg 2000a). Sie bedeuten aber auch, dass trotz niedriger Kontaktflächendrücke der Eindringwiderstand der Böden erhöht wurde. Im Vergleich der Jahre hatte *CTF intensiv befahren* 2011 den höchsten Abstand von *CTF mittel befahren*. Dies deutet darauf hin, dass es während der Kunstwiesenbewirtschaftung zu stärkeren Verdichtungen als in den Vorjahren kam. Dies ist vermutlich vor allem auf die durch vier Ernten im Vergleich zur Getreideernte etwa um Faktor 4 höhere Befahrungshäufigkeit und die generell feuchteren Einsatzbedingungen zurückzuführen. Bei den Kunstwiesenernten lag der volumetrische Wassergehalt in den Tiefen 10 und 20cm zwischen 19-35%. Im Mittel waren die Werte etwa 9% höher als bei der Getreideernte 2010.

Die Penetrometrie zeigte auf, dass Überfahren den Eindringwiderstand statistisch signifikant erhöht und somit davon ausgegangen werden kann, dass Pflanzenwurzeln in unbefahrenen Böden einem kleineren Widerstand ausgesetzt sind.

Die verschiedenen **Porometrieparameter** (4.2.3) zeigen die Entwicklung der Varianten weniger ausgeprägt als der Eindringwiderstand. Das **Grobporenvolumen** ist auf einem ähnlichen niedrigen Niveau wie in anderen Versuchen (Bischoff & Hofmann 2007; Stahl et al. 2009). Die stark das Grob- und Gesamtporenvolumen beeinflussende **Lagerungsdichte** zeigt mit bis zu 1.5g/cm^3 hohe Werte, die aber auch in anderen Versuchen gemessen wurden (Linke 1998). Im Vorgängerversuch 2000 und 2001 wurden unter Direktsaat leicht höhere Lagerungsdichten von 1.51 und 1.54g/cm^3 gemessen, interessanterweise lag auch das Grobporenvolumen mit 6.4 und 6.8% etwas höher (Anken 2003).

Ein Blick auf die in den Varianten *Pflug* und *Direktsaat* von 2000 bis 2008 durchgehend zum Teil mehrmals jährlich erhobenen Parameter Grobporenvolumen und Luftpermeabilität zeigen, dass die Werte im Zeitverlauf beträchtlich variierten. Das zweite und dritte Quartil der Grobporenvolumenwerte in $10\text{-}16\text{cm}$ Tiefe lag zwischen $5\text{-}7\%$; die Lagerungsdichte zwischen $1.52\text{-}1.55\text{g/cm}^3$ (Abb. 21). Die beobachtete Tendenz 2009-2011 von in allen Varianten sinkenden Werten wird durch die Zeitreihenwerte 2000-2008 relativiert. Vermutlich als Kombieffekt von angebaute Kultur, damit verbundenen variierenden Befahrungintensitäten und Witterungsverlauf können Werte über einige Jahre sinken, dann aber auch wieder steigen. Ein Teil des beobachteten Effektes könnte allerdings auch auf die Tatsachen zurückzuführen sein, dass einerseits mit den kleinräumigen Erhebungszonen in nur zwei Wiederholungen die räumliche Variabilität des Feldes nicht adäquat berücksichtigt werden konnte und andererseits aufgrund der bis 2008 praktizierten zufälligen Befahrung aller Parzellen nicht kontrolliert werden konnte, ob die Erhebungszonen Überrollungen ausgesetzt waren oder nicht. Die insgesamt nur kleinen beprobten Flächen sind ein Hauptnachteil der in Probenahme, -aufarbeitung und -auswertung sehr zeitaufwändigen Porometrie. Es fehlt an nicht destruktiven Methoden zur Erhebung von Porometrieparametern auf grösseren Flächen, mit denen die räumlichen Streuungen und die zeitliche Entwicklung der Bodenstruktur unter verschiedenen Bearbeitungs- und Befahrungssystemen besser verfolgt werden könnten.

Ein Grobporenvolumen kleiner 10% wird vielfach als kritisch angesehen (Cramer 2006). In der Schweiz gelten 7% als Richtwert und 5% als Minimalwert (Buchter & Häusler 2009). Mit 5% und weniger liegt das Grobporenvolumen in einem kritischen Bereich (Cramer 2006; Linke 1998; Weisskopf et al. 2005; Weyer 2007). Gemäss Literatur würden die in Deutschland in der Krumbasis unterhalb der Bearbeitungstiefe üblichen Grobporenvolumen kleiner 5% in der pflanzenbaulichen Praxis aber nicht als beeinträchtigend wahrgenommen (Brandhuber 2007). Die Bodenbearbeitung der Krume kompensiert in der Regel die Krumbasisverdichtungen bis zu einem bestimmten Grad. Auch wenn Böden mit hoher Lagerungsdichte und damit geringerem Porenvolumen nicht unbedingt in ihrer Funktion limitiert sein müssen (Anken et al. 2004), so stagnierten doch verdichtete Direktsaatböden mit niedrigem Grobporenvolumen auf einem niedrigen Niveau (Weisskopf et al. 2010). Zusammenfassend wäre der vorliegende Standort unter Direktsaat sowohl mit zufälliger als auch kontrollierter Befahrung als verdichtet bzw. schadverdichtet einzustufen, so dass er sich, wenn überhaupt, nur über einen langen Zeitraum substanziell erholen könnte.

Es stellt sich die Frage, in welchem Masse das Weglassen jeglicher Befahrung die Bodenstruktur beeinflusst. Es zeigt sich ein recht konsistentes Bild: Penetrometerwerte, Grobporenvolumen, Lagerungsdichte, Luftpermeabilität zeigen in *CTF unbefahren* tendenziell bis statistisch signifikant bessere Werte als in *CTF mittel befahren* und *CTF intensiv befahren*. Die Unterschiede sind allerdings bei den meisten Parametern nicht ausgeprägt. Generell zeigt die langjährige *Direktsaat zufällig befahren* recht gute Werte, die auch durch *CTF nicht befahren* nur zum Teil übertroffen werden. Über die Jahre gesehen liessen sich zwischen den Varianten *CTF nicht befahren* und *CTF mittel befahren* keine ausgeprägten Unterschiede erheben.

4.3.2 Saugspannung, volumetrischer Bodenwassergehalt, Bodenluft

Die Verfahren unterschieden sich bezüglich **Saugspannung** (4.2.5) und **volumetrischem Wassergehalt** (4.2.6) nur während ausgeprägter Trockenperioden signifikant voneinander. Die Werte von *CTF nicht befahren* waren aber nur um wenige Prozent höher; die Unterschiede spiegelten sich nicht in den korrespondierenden Saugspannungsklassen $>2\text{pF}$ wider. Es sind keine pflanzenbaulich relevanten Auswirkungen zu erwarten, da die Saugspannungswerte nur selten im Bereich des Permanenten Welkepunktes von $\text{pF } 4.2$ (Scheffer & Schachtschabel 2002) zu liegen kamen. Insgesamt reagieren die Varianten ähnlich. Die zum Teil hohen Standardabweichungen lassen sich vermutlich auf kleinräumige Unterschiede in der Bodenstruktur zurückführen.

Der Parameter **Bodenluft** (4.2.7) reagiert eindeutig auf die unterschiedliche Befahrung der Varianten. *CTF nicht befahren* wies unter feuchten Bodenbedingungen höhere O_2 -Gehalte als *CTF mittel befahren*. Umgekehrt sind die CO_2 -Gehalte in *CTF mittel befahren* generell höher als in *CTF nicht befahren*.

Nach Literatur liegen optimale CO_2 -Konzentration in der Bodenluft bei 1-2%, ab 4-5% kann es zu erheblichen Beeinträchtigungen des Gesamtwachstums kommen. Sauerstoffkonzentrationen bis 15% bieten für ackerbauliche Kulturpflanzen eine ausreichende O_2 -Versorgung, ab 10% ist mit einer Verlangsamung des Pflanzenwachstums zu rechnen und ab 4-6% herrscht O_2 -Mangel (Geisler 1978; Scheffer & Schachtschabel 2002).

In der für Keimung und Feldaufgang wichtigen Tiefe von 10cm lag nur jede zehnte Messung unter *CTF nicht befahren* im Bereich 10-15% O_2 und keine darunter. In *CTF mittel befahren* hingegen lag jede vierte Messung im Bereich $<15\%$ O_2 . Von der O_2 -Versorgung her dürften in *CTF nicht befahren* also nur selten kritische Situationen entstehen. Hinsichtlich der CO_2 -Konzentrationen liegen bei *CTF nicht befahren* 60%, in *CTF mittel befahren* nur gut 30% der Messungen im optimalen Bereich. Je nach zeitlichem Auftreten der suboptimalen Bodenluftkonzentrationen könnte es in beiden Varianten zu einem mehr oder weniger ausgeprägten negativen Einfluss auf die Pflanzenentwicklung kommen. Die gemessenen hohen CO_2 -Konzentrationen decken sich mit anderen Messungen (Elsässer et al. 1999).

O_2 - und CO_2 -Gehalt lassen sich mittels linearer Regression durch die Einflussgrößen volumetrischer Wassergehalt, Saugspannung, Grobporenvolumen und Penetrometrie nur zu etwa 50% und 60% erklären (Tab. 15). Die Einflussgrößen sind dabei teilweise redundant, volumetrischer Wassergehalt und Saugspannung sowie Grobporenvolumen

und Penetrometrie lassen sich jeweils gegeneinander austauschen. Die relativ hohe Restvariabilität lässt sich vermutlich auf die örtlich unterschiedlichen Beprobungsorte sowie bodenbiologische Vorgänge zurückführen.

Da nur in den Varianten *CTF nicht befahren* und *CTF mittel befahren* die Parameter Saugspannung, volumetrischer Wassergehalt und Bodenluft untersucht wurden, gibt es keine Informationen zu den Verhältnissen in der Pflugvariante. In einem Vorgängerversuch 2006 auf derselben Fläche wurde Mais von der Aussaat bis zum 6-Blatt-Stadium beobachtet und in den Varianten Direktsaat, Pflug und flache Bearbeitung (8cm Tiefe) Saugspannung und Bodenluft untersucht. Bei nassen Bedingungen wurden unter Direktsaat 5-8% tiefere O₂- und 2.5-4% höhere CO₂-Konzentrationen in der Bodenluft als bei Verfahren mit Bodenbearbeitung festgestellt. Bei trockenen Bedingungen verhielten sich alle Varianten ähnlich. (Boller 2006). Angesichts ähnlicher Bodenstrukturparameter von *Direktsaat zufällig befahren* und *CTF mittel befahren* im jetzigen Versuch könnte davon ausgegangen werden, dass die beiden Varianten ähnliche Bodenluftwerte aufweisen. Verglichen dazu hätte *CTF nicht befahren* eine deutlich bessere Bodenluftcharakteristik entwickelt. Dieser Unterschied könnte auf die Auswirkungen der Befahrungen zurückzuführen sein, die trotz angestrebt niedriger Kontaktflächendrücke den Boden verdichtet und den Gasaustausch erschwert haben. Nach Berechnungen mit TASC wies der Mädescher mit 15t Vorderachslast mit 1bar Reifeninnendruck den höchsten Kontaktflächendruck aller eingesetzten Maschinen auf, der bei nicht sehr trockenen Bodenverhältnissen Verdichtungen induzieren kann. Bereits diese eine Überfahrt pro Jahr könnte den Effekt hervorgerufen haben. Dies zeigt, dass Befahrungen mit schweren Maschinen, die in der Praxis häufig Kontaktflächendrücke über 2 bar aufweisen, einen negativen Effekt auf die Bodenstruktur ausüben. Diese Effekte müssen in der Regel durch Bodenbearbeitung korrigiert werden.

Aus den für *CTF nicht befahren* und *CTF mittel befahren* durchgeführten Luftmessungen kann in Kombination mit den Grössen Grobporenvolumen und Eindringwiderstand auch schlussgefolgert werden, dass unter *CTF intensiv befahren* der Lufthaushalt im ungünstigen Bereich liegen muss.

4.3.3 Bodenbiologische Aktivität

Die über die zwei Tiefen einheitlichen Werte der biologischen Aktivität (4.2.10) von *Pflug zufällig befahren* sind durch den Mischeffekt der Bodenbearbeitung zu erklären. Die hohe Standardabweichung von *Direktsaat zufällig befahren* bei der mikrobiellen Biomasse in der Tiefe 0-10cm liegt an den Bodenunterschieden zwischen den Blöcken, die ebenfalls bei einigen Porometriewerten zu beobachten sind. In einem seit 1966 laufenden sächsischen Anbausystemvergleich wurden für Pflug rund 200mg C/kgS und unter Grubber gut 400mg C/kgS erhoben (Hofmann et al. 2003). In Baden-Württemberg wurden unter Pflug 280mg C/kgS, unter Mulchsaat 480mg C/kgS und unter Direktsaat 450mg C/kgS gefunden (Flaig 2008). In einer Gesamtschweizer Erhebung 2004/05 wurden unter Ackerland im Mittel von 32 Proben SIR-Werte von 525 mg C/kgS mit einer Spannweite von 300-1300 mg C/kgS gemessen (Oberholzer & Scheid 2007). Im Versuch liegen die Werte von *CTF* und *Direktsaat* etwas über, *Pflug* etwas unter den durchschnittlichen Erhebungswerten der Literatur. Die Versuchswerte FEC, FEN und BA zeigen eine ähnliche Übereinstimmung mit den Erhebungswerten. Auch dass die bodenbiologischen Parameter der *CTF-Varianten* bereits

direkt nach der Umstellung von flacher Bearbeitung auf Direktsaat auf demselben Niveau wie die langjährigen *Direktsaat*-Parzellen liegen, stimmt mit Erfahrungen überein, dass nichtwendend und nicht bearbeitete Böden in der Regel eine höher biologische Aktivität als bearbeitete haben (Linke 1998). Nach drei Versuchsjahren unterschieden sich *Direktsaat zufällig befahren*, *CTF nicht*, *mittel* und *intensiv befahren* in keinem bodenbiologischen Parameter signifikant. Die unterschiedliche Befahrung zeigte keine Auswirkung. Dies passt zu den Ergebnissen verschiedener Verdichtungsversuche, in denen oft keine, temporäre oder nicht signifikante Unterschiede gefunden wurden (Weisskopf et al. 2010). Dies traf sogar auf einen langjährigen Systemvergleich Pflug-Direktsaat zu, in dem keine Differenzen auftraten (Maurer-Troxler et al. 2005).

4.3.4 Feldaufgang, Zwischenernte, Vegetationsindex und Ernte

Der **Feldaufgang** (4.2.11) wird wesentlich von der Qualität des Saatbetts, der damit verbundenen Einbettung der Körner in den Boden, sowie von Bodenfeuchte und Temperatur beeinflusst. Bei Direktsaaten sind vor allem eine gute Krümelung des Säschlitzes ohne den Korn-Boden-Kontakt störendes Stroh und ein gutes Verschiessen des Schlitzes entscheidend. Wenn diese Voraussetzungen erfüllt sind, dann unterscheidet sich Direktsaat im Feldaufgang nicht von Anbauverfahren mit Bodenbearbeitung. Unter trockeneren Bedingungen sind Direktsaat-Feldaufgänge tendenziell höher, unter nassen Bedingungen mit Sauerstoffmangel kann das Keimwachstum aber beeinträchtigt sein. Bei schlechtem Bodenkontakt besteht die Gefahr, dass das Saatgut nur ankeimt und dann vertrocknet (Linke 1998).

Der bei Winterweizen 2008 im Vergleich zu *Pflug zufällig befahren* (75% Auflauftrate) geringere Feldaufgang der direkt gesäten Varianten (\emptyset 50% Auflauftrate) könnte darauf zurückzuführen sein, dass der Direktsaat-Säschlitz teilweise nicht ganz geschlossen war und die Körner suboptimal in den Boden eingebettet waren. Da die Niederschlagsmengen je einen Monat vor und nach der Aussaat im langjährigen Mittel lagen (Tab. 5), ist zu vermuten, dass die oberste Bodenschicht zum Aussaatzeitpunkt nicht die optimale Feuchte für eine gute Krümelung hatte. Ein negativer Einfluss des gehäckselten Erbsenstrohs kann ebenfalls nicht ausgeschlossen werden. Der im Vergleich zu *Direktsaat zufällig befahren* niedrigere Feldaufgang bei *CTF nicht befahren* und *CTF mittel befahren* könnte an den vor allem im ersten Jahr noch unterschiedlichen Bodeneigenschaften liegen.

Die sich bei Wintergerste 2009 zwischen den Varianten statistisch nicht signifikant unterscheidenden Feldaufgänge könnten primär auf zwei Ursachen zurückzuführen sein. Einerseits war in den direkt gesäten Varianten der Säschlitz krümeliger und besser geschlossen, das Saatgut somit besser eingebettet als im Vorjahr. Da die Sämaschinenstellungen nicht verändert worden waren, könnte dies auf vorteilhaftere Bodenbedingungen zum Aussaatzeitpunkt und eventuell einen geringeren Einfluss des gehäckselten Weizenstrohs zurückzuführen sein. Andererseits fielen einen Monat vor und nach der Aussaat nur etwa 2/3 der langjährigen mittleren Niederschlagsmenge. Die Auflaufraten von *CTF* und *Direktsaat* mit 58-64% und von *Pflug zufällig befahren* mit 68% sind verhältnismässig niedrig und deuten darauf hin, dass die niedrige Niederschlagsmenge eine limitierende Rolle gespielt haben könnte.

Ein nicht zu vernachlässigender Punkt in der Variante *Pflug zufällig befahren* ist die Rückverfestigung durch den Walzeffekt des Sättraktors. Vergleiche zwischen den Erhebungszonen des Feldaufgangs zeigten, dass die in der Reifenspur des Sättraktors liegenden Erhebungszonen einen etwa 10-15% höheren Feldaufgang hatten als die während der Saat nicht befahrenen. Eine Überfahrt mit einer Cambridgewalze nach der Aussaat hätte vermutlich zu ausgeglicheneren Ergebnissen geführt.

Die Literaturaussage, dass Direktsaat unter eher trockenen Bedingungen Vorteile gegenüber dem Pflug habe, bestätigte sich nicht. Einzelne Gründe hierfür liessen sich nicht eindeutig eruieren. Bei der Direktsaat könnten neben dem generellen Einfluss der Bodenstruktur am Versuchsstandort und damit verbunden der Qualität der Saatguteinbettung auch physikalische Effekte des gehäckselten Stroh, Strohabbauprodukte oder am Stroh anhaftende Pflanzenschutzmittelrückstände eine Rolle gespielt haben (Delabays & Mermillod 2002; Vosshenrich 2010; XiangJu et al. 2000).

In Vorgängerversuchen auf derselben Fläche wurden unter feuchten Bedingungen niedrigere Feldaufgänge beobachtet. 1999 und 2001 waren der Feldaufgang und die Jugendentwicklung von Mais unter Direktsaat wesentlich schlechter als unter Pflug. Als Ursache wurden primär die sehr hohen Niederschläge in der Zeit nach der Aussaat 1999 in Kombination mit einer hohen Lagerungsdichte, tiefem Grobporenvolumen und niedriger Luftleitfähigkeit vermutet (Anken 2003). 2006 mit Anfang Mai gesättem Mais hatte Direktsaat einen etwa 20% geringeren Feldaufgang als die Verfahren mit Bodenbearbeitung. Der Mai war geprägt durch hohe Niederschlagsmengen, der Juni durch tiefe Temperaturen (Boller 2006).

Bei der **Zwischenernte** (4.2.12) von Winterweizen 2008/09 waren die *CTF-Varianten* und *Direktsaat* weiterhin auf demselben Niveau; die unter den Auswinterungsschäden leidende *Pflugvariante* lag signifikant tiefer.

Die **NDVI-Messungen** (4.2.13) bis Ende Mai zeigten, dass *CTF* und *Direktsaat* sich weiterhin einheitlich entwickelten und die Unterschiede zu *Pflug* geringer wurden. Die Entwicklung der Varianten von der Zwischenernte bis zu den NDVI-Messungen ist konsistent. Weitergehende Aussagen zur Ertragsentwicklung sind aufgrund der durch Hagel ausgefallenen Ernte leider nicht möglich.

In der Wintergerste 2009/10 lagen alle Varianten auch in der Zwischenernte in derselben Signifikanzgruppe; es gab keine Auswinterungsschäden. Auch hier zeigt sich die Ausdifferenzierung der direkt gesäten Varianten einheitlich von der Zwischenernte über die NDVI-Messungen bis zur Ernte. Eine Überprüfung der Ertragserhebungszonen im *Pflug* zeigte, dass die Zonen in der Fahrspur des Sättraktors etwa 15% mehr Ertrag erzielten als in den Zonen ausserhalb der Fahrspur und die Rückverfestigung einen positiven Einfluss auf den Feldaufgang hatte. Die Ursachen des durch ein geringes Tausendkorngewicht (35g anstatt sortentypisch 50g) verursachten verhältnismässig niedrigen Ernteertrag aller Varianten liess sich nicht genau eruieren. Dies erstaunt umso mehr, als die Bestandesdichten mit 300-400 Pflanzen tief lagen und die Einzelpflanzen entsprechend versorgt gewesen sein müssten. Eine ungenügende Kornausbildung müsste durch schlechte Bedingungen nach der Blüte bedingt sein. Es konnten aber weder ein starker Krankheitsbefall noch andere limitierende Bedingungen festgestellt werden. Die

Aprilniederschläge waren niedrig, in den darauffolgenden Monaten aber eher hoch. Die Temperaturen lagen im üblichen Bereich.

Die Kunstwiese 2010 zeigte in *CTF* und *Direktsaat* im Gegensatz zu *Pflug* eine schlechte Bestandesetablierung. Die Feldaufgänge waren gering und heterogen, Gras entwickelte sich besser als Klee. Die Ursachen könnten im Bereich der Bodenfeuchte (zu trockener oberster Horizont, der nicht durchmischt wurde), bei den oben angeführten allelopathischen Wirkungen von Strohabbauprodukten, beim Säverfahren und der Konkurrenz durch Wintergerstendurchwuchs liegen. *Pflug* hingegen verzeichnete optimale Feldaufgänge. Eine Nachsaat aller Varianten mit dem pneumatischen Düngerstreuer und anschliessendem Striegeln Mitte März 2011 verbesserte den Bestand in *CTF* und *Direktsaat* etwas. Der Bestand unter *Pflug* entwickelte sich dichter und ausgeglichener. Die Erträge der ersten Ernte der CTF-Varianten und Direktsaat bestanden trotz vorgängiger Glyphosatbehandlung noch zu einem erheblichen Teil aus Wintergerstendurchwuchs; der Kunstwiesenertrag wurde dadurch verzerrt. Die zum Teil hohen Ertragsvariabilitäten lassen sich primär auf die ungleichmässige Bestandesentwicklung zurückführen.

In den **Ernten** (4.2.14) von Wintergerste 2010 und Kunstwiese 2011 begannen die Varianten zu differenzieren. *Direktsaat zufällig befahren* und *CTF nicht befahren* waren in der Regel in derselben Signifikanzgruppe. Hier könnte sich die bessere Bodenstruktur von *Direktsaat zufällig befahren* bemerkbar gemacht haben. Die negativen Auswirkungen von Befahrung zeigten sich in der Wintergerste zwischen *CTF nicht befahren* und *CTF mittel befahren* bzw. in der Kunstwiese zwischen *CTF nicht befahren* und *CTF intensiv befahren*. Die Erträge in befahrenen Zonen waren tiefer, wenn auch nicht durchgehend signifikant. Die Literatur bestätigt die Beobachtungen unter Gerste (Chamen 2009; Reintam et al. 2009) und Kunstwiese (Trunkmann et al. 2009; Würfel et al. 2002).

Mit Ausnahme von *CTF intensiv befahren*, das sich eindeutig schlechter entwickelte, war nach drei Versuchsjahren in Bezug auf den Ertrag keine der drei Varianten *Direktsaat zufällig befahren*, *CTF nicht befahren* und *CTF mittel befahren* einer anderen gesichert überlegen. Der *Pflug* zeigte jedoch eine klare Tendenz zu den besten Erträgen. Dies ist durch die starke Beeinflussung der Erträge durch den Witterungsverlauf und die zum Teil suboptimalen Bestände zu erklären. Ähnliche Erfahrungen wurden im Vorgängerfeldversuch 1999-2001 gemacht, als Direktsaat auf derselben Fläche signifikant tiefere Weizen- und Silomaiserträge als Pflug erzielte (Anken 2003). 2006 hingegen war Direktsaat zwar niedriger als Pflug, unterschied sich aber nicht signifikant (Boller 2006). Europäische CTF-Versuchsergebnisse zeigen für nicht befahrene Flächen einen Ertrag von 80-160% der befahrenen Flächen. Aus Australien, wo CTF hauptsächlich unter semiariden Bedingungen verbreitet ist, werden 100-190% berichtet (Chamen 2006). Die Ertragsvariabilität ist abhängig von Standort und Klima hoch und die erzielten Versuchsergebnisse sind nicht unüblich.

Die **Haupteinflussgrössen auf den Biomasseertrag** (4.2.16) von Wintergerste und Kunstwiese waren Tagesmitteltemperatur, Niederschlag und Eindringwiderstand bzw. Grobporenvolumen. Sie erklärten 85% der Variabilität des Ertrages. Da Niederschlag und Temperatur bei allen Verfahren konstant waren, zeigt sich der wichtige Einfluss des Eindringwiderstandes und Grobporenvolumens auf den Ertrag. Diesbezüglich weist der *Pflug* im Vergleich zu den anderen Verfahren bessere Voraussetzungen auf. Mit Blick auf

die Ernteergebnisse kann zusammengefasst gesagt werden, dass die kumulierten Bodenstrukturunterschiede eine Erklärung für den generellen Ertragsunterschied zwischen den Varianten geben und der Witterungsverlauf für die generelle Ertragshöhe. Der Einfluss der Witterung kann dabei höher sein als der der Bodenstruktur.

In der Literatur ist im Zusammenhang mit Befahrungsexperimenten in der Regel immer eine der beiden Einflussgrößen Grobporenvolumen und Eindringwiderstand zu finden. Auf nicht befahrenen Flächen sind das Grobporenvolumen oft höher und der Eindringwiderstand geringer (Chamen 2006b; Weisskopf et al. 2010). Aus Direktsaatversuchen ist auch der positive Zusammenhang zwischen Grobporenvolumen und Ertrag bekannt (Vulllioud et al. 2006; Weisskopf et al. 2005). Im vorliegenden Versuch reagierte der Eindringwiderstand bereits im ersten Jahr auf die unterlassene Befahrung und blieb bis zum Schluss niedriger als in den Vergleichsvarianten. Da sich Grobporenvolumen in unbearbeiteten Böden durch die natürliche Regenerationsfähigkeit in der Regel nicht kurzfristig sondern nur über lange Zeiträume hinweg erhöhen, war eine Zunahme innerhalb des Versuchszeitraums und damit eine Auswirkung auf den Ertrag eher unwahrscheinlich (Scheffer & Schachtschabel 2002).

Auch wenn Pflegefahrgassen wie *CTF intensiv befahren* nur in Ausnahmefällen wie Kunstwiese kultiviert und somit pflanzenbaulich relevant werden, so sind sie doch einer gesonderten Betrachtung wert. In Anbausystemen mit ganzflächiger Bodenbearbeitung werden die Pflegefahrgassen immer mit gelockert. Einerseits erfordert dies je nach Pflegebreite auf 5-7% der Fläche einen höheren Energieaufwand. Andererseits sind diese Stellen zwar gelockert, haben pflanzenbaulich aber nicht dieselbe Qualität wie zuvor nicht dermassen stark verdichteter Boden. Da sich Pflegefahrgassen von Jahr zu Jahr häufig verschieben, ist das Wachstum der Folgekulturen oft beeinträchtigt. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, begann die acker- und gemüsebauliche Praxis bereits mit der permanenten Fixierung von Pflegefahrgassen unter Nutzung von automatischen Lenksystemen (Möbius 2011; Rüegg et al. 2011).

4.3.5 Spatenprobe und Blaufärbung

Bei der Beurteilung der Spatenproben (4.2.17) ist zu berücksichtigen, dass es sich um qualitative Erhebungen mit einer Wiederholung handelt, die entsprechend vorsichtig zu interpretieren sind.

Die Proben machen deutlich, dass eine natürliche Verbesserung von Bodenstrukturen ein mehrjähriger Vorgang ist. Bis 1998 wurden alle Parzellen identisch mit dem *Pflug* bearbeitet. In den darauffolgenden 12 Jahren haben sich die Parzellen unter *Direktsaat* und *flacher Bearbeitung* stark differenziert entwickelt. *Direktsaat* zeigt heute die gewünschte krümelige Bodenstruktur ohne Verdichtungshorizonte, während die bis 2008 flach bearbeiteten *CTF*-Flächen noch in der Umstellungsphase sind, in der unter Umständen mit nachteiligen Effekten gerechnet werden muss (Chervet et al. 2005; Derpsch 2010; Linke 1998). Die im Vergleich zu Direktsaat schlechtere Struktur der vorgängig mit Scheibenegge, Grubber und Kreiselegge nicht über 10 cm tief bearbeiteten Flächen überraschte, konnte aber auf den Parzellen immer wieder beobachtet werden. Die intensive Einarbeitung der Bodenbedeckung und die Bearbeitung des obersten

Horizontes mit zapfwellengetriebenem Gerät wirken über einen längeren Zeitraum nachteilig auf die Bodenstruktur.

Die Blaufärbung (4.2.17) bestätigt die mit den Parametern Eindringwiderstand und Grobporenvolumen erhobenen Effekte. In *CTF intensiv befahren* mit hohem Eindringwiderstand und niedrigem Grobporenvolumen ist die Infiltration gering, in Zonen mit höherem Grobporenvolumen und niedrigerem Eindringwiderstand *CTF mittel befahren* und *CTF nicht befahren* mittel bis hoch.

Es ist zu vermuten, dass *CTF nicht befahren* im Laufe der fortschreitenden natürlichen Bodenregeneration ohne Befahrung eine andere, vorteilhaftere Charakteristik als die heutigen Direktsaatflächen mit zufälliger Befahrung entwickeln könnte.

4.4 Schlussfolgerung

CTF in Kombination mit niedrigen Kontaktflächendrücken führte zu keiner ausgeprägten Deformation der Bodenoberfläche, es wurde während der drei Versuchsjahre keine tiefe Fahrspur- bzw. Rinnenbildung beobachtet. Die bei der Umsetzung von CTF mit Standardspurweiten und –reifenbreiten neben den Pflegefahrgassen *CTF intensiv befahren* entstehenden Spuren *CTF mittel befahren* können regulär bewirtschaftet werden. Mit niedrigen Kontaktflächendrücken befahren, ist die Verdichtungsgefährdung gering.

Die Verringerung der Bodeneindringwiderstände in *CTF nicht befahren* war positiv zu werten. *CTF mittel befahren* kam zwischen *CTF nicht befahren* und *CTF intensiv befahren* auf einem ähnlichen Niveau wie *Direktsaat zufällig befahren* zu liegen.

Das Auslassen der Befahrung wirkte sich auch positiv auf Bodenluftparameter aus. In der für die Jugendentwicklung wichtigen Bodentiefe von 10cm waren die O₂- und CO₂-Werte unter *CTF nicht befahren* signifikant günstiger als unter *CTF mittel befahren*.

Die im Versuchsverlauf stark gestiegenen Eindringwiderstände in den Pflegefahrgassen *CTF intensiv befahren* zeigen hingegen die negativen Auswirkungen einer intensiven Befahrung deutlich auf.

Das Grobporenvolumen bewegte sich standortbedingt auf einem tiefen Niveau von 5%, das Weglassen der Befahrung bewirkte keinen messbaren Anstieg. Grobporenvolumen und Luftpermeabilität erreichten in den Pflegefahrgassen *CTF intensiv befahren* kritische Werte, was mit den Eindringwiderständen übereinstimmt.

Die Auswirkungen auf Saugspannung und volumetrischen Wassergehalt lagen in den beiden untersuchten Varianten *CTF nicht befahren* und *CTF mittel befahren* immer in einem pflanzenbaulich nicht relevanten Bereich. Die unbefahrenen Bereiche *CTF nicht befahren* zeigten während Trockenheiten eine leichte Tendenz zu höheren Bodenfeuchtewerten, was aber statistisch nicht gesichert war.

In beiden direkt gesäten Verfahren (*CTF* und *Direktsaat*) war die bodenbiologische Aktivität hoch. Es wurden keine auf die Befahrung zurückzuführenden signifikanten Unterschiede festgestellt.

Die agronomischen Ergebnisse während der Versuchsdauer waren oft weniger durch die Befahrung als durch andere Einflussfaktoren wie Stroh oder inhomogene Bestände geprägt. Im Feldversuch zeigten sich in der Regel geringe Unterschiede, diese aber mit einer Tendenz, dass sich Befahrungen negativ auf die Erträge auswirken.

Die unter *CTF nicht befahren* in wenigen Jahren erzielten positiven Auswirkungen auf Eindringwiderstand und Lufthaushalt bieten eine günstige Voraussetzung für die Entwicklung einer aus bodenkundlicher und pflanzenbaulicher Sicht nachhaltig vorteilhaften Bodenstruktur.

Die trotz niedriger Kontaktflächendrücke in *CTF intensiv befahren* beobachteten negativen Auswirkungen auf bodenkundliche und pflanzenbauliche Parameter legen nahe, dass Pflegefahrgassen nach Möglichkeit generell permanent über die Jahre hinweg zu fixieren sind. Mit einer wie im Versuch angepassten Bereifung und Befahrung können negative Auswirkungen auf die Bodenstruktur wie die Ausprägung von erosionsgefährdeten Fahrspuren und irreversible Unterbodenverdichtungen vermieden werden.

5 Messungen Lenksysteme

Die Auswirkungen automatischer Lenksysteme auf verfahrenstechnische, arbeitswirtschaftliche und ergonomische Parameter wurden in einem grösseren Feldversuch erhoben. Ziel war eine Erhebung unter möglichst praxisnahen Bedingungen im regulären Feldeinsatz.

5.1 Material und Methoden

5.1.1 Versuchsdesign

Bei Messungen arbeitswirtschaftlicher und physiologischer Parameter bei Arbeiten ohne/mit Lenksystem hat der Fahrer einen grossen Einfluss auf die Ergebnisse. Für eine aussagekräftige Erhebung müssen die Messungen mit einer ausreichenden Anzahl an Fahrern wiederholt werden. Vor Ort in Tänikon standen weder genügend Fahrer noch Flächen zur Verfügung. Daraufhin wurden die Untersuchungen in Kooperation mit der Technischen Fakultät der Tschechischen Universität für Lebenswissenschaften in Prag durchgeführt. Die Erhebungen bei Grundbodenbearbeitung, Saatbettbereitung und Aussaat fanden im Herbst 2010 und Frühjahr 2011 in verschiedenen tschechischen Regionen (Abb. 48) statt. Durch die Nutzung betriebseigener Lenksysteme und im Umgang damit geübten Fahrern konnten lernbedingte Einflüsse ausgeschlossen werden.

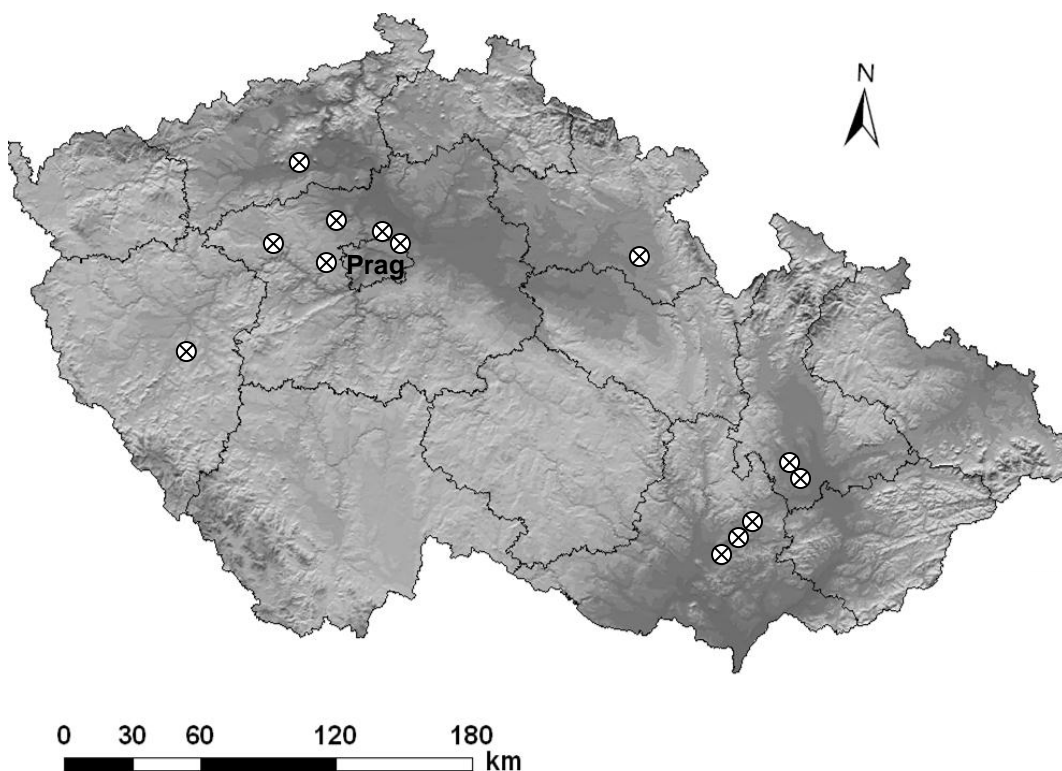


Abb. 48: Standorte der Messungen mit Lenksystemen in Tschechien.

Die bei der Grundbodenbearbeitung verwendeten Geräte hatten Arbeitsbreiten von 5-15m, bei der Saatbettbereitung 8m bei der Aussaat von 6-9m. Die Sämaschinen waren mit Spuranreißern ausgestattet, die Bodenbearbeitungsgeräte hatten keine zusätzlichen Markierer. Die Fahrer waren 20-60 Jahre alt (Tab. 18).

Tab. 18: Überblick über verwendete Traktoren, Geräte und Alter der Fahrer

¹ Traktorhersteller: JD = John Deere, CAT = Caterpillar;

² Arbeitsgang: G = Grundbodenbearbeitung, S = Saatbettbereitung, A = Aussaat

³ Fahrercode = Alter, Arbeitsgang, Arbeitsbreite (m)

⁴ Bei den Fahrercodes 34aS8 und 34bS8 handelt es sich um zwei Fahrer, die beide 34 Jahre alt sind.

Traktor Hersteller¹, Typ	Gerät Marke, Typ, Arbeitsbreite	Arbeitsgang²	Fahreralter	Fahrercode³
CASE Quad Track	Simba Xpress, 10m	G	20	20G10
Fendt 936	Horsch Terrano, 5m	G	26	26G5
CASE Quad Track	Horsch Tiger, 8m	G	31	31G8
CASE STX 450	Strom Swifter Combi, 15m	G	31	31G15
Challenger	Horsch Terrano, 5m	G	37	37G5
JD 8530	Strom Discland 6000, 6m	G	37	37G6
CASE Quad Track	Horsch Tiger, 8m	G	40	40G8
CASE Quad Track	Horsch Tiger, 8m	G	52	52G8
CASE Magnum 335	Horsch Terrano, 6m	G	60	60G6
JD 8220	Farmet Kompaktomat 8, 8m	S	34	34aS8 ⁴
JD 8220	Farmet Kompaktomat 8, 8m	S	34	34bS8 ⁴
CAT MT 765B	Horsch Phantom FG8, 8m	S	37	37S8
CASE 335	Great Plains, 6m	A	22	22A6
JD 8530	Great Plains NTA 907 HD, 9m	A	26	26A9
JD 8210	Lemken Solitär 10, 6m	A	29	29A6
JD 8210	Lemken Solitär 10, 6m	A	33	33A6
CASE 1170	Amazone EDX 6000-TC, 8m	A	34	34A8

Vom 11.-20.10.2010 wurden mit zehn verschiedenen Fahrern auf 15 Feldern Messungen durchgeführt. Vom 16.3.-19.4.2011 wurden mit sieben verschiedenen Fahrern Messungen auf sieben Feldern durchgeführt. Hauptsächlich wurden grössere Felder zwischen 10 und 80ha in Beete unterteilt und diese wechselweise ohne und mit Lenksystem bearbeitet. Daneben gab es in der Herbstkampagne auch mehrere kleinere Felder, die jeweils komplett ohne und mit Lenksystem bearbeitet wurden. Insgesamt wurden in der Auswertung 66 Parzellen mit Grössen von 1.2 bis 15.7ha berücksichtigt. Im Mittel waren es 5.7ha, der Median lag bei 4.9ha. Die gesamte Fläche betrug 373ha. Die Messungen fanden über den Tag verteilt von 07:00-00:00Uhr statt (Abb. 49). Es wurde keine automatische Geschwindigkeitsregelung (Tempomat) benutzt, die zu einer Beeinflussung der Ergebnisse hätte führen können.

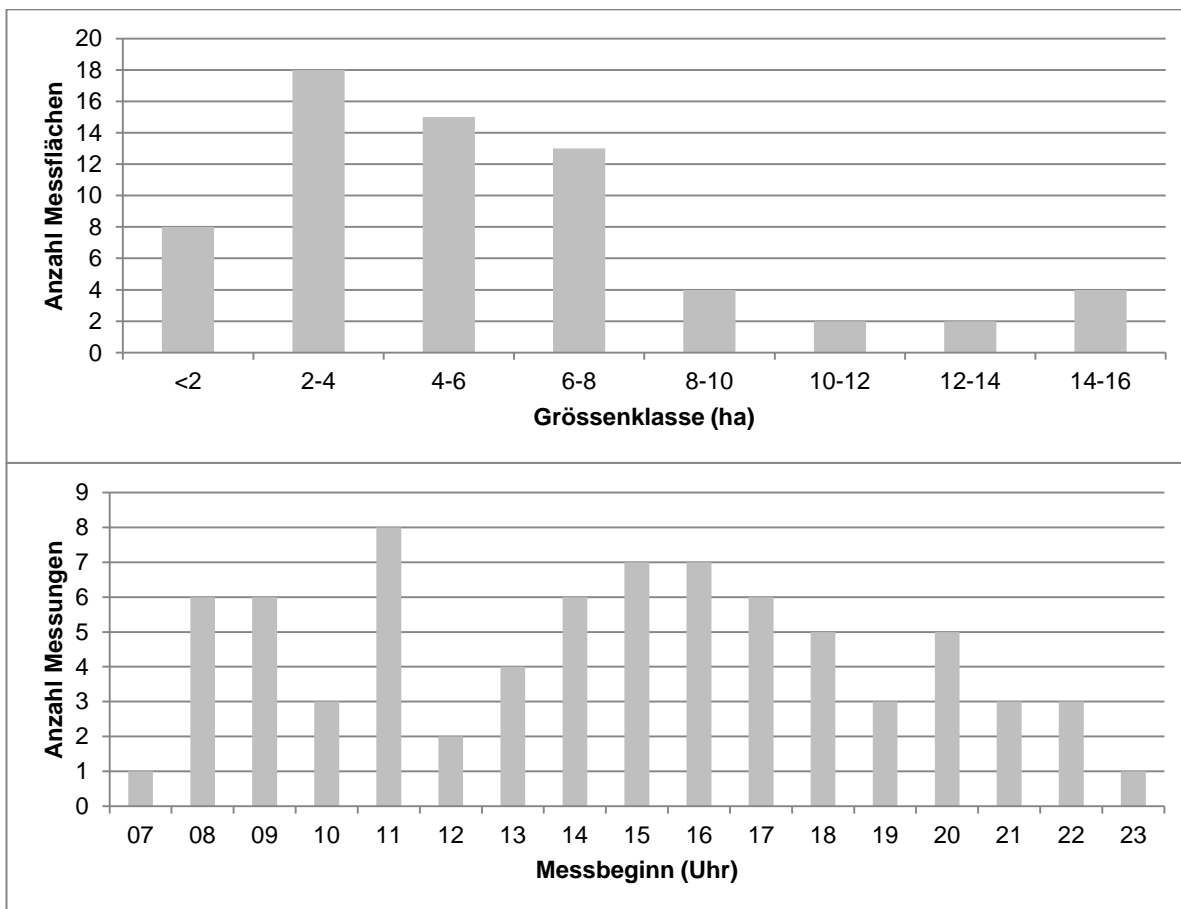


Abb. 49: Oben Messflächen nach Grössenklassen; unten Beginn der Messungen auf dem Feld.

Mit einer Ausnahme wurde auf allen Felder in geraden Linien parallel gefahren, auf einem wurde in Konturfahrt entlang der geschwungenen Vorgängerspurr gearbeitet. Der Wendemodus wurde von den Fahrern entsprechend den Bedingungen vor Ort gewählt. Ohne Lenksystem wurde in Omegakurven, mit Lenksystem in Omegakurven oder mit dem Überspringen von Spuren gewendet (vgl. Abb. 4).

Ein Messverhältnis von etwa 50% ohne und 50% mit Lenksystem wurde angestrebt. Zur Vermeidung von Störeinflüssen während der Messung befand sich ausser dem Fahrer niemand auf dem Traktor.

Während aller Messungen war der Satellitenempfang stabil, es gab keine reduzierte Empfangsgenauigkeit.

Aus organisatorischen Gründen war es leider weder möglich, dieselben Fahrer bei verschiedenen Arbeiten zu messen, noch Langzeitmessungen über komplette Arbeitstage oder während kompletter Tag- und Nachtschichten durchzuführen. Die daraus entstandenen Einschränkungen für die Dateninterpretation sind in der Diskussion (5.3) aufgeführt.

5.1.2 Untersuchungsparameter

Das Feld wurde in Vorgewende und Hauptfläche unterteilt. Im Vorgewende fanden die Wendevorgänge statt, in der Hauptfläche arbeitete das Gerät im Boden. Es wurden folgende Parameter ohne/mit Nutzung des Lenksystems während den Arbeitsgängen Grundbodenbearbeitung, Saatbettbereitung und Aussaat untersucht:

- Die **Fahrgeschwindigkeiten** in der Hauptfläche und im Vorgewende auf Basis der Mittelwerte der Fahrer.
- Die **Wendzeiten** auf Basis der einzelnen Wendevorgänge. Es wurden die Vorgänge ausgewertet, bei denen die Bedingungen für das Wenden, vor allem die Feldform, beim Fahren ohne und mit Lenksystem vergleichbar war.
- Die **Lenkgenauigkeiten** in der Hauptfläche auf Basis der für die einzelnen Fahrspuren aus den Positionspunkten errechneten Abweichung von der Sollfahrspur.
- Die **Ausnutzung der Gerätearbeitsbreite** auf Basis von Feldbreite, Arbeitsbreite und Anzahl gefahrener Fahrspuren.
- Als Mass der Fahrerbelastung und -entlastung die **Herzfrequenzen** in der Hauptfläche und im Vorgewende auf Basis der Mittelwerte der Fahrer.

5.1.3 Messtechnik

Für die Herzfrequenzmessungen wurden Sportuhren (RS800CX, Polar, Kempele, Finnland) mit Brustgurtsensor und einem Polar-GNSS-Empfänger (G3 GPS Sensor, Polar, Kempele, Finnland) mit einer Positionsgenauigkeit von +/-30cm genutzt.

Die GNSS-basierten automatischen Lenksysteme (EZ-Guide 500, Trimble, Sunnyvale, USA) hatten eine Genauigkeit von +/-2.5cm. Aus technischen Gründen konnten in der Messung im Herbst 2010 keine Positionsdaten vom Lenksystem aufgezeichnet werden. Alternativ wurden die Positionsdaten von der Polaruhr verwendet. Im Frühling 2011 wurden die Positionen der Lenksysteme mit einem Datenlogger (DD-Logger, CSM, Filderstadt, Deutschland) mit einer Aufzeichnungsrate von 1Hz aufgenommen.

5.1.4 Datenanalyse

Auf der vom Traktor abgefahrenen Strecke wurde jede Sekunde ein Positionspunkt gespeichert. Das bearbeitete Feld lag dann als Punktwolke vor. Bei chronologischem Verbinden der Punkte ergibt sich wieder die Fahrstrecke.

Die Polardateien mit Herzfrequenz und Positionsdaten wurden in die Polar-PC-Software (Polar Trainer 5, Polar, Kempele, Finnland) übertragen und im Microsoft-Excel-Dateiformat XLS exportiert. Die Positionsdateien von Polaruhr und Lenksystem wurden in das Geografische Informationssystem (GIS) Arc-GIS (Version 9.2, ESRI, Redlands, USA) importiert, die GNSS-Positionsdaten in das für die Erhebungsregion gültige Koordinatensystem S-JTSK Krovak mit der Einheit Meter transformiert, Vorgewende und Hauptfläche separat abgespeichert und im Dateiformat XLS exportiert. Die Herzfrequenz- und Positionsdaten von Polaruhr und Lenksystem wurden in Excel 2007 (Microsoft, Redmond/USA) auf Basis der sekundengenauen Zeitstempel zusammengeführt. Mit der GIS-Software QGIS (Quantum GIS Version 1.02, Open Source Geospatial Foundation (OSGeo), Beaverton, USA) wurden Distanzmessungen durchgeführt. Die weiteren Berechnungen der Untersuchungsparameter und die Erstellung der Abbildungen wurden mit Excel durchgeführt.

Zur Bestimmung von Vorgewende und Hauptfläche wurden im GIS die jeweiligen Punkte separat abgespeichert (Abb. 50). Durch dieses Auftrennen der Fahrstrecke liegen die Punkte nicht mehr im Sekundenabstand vor, es kommt zu Zeitsprüngen. Eine Zeitdifferenz $>1s$ zeigt an, dass eine neue Fahrspur bzw. ein neuer Wendevorgang beginnt. Auf diese Art wurden Spuren und Wendevorgänge gezählt sowie die Wendezeiten abgeleitet.

Die **Fahrgeschwindigkeiten** sind in den GNSS-Positionsdaten enthalten, für die Fahrspuren und Wendevorgänge wurden Mittelwerte gebildet.

Das Bestimmtheitsmass und die Residuen für die **Lenkgenauigkeit** wurden mit der linearen Regression aus den Positionspunkten der einzelnen gefahrenen Spuren pro Fahrer ermittelt.

Die **Ausnutzung der Gerätearbeitsbreite** wurde auf der Basis der bearbeiteten Feld- bzw. Beetbreiten, Gerätearbeitsbreiten und Anzahl gefahrener Fahrspuren berechnet. Aufgrund technischer Probleme im Herbst 2010 lagen nur für das Frühjahr 2011 geeignete Datensätze für die Bestimmung der Lenkgenauigkeit und Ausnutzung der Gerätearbeitsbreite vor. Pro Fahrer wurden an zwei verschiedenen Stellen im Feld in je sechs Repetitionen die Feld- bzw. Beetbreite quer zu den Fahrspuren gemessen und die gefahrenen Spuren gezählt.

Für statistische Analysen wurde TIBCO Spotfire S+® 8.1 for Windows (TIBCO Software Inc., Palo Alto, USA) mit Fixed Effects Anova genutzt. Da einerseits Fahrer, Feldform etc. die Messparameter stark beeinflussten und andererseits nicht alle Fahrer mit allen Geräten in allen Arbeitsgängen fahren, wurden die Werte auf Basis der Fahrer gepoolt und nicht zusätzlich in Arbeitsgänge aufgesplittet. Insgesamt konnten Werte von 14 verschiedenen Fahrern ausgewertet werden, 7 bei der Grundbodenbearbeitung, 3 bei der Saattbettbereitung und 4 bei der Aussaat. Dies ergab ein randomisiertes Design mit den Einflussfaktoren Fahrer, Art der Bearbeitung und Fahren mit/ohne Lenksystem, die als zufällig angeordnet ausgewertet wurden, auch wenn dies in der Praxis für die Wahl mit/ohne Lenksystem nicht vollständig umgesetzt werden konnte.

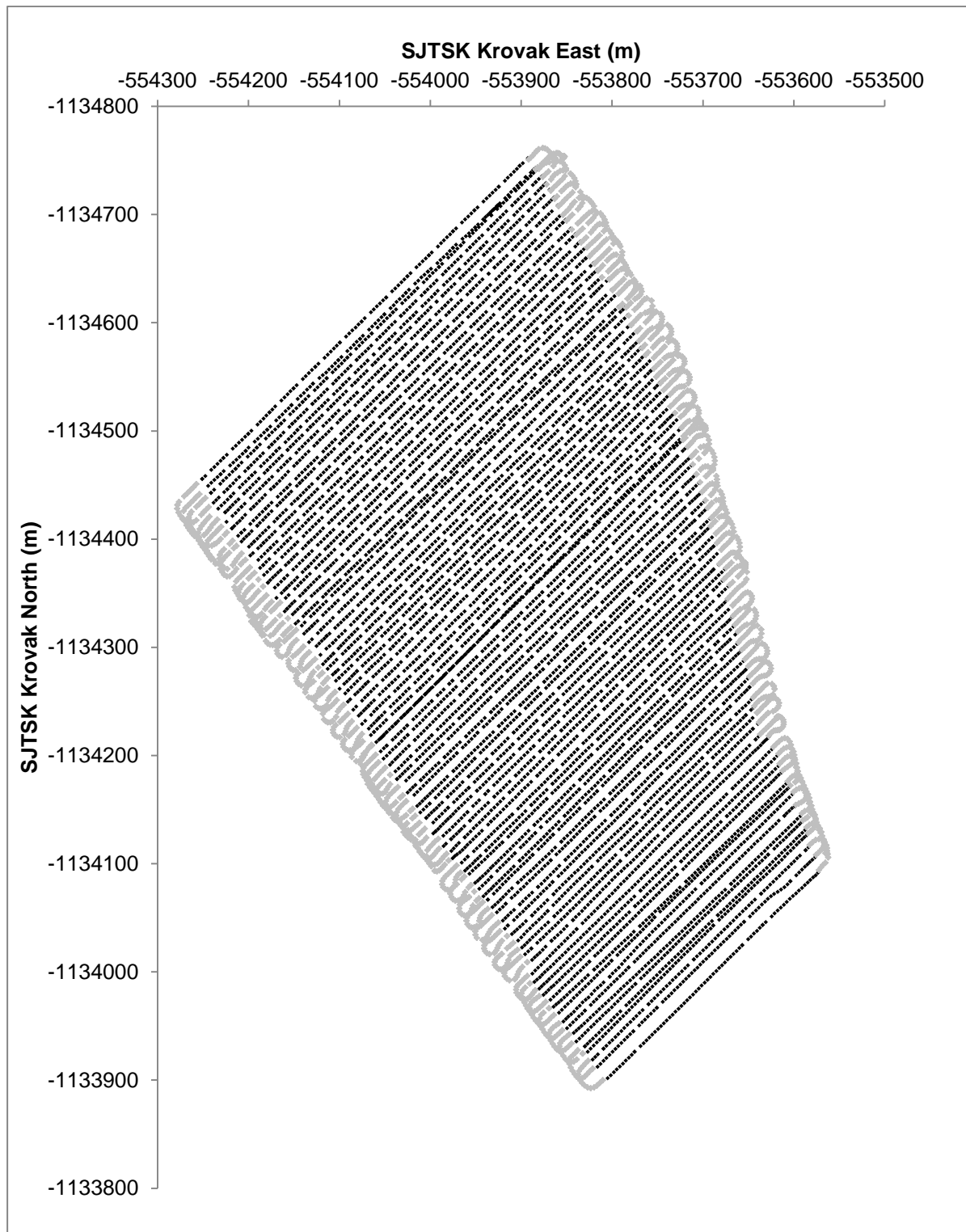


Abb. 50: Beispielhafte Positionsdaten (Feld von Fahrercode 37S8) im tschechischen Koordinatensystem SJTSK Krovak, Einheiten in Meter. Vorgewende und Hauptfläche wurden separat abgespeichert. Die Feldgröße wurde im GIS gemessen. Das Feld ist 712 m breit, die Fahrspuren sind 296-470m lang. Abbildung nicht massstäblich.

5.2 Ergebnisse

5.2.1 Fahrgeschwindigkeiten

Die Fahrgeschwindigkeiten und Unterschiede mit Lenksystem für Hauptfläche und Vorgewende sind in Abb. 51 dargestellt. Die generell grossen Unterschiede lassen sich mit den unterschiedlichen Bodenbearbeitungsgeräten, Arbeitstiefen, Bodenunterschieden wie auch Fahrern und Traktorenleistungen erklären.

Es scheint eine Tendenz zu geben, dass bei der Grundbodenbearbeitung in der Hauptfläche und im Vorgewende mit Lenksystem langsamer gefahren wurde. Bei Saatbettbereitung und Aussaat waren die Geschwindigkeiten tendenziell höher. Bei der Grundbodenbearbeitung waren die Geschwindigkeiten mit Lenksystem im Vorgewende tiefer.

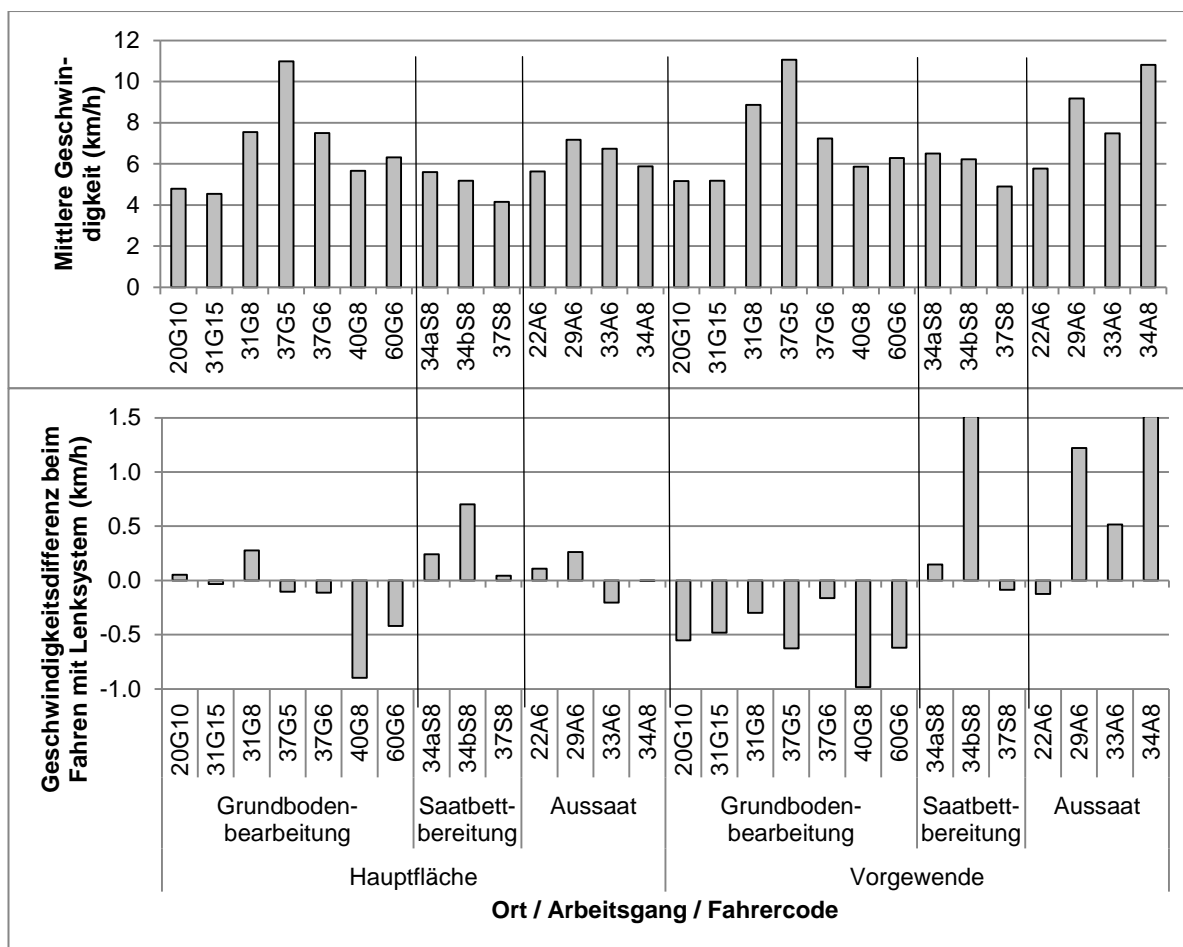


Abb. 51: Oben die mittleren Geschwindigkeiten nach Fahrer, unten die Geschwindigkeitsdifferenzen beim Fahren mit Lenksystem im Vergleich zum Fahren ohne Lenksystem.

Über alle Arbeitsgänge gesehen erreichten die Fahrer im Mittel ohne/mit Lenksystem etwa identische Geschwindigkeiten, es gab keine signifikanten Unterschiede (Abb. 52). Die stärkere Schwankungsbreite im Vorgewende lässt sich vermutlich auf die dann zur Geltung kommenden Auswirkungen der Feldformen und Unterschiede im Aushebevorgang zurückführen.

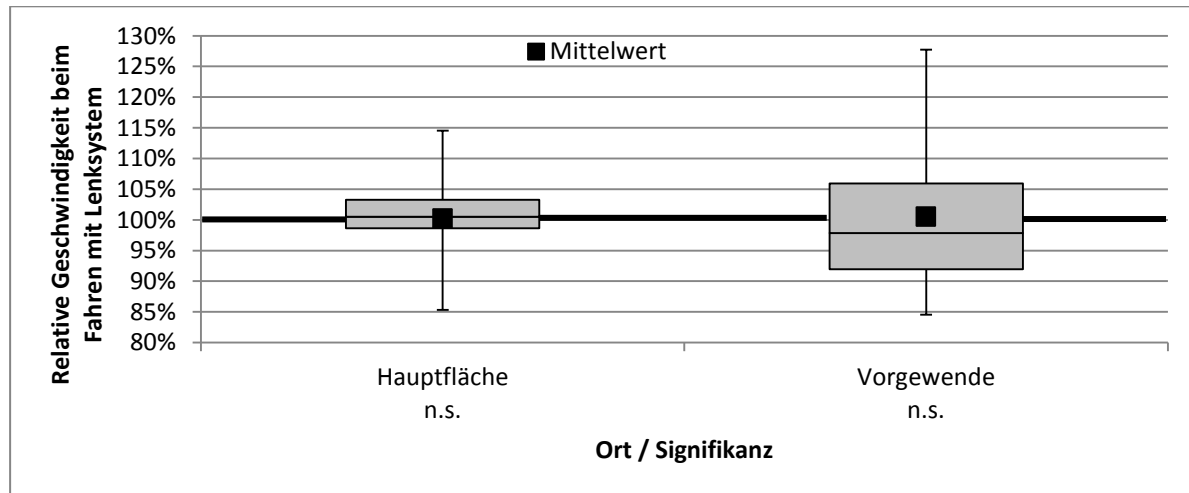


Abb. 52: Die über alle Fahrer statistisch ausgewertete relative Geschwindigkeit beim Fahren mit Lenksystem. Die Geschwindigkeit ohne Lenksystem beträgt 100%. Weder in der Hauptfläche noch im Vorgewende sind die Unterschiede signifikant.

5.2.2 Wendezeiten

Für die Berechnung der Wendezeiten konnten 350 Wendevorgänge von 6 Fahrern ausgewertet werden (Abb. 53). Die mittlere Wendezeit lag ohne Lenksystem bei 30s, mit Lenksystem bei 29s. Die Unterschiede waren nicht signifikant. Die zum Teil hohen Maximalwerte sind auf naturräumliche Gegebenheiten am Feldrand zurückzuführen, die die Wendestrecke verlängerten.

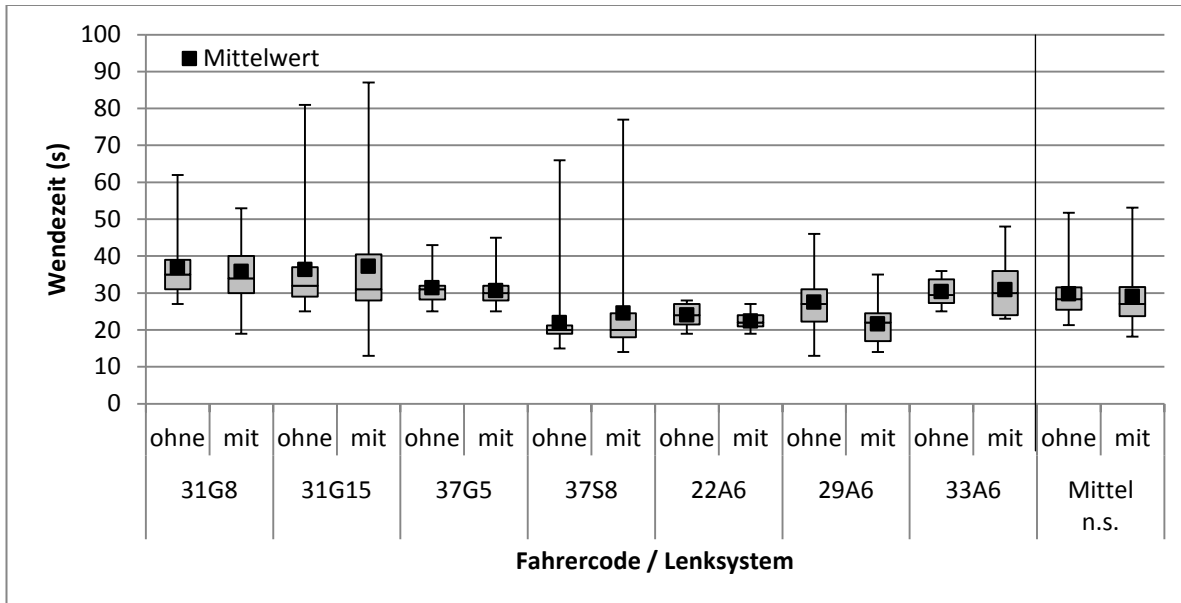


Abb. 53: Wendezeiten von insgesamt 350 Wendevorgängen mit 6 Fahrern. Im Mittel unterschieden sich die Wendezeiten mit/ohne Lenksystem nicht signifikant.

5.2.3 Lenkgenauigkeit

Zur Analyse der Lenkgenauigkeit konnten 201 einzelne Fahrspuren in der Hauptfläche von 5 Fahrern im Frühjahr 2011 verwendet werden. Bei Grundbodenbearbeitung und Saatbettbereitung führen die Fahrer mit Lenksystem genauer als ohne. Der Genauigkeitsgewinn stieg mit wachsender Arbeitsbreite. Bei der Aussaat ohne Lenksystem führen die Fahrer mit Spuranreißern zum Teil ähnlich genau wie mit Lenksystem. Im Mittel sank die Standardabweichung der Abweichung von der Sollfahrspur statistisch signifikant von 30cm auf 10cm (Abb. 54, Abb. 55).

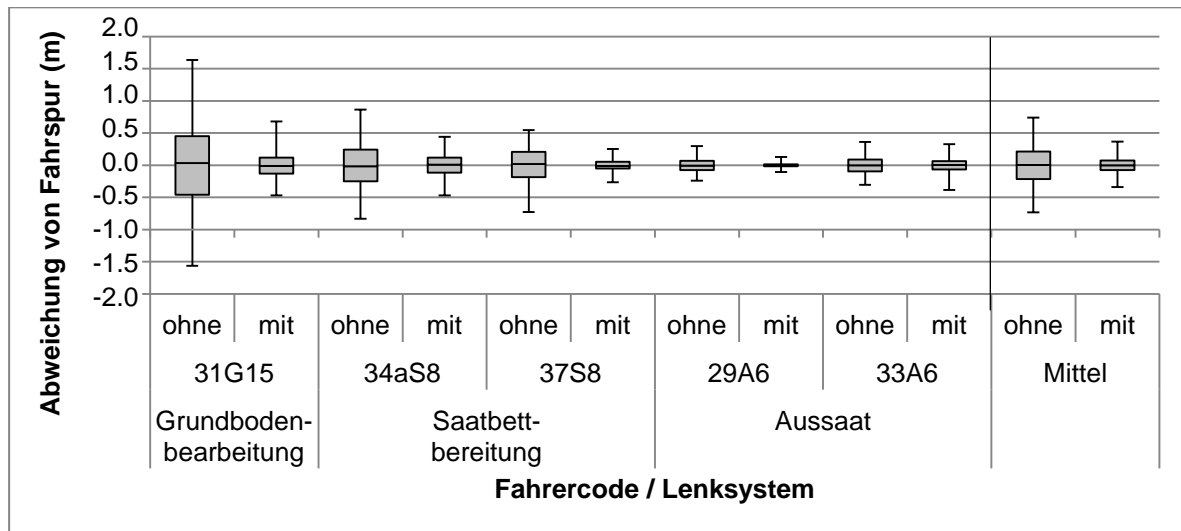


Abb. 54: Lenkgenauigkeit als Boxplot der Positionsabweichung von der Sollfahrspur beim Fahren ohne/mit Lenksystem.

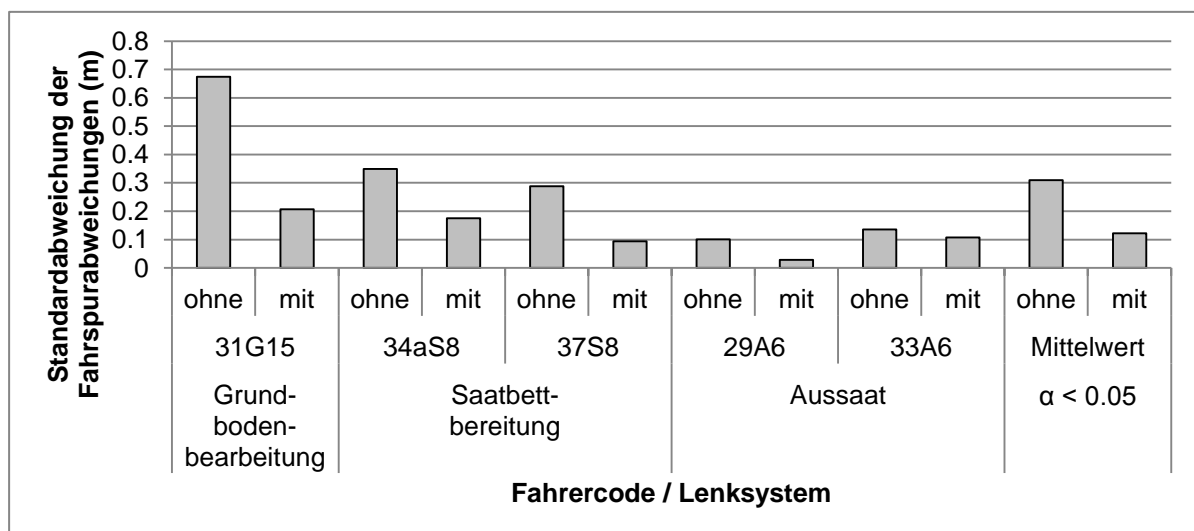


Abb. 55: Standardabweichungen der Positionsabweichungen von der Sollfahrspur beim Fahren ohne/mit Lenksystem. Im Mittel waren die Unterschiede statistisch signifikant.

5.2.4 Ausnutzung Gerägearbeitsbreite

Zur Berechnung der Ausnutzung der Gerägearbeitsbreite konnten die Daten von 6 Feldern verwendet werden. Wie in 5.1.4 beschrieben, wurde dazu die Feldbreite durch die Anzahl gefahrene Spuren geteilt. Sie ist mit einem Median von 99.1% ohne und 99.8% mit Lenksystem in beiden Fällen sehr hoch (Abb. 56). Ohne Lenksystem fährt man meist mit leichter Überlappung, mit Lenksystem selten auch mit Fehlstellen. Bei einer durchschnittlichen Gerägearbeitsbreite von 8.5m nutzt man mit Lenksystem gut 4cm mehr aus als ohne Lenksystem.

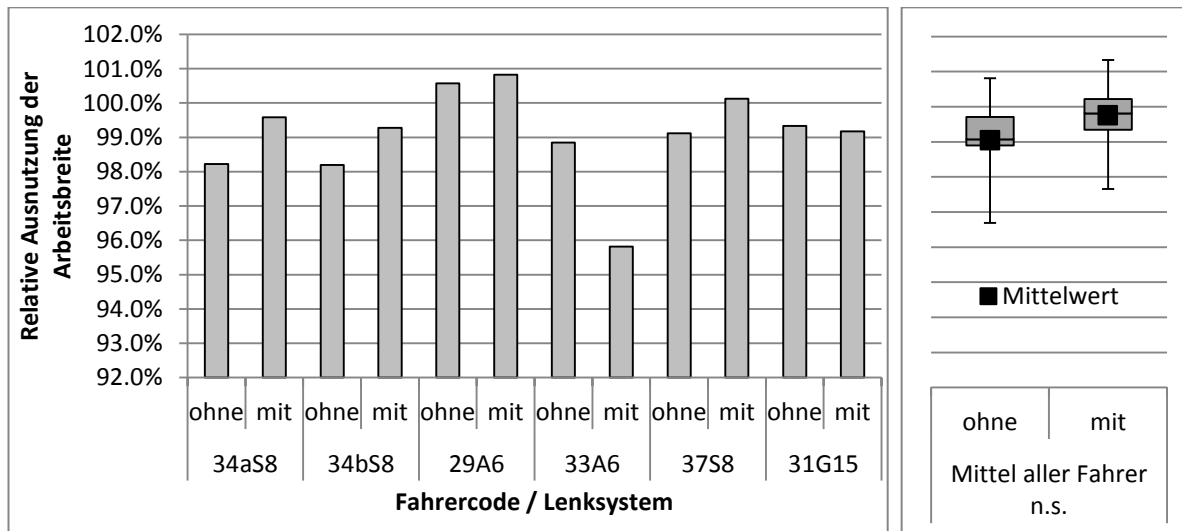


Abb. 56: Relative Ausnutzung der Gerägearbeitsbreite in Prozent. Weniger als 100% bedeutet Überlappung, mehr als 100% bedeutet Fehlstellen. Die Unterschiede waren nicht signifikant.

5.2.5 Herzfrequenz

Die Herzfrequenz jedes Fahrers wurde während der von ihm ausgeführten Arbeit insgesamt zwischen 1.1 bis 2.8h lang aufgezeichnet. In Abb. 57 sind die Herzfrequenzen der verschiedenen Fahrer während der Aufzeichnungszeit angegeben. Die Mittelwerte variieren zwischen 64 und 99min⁻¹, die Minimal- und Maximalwerte zwischen 48 und 167min⁻¹. Die mittlere Herzfrequenz in der Hauptfläche lag bei 84min⁻¹, im Vorgewende bei 86min⁻¹.

Mit Lenksystem waren die Herzfrequenzen in der Hauptfläche und im Vorgewende kaum je höher, blieben bei einigen Fahrern auf demselben Niveau und waren bei den meisten niedriger. Es liess sich keine Tendenz zu einer Abhängigkeit von den Arbeitsgängen erkennen. Im Mittel sank die Herzfrequenz um 2min⁻¹ bzw. 2%, die Unterschiede waren in der Hauptfläche und im Vorgewende signifikant. Die Entlastung im Vorgewende war mit einem Median von 97.5% höher als in der Hauptfläche, wo er 98.5% betrug.

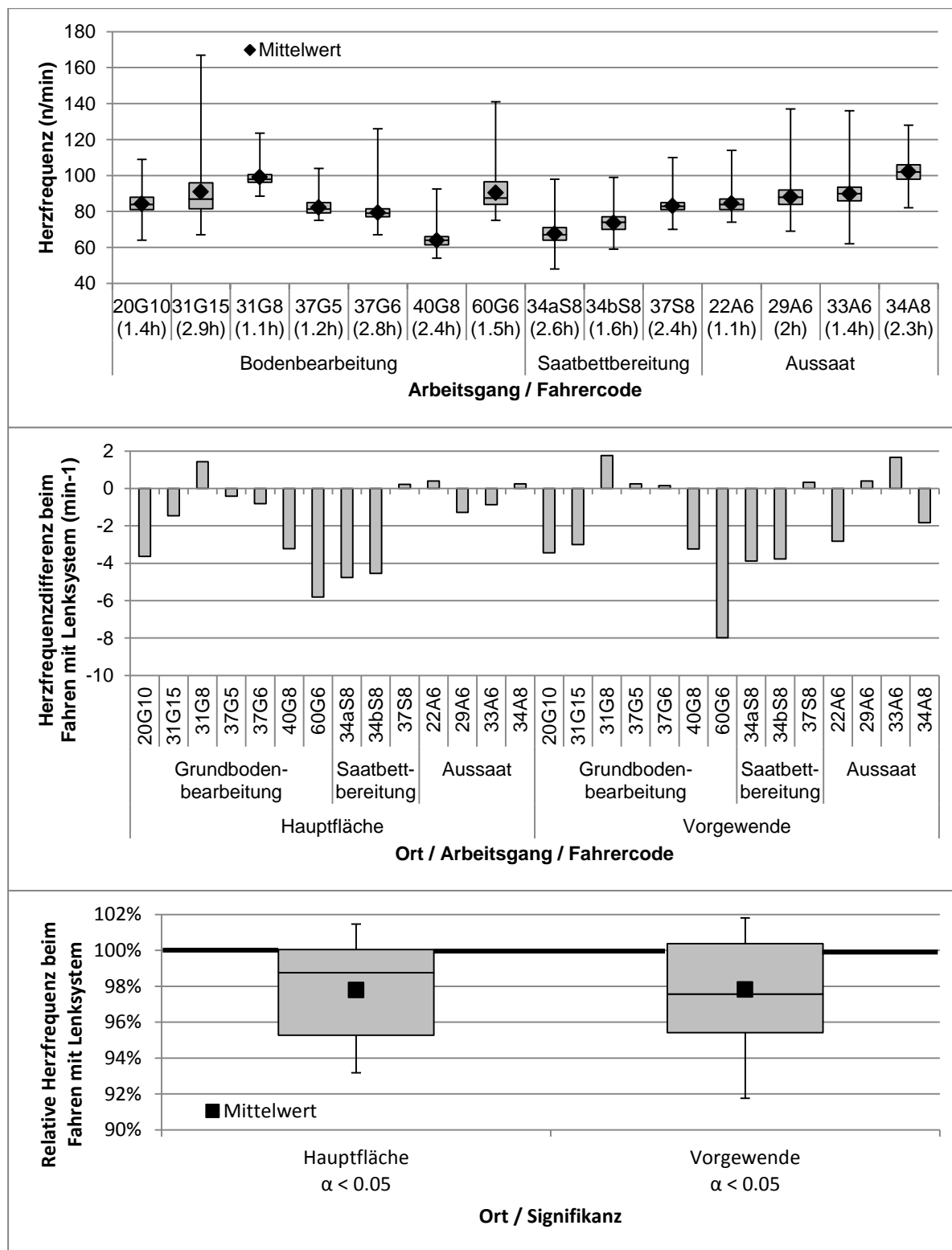


Abb. 57: Oben: Mittlere Herzfrequenzen der 14 verschiedenen Fahrer bei unterschiedlichen Arbeiten. (Fahrercode siehe Tab. 18) Unter dem Fahrercode ist in Klammern die Aufzeichnungsdauer pro Fahrer aufgeführt. Mitte: Abweichung der Herzfrequenzen beim Fahren mit Lenksystem im Vergleich zum Fahren ohne Lenksystem. Unten: Die über alle Fahrer statistisch ausgewertete relative Herzfrequenz beim Fahren mit Lenksystem. Fahren ohne Lenksystem = 100%. Fahren mit Lenksystem führt zu signifikant tieferen Herzfrequenzen.

5.3 Diskussion

5.3.1 Fahrgeschwindigkeiten

Generell wirkte sich der Einsatz eines Lenksystems nur minimal auf die Fahrgeschwindigkeit aus, andere Faktoren scheinen unter den gegebenen grossflächigen Felder und grossen Arbeitsbreiten bestimmend gewesen zu sein. Die ohne/mit Lenksystem fast identischen Fahrgeschwindigkeiten im Feld sind vermutlich darauf zurückzuführen, dass unabhängig vom Einsatz eines Lenksystems stets versucht wurde, mit der für den jeweiligen Arbeitsgang maximal möglichen Geschwindigkeit zu fahren. Die Kontrolle der Anschlussgenauigkeit wirkte nicht limitierend.

Die bei der Grundbodenbearbeitung mit Lenksystem beobachteten leicht tieferen Geschwindigkeiten im Vorgewende könnten darauf zurückzuführen sein, dass der Fahrer beim Wenden auf dem Lenksystemmonitor die Anweisungen zum Einfahren in die nächste Spur verfolgen muss und er durch Beschäftigung mit dieser zusätzlichen Aufgabe die Geschwindigkeit etwas reduzierte. Beim Wenden ohne Lenksystem mit Omegakurve entfiel diese zusätzliche Aufgabe.

Die bei der Aussaat mit Lenksystem beobachteten leicht höheren Geschwindigkeiten im Vorgewende könnten damit erklärt werden, dass durch das Lenksystem einerseits das Betätigen von Spuranreissern wegfiel und andererseits das Anvisieren der genauen Anschlussfahrt an die vorgängige Spur mit Lenksystem bei höheren Geschwindigkeiten durchführbar war.

In der Literatur wurden keine Informationen zu den Auswirkungen von Lenksystemen auf die Fahrgeschwindigkeiten gefunden.

5.3.2 Wendezeiten

In der vorliegenden Versuchsanstellung zeigten sich generell nur geringe Unterschiede bei den Wendezeiten mit/ohne Lenksystem. Die gemessenen marginal geringeren Wendezeiten lassen sich vermutlich darauf zurückführen, dass beim Fahren mit Lenksystem angepasst an die naturräumlichen Bedingungen zum Teil im selben Feld sowohl in Omegakurven als auch mit Überspringen der Spur gewendet wurde. Diese beiden Wendemodi unterscheiden sich im Zeitbedarf wesentlich weniger als die Wende in Schwalbenschwanzform, die im Versuch mit den grossen Arbeitsbreiten und grossen Flächen nie gefahren wurde.

In der Literatur wurden um 5-33% verringerte Wendezeiten genannt. Die Reduktion um ein Drittel wurde durch den Wechsel von Schwalbenschwanzwende auf Überspringen einer Spur erzielt. Auch die Reduktion um 15% pro Wendevorgang mit Grubber im rechteckigen Feld wurde auf den mit Lenksystem angewendeten Wendemodus mit Überspringen der Spur zurückgeführt. Die Reduktion um 5% wurde unter ähnlichen Feld- und Maschinensituationen wie der vorliegenden erhoben (Demmel 2007; Kroulik et al. 2009; Moitzi et al. 2007).

Insgesamt waren die Wendezeiten wesentlich stärker von Parametern wie Gerätearbeitsbreiten und Feldformen beeinflusst als vom Lenken ohne oder mit Lenksystem.

5.3.3 Lenkgenauigkeit

Die Messungen zeigten, dass mit automatischen Lenksystemen bei Grundbodenbearbeitung und Saatbettbereitung eine wesentlich höhere Genauigkeit erreicht wird. Bei der Aussaat mit Spuranreißern war dies aber nicht der Fall. Die Lenkgenauigkeit bewegte sich mit/ohne Lenksystem in einem ähnlichen Bereich.

In der Literatur wurden vergleichende Messungen mit/ohne Lenksystem mit Geräten ohne Spuranreißer gefunden. Diese bestätigten, dass mit Lenksystem eine höhere Lenkgenauigkeit erzielt wird (Amiama-Ares et al. 2011; Berning 2011; Gomez-Gil et al. 2011; Macak & Nozdrovicky 2011).

Spezifische Vergleiche zwischen manuellem und automatischem Lenken bei der Aussaat wurden in der Literatur nicht gefunden. Es scheint aber plausibel, dass mit Spuranreißern bei gut sichtbaren Markierungen in einem ähnlichen Genauigkeitsbereich wie mit Lenksystem gefahren werden kann.

Einschränkend für die Interpretation der vorliegenden Daten ist der geringe Stichprobenumfang von fünf Fahrern bei drei Arbeitsgängen auf fünf verschiedenen Feldern.

5.3.4 Ausnutzung Gerätearbeitsbreite

In den vorliegenden Versuchen führte der Einsatz von Lenksystemen zu einer durchschnittlich 4cm besserer Ausnutzung der Gerätearbeitsbreite. Bei Arbeitsbreiten zwischen 6-15m scheint dies relativ gering bzw. die Ausnutzung ohne Lenksystem sehr hoch zu sein. Dies widerspiegelt die Tatsache, dass auf ebenen Flächen mit sehr professionellen Fahrern gearbeitet wurde, die in der Versuchssituation auch ohne Lenksystem eine sehr hohe Arbeitsbreitenausnutzung erzielten. In der Literatur wird von einer um 6-15cm verbesserten Ausnutzung der Gerätearbeitsbreite berichtet (Berning 2011; Keller 2005).

5.3.5 Herzfrequenz

Die grossen Unterschiede in der Herzfrequenz zwischen Fahrern sind primär auf individuelle Veranlagung und sekundär auf die unterschiedliche Anforderung der Bedienung der Technik während des Fahrens zurückzuführen. Insgesamt bewegen sich die Fahrer in einer üblichen Bandbreite, wobei Mittelwerte knapp über 60 als eher niedrig und um 100 als eher hoch angesehen werden können (Dikow 2010).

Die durchschnittliche Reduktion der Herzfrequenz beim Fahren mit Lenksystem um 2min^{-1} passt zu den in der Literatur genannten Herzfrequenzänderungen von $1-2\text{min}^{-1}$ bei der Anpassung an einfache Situationsänderungen im Strassenverkehr (De Waard 1996) und dem geringen Unterschied zwischen Positionieren zum Einparken und Abwarten des automatischen Einparkvorgangs (Reimer et al. 2010). Die Änderung ist nicht so stark wie eine Herzfrequenzzunahme durch Ablenkung während der Fahrt um $4-5\text{min}^{-1}$ (Paridon 2006; Reimer et al. 2011) oder einem manuellen Einparkvorgang von bis zu 12min^{-1} mehr (Reimer et al. 2010).

Ein automatisches Lenksystem entlastet den Fahrer also in etwa im Umfang einer leichten Anpassung an Verkehrsverhältnisse bzw. im selben Mass wie der Unterschied zwischen Fahren in der Hauptfläche und im Vorgewende. Die absoluten Unterschiede der

Herzfrequenz sind gering, es ist aber zu bedenken, dass sich das Ausmass der körperlichen Anstrengung durch den Einsatz eines Lenksystems nicht verändert und einzig die geistige Anstrengung indirekt über die Veränderung der Herzfrequenz gemessen wird. Die gemessenen signifikanten Auswirkungen auf den Fahrer bestätigen die in der Literatur erwähnten positiven Effekte (Keller 2005; Moitzi & Heine 2006; Niemann et al. 2007; Rüegg et al. 2011; Schulten-Baumer et al. 2009).

5.3.6 Interpretationshinweise

Bedingt durch die Beobachtungsdauer pro Fahrer von 1.1 bis 2.8h können nur Angaben über in diesen Zeiträumen auftretende Effekte gemacht werden. Aussagen bezüglich der Auswirkungen von Lenksystemen bei längeren Fahrzeiten oder unterschiedlichen Konzentrations- und Sichtverhältnissen am Tag und in der Nacht sind nicht möglich.

Es kann zudem nicht ausgeschlossen werden, dass die untersuchten Fahrer sich in der Beobachtungssituation anders verhielten, beispielsweise konzentrierter fahren und dadurch eine bessere Arbeitsqualität erzielten, als dies in Alltagssituationen der Fall gewesen wäre.

Bei einem längeren Arbeitseinsatz könnten sich arbeitswirtschaftliche und ergonomische Auswirkungen verändern. Es ist zu vermuten, dass sich vor allem Lenkgenauigkeit und Ausnutzung der Gerätearbeitsbreite bei längerer Arbeitszeit und in der Nacht tendenziell verringern und mit Lenksystem wieder gesteigert werden können.

5.4 Schlussfolgerung

In der vorliegenden Untersuchung mit 14 Fahrern bei den Arbeitsgängen Grundbodenbearbeitung, Saatbettbereitung und Aussaat wurden meist geringe Auswirkungen von Lenksystemen gemessen. Fahrgeschwindigkeiten im Vorgewende und in der Hauptfläche, Wendezeiten und Ausnutzung der Gerätearbeitsbreiten waren mit Lenksystem zum Teil leicht vorteilhafter als ohne Lenksystem, unterschieden sich aber nicht signifikant voneinander. Arbeitsbreiten, Fahrer und naturräumliche Gegebenheiten wie die Schlagform und daraus resultierende optimale Wendestrategien hatten im Praxisversuch einen wesentlich grösseren Einfluss auf die Messgrößen als der Einsatz des Lenksystems.

Mit Lenksystemen erhöht sich die Lenkgenauigkeit bei Arbeiten ohne Spuranreisser vor allem bei grossen Arbeitsbreiten. Nicht zu unterschätzen sind auch die Vorteile, wenn Spuranreissermarkierungen wie in der Nacht nur schlecht oder wie bei Direktsaatverfahren kaum sichtbar sind. Wenn der Vorteil bei der Aussaat mit Spuranreissern auch geringer ist, so ermöglichen die geraderen Säreihen doch einen einfacheren Einsatz von Geräten zur mechanischen Beikrautkontrolle wie auch von Droplegs an Pflanzenschutzgeräten, die eine Reduktion der Aufwandsmenge bei gleichzeitiger Erhöhung der Ausbringqualität erlauben.

Die statistisch gesicherten positiven Auswirkungen des Einsatzes von Lenksystemen auf die Fahrerbelastung zeigen Ansatzpunkte für eine komfortablere und ergonomischere Gestaltung von Traktorarbeitsplätzen, mit der die Leistungsfähigkeit der Fahrer über einen längeren Zeitraum erhalten werden kann.

6 Synthese und Ausblick

Die **CTF-Umsetzung** mit Standardmaschinen üblicher Spurweiten und Reifenbreiten unter europäischen Rahmenbedingungen ist im Ackerbau und Grünland relativ einfach realisierbar; bei der Erntemechanisierung der Kulturen Rüben und Kartoffeln müssen gegebenenfalls Kompromisse eingegangen werden. CTF ist damit grundsätzlich geeignet, das bestehende Instrumentarium technischer Bodenschutzmassnahmen wie Erhöhung der Reifenkontaktfläche, situative Anpassung der Radlast, Berücksichtigung der Befahrbarkeit des Bodens und Reduktion der Überfahrtenanzahl um eine zusätzliche Komponente zu erweitern.

Die im **CTF-Feldversuch** beobachteten Auswirkungen lassen generell darauf schließen, dass CTF die natürliche Bodenregeneration fördert. Am vorliegenden Versuchsstandort unter Direktsaat waren mit niedrigen Kontaktflächendrücken und unter Einhaltung der Bodenbefahrbarkeitszeiträume die Unterschiede zwischen nicht befahrenen und gering befahrenen Varianten klein. Die bei bodenkundlichen Parametern teilweise gemessenen vorteilhafteren Werte nicht befahrener Flächen spiegelten sich nicht eindeutig interpretierbar in den agronomischen Parametern Feldaufgang und Ertrag wider. Die durchgängig nachteiligen Werte der Pflegefahrgassen hingegen zeigten die negativen Auswirkungen häufigen Befahrens mit teilweise hohen Kontaktflächendrücken.

Da sich die nicht befahrenen Flächen nur leicht von den mit einem tiefem Kontaktflächendruck von in der Regel 0.8bar befahrenen Flächen unterscheiden, könnte es unter bodenkundlichen und klimatischen Bedingungen wie am Versuchsstandort sinnvoll sein, in einer Art „CTF-Light“ primär die Pflegefahrgassen permanent festzulegen und sie möglichst für alle Überfahrten mit höheren Kontaktflächendrücken bzw. unter weniger tragfähigen Bodenzuständen bei Ernte, organischer Düngung und Transport zu benutzen. Alle Arbeiten, die unter günstigen Bedingungen mit tiefen Kontaktflächendrücken erfolgten, könnten ohne Befahrungseinschränkungen durchgeführt werden. Die negativen Folgen einer intensiven Befahrung würden dauerhaft auf denselben kleinstmöglichen Teil der Fläche beschränkt und der Boden könnte sich auf einem Grossteil der Fläche unter weitgehend optimalen Bedingungen entwickeln.

Die auf grossstrukturierten Flächen in Tschechien durchgeführten **Lenksystem-Messungen** belegten die höhere Genauigkeit der RTK-Systeme und die Entlastung der Fahrer im Vergleich zum manuellen Lenken. Die Lenksysteme bieten zudem eine Alternative zu Spuranreissern und Schaummarkierern und ermöglichen das präzise Anschlussfahren zum Beispiel bei ungünstigen Sichtbedingungen bei Nacht & Nebel, bei Arbeiten im Voraufbau und auf Direktsaatflächen. Die Entlastung vom Lenkvorgang kommt vor allem Berufsfahrern auf grossen Betrieben und in Lohnunternehmen zugute. Die Fahrer bleiben länger leistungsfähig und die Arbeitsqualität bleibt auf einem hohen Niveau.

Die rasche Weiterentwicklung satellitengebundener Navigationssysteme, die bevorstehende Ergänzung des US-amerikanischen GPS und russischen Glonass durch das europäische Galileo und das chinesische Compass sowie der generelle Trend zur omnipräsenten Nutzung von Geodaten lassen erwarten, dass sich präzise RTK-Systeme als Basis einer CTF-Bewirtschaftung in der nahen Zukunft in der Landwirtschaft stärker verbreiten werden.

Bei einer **CTF-Praxiseinführung** ist zu berücksichtigen, dass CTF-Anbausysteme überlegtes Handeln bei allen Überfahrten erfordern. Insbesondere beim Einbezug von fremden Fahrern vom Lohnunternehmer oder im Rahmen der Nachbarschaftshilfe ist eine sorgfältige Vorausplanung der Fahrspuren, Übergabe der Fahrspurkoordinaten und Instruktion der Beteiligten erforderlich. Versehentliche falsche Überfahrten würden den vorteilhaften Effekt einer langjährigen CTF-Bewirtschaftung mindern.

Aufgrund der hohen Anforderungen kann CTF zur Zeit als ein Profisystem eingestuft werden, das entweder vom Landwirt in der Eigenbewirtschaftung oder vom Lohnunternehmer bei der Teil- und Komplettbewirtschaftung von Auftragsflächen erfolgreich eingesetzt werden kann. Eine kombinierte Bewirtschaftung ist ebenfalls möglich, wenn der Lohnunternehmer Bodenbearbeitung, Saat und Ernte erledigt und der Landwirt Düngung und Pflanzenschutz auf den vom Lohnunternehmer angelegten Pflegefahrgassen durchführt und dadurch kein eigenes Lenksystem benötigt.

In Kombination mit weiteren Bodenschutzmassnahmen erweitert CTF die Möglichkeiten, tiefergehende Bodenverdichtungen zu vermeiden, den Bedarf an energieintensiver Bodenlockerung zu reduzieren und die Entwicklung einer stabileren Bodenstruktur mit höherer Tragfähigkeit zu fördern. Zusammen mit einer an Kultur und Anbausystem angepassten Saatbettbereitung und den in geraden Reihen einfacher durchführbaren mechanischen Pflegemassnahmen ergeben sich gute Voraussetzungen für die Gestaltung agronomisch leistungsfähiger und ökologisch nachhaltiger Anbausysteme.

7 Zusammenfassung

Diese Arbeit behandelt auf permanenten Fahrspuren basierende Controlled Traffic Farming Anbausysteme und damit verbundene satellitenbasierte Lenksysteme hinsichtlich Umsetzungsmöglichkeit und Potenzial unter europäischen Bedingungen.

Die Analyse einer **CTF-Umsetzung** mit der Verwendung von Standardmaschinen zeigte, dass sich CTF-Anbausysteme mit den heute zur Verfügung stehenden Maschinen für Dauergrünland, Mähdruschfrüchte, Mais und Ackerfutterbau relativ einfach mechanisieren lassen. Im Grünland können mit Arbeitsbreiten ab 9m Spurflächenanteile von bis zu unter 15% erreicht werden, im Ackerbau mit 4.5m und 9m von etwa 27%. Bei Rüben und Kartoffeln lassen sich mit der derzeit primär auf 3m Arbeitsbreite ausgelegten Erntetechnik nur CTF-Systeme mit einem Fahrspuranteil von 50% und mehr anlegen. Zum Erreichen geringerer Fahrspuranteile müsste neben der Entwicklung von Erntetechnik mit grösserer Arbeitsbreite vor allem auch der Transport der grossen Erntemassen auf dem Feld bodenschonend gestaltet werden. Alternativ besteht die Möglichkeit, in Form eines sogenannten „Seasonal CTF“ solche einzelnen Arbeitsgänge von der Benutzung der CTF-Fahrspuren auszunehmen. Bei einer CTF-Praxiseinführung ist zu berücksichtigen, dass CTF-Anbausysteme überlegtes Handeln bei allen Überfahrten erfordern und aufgrund der hohen Anforderungen beim Fahrspurmanagement Profisysteme sind.

Im dreijährigen **CTF-Feldversuch** mit den Kulturen Winterweizen, Wintergerste und Kunstwiese mit Kleegrasmischung, Standardmaschinen, niedrigen Kontaktflächendrücken (generell 0.8bar) und den Vergleichsvarianten Pflug, konventionell befahrene Direktsaat und CTF-Direktsaat zeigte sich eine klare Differenzierung der Bodenstruktur zwischen intensiv befahrenen Pflegefahrgassen und wenig bzw. nicht befahrenen Flächenteilen. Durch den niedrigen Kontaktflächendruck kam es in keinem Fall zu Fahrspurbildungen oder einer Gefährdung des Unterbodens. Unter den Pflegefahrgassen erreichten Oberbodenparameter aber kritische Werte und die Biomasseerträge entwickelten sich negativ.

Nach drei Jahren hatten die nicht befahrenen CTF-Flächen nach dem Pflug signifikant die niedrigsten Bodeneindringwiderstände. Die gering befahrenen CTF-Flächen folgten mit einigem Abstand und waren mit der zufällig befahrenen Direktsaat vergleichbar. Das Grobporenvolumen bewegte sich standorttypisch auf einem tiefen Niveau von 5%, das Auslassen der Befahrung bewirkte keinen messbaren Anstieg. Die in den nicht und gering befahrenen CTF-Flächen untersuchten Parameter Saugspannung und volumetrischer Wassergehalt lagen stets in einem pflanzenbaulich nicht relevanten Bereich unterhalb des permanenten Welkepunktes. Es wurden keine signifikanten Unterschiede gefunden.

Die in den nicht und gering befahrenen CTF-Flächen untersuchten Bodenluftparameter O_2 und CO_2 unterschieden sich zum Teil signifikant. In der für die Jugendentwicklung wichtigen Bodentiefe von 10cm war die O_2 -Versorgung in den nicht befahrenen Bereichen in 90% aller Messungen im optimalen Bereich von >15%, in den gering befahrenen in 75% der Messungen. Die CO_2 -Konzentrationen lagen in den nicht befahrenen Bereichen in 60% der Messungen, in den gering befahrenen in nur gut 30% der Messungen im optimalen Bereich bis 2%.

Sowohl in CTF und Direktsaat war die bodenbiologische Aktivität hoch. Es wurden keine auf die Befahrung zurückzuführenden signifikanten Unterschiede festgestellt.

Die höchsten Erträge wurden generell in der Pflugvariante erzielt. Die nicht und gering befahrenen Bereiche in der CTF-Variante unterschieden sich ein Mal, in der Wintergersternte, signifikant voneinander. Unter Kunstwiese auf den intensiv befahrenen Pflegefahrgassen durchgeführte Ertragserhebungen ergaben für CTF die signifikant niedrigsten Ernteerträge. Die agronomischen Ergebnisse aller Varianten waren oft weniger durch die Befahrung als durch Einflussfaktoren wie Stroh oder Bestelltechnik geprägt. Unter den direkt gesäten Varianten bietet die fortschreitende natürliche Bodenentwicklung hin zu einer stabil-krümeligen Bodenstruktur jedoch die Voraussetzungen zu über die Zeit besser werdenden Wachstumsbedingungen.

Die Untersuchung zu den **Auswirkungen von Lenksystemen** bei den Arbeitsgängen Grundbodenbearbeitung, Saatbettbereitung und Aussaat wurden auf grossstrukturierten tschechischen Flächen mit 14 Fahrern durchgeführten. Es wurden meist geringe Auswirkungen von Lenksystemen gemessen. Fahrgeschwindigkeiten im Vorgewende und in der Hauptfläche, Wendezeiten und Ausnutzung der Gerätearbeitsbreiten waren mit Lenksystem zum Teil leicht vorteilhafter als ohne Lenksystem, unterschieden sich jedoch nicht signifikant voneinander. Fahrer und naturräumliche Gegebenheiten wie die Schlagform und daraus resultierende optimale Wendestrategien hatten im Praxisversuch einen wesentlich grösseren Einfluss auf die Messgrössen als der Einsatz des Lenksystems.

Mit Lenksystemen erhöhte sich die Lenkgenauigkeit bei Arbeiten ohne Spuranreisser vor allem bei grossen Arbeitsbreiten wesentlich. Der Lenksystemvorteil bei der Aussaat mit Spuranreissern ist geringer, jedoch ermöglichen die geraderen Säreihen einen einfacheren Einsatz von Geräten zur mechanischen Beikrautkontrolle wie auch von Droplegs an Pflanzenschutzgeräten, die eine Reduktion der Aufwandsmenge bei gleichzeitiger Erhöhung der Ausbringqualität erlauben.

Der Einsatz von Lenksystemen senkte auch die Fahrerbelastung. Durch sie kann einerseits die Leistungsfähigkeit der Fahrer über einen längeren Zeitraum erhalten werden und andererseits die Arbeitsqualität auf einem konstant hohen Niveau gehalten werden.

In der **Synthese** ergibt sich, dass CTF grundsätzlich geeignet ist, das bestehende Instrumentarium technischer Bodenschutzmöglichkeiten wie Erhöhung der Reifenkontaktfläche, situative Anpassung der Radlast, Berücksichtigung der Befahrbarkeit des Bodens und Reduktion der Überfahrtenanzahl um eine Komponente zu erweitern.

Die trotz niedriger Kontaktflächendrücke auf den Pflegefahrgassen beobachtete negative Entwicklung bodenkundlicher und pflanzenbaulicher Parameter legt nahe, primär intensiv befahrene Bereiche in einer Art „CTF-Light“ permanent festzulegen und möglichst für alle Überfahrten mit höheren Kontaktflächendrücken bzw. weniger tragfähigen Bodenzuständen wie bei Ernte, organischer Düngung und Transport zu benutzen.

In Kombination mit weiteren Bodenschutzmassnahmen erweitert CTF die Möglichkeiten, tiefergehende Bodenverdichtungen zu vermeiden, den Bedarf an energieintensiver Bodenlockerung zu reduzieren und die Entwicklung einer stabileren Bodenstruktur mit höherer Tragfähigkeit zu fördern. Zusammen mit einer an Kultur und Anbausystem angepassten Saatbettbereitung und den in geraden Reihen einfacher durchführbaren mechanischen Pflegemassnahmen ergeben sich gute Voraussetzungen für die Gestaltung agronomisch leistungsfähiger und ökologisch nachhaltiger Anbausysteme.

8 Literatur

- Alakukku, L., Weisskopf, P., Chamen, W. C. T., Tijink, F. G. J., van der Linden, J. P., Pires, S., Sommer, C., Spoor, G. (2003): Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 1. Machine/soil interactions. *Soil and Tillage Research*. 2003; 73(1/2): 145-160, Special Issue: Experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Union.
- Amiama-Ares, C., Bueno-Lema, J., Alvarez-Lopez, C. J., Riveiro-Valiño, J. A. (2011): Manual GPS guidance system for agricultural vehicles. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(3), S. 702-712.
- Anken, T., Keck, M., Keil, N., Schick, M., Weber, R., Wechsler, B., Zähler, M. (2002): S-Plus-Kochbuch. FAT, Tänikon, 45 S.
- Anken, T. (2003): Pflanzenentwicklung, Stickstoffdynamik und Nitratauswaschung gepflügter und direktgesäter Parzellen. Eidgenössisch Technische Hochschule, Zürich.
- Anken, T., Weisskopf, P., Zihlmann, U., Forrer, H., Jansa, J., Perhacova, K. (2004): Long-term tillage system effects under moist cool conditions in Switzerland. *Soil and Tillage Research*, 78, S. 171-183.
- Anken, T., Heusser, J., Weisskopf, P., Rek., J., Boller, M., Stamp, P. (2007): Mulch- und Direktsaaten - Ursachen reduzierter Feldaufgänge. ART-Berichte, 682, S. 6 S.
- Anken, T. (2009): Conserve the soil, save time and fuel. International Symposium 'Controlled Traffic Farming and Conservation Agriculture' 25.05.2009, Präsentation, Gissel-feld Kloster / DK.
- Ansorge, D., Godwin, R. J. (2007): The effect of tyres and a rubber track at high axle loads on soil compaction, Part 1: Single axle-studies. *Biosystems Engineering*, 98, 1, S. 115-126.
- Ansorge, D., Godwin, R. J. (2008): The effect of tyres and a rubber track at high axle loads on soil compaction - Part 2: Multi-axle machine studies. *Biosystems Engineering*, 99, 3, S. 338-347.
- Ansorge, D., Godwin, R. J. (2009): The effect of tyres and a rubber track at high axle loads on soil compaction: Part 3: Comparison of virgin compression line approaches. *Biosystems Engineering*, 104, 2, S. 278-287.
- BBodSchG (1998/2004): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz - BBodSchG). Bundesrepublik Deutschland. Berlin.
- Bernhard, J., Kiene, H. C. (2004): Ergonomie an Nährarbeitsplätzen. In: Fachgespräch Ergonomie 2004, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), 15./16.11.2004, Dresden, S. 149-157.
- Berning, F. (2011): Ganz genau geradeaus? TOP AGRAR, 3, S. 116-123.
- Bischoff, J., Hofmann, B. (2007): Vorbeugen statt heilen - Bodenschadverdichtungen bei langfristigem Pflugverzicht. *Neue Landwirtschaft*, 6, S. 38-41.

- Böhrnsen, A., Holtmann, W. (2009): Lenken mit dem Radio. *Profi*, 11, S. 4.
- Böhrnsen, A., Holtmann, W. (2011): Präzision kostet. *Profi*, 06, S. 82-86.
- Boller, M. (2006): Jugendentwicklung und Bodensauerstoffgehalt bei Mais. Institut für Pflanzenwissenschaften der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich.
- Bongwald, O., Luttmann, A., Laurig, W. (1995): Leitfaden für die Beurteilung von Hebe- und Tragetätigkeiten. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), St. Augustin, 277 S.
- Boxberger, J., Moitzi, G., Krönigsberger, O., Landerl, G. (2009): Kosten und Nutzen von Parallelfahrhilfen und automatischen Leitsystemen. Wintertagung des Ökosozialen Forums 10.02.2009, Präsentation, Hollabrunn.
- Brandhuber, R. (2007): Status der Bodenverdichtung in Bayern. In: Strategien zum Bodenschutz - Sachstand und Handlungsbedarf, Fördergemeinschaft Nachhaltige Landwirtschaft e.V. (FNL), Institut für Landwirtschaft und Umwelt (ILU), Bonn, S. 47-56.
- Brandhuber, R. (2008): Wie und wann entsteht Bodenverdichtung? In: Land.Technik für Profis, VDI-MEG, VDI-Verlag, Alpen/Niederrhein, S. 3-10.
- Brunotte, J. (2007): Messung der aktuellen Befahrbarkeit durch online-Sensoren - eine Lösung für die Praxis? In: Strategien zum Bodenschutz - Sachstand und Handlungsbedarf, Fördergemeinschaft Nachhaltige Landwirtschaft e.V. (FNL), Institut für Landwirtschaft und Umwelt (ILU), Bonn, S. 101-110.
- Brunotte, J., Sommer, C. (2008): Möglichkeiten zur Vermeidung der Bodenverdichtung - die VDI-Richtlinie 6101 als Basis und Hilfestellung. In: Land.Technik für Profis, VDI-MEG, VDI-Verlag, VDI-Berichte, Alpen/Niederrhein, S. 11-23.
- Buchter, B., Häusler, S. (2009): Arbeitshilfe zur Erfassung und Beurteilung von Bodenschadverdichtungen., Bodenkundliche Gesellschaft Schweiz (BGS).
- Buick, R. (2006): GPS-Guidance and Automated Steering Renew Interest in Precision Farming Techniques. Trimble.
- Chamen, T., Alakukku, L., Pires, S., Sommer, C., Spoor, G., Tijink, F., Weisskopf, P. (2003a): Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 2. Equipment and field practices. *Soil-and-Tillage-Research*. 2003; 73(1/2): 161-174, Special Issue: Experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Union.
- Chamen, T. (2006a): 'Controlled traffic' farming: literature review and appraisal of potential use in the U.K. *HGCA-Research-Review*. 2006; (59): ii + 58 pp.
- Chamen, T., Alakukku, L., Pires, S., Sommer, C., Spoor, G., Tijink, F., Weisskopf, P. (2003b): Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 2. Equipment and field practices. *Soil-and-Tillage-Research*. 2003; 73(1/2): 161-174, Special Issue: Experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Union.
- Chamen, T. (2006b): Controlled traffic farming: literature review and appraisal of potential use in the U.K. *HGCA-Research-Review*. 2006; (59): ii + 58 pp.

- Chamen, T. (2007): Wege aus der Kostenfalle. *Landwirtschaft ohne Pflug*, 3, S. 19-23.
- Chamen, T. (2009): The Practical Application and Economics of Controlled Traffic Farming as a Soil Management Tool. In: 18th ISTRO, June 15-19, 2009, Izmir / Turkey.
- Chamen, T. (2011): The effects of low and controlled traffic systems on soil physical properties, yields and the profitability of cereal crops on a range of soil types, Cranfield, 305 S.
- Chamen, W. C. T., Vermeulen, G. D., Campell, D. J., Sommer, C. (1992a): Reduction of traffic-induced soil compaction: a synthesis. *Soil & Tillage Research*, 24, S. 303-318.
- Chamen, W. C. T., Watts, C. W., Leede, P. R., Lonstaff, D. J. (1992b): Assessment of a wide span vehicle (gantry) and soil cereal crop responses to its use in a zero traffic regime. *Soil & Tillage Research*, 24, S. 359-380.
- Chervet, A., Ramseier, L., Sturny, W. G., Tschannen, S. (2005): Direktsaat und Pflug im 10-jährigen Systemvergleich. *Agrarforschung*, 12, 5, S. 184-189.
- Cramer, B. (2006): Überprüfung von Bewertungsmodellen zur Identifikation und Bewertung von Schadverdichtungen auf Ackerböden in Nordrhein Westfalen. Universität, Bonn, 235 S.
- De Waard, D. (1996): The Measurement of Drivers' Mental Workload. Dissertation, Wageningen, 136 S.
- Delabays, N., Mermillod, G. (2002): Phénomènes d'allélopathie: premières observations au champ. *Revue suisse d'agriculture*, 34, 5, S. 231-237.
- Demmel, M. (2007): Automatische Spurführung von Landmaschinen Systeme, Einsatzbereiche, Wirtschaftlichkeit. Landtechniktagung 26.01.2007, Präsentation, Schönbrunn.
- Denker, S., Rose, S., Volk, L. (2009): Reifen und Deseleffizienz. *Neue Landwirtschaft*, 6, S. 3.
- Derpsch, R., Friedrich, T. (2009): Development and Current Status of No-till Adoption in the World. In: 18th ISTRO, June 15-19, 2009, Izmir / Turkey.
- Derpsch, R. (2010): Schritte zur erfolgreichen Umsetzung von Direktsaat. Arbeitskreis "Ackerbau ohne Pflug Baden-Württemberg" 25.06.2010, Präsentation, Tübingen.
- Diepolder, M., Raschbacher, S., Brandhuber, R., Kreuter, T. (2009): Auswirkung mechanischer Bodenbelastung auf Dauergrünland. Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, München, S. III-14-III-18.
- Dikow, A. (2010): Ergonomische Aspekte der Arbeit. Vorlesungsreihe Arbeitswissenschaft 2010, Präsentation, Rostock.
- Diserens, E., Spiess, E. (2004): Wechselwirkung zwischen Fahrwerk und Ackerboden. TASC: Eine PC-Anwendung zum Beurteilen und Optimieren der Bodenbeanspruchung.
- Diserens, E., Spiess, E. (2006): Dem Boden zuliebe... Info-Galerie über physikalischen Bodenschutz und der PC-Anwendung TASC. Agroscope, Letzter Zugriff unter www.agroscope.admin.ch/agrartechnische-systeme/00979/00984/ am 21.06.2012

- Dölger, D., Jürgens, H. (2009): Sind Sie auf der richtigen Spur? DLG-Mitteilungen, 07/2009, 07, S. 50-53.
- Egelund, N. (1982): Spectral analysis of heart rate variability as an indicator of driver fatigue. *Ergonomics*, 25, 7, S. 663-672, DOI 10.1080/00140138208925026.
- Elsässer, M., Schäffer, J., Erzgraber, K., Oppermann, R. (1999): Bodenverdichtung unter Grünland Staatliche Lehr und Versuchsanstalt Aulendorf, Letzter Zugriff unter http://www.landwirtschaft-mlr.baden-wuerttemberg.de/servlet/PB/menu/1043365_11/index1305553051392.html am 06.01.2012
- Elsässer, M., Grund, S. (2005): Entwicklung von Gemeiner Rispe (*Poa trivialis* L.) in Abhängigkeit von Nutzungstiefe und Verdichtung des Bodens. Letzter Zugriff unter https://www.landwirtschaft-bw.info/servlet/PB/show/1174896_11/ am 06.01.2012
- ESF/COST (2009): European food systems in a changing world., European Science Foundation / European Cooperation in Science and Technology, Letzter Zugriff unter <http://www.esf.org/publications/forward-looks.html> am 05.04.2012
- Evans, A. (2009): The Feeding of the Nine Billion - Global Food Security for the 21st Century. Chatham House, Letzter Zugriff unter <http://www.chathamhouse.org/publications/papers/view/108957> am 05.04.2012
- FAL, FAW, RAC [Hrsg.] (1998): Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten - 2. Bodenuntersuchung zur Standortcharakterisierung., Zürich-Reckenholz.
- Felder, S. (2003): Vergleich der Böden von Extensiv- und Intensivbewirtschaftung anhand ihres O₂/CO₂-Gehaltes, Bodenfeuchtigkeit und Bodentemperatur. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL), Zürich-Reckenholz.
- Flaig, H. (2008): Bodenbiologie und Bodenfruchtbarkeit. Laborinfotag 28.05.2008, Präsentation, Augustenberg.
- Fleige, H., Horn, R., Gebhardt, S., Hartmann, P., Zink, A. (2009): Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. In: 18th ISTRO, June 15-19, 2009, Izmir / Turkey.
- Friedrich, T. (2007): Degradation of Natural Resources and Measures for Mitigation. In: International Seminar on Enhancing Extension of Conservation Agriculture Techniques in Asia and the Pacific, Asian and Pacific Centre for Agricultural Engineering and Machinery (APCAEM), Zhengzhou/China.
- Fuhrer, J. (2008): Herausforderung Klimawandel - Chancen und Risiken. ART-Tagung 18.01.2008, Zürich-Reckenholz.
- Fuhrer, J., Jasper, K. (2009): Bewässerungsbedürftigkeit von Acker- und Grasland im heutigen Klima. *Agrarforschung*, 16, 10, S. 369-401.
- Geischeder, R., Brandhuber, R., Demmel, M. (2008): Radfahrwerk oder Bandlaufwerk? Wirkungen verschiedener Fahrwerkskonfigurationen auf die Bodenstruktur. *LOP Landwirtschaft ohne Pflug*, 07, S. 22-25.

- Geisler, G. (1978): Der Lufthaushalt des Bodens in seiner Bedeutung für das Pflanzenwachstum. Kali-Briefe, 14, S. 61-78.
- Gomez-Gil, J., San-Jose-Gonzalez, I., Nicolas-Alonso, L. F., Alonso-Garcia, S. (2011): Steering a Tractor by Means of an EMG-Based Human-Machine Interface. Sensors, 11, 7, S. 7110-7126.
- Grund, M. (2003): Pfluglos – Mit konservierender Bodenbearbeitung zum Erfolg. . Neue Landwirtschaft, Sonderheft 2003, S. 92.
- Hamza, M. A., Anderson, W. K. (2005): Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. Soil-and-Tillage-Research, S. 2005; 2082(2002): 2121-2145.
- Hekkert, G., Lenge, R. (2007): Wenn der Automat am Lenkrad dreht. TOP AGRAR, 02, S. 100-105.
- Hemmat, A., Adamchuk, V. I. (2008): Sensor systems for measuring soil compaction: Review and analysis. Computers and Electronics in Agriculture, 63, 2, S. 89-103.
- Herrmann, W. (2010): Streifen lockern vermindert Erosion. DLZ spezial Konservierende Bodenbearbeitung, 2010, S. 20-22.
- Hofmann, B., Tischer, S., Christen, O. (2003): Einfluss langjährig unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf Humusgehalt und biologische Bodeneigenschaften. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss., 15, S. 288-289.
- Holpp, M. (2006): Parallelfahrssysteme für Traktoren. Technik und Wirtschaftlichkeit. ART-Berichte (Früher: FAT-Berichte), 659, S. 12.
- Holtmann, W. (2009): Überladewagen: Wo er hinpasst, schafft er was. Profi, 7, S. 3.
- Höner, G. (2010): Entwicklungsauftrag Bodenschutz. TOP AGRAR, 1, S. 110-115.
- Hörner, R., Keunecke, T., Uhlig, F. (2009): Kompetente Partner gefragt. DLG-Test Landwirtschaft, 4, S. 8.
- Hörner, R. (2010): Effizienz und Schlagkraft kombiniert. DLZ spezial Konservierende Bodenbearbeitung, 2010, S. 32-34.
- Hufnagel, J., Herbst, R., Jarfe, A., Werner, A. (2004): Precision Farming - Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL, 419, Landwirtschaftsverlag GmbH, Darmstadt.
- Kastens, T. L., Kastens, D. L., Dhuyvetter, K. C. (2006): Economics of GPS Guidance. Agricultural Technology Field Day 1.08.2006, Präsentation, Great Bend, Kansas.
- Keller, J. (2005): Auto-Guidance-System - Effiziente Flächenbearbeitung, Dieserverbrauchsoptimierung, Steigerung der Wirtschaftlichkeit. In: Landtechnik für Profis, VDI Verlag GmbH, VDI-Berichte, Magdeburg, S. 106.
- Klapka, S., Steinert, K. (2008): GKB-Forum: Rübenbau und Direktsaat. Gesellschaft für Konservierende Bodenbearbeitung e.V. (GKB), Letzter Zugriff unter <http://www.gkb-ev.de/forum/> am 08.06.2012

- Kolbe, R. (2007): Bodenschadverdichtung und aufwandsoptimierter Ackerbau. In: Strategien zum Bodenschutz - Sachstand und Handlungsbedarf, Fördergemeinschaft Nachhaltige Landwirtschaft e.V. (FNL), Institut für Landwirtschaft und Umwelt (ILU), Bonn, S. 83-91.
- Kölliker, R., Gaume, A., Hund, A., Winzeler, M., Einsele, A. (2008): Eine Vision für den Schweizer Pflanzenbau im Jahr 2050. *Agrarforschung*, 15, 7, S. 332-337.
- Kromer, K. H., Strätz, J., Thelen, M. (2000): Fahrgassenanbau in Zuckerrüben. Arbeiten aus dem Institut für Landtechnik der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Sonderheft.
- Kroulik, M., Loch, T., Kviz, Z., Prosek, V. (2009): Procedures of soil farming allowing to reduce compaction. In: Precision Agriculture '09, van Henten, E. J., Goense, D., Lokhorst, C., Wageningen, S. 603-611.
- Lebert, M., Brunotte, J., Sommer, C. (2004): Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung, entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden/Regelungen zur Gefahrenabwehr., Umweltbundesamt, Berlin.
- Li, Y. X., Tullberg, J. N., Freebairn, D. M., McLaughlin, N. B., Li, H. W. (2008): Effects of tillage and traffic on crop production in dryland farming systems: II. Long-term simulation of crop production using the PERFECT model. *Soil and Tillage Research*, 100, 1-2, S. 25-33.
- Linke, C. (1998): Direktsaat - eine Bestandesaufnahme unter besonderer Berücksichtigung technischer, agronomischer und ökonomischer Aspekte. Dissertation, Universität Hohenheim (D), Jahrgang, Nummer, S. 482 p.
- Lorenz, M. (2007): Status der Bodenverdichtung auf niedersächsischen Ackerböden und eine Übersicht der Verhältnisse in Deutschland. In: Strategien zum Bodenschutz - Sachstand und Handlungsbedarf, Fördergemeinschaft Nachhaltige Landwirtschaft e.V. (FNL), Institut für Landwirtschaft und Umwelt (ILU), Bonn, S. 57-70.
- Macak, M., Nozdrovicky, L. (2011): Economic Benefit of the Automated Satellite Guidance of the Field Machines. Nitra.
- Maurer-Troxler, C., Chervet, A., Ramseier, L., Sturny, W. G., Oberholzer, H. R. (2005): Bodenbiologie nach zehn Jahren Direktsaat und Pflug. *Agrarforschung*, 12, 10, S. 460-465.
- Möbius, J. (2011): Controlled Traffic light: Dauerhaft feste Fahrspuren für Düngung und Pflanzenschutz. *Agrarheute*, Letzter Zugriff unter <http://meilensteine.agrarheute.com/nl-bericht-lenkung-nh> am 16.01.2012
- Moitzi, G., Heine, E. (2006): GPS kontra Mensch. *Der Fortschrittliche Landwirt*, 05, S. 38-42.
- Moitzi, G., Heine, E., Refenner, K., Paar, J., Boxberger, J. (2007): Automatisches Lenksystem im Einsatz auf kleinen Flächen - Untersuchungen zum Arbeitszeit- und Kraftstoffaufwand sowie zur Systemgenauigkeit. 15. Arbeitswissenschaftliches Seminar 05./06.03.2007, Präsentation, Universität für Bodenkultur, Wien.

- Morawietz, E. (2011): Mit schwachem Herz ans Steuer? Ford experimentiert mit EKG. Frankfurter Allgemeine Zeitung, Letzter Zugriff unter <http://m.faz.net/aktuell/technik-motor/auto-verkehr/ford-experimentiert-mit-ekg-mit-schwachem-herz-ans-steuer-11107647.html> am 14.01.2012
- Mosimann, T., Rüttimann, M. (1996): Abschätzung der Bodenerosion und Beurteilung der Gefährdung der Bodenfruchtbarkeit. Amt für Umwelt und Energie, Kanton Basel-Landschaft, Liestal.
- Mühlhausen (2009): Agravis-Mit-Handysignalen-die-Spur-halten. Eilbote, 45-46, S. 2.
- Mumme, M. (2009): Strategien für die Zukunft - Teil I. DLZ Agrarmagazin, 6, S. 5.
- N.N. (2008): Polar RS800CX - Gebrauchsanleitung. Oy, P. E., Kempele/FI, 67 S.
- N.N. (2011a): Vereinfachte Aussaattechniken weiter auf dem Vormarsch. Eilbote, 22.
- N.N. (2011b): Erosionsgefährdung durch Wasser., Umweltbundesamt, Letzter Zugriff unter <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodent=3167> am 06.06.2012
- N.N. (2011c): Sehr flexible Michelin-Reifen. DLZ-Agrarmagazin, 05/2011, S. 78.
- Nemecek, T., Gaillard, G., Baan, L. d. (2009): EUROCCROP: Forschungsstrategie für den europäischen Ackerbau. Agrarforschung, 16, 6, S. 192-197.
- Niemann, H., Schwaiberger, R., Fröba, N. [Hrsg.] (2007): Parallelfahrssysteme. 67, KTBL, Darmstadt, 54 S.
- Nievergelt, J., Petrasek, M., Weisskopf, P. (2002): Bodengefüge – Ansprechen und Beurteilen mit visuellen Mitteln. . FAL, Zürich, S. 1-93.
- Nievergelt, J. (2005): Boden und Bodeninformation: Auch eine europäische Sache. Zürich.
- Noack, P. (2004): GPS gestützte automatische Lenksysteme. Landtechnik, 05, S. 256-257.
- Nowak, G. (2009): Nyt beregningsværktøj til kørespor (Neues Berechnungstool für Fahrspuren). AgroTech, Letzter Zugriff unter <http://agrotech.dk/netop-nu-nyt-beregningsvaerktoej-til-koerespor> am 07.06.2012
- NSC (2010): Understanding the distracted brain - Why driving while using hands-free cell phones is risky behaviour. National Safety Council.
- Oberholzer, H.-R., Scheid, S. (2007): Bodenmikrobiologische Kennwerte - Erfassung des Zustands landwirtschaftlicher Böden im NABO-Referenzmessnetz anhand biologischer Parameter (NABObio). Umwelt, B. f., Bern, 76 S.
- Paar, J. (2009): Günstige Technik hält Sie auf dem rechten Weg. Landfreund, 09, S. 23-25.
- Paridon, H. (2006): Herzrate und Blickverlauf: Wie reagieren junge Fahrer? Akademie-Journal, 3/2006, S. 7.

- Pedersen, H. H. (2008): CTF in Forage Grass. www.controlledtrafficfarming.com, Letzter Zugriff unter <http://www.controlledtrafficfarming.com/downloadssecure/Denmark%20CTF%20in%20Forage%20Grass%20Workshop%20Report.pdf> am 21.06.2012
- Pedersen, H. H. (2011): Harvest Capacity Model for a Wide Span Onion Bunker Harvester. In: CIGR/NJF seminar 441 - Automation and system technology in plant production, 30.06.-02.07.2011, Herning.
- Petelkau, H. (1984): Auswirkungen von Schadverdichtungen auf Bodeneigenschaften und Pflanzenertrag sowie Massnahmen zu ihrer Minderung. In: Tag. Ber. Akad. Landwirtsch. Wiss. DDR, Berlin, S. 25-34.
- Peters, O., Pickel, P., Tarasinski, N. (2011): Automated Machine Guidance Using Laser Range Data. In: Land.Technik AgEng 2011, VDI, VDI, Hannover.
- Piechotka, M. (1999): Überprüfung der Praxistauglichkeit und Weiterentwicklung von Methoden zur Entnahme, Aufbewahrung und Analyse von Bodenluftproben. Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL), Zürich-Reckenholz.
- Poesse, G. J. (1992): Soil compaction and new traffic systems. Commission of the European Communities: Possibilities offered by new mechanization systems to reduce agricultural production costs, Brussels, 79-91 S.
- Poloni, D. (2007): Korrektur muss sein. Vorteile ortsfester RTK-Stationen für die automatische Lenkung. Neue Landwirtschaft, 12, S. 56-58.
- Prasuhn, V., Liniger, H., Hurni, H., Friedli, S. (2007): Bodenerosions-Gefährdungskarte der Schweiz. Agrarforschung, 14, 03, S. 120-127.
- Prasuhn, V. (2012): On-farm effects of tillage and crops on soil erosion measured over 10 years in Switzerland. Soil & Tillage Research, S. 10, DOI 10.1016/j.still.2012.01.002.
- Prem, W., Rothmund, M., Umstätter, C. (2004): Umfrage zu Precision Agriculture 2004. Poster.
- Raper, R. L., Reeves, D. W., Burt, E. C., Torbert, H. A. (1994): Conservation tillage and traffic effects on soil condition. Transactions of the ASAE. 1994; 37(3): 763-768.
- Rehme, G. (2004): Musterbaustellen - Versetzhilfen im Mauerwerksbau. In: Fachgespräch Ergonomie 2004, Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), 15./16.11.2004, Dresden, S. 189-198.
- Reimer, B., Mehler, B., Coughlin, J. F. (2010): An Evaluation of Driver Reactions to New Vehicle Parking Assist Technologies Developed to Reduce Driver Stress.
- Reimer, B., Mehler, B., Coughlin, J. F., Roy, N., Dusek, J. A. (2011): The impact of a naturalistic hands-free cellular phone task on heart rate and simulated driving performance in two age groups. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 14, 1, S. 13-25.
- Reintam, E., Trukmann, K., Kuht, J., Nugis, E., Edesi, L., Astover, A., Noormets, M., Kauer, K., Krestein, K., Rannik, K. (2009): Soil compaction effects on soil bulk density and

- penetration resistance and growth of spring barley (*Hordeum vulgare* L.). *Acta Agriculturae Scandinavica*, 2009. 59, 3, S. 265-272.
- Roberts, M. (2011): Ackern auf dem rechten Weg - Controlled Traffic Farming in Grossbritannien. *Profi*, 07, S. 70-73.
- Rücknagel, J., Dumbeck, G. (2011): Mehr als nur Zwillingsreifen. *DLG-Mitteilungen*, 07, S. 24-27.
- Rüegg, J., Total, R., Holpp, M., Anken, T., Bachmann, T. (2011): Satelliten-gesteuerte Lenksysteme im Feldgemüsebau - Stand der Technik, praktische Erfahrungen und Empfehlungen. *Agroscope Changions-Wädenswil (ACW), Wädenswil*.
- Schäfer, C. (2010): Berechnungen zum Kraftstoffbedarf der pflanzlichen Produktion und Abschätzung von Einsparpotentialen unter Berücksichtigung verschiedener Anbauverfahren. *Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE)*.
- Schäfer, W. (2003): Gantry technology in organic crop production. In: 22nd Congress "Nordic Agriculture in Global Perspective", Niemeläinen, O., Topi-Helmi, M., S. 212.
- Scheffer, F., Schachtschabel, P. (2002): *Lehrbuch der Bodenkunde*. Spektrum Akademischer Verlag, Stuttgart.
- Schulten-Baumer, F., Schmittmann, O., Schulze Lammers, P. (2009): Parallelfahrssysteme - Akzeptanz und Nutzen. *Landtechnik*, 01, S. 61-63.
- Schulten-Baumer, F., Schmittmann, O. (2010): Lenksysteme: wer nutzt sie und zu welchen Arbeiten? *Lohnunternehmen*, 1, S. 4.
- Schwab, P. (2010): Eindringwiderstandsmessung mit dem Penetrometer. Referenzierung von Zeitreihen für die Boden-Dauerbeobachtung., *Forschungsanstalt Agroscope ART, Zürich*.
- Shaver, T. M., Westfall, D. G., Khosla, R. (2007): Comparison of three active hand-held NDVI (normalized difference vegetation indices) remote sensors for nitrogen management in corn. In: Stafford, J. V., *Precision agriculture '07. Papers presented at the 6th European Conference on Precision Agriculture, Skiathos, Greece, 3-6 June, 2007. 2007. 373-379. 11 ref.*
- SR814.12 (1998): *Verordnung vom 1. Juli 1998 über Belastungen des Bodens (VBBo)*. Bundesrat, S. Bern. SR 814.12.
- Stahl, H. (2006): Schutz des Bodengefüges mit Entscheidungshilfe Bodendruck. *Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Letzter Zugriff unter http://www.landwirtschaft.sachsen.de/de/wu/Landwirtschaft/lfl/inhalt/7211_9795.htm am 07.12.2006*
- Stahl, H. (2007): Bodenverdichtung: Stand des Wissens und der Vorsorge in Sachsen. In: *Strategien zum Bodenschutz - Sachstand und Handlungsbedarf*, Fördergemeinschaft Nachhaltige Landwirtschaft e.V. (FNL), Institut für Landwirtschaft und Umwelt (ILU), Bonn, S. 41-45.
- Stahl, H., Marschall, K., Götze, H., Freytag, A. (2009): *Bodendruck im Grünland*. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.

- Stettler, M., Keller, T., Schjonning, P., Lamandé, M., Lassen, P., Pedersen, J., Weisskopf, P. (2010): Terranimo® - a web-based tool for assessment of the risk of soil compaction due to agricultural field traffic. In: Conference AgEng 2010, European Society of Agricultural Engineers, September 6-8, 2010, Clermont-Ferrand, France, S. 1-7.
- Südzucker (2002): Innovative Bodenbearbeitung: Pflug - Locker - Mulch - Direktsaat. Südzucker AG, Mannheim/Ochsenfurt, S. 8.
- Taylor, J. H. (1994): Development and benefits of vehicle gantries and controlled traffic systems., 521-537 S.
- Trunkmann, K., Horn, R., Reintam, E. (2009): Impact Of Roots On Soil Stabilisation In Grassland. In: 18th ISTRO, June 15-19, 2009, Izmir / Turkey.
- Tullberg, J. (2000a): Wheel traffic effects on tillage draught. Journal-of-Agricultural-Engineering-Research. 2000; 75(4): 375-382.
- Tullberg, J., Yule, D. F., McGarry, D. (2003): "On track" to sustainable cropping systems in Australia. Proceedings of the 16th ISTRO conference, 13.-18. july, Brisbane, Australia, S. 1271-1285.
- Tullberg, J. N. (1994): Controlled traffic in rainfed grain production., 1295-1301 S.
- Tullberg, J. N. (2000b): Traffic and Tillage- Efficiency/Sustainability Implications. Prodeeding in 15 th ISTRO-Conference, in Fort Worth, Texas USA, S. 7p.
- Tullberg, J. N., Yule, D. F., McGarry, D. (2007): Controlled traffic farming - From research to adoption in Australia. Soil and Tillage Research, 97, 2, S. 272-281.
- UN (2010): World Population Prospects - the 2010 Revision. United Nations, Letzter Zugriff unter <http://esa.un.org/unpd/wpp/index.htm> am 05.04.2012
- van den Akker, J. J. H., Schjonning, P. (2004): Subsoil compaction and ways to prevent it., 163-184 S.
- VDI-Richtlinie 6101 (2007): Maschineneinsatz unter Berücksichtigung der Befahrbarkeit landwirtschaftlich genutzter Böden / Machine operation with regard to the trafficability of soils used for agriculture. Verein Deutscher Ingenieure VDI. Berlin, Beuth-Verlag.
- Vermeulen, B., Korteweg, J. (2007): Controlled traffic for organic farming. Workshop Controlled Traffic Farming 23.-25.05.2007, Präsentation, Wageningen.
- Volkart, U. (1944): Geschichte und Arbeit des Pfluges. Die Grüne, 12, S. 286-306.
- Vosshenrich, H. (2010): Verteilen allein reicht nicht. DLZ spezial Konservierende Bodenbearbeitung, S. 26-31.
- Vullioud, P., Neyroud, J.-A., Mercier, E. (2006): Résultats de 35 ans de culture sans labour a Changins II Evolution des propriétés du sol. Revue suisse d'Agriculture, 38, 1, S. 1-16.
- Webb, B., Blackwell, P. (2004): Tramline Farming Systems. Departement of agriculture of Western Australia, Geraldton.

- Weissbach, M. (2001a): Niedriger Luftdruck ist entscheidend. Landwirtschaft ohne Pflug, 4, S. 12-18.
- Weissbach, M. (2001b): Bodenschonende Bereifung für grosse Fahrzeuge bei der Gül-
lenausbringung. Landtechnik, 56, 4, S. 286-287.
- Weisskopf, P., Zihlmann, U., Chervet, A., Sturny, W. G., Müller, M. (2005): Entwicklung
des Bodengefüges bei Direktsaat und Pflug. AGRARForschung, 12, 08, S. 362-367.
- Weisskopf, P., Keller, T. (2007): Konzeptionelle Überlegungen zur bodenschonenden Me-
chanisierung als Bestandteil von precision agriculture. In: Strategien zum Bodenschutz -
Sachstand und Handlungsbedarf, Fördergemeinschaft Nachhaltige Landwirtschaft e.V.
(FNL), Institut für Landwirtschaft und Umwelt (ILU), Bonn, S. 71-81.
- Weisskopf, P., Reiser, R., Rek, J., Oberholzer, H.-R. (2010): Effect of different compaction
impacts and varying subsequent management practices on soil structure, air regime and
microbiological parameters. Soil-and-Tillage-Research, 111, S. 65-74.
- WERU. Wind Erosion Research Unit (WERU), United States Department of Agriculture,
Agricultural Research Service, Kansas State University, Letzter Zugriff unter
<http://www.weru.ksu.edu> am 23.01.2012
- Weyer, T. (2007): Status der Bodenverdichtung in Nordrhein-Westfalen. In: Strategien
zum Bodenschutz - Sachstand und Handlungsbedarf, Fördergemeinschaft Nachhaltige
Landwirtschaft e.V. (FNL), Institut für Landwirtschaft und Umwelt (ILU), Bonn, S. 29-39.
- Winner, H., Halkuli, S., Wolf, G. (2009): Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Vieweg +
Teubner, Wiesbaden, 697 S.
- Würfel, T., Vetter, R., Unterseher, E., Elsässer, M. (2002): Vorsorge gegen Bodenschad-
verdichtungen. Landsanstalt für Pflanzenbau, Rheinstetten.
- Wurbs, D., Steininger, M. (2011): Wirkungen der Klimaänderungen auf die Böden. Unter-
suchungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser.,
Umweltbundesamt, S. 225.
- XiangJu, L., DeZi, L., YangHan, L. (2000): Study on allelopathic effect of wheat straw on
the emergence of crabgrass. Journal of Hebei Agricultural University, 23, 2, S. 74-77.
- Yule, D. (2012): Overloading within CTF systems. Mündliche Mitteilung, Brisbane, Austra-
lia.
- Zhang, X., Geimer, M., Grandl, L., Ehrl, M., Noack, P. O. (2010): Elektronische Deichsel
für landwirtschaftliche Arbeitsmaschine. Landtechnik, 04, S. 256-259.
- Zink, A., Fleige, H., Horn, R. (2009): Effect of wheel load, tire inflation pressure and tillage
treatment on stress distribution and soil physical properties under agricultural land use.
In: 18th ISTRO conference proceedings, June 15-19, 2009, Izmir / Turkey.

9 Anhang

9.1 Maschinen im CTF-Feldversuch

Maschine	Hersteller	Typ	Leistung / Arbeitsbreite
Traktor	John Deere, Mannheim, DE	6920S	110kW
Traktor	Same, Treviglio, IT	Dorado 75	53kW
Traktor	Fendt, Marktoberdorf, DE	Vario 411	81kW
Traktor	Hürlimann, Treviglio, IT	H488DT	65kW
Pflug	Althaus, Ersigen, CH	Tierra 2	0.75m
Scheibenegge	Evers, Almelo, NL	Skyros	3.00m
Grubber	Pöttinger, Grieskirchen, AT	Syncro 3003	3.00m
Kreiselegge + Sämaschine	Kverneland, Kverneland, NO	NG 18 300 Pneumatic DA-L	3.00m
Versuchs-sämaschine	Eigenbau mit Gaspardo-Scheibensächaren		2.25m
Mulchgerät	FALC, Faenza, IT	Pellicano 2100	2.10m
Mähdrescher	John Deere, Mannheim, DE	Hillmaster 2254	4.50m
Zetter	Pöttinger, Grieskirchen, AT	Eurohit 540	5.40m
Zetter	Claas, Saugau, DE	Volvo 870T	8.70m
Seitenschwader	Krone, Spelle, DE	Swadro 710	7.10
Frontmäherwerk	Claas, Saugau, DE	Corto 3150F	3.15m
Heckmäherwerk	Deutz-Fahr, Gottmadingen, DE	KM24CR	1.85m
Rundballenpresse	Krone, Spelle, DE	Comprima F155XC	
Ladewagen	GVS Agrar, Schaffhausen, CH	TL219	
Düngerstreuer	Rauch, Sinzheim, DE	Aero 2215	12m
Pflanzenschutzgerät	Fischer, Collombey-le-Grand, CH	Agri 3000	12m

9.2 Saatgut

Kultur	Sorte	TKG	Saatstärke
Winterweizen 2009	Siala	44	400 Körner/m ²
Wintergerste 2010	Fridericus	50	250 Körner/m ²
Kunstwiese 2011	Gras-Weissklee-Mischung UFA 330	-	Pflug 33kg/ha Direktsaat/CTF 36kg/ha

9.3 N_{min}-Beprobung

Variante	Tiefe (cm)	25.02.2009 vor Winterweizen N _{min} (kg/ha)	10.03.2010 vor Wintergerste N _{min} (kg/ha)
CTF nicht befahren	0-30	13.8	15.9
	30-60	10.6	6.5
	60-100	9.8	3.6
	Summe	34.2	26.0
CTF mittel befahren	0-30	13.1	14.6
	30-60	10.6	6.8
	60-100	7.9	5.6
	Summe	31.6	26.9
Direktsaat zufällig befahren	0-30	13.6	14.6
	30-60	8.0	5.7
	60-100	7.9	2.7
	Summe	29.5	22.9
Pflug zufällig befahren	0-30	7.8	13.5
	30-60	7.7	9.8
	60-100	7.8	6.1
	Summe	23.3	29.4

9.4 Schlagkarten

Im Folgenden sind die Schlagkarten der Erntejahre 2009 (Winterweizen), 2010 (Wintergerste) und 2011 (Kunstwiese) aufgeführt. Die genaue Bezeichnung der Dünger sind in der Tabelle aufgeführt. In den Schlagkarten aufgeführte Hofdünger wurden auf den in diesem Versuch nicht berücksichtigten Bio-Parzellen ausgebracht.

Tabelle: Düngerbezeichnungen

Bezeichnung in Schlagkarte	Bezeichnung
2 Ammonsal	Ammonsalpeter
2 NPK 13.13.	NPK 13/13/21
2 Concentro	Concentro



Schlagkarte 2009

ART-Tänikon

Datum / Uhrzeit: 31.01.2012 / 10:37
Seite: 1/2

Schlag

010-02 10 Grund VP

Größe: 1.000 ha
Vorrüchte: 2006: SM 2007: WW 2008: EE

Wasserschutzgebiet: nein Benachteiligtes Gebiet: nein

Anbau	01.10.2008	Winterweizen Siala Top	TKG: 44.00 ..m²:	Keimf.: %	Abstand:
Hauptfrucht		Saatmenge : 180.00 kg / ha			180.00 kg gesamt
		Saatgutpreis: EUR / kg			

Pflanzenschutz						Düngung					
	bearb. ha	Menge ges	-/ha	EUR/ha	EC		bearb. ha	Menge ges	-/ha	EUR/ha	N EC
05.09. Glyphos CH	0.50	2.50	5.00	54.00		18.03. 2 Ammonsal	0.70	1.12	1.60	45.28	43
08.04. Isoproturon	1.00	2.50	2.50	27.50		19.03. 1 Rindergüll	0.20	11.00	55.00	0.00	61
08.04. Concert SX	1.00	80.00	80.00	0.00		06.04. 2 Ammonsal	0.60	1.02	1.70	48.11	46
08.04. Starane 180 CH	1.00	0.80	0.80	61.60		16.04. 1 Rindergüll	0.20	8.00	40.00	0.00	44
14.04. Cycocel Extra	1.00	0.80	0.80	0.00		26.05. 2 Ammonsal	0.60	0.90	1.50	42.45	41
27.08. Glyphos CH	0.40	2.00	5.00	54.00		11.09. 2 PK 20-30	0.60	1.80	3.00	149.85	
Schlagsumme				137.70		2009					103
						Schlagsumme				175.94	103

Maschinen				
	bearb. ha	Std. ges.	-/ha	EUR/ha
19.03. 1 DF Schleppschl 8m3	0.20			0.00
19.03. 1 Gülle ausbringen	0.20	0.00	0.00	0.00
03.04. Striegel 12 m	0.20			3.20
03.04. Striegeln	0.20	0.00	0.00	3.20
06.04. Striegel 12 m	0.20			3.20
06.04. Striegeln	0.20	0.00	0.00	3.20
16.04. 1 DF Schleppschl 8m3	0.20			0.00
16.04. 1 Gülle ausbringen	0.20	0.00	0.00	0.00
07.05. Striegel 12 m	0.20			3.20
07.05. Striegeln	0.20	0.00	0.00	3.20
25.05. 1 Handarbeit	0.20			0.00
25.05. Unkraut regulieren	0.20	0.00	0.00	0.00
02.06. 1 Handarbeit	0.20			0.00
02.06. Unkraut regulieren	0.20	0.00	0.00	0.00
21.08. 3 Grubber Rabe	0.40			10.20
21.08. Stoppelbearbeitung	0.40	0.00	0.00	10.20
31.08. Scheibenegge	0.40			0.00
31.08. Stoppelbearbeitung	0.40	0.00	0.00	0.00
Schlagsumme		0.00	0.00	6.00

Sonstiges	

Ernte					
	1	Hauptfrucht WW Siala Top			
		Erntemenge:	20.50 dt	20.50 dt/ha	Prämie: EUR
13.08.09	1.0000 ha	Ernteerlöse:	EUR	EUR /ha	EUR/ha

Bilanz				Nährstoffe					
		Sonstige Kosten:	0.00	N	P2O5	K2O	MgO	CaO	
Saatgut:				Bedarf					
Dünger-folgeEJ:	175.94 - 0.00	Leistung:	0.00	Zugang	103.0	53.1	130.0	4.8	0.0
Pflanzenschutz:	137.70	Prämie:	0.00	Bilanz					
Maschinen:	6.00	Sonstige Erträge:	0.00	max/ha					

Bemerkungen Kommentare und Notizen		
bearbeitet	Bemerkung / Kommentar	
05.09.	50%	ohne Bio /
18.03.	70%	nach Versuchsplan /
19.03.	20%	Bio-Parzellen, eff. 55 N/ha /



www.agrocom.com

Schlagkarte 2009

ART-Tänikon

Datum / Uhrzeit: 31.01.2012 / 10:37
Seite: 2 / 2

Schlag

010-02 10 Grund VP

Größe: 1.0000 ha
Vorfrüchte: 2006: SM 2007: WW 2008: EE

Wasserschutzgebiet: nein Benachteiligtes Gebiet: nein

Bemerkungen Kommentare und Notizen		
bearbeitet		Bemerkung / Kommentar
03.04.	20%	1. Durchgang /
06.04.	60%	Nach Plan 40-50 N /
06.04.	20%	2. Durchgang /
16.04.	20%	Bio-Parzellen eff. 45 N/ha /
07.05.	20%	Bio 3.Durchgang /
25.05.	20%	Blacken /
26.05.	60%	nach Versuchsplan /
02.06.	20%	Disteln /
21.08.	40%	Pflug und Bio /
27.08.	40%	Direkrsaat und CContr. Traf. /
31.08.	40%	Pflug und Bio /
11.09.	60%	ohne Bio /
weitere Notizen:		



Schlagkarte 2010

ART-Tänikon

Datum / Uhrzeit: 31.01.2012 / 10:36
Seite: 1 / 1

www.agrocom.com

Schlag

010-02 10 Grund VP

Größe: 1.000 ha
Vorrüchte: 2007: WW 2008: EE 2009: WW

Wasserschutzgebiet: nein Benachteiligtes Gebiet: nein

Anbau	25.09.2009	Wintergerste Fridericus	TKG:	52.00 €/m²:	Keimf.:	% Abstand:
Hauptfrucht		Saatmenge:	140.00 kg / ha			140.00 kg gesamt
		Saatgutpreis:	EUR / kg			

Pflanzenschutz						Düngung					
	bearb. ha	Menge ges	-/ha	EUR/ha	EC		bearb. ha	Menge ges	-/ha	EUR/ha	N EC
21.10. Herold	0.60	0.36	0.60	121.08		24.03. 2 Ammonsal	0.60	0.90	1.50	42.45	41
21.04. Amistar Xtra	0.80	0.64	0.80	0.00		25.03. 1 Rindergüll	0.20	10.00	50.00	0.00	55
21.04. Moddus CH	0.80	0.64	0.80	61.60		26.04. 2 Ammonsal	0.60	0.84	1.40	39.62	38
04.08. Glyphos CH	0.40	2.00	5.00	54.00		2010					58
Schlagsumme				143.53		Schlagsumme				49.24	58

Maschinen				
	bearb. ha	Std. ges.	-/ha	EUR/ha
19.09. Pflug 2-Schar	1.00			34.40
19.09. 1 Pflügen	1.00	0.00	0.00	34.40
29.10. Striegel 12 m	0.20			3.20
29.10. Striegeln	0.20	0.00	0.00	3.20
25.03. Striegel 12 m	0.20			3.20
25.03. Striegeln	0.20	0.00	0.00	3.20
08.04. Striegel 12 m	0.20			3.20
08.04. Striegeln	0.20	0.00	0.00	3.20
09.04. Striegel 12 m	0.20			3.20
09.04. Striegeln	0.20	0.00	0.00	3.20
Schlagsumme		0.00	0.00	36.96

Sonstiges	

Ernte	1	Hauptfrucht WG Fridericus	Erntemenge:	36.91 dt	36.91 dt/ha	Prämie:	EUR
13.07.10	1.0000 ha	Ernteerlöse:	EUR	EUR /ha		EUR/ha	
Ernte	2	Hauptfrucht WG Fridericus	Erntemenge:	36.91 dt	36.91 dt/ha	Prämie:	EUR
13.07.10	1.0000 ha	Ernteerlöse:	EUR	EUR /ha		EUR/ha	

Bilanz				Nährstoffe					
Saatgut:		Sonstige Kosten:	0.00		N	P2O5	K2O	MgO	CaO
Dünger-folgeEJ:	49.24 - 0.00	Leistung:	0.00	Bedarf					
Pflanzenschutz:	121.93	Prämie:	0.00	Zugang	58.0	9.0	40.0	2.5	0.0
Maschinen:	36.96	Sonstige Erträge:	0.00	Bilanz					
Personen:				max/ha					

Bemerkungen Kommentare und Notizen		
bearbeitet	Bemerkung / Kommentar	
19.09.	100%	bei Pflug u Bioparzelle /
25.09.	100%	Biosaatgut 160 kg/ha /
21.10.	60%	ohne Bio /
29.10.	20%	Nur Bioparzelle /
24.03.	60%	/
25.03.	20%	4 Stund vor dem güllen /
25.03.	20%	/
08.04.	20%	Bioparzelle /
09.04.	20%	in Gegenrichtung /
21.04.	80%	/
26.04.	60%	/
04.08.	40%	wo keine Stoppelbearbeitung /



Schlagkarte 2011

ART-Tänikon

 Datum / Uhrzeit: 31.01.2012 / 10:34
 Seite: 1/2

www.agrocom.com

Schlag

010-02 10 Grund VP

Größe: 1.0000 ha

Vorfrüchte: 2008: EE 2009: WW 2010: WG

Wasserschutzgebiet: nein Benachteiligtes Gebiet: nein

Anbau	Kunstwiese St.M. 330	TKG:	./m²:	Keimf.:	% Abstand:
Hauptfrucht	Saatmenge : 33.00 kg / ha			33.00 kg gesamt	
	Saatgutpreis: 33.00 EUR / kg				

Pflanzenschutz	Düngung				
	parb. ha	Menge ges	-/ha	EUR/ha	N EC
	25.08. 3 StM 330	1.00	33.00	33.00	
	06.09. 2 Ammonsal	0.60	0.66	1.10	31.13 30
	08.09. 1 Rindergüll	0.20	6.00	30.00	0.00 33
	2010				24
	23.03. 1 Rindergüll	0.20	6.00	30.00	0.00 33
	23.03. 2 NPK 13.13.	0.60	1.50	2.50	0.00 33
	31.03. 2 NPK 13.13.	0.60	0.24	0.40	0.00 5
	31.03. 3 StM 330	0.60	12.00	20.00	0.00
	26.05. 2 Ammonsal	0.60	0.66	1.10	31.13 30
	26.05. 1 Rindergüll	0.20	6.00	30.00	0.00 33
	22.06. 2 Concentro	0.60	1.38	2.30	127.19 30
	22.06. 1 Rindergüll	0.20	6.00	30.00	0.00 33
	23.08. 2 NPK 13.13.	0.20	0.46	2.30	0.00 30
	26.08. 1 Rindergüll	0.20	6.00	30.00	0.00 33
	2011				91
	Schlagsumme			113.67	115

Maschinen	bearb. ha	Std. ges.	-/ha	EUR/ha
25.08. 3 Säkombination	1.00			36.50
25.08. Saat GD-Zwischenfutter	1.00	0.00	0.00	36.50
08.09. 1 DF Schleppschl 8m3	0.20			0.00
08.09. 1 Gülle ausbringen	0.20	0.00	0.00	0.00
23.03. 1 DF Schleppschl 8m3	0.20			0.00
23.03. 1 Gülle ausbringen	0.20	0.00	0.00	0.00
31.03. 1 Düngerstr Rauch	0.60			7.26
31.03. Wiesen pflegen	0.60	0.00	0.00	7.26
31.03. Striegel 12 m	0.00			0.00
31.03. Wiesen pflegen	1.00	0.00	0.00	0.00
17.05. Kreiselmäher Fahr	1.00			13.15
17.05. 1 Mähen	1.00	0.00	0.00	13.15
26.05. 1 DF Schleppschl 8m3	0.20			0.00
26.05. 1 Gülle ausbringen	0.20	0.00	0.00	0.00
20.06. 2 FM Aufbereiter	1.00			0.00
20.06. 1 Mähen	1.00	0.00	0.00	0.00
22.06. 1 DF Schleppschl 8m3	0.20			0.00
22.06. 1 Gülle ausbringen	0.20	0.00	0.00	0.00
27.06. 2 FM Aufbereiter	1.00			0.00
27.06. 1 Mähen	1.00	0.00	0.00	0.00
17.08. 2 FM solo	1.00			14.70
17.08. 1 Mähen	1.00	0.00	0.00	14.70
27.09. 2 FM solo	1.00			14.70
27.09. 1 Mähen	1.00	0.00	0.00	14.70
Schlagsumme	0.00	0.00	0.00	83.41

Sonstiges



Schlagkarte 2011

ART-Tänikon

Datum / Uhrzeit: 31.01.2012 / 10:34
Seite: 2/2

www.agrocom.com

Schlag

010-02 10 Grund VP

Größe: 1.0000 ha
Vorfrüchte: 2008: EE 2009: WW 2010: WG

Wasserschutzgebiet: nein Benachteiligtes Gebiet: nein

Bilanz				Nährstoffe					
Saatgut:	1'089.00	Sonstige Kosten:	0.00		N	P2O5	K2O	MgO	CaO
Dünger-folgeEJ:	113.67 - 0.00			Bedarf					
Pflanzenschutz:	0.00	Leistung:	26'250.00	Zugang	115.2	73.5	202.1	7.5	0.0
Maschinen:	83.41	Prämie:	0.00	Bilanz					
Personen:		Sonstige Erträge:	0.00	max/ha					

Bemerkungen Kommentare und Notizen

bearbeitet	Bemerkung / Kommentar
25.08. 100%	Direktsaat am Volgetag /
06.09. 60%	ohne Bioparzelle /
08.09. 20%	/
23.03. 60%	/
23.03. 20%	Bioparzelle /
31.03. 60%	Nachsaat /
26.05. 60%	ohne Bio /
26.05. 20%	/
22.06. 60%	/
22.06. 20%	/
27.06. 100%	nach Versuchsplan /
23.08. 20%	Bioparzellen /
26.08. 20%	/

weitere Notizen:

ISSN 0931-6264