

Landbauforschung

*Applied Agricultural
and Forestry Research*

Vol. 66
No. 2 · 06.2016



Landbauforschung

Landbauforschung *Applied Agricultural and Forestry Research* ist eine wissenschaftliche Zeitschrift, in der Forschungsergebnisse zu gesellschaftlich relevanten Themen veröffentlicht werden, die einen Bezug zur Landwirtschaft, zur Forstwirtschaft und zur ländlichen Entwicklung aufweisen. Die Zeitschrift ist damit explizit Disziplinen übergreifend ausgerichtet.

Veröffentlicht werden insbesondere anwendungsorientierte wissenschaftliche Beiträge, die interdisziplinär angelegt sind oder die ausgeprägte Bezugspunkte zu anderen Fachdisziplinen aufweisen. Der geographische Fokus der Zeitschrift liegt auf Deutschland und Europa. Die Sprache der Beiträge ist deutsch oder englisch. Alle Beiträge unterliegen einer doppelt anonymen Begutachtung (double-blind peer review).

Landbauforschung *Applied Agricultural and Forestry Research* wird vom Thünen-Institut in Braunschweig herausgegeben. Für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren und Autorinnen verantwortlich. Eine Haftungsübernahme durch die Redaktion erfolgt nicht.

Mit der Einsendung von Manuskripten geben die Verfasser/Verfasserinnen ihre Einwilligung zur Veröffentlichung. Die von den Autoren/Autorinnen zu beachtenden Richtlinien zur Einreichung der Beiträge sind unter www.thuenen.de/de/infotehek/publikationen/landbauforschung/ oder bei der Geschäftsführung erhältlich.

Als Printausgabe erscheinen vier Hefte pro Jahr. Beiträge, die noch keinem bestimmten Heft zugeordnet sind, werden als Online First – Version veröffentlicht.

Indexiert in: CAB International, Science Citation Index Expanded, Current Contents – Agriculture, Biology & Environmental Sciences, Scopus, Web of Science.

Herausgeber
Johann Heinrich von Thünen-Institut

Schriftleitung
Prof. Dr. Andreas Bolte,
Prof. Dr. Peter Weingarten

Geschäftsführung
Dr. Hans-Walter Roering
Tel. +49 (0) 40 - 73962 239
Leuschnerstraße 91
21031 Hamburg, Germany
landbauforschung@thuenen.de
www.thuenen.de

Grafikdesign und Satz
Karin Tamoschat-Depolt, Thünen-Institut

Fotos Umschlagseite
Katja Seifert, Thünen-Institut (2),
Michael Welling, Thünen-Institut (1)

ISSN 0458-6859

Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

Alle Rechte vorbehalten.

Applied Agricultural and Forestry Research

Landbauforschung *Applied Agricultural and Forestry Research* is a scientific journal, concerning the latest research results of socially relevant issues related to agriculture, forestry and rural development. The journal is targeted explicitly to interdisciplinary topics.

Particularly welcome are application-oriented scientific contributions with an interdisciplinary approach or with a close connection to other research areas. The geographical focus of the journal is Germany and Europe. Articles may be written in English or German. All articles are subject to a double-blind peer review.

Landbauforschung *Applied Agricultural and Forestry Research* is published by the Thünen Institute with headquarters in Brunswick, Germany. Authors are responsible for the content of their articles. The publishers are not liable for the content.

With the submission of a manuscript, the authors grant permission for publication. The guidelines for the submission of manuscripts can be found under www.thuenen.de/en/infotehek/publikationen/landbauforschung/ or obtained from the publishers.

The print edition is published quarterly. Articles not yet assigned to a specific issue are available online ("Online First")

Indexed in: CAB International, Science Citation Index Expanded, Current Contents – Agriculture, Biology & Environmental Sciences, Scopus, Web of Science.

Publisher
Johann Heinrich von Thünen Institute

Editor in Chief
Prof. Dr. Andreas Bolte,
Prof. Dr. Peter Weingarten

Managing Editor
Dr. Hans-Walter Roering
Tel. +49 (0) 40 - 73962 239
Leuschnerstraße 91
21031 Hamburg, Germany
landbauforschung@thuenen.de
www.thuenen.de

Graphic Design and Typesetting
Karin Tamoschat-Depolt, Thünen Institute

Photos cover pages
Katja Seifert, Thünen Institute (2),
Michael Welling, Thünen Institute (1)

ISSN 0458-6859

Printed on FSC-certified paper

All rights reserved.

Inhalt
Content

- Markus Dög, Björn Seintsch, Lydia Rosenkranz und Matthias Dieter
Belastungen der deutschen Forstwirtschaft aus der Schutz- und Erholungsfunktion des Waldes
71 Economic burdens for German forestry due to protection and recreation functions of forests
- Gunnar Mann, Mathias Schlegel, Norbert Kanswohl, and Rhena Schumann
Experimental system for the prevention of O₂ – and air contamination during biogas upgrading with phototrophic microalgae
93 Versuchsaufbau zur Vermeidung von Sauerstoff- und Lufteinträgen während der Biogasaufbereitung mit phototrophen Mikroalgen
- Marco Lorenz, Joachim Brunotte, Thomas Vorderbrügge, Robert Brandhuber, Heinz-Josef Koch, Marion Senger, Norbert Fröba und Franz-Josef Löpmeier
Anpassung der Lasteinträge landwirtschaftlicher Maschinen an die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens – Grundlagen für ein bodenschonendes Befahren von Ackerland
101 Adaption of load input by agricultural machines to the susceptibility of soil to compaction – Principles of soil conserving traffic on arable land
- Daniel Zaborski, Katarzyna Wojdak-Maksymiec, and Wilhelm Grzesiak
Detection of susceptibility of dairy cows to clinical mastitis by artificial neural networks based on selected genotypes and milk production records
145 Erkennen einer Mastitis-Anfälligkeit von Milchkühen mittels künstlicher neuronaler Netze auf Basis ausgewählter Genotypen und Milchleistungsdaten

Belastungen der deutschen Forstwirtschaft aus der Schutz- und Erholungsfunktion des Waldes

Markus Dög*, Björn Seintsch**, Lydia Rosenkranz** und Matthias Dieter**

Zusammenfassung

Nach § 41 (3) BWaldG besteht eine Berichtspflicht gegenüber dem Deutschen Bundestag zu den Belastungen der Forstwirtschaft aus der Schutz- und Erholungsfunktion des Waldes. Negative Ergebnisse (inklusive Förderung) im Produktbereich 2 „Schutz und Sanierung“ und Produktbereich 3 „Erholung und Umweltbildung“ des Testbetriebsnetzes Forst (TBN-Forst) werden als aktuelle Mehraufwendungen aus der Schutz- und Erholungsfunktion interpretiert. In der vorliegenden Studie wurde eine neue Methode entwickelt, bei der Belastungen als Summe der aktuellen Mehraufwendungen und der zukunftsgerichteten, kalkulatorischen Mindererträge und Mehraufwendungen zur Erbringung der Schutz- und Erholungsleistungen verstanden werden. Diese ergeben sich gegenüber einer Referenz, in der die Erbringung dieser Leistungen freigestellt ist. Zur Ermittlung der kalkulatorischen Mindererträge und Mehraufwendungen wurde eine Zusatzbefragung des TBN-Forst zu den forstbetrieblichen Steuerungsgrößen der Waldbewirtschaftung für eine 200-jährige Simulation durchgeführt. Auf dieser Basis berechnen sich für das Jahr 2011 Gesamtbelastungen aus der Schutz- und Erholungsfunktion durch aktuelle Mehraufwendungen und kalkulatorische Mindererträge und Mehraufwendungen von 45,03 €/ha für die Privatwaldbetriebe und 52,03 €/ha für die Körperschaftswaldbetriebe, jeweils größer 200 ha.

Schlüsselwörter: Forstwirtschaft, Schutzfunktion, Erholungsfunktion, Mindererträge, Mehraufwendungen, forstbetriebliches Simulationsmodell, Opportunitätskosten, Testbetriebsnetz

Abstract

Economic burdens for German forestry due to protection and recreation functions of forests

Due to Germany's Federal Forest Act (BWaldG § 41 (3)) the federal government has to report the economic burdens of forest enterprises from safeguarding the protective and recreational functions of forests. A negative value (including public funding) in PB ('product area') 2 (protection and restoration) and PB 3 (recreation and environmental education) in the forest accountancy data network (TBN-Forst) is interpreted as current additional expenses required for delivering protective and recreational functions. In this study a new method has been developed where "economic burdens" are understood as the sum of current additional expenses plus future imputed additional expenses and reduced revenues that accrue from the provision of protective and recreational services compared to a reference scenario where the provision of these services is not mandatory. In order to determine these imputed additional expenses and reduced revenues, we conducted a supplemental survey with forest enterprises participating in the TBN-Forst to obtain additional information on relevant control factors of forest management, and used them in a forest enterprise simulation model. On this basis, for the year 2011, we calculated a total economic burden from protective and recreational functions, including current additional expenses as well as imputed additional expenses and reduced revenues. We calculated a total economic burden of 45.03 €/ha for private forest enterprises and 52.03 €/ha for corporate forest enterprises greater than 200 ha.

Keywords: Forestry, protection function, recreation function, economic burden, forest enterprise simulation model, opportunity costs, forest accountancy data network

* Georg-August-Universität, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, Abteilung Forstökonomie und Forsteinrichtung, Büsgenweg 3, 37077 Göttingen

** Thünen-Institut für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie, Leuschnerstraße 91, 21031 Hamburg

Kontakt: bjorn.seintsch@thuenen.de

1 Problemstellung und Zielsetzung

Nach § 41 (3) des BWaldG besteht eine Berichtspflicht der Bundesregierung gegenüber dem Deutschen Bundestag „[...] über die Lage und Entwicklung der Forstwirtschaft [...] sowie über die zur Förderung der Forstwirtschaft erforderlichen Maßnahmen. Dieser Bericht erstreckt sich auch auf die Belastungen aus der Schutz- und Erholungsfunktion.“ Im Zuge dieser Berichtspflicht wurde das Forschungsprojekt „Belastungen der Forstwirtschaft aus der Schutz- und Erholungsfunktion (BeSEFu)“ durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) beim Thünen-Institut für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie (TI-WF) in Auftrag gegeben.

Vorläuferstudien im Rahmen dieser Berichtspflicht liegen von Kroth et al. (1984), Bartelheimer und Baier (1991) sowie Dahm et al. (1999) vor, welche sich auf umfangreiche Befragungen von Forstbetrieben zu Schutz- und Erholungsleistungen als Teilaspekten des gesamten Betriebsvollzuges stützen. Von Küppers und Dieter (2008) wurde ein neuer Forschungsansatz gewählt, welcher auf einer Analyse des Testbetriebsnetzes Forst des BMEL (TBN-Forst) beruht. Das TBN-Forst umfasst staatliche, kommunale und private Forstbetriebe ab 200 ha Holzbodenfläche. Der Gesamtaufwand und -ertrag des jährlichen Betriebsvollzuges ist durch die TBN-Teilnehmerbetriebe auf die fünf Produktbereiche (PB) des Produktplans Forst des DFWR (1998) zu verbuchen (BMELV, 2012):

- PB 1 „Produktion von Holz und andere Erzeugnisse“
- PB 2 „Schutz und Sanierung“
- PB 3 „Erholung und Umweltbildung“
- PB 4 „Leistungen für Dritte“
- PB 5 „Hoheitliche und sonstige behördliche Aufgaben“

Die Erträge und Aufwendungen zur Erbringung von Schutz- und Erholungsleistungen sind auf Basis der betrieblichen Buchführung nach der Ausführungsanweisung des TBN-Forst im PB 2 und PB 3 zu verbuchen (BMELV, 2012). Die im zeitlichen Verlauf überwiegend negativen Ergebnisse (inklusive Förderung) in diesen beiden Produktbereichen werden von Küppers und Dieter (2008) als aktuelle Mehraufwendungen zur Erbringung der Schutz- und Erholungsleistung angesehen. Dieser Ansatz liefert gegenüber den Vorläuferstudien konsistentere Ergebnisse, da bei einer multifunktionalen Waldbewirtschaftung durch forstliche Maßnahmen zugleich Nutz-, Schutz- und Erholungsleistungen gemeinsam verfolgt werden können und sich die TBN-Forstbetriebe auf eine Zuordnung des jährlichen Gesamtaufwandes und -ertrages des Betriebsvollzuges auf die definierten fünf PB festlegen müssen. Im Jahr 2011 belief sich das Ergebnis (inklusive Förderung) in Summe des PB 2 und PB 3 im Körperschaftswald auf -16,85 €/ha und im Privatwald auf -5,20 €/ha (vgl. Anhang 1).

Belastungen aus der Schutz- und Erholungsfunktion können sich für die Forstbetriebe aber nicht nur durch negative Ergebnisse (inklusive Förderung) in PB 2 und PB 3 aus aktiver betrieblicher Leistungserstellung ergeben, sondern zusätzlich auch aus kalkulatorischen Mindererträgen und

Mehraufwendungen. Kalkulatorische Mindererträge und Mehraufwendungen können als die entgangenen Erträge und zusätzlichen Aufwendungen gegenüber einer nicht realisierten betrieblichen Handlungsalternative definiert werden. Sie resultieren zum Teil nicht aus aktiver betrieblicher Leistungserstellung, sondern aus gezielten Unterlassungen der Forstbetriebe zur Erbringung von Schutz- und Erholungsleistungen (z. B. Nutzungsverzicht für den dauerhaften Erhalt von Habitatbäumen). Sie haben somit den Charakter von Opportunitätskosten und reduzieren das Betriebsergebnis.

Nach der Ausführungsanweisung des TBN-Forst können kalkulatorisch ermittelte Mindererträge und Mehraufwendungen durch die TBN-Teilnehmerbetriebe verbucht werden, wenn hierfür eindeutige Regeln zur Berechnung bestehen (BMELV, 2012). In der betrieblichen Verbuchungspraxis dürften kalkulatorische Mindererträge und Mehraufwendungen jedoch nur in Ausnahmefällen verbucht sein. In den aufgeführten Vorläuferstudien wurden Mindererträgen und Mehraufwendungen durch Schutz- und Erholungsleistungen unterschiedliche Bedeutungen beigemessen. Von Küppers und Dieter (2008) wurden bspw. als kalkulatorischer Minderertrag lediglich die Ertragsverluste auf Stilllegungsflächen, wie bspw. Kernzonen von Nationalparks, angesehen und bewertet.

Die von Rosenkranz et al. (2014) durchgeführten Fallbeispielanalysen zu den betrieblichen Auswirkungen der FFH-Richtlinie auf die Bewirtschaftung von FFH-Buchenlebensraumtypen verdeutlichen jedoch, dass zahlreiche naturschutzfachliche Maßnahmen kalkulatorische Minderertrags- und Mehraufwandstatbestände in der Rohholzerzeugung darstellen (z. B. Nutzungsverzicht für den dauerhaften Erhalt von Habitatbäumen oder Einbringung von Laubholz statt ertragsreicherer Nadelholzbaumarten). Ebenso verdeutlichen die Ergebnisse von Rosenkranz et al. (2014), dass zahlreiche Maßnahmen zur Erbringung von Schutz- und Erholungsleistungen aufgrund der langen forstlichen Produktionszeiträume ihre Wirkung stark zeitversetzt entfalten und daher nur mit forstbetrieblicher Simulation ermittelbar sind.

Vor diesem Hintergrund wird mit der vorliegenden Studie ein Ansatz vorgestellt, die aktuellen Mehraufwendungen in PB 2 und PB 3 nach dem Ansatz von Küppers und Dieter (2008) um die kalkulatorischen Mindererträge und Mehraufwendungen in der Rohholzerzeugung zu ergänzen, um die Belastungen von Forstbetrieben aus der Schutz- und Erholungsfunktion des Waldes in Deutschland konsistent zu ermitteln. Als zentrale Eingangsdaten stützt sich dieser Ansatz auf eine Zusatzbefragung der Betriebe des TBN-Forst („TBN-Unterstichprobe“). Als konzeptionelle Einschränkung werden in der vorliegenden Studie keine Mindererträge und Mehraufwendungen berücksichtigt, die bei forstbetrieblichen Nebentätigkeiten (z. B. Jagd, Steinbruch oder Windkraft) entstehen oder durch verwehrte potenzielle Geschäftsfelder, wie bspw. eingeschränkte oder fehlende Verfügungsrechte zum Grundwasser oder der Erholungsnutzung, begründet sind.

Als kalkulatorische Mindererträge und Mehraufwendungen werden nur Ergebnisse für den Privat- und Körperschaftswald dargestellt. Auf eine Betrachtung des

Staatswaldes wird verzichtet, da sich Bund und Länder ihre Belastungen jeweils selbst erlassen und diese in ihren Eigenbetrieben auch unmittelbar ermitteln können.

2 Material und Methoden

2.1 Konzeptioneller Ansatz

Die Erfassung und Bewertung von heute bestehenden kalkulatorischen Minderertrags- und Mehraufwandstatbeständen würde erfordern, zum Zeitpunkt ihrer Initiierung jeweils die ursprüngliche betriebliche Referenz zu kennen. Dies ist bei länger zurückliegenden Maßnahmen, wie z. B. Waldumbau, kaum noch möglich. In vielen Forstbetrieben dürften die damals gültigen Bewirtschaftungskonzepte nicht schriftlich fixiert vorliegen und die Entscheidungsträger von damals stehen für Befragungen häufig nicht mehr zur Verfügung. Aus diesem Grund wird mit dem hier vorgestellten Ansatz der umgekehrte Weg beschritten. Es werden die heutigen Entscheidungsträger, i. d. R. die Eigentümer oder Betriebsleiter, nach den aktuellen Bewirtschaftungskonzepten zur zukünftigen Erbringung von Schutz- und Erholungsleistungen in ausgewählten forstlichen Maßnahmentypen mit potenziellen Minderertrags- und Mehraufwandstatbeständen befragt. Um diese bewerten zu können, werden die Entscheidungsträger ebenfalls nach ihrer betriebsindividuellen Referenz befragt. Beide Szenarien werden mit einem forstbetrieblichen Simulationsmodell 200 Jahre in die Zukunft berechnet. Der lange Zeitraum wurde gewählt, um der Langfristigkeit der forstlichen Produktion Rechnung zu tragen. Aus dem Vergleich der Szenarien werden durchschnittliche jährliche Belastungen berechnet.

Grundsätzlich sind bei diesem Ansatz Doppelzählungen zwischen den verbuchten, aktuellen Mehraufwendungen in PB 2 und PB 3 und den zukünftigen, kalkulatorischen Mindererträgen und Mehraufwendungen in der Rohholzerzeugung bei einzelnen forstlichen Maßnahmentypen nicht auszuschließen. Doppelzählungen würden sich ergeben, wenn die TBN-Forstbetriebe forstliche Maßnahmen mit potenziellen Minderertrags- und Mehraufwandstatbeständen in der Rohholzerzeugung, wie z. B. Waldumbau, anteilig auf PB 1, PB 2 und PB 3 verbuchen. Bei einer rein auf kalkulatorische Mindererträge und Mehraufwendungen in der Rohholzerzeugung reduzierten Betrachtung würden umgekehrt nennenswerte aktuelle Mehraufwendungen in PB 2 und PB 3 durch Maßnahmen wie z. B. Waldbiotoppflege oder Besucherinformationen unberücksichtigt bleiben. Nach Abwägung der möglichen Nichterfassung von Aufwendungen gegenüber möglicher Doppelzählung wird die Wirkung einer Überschätzung der Belastungen aus der Schutz- und Erholungsfunktion durch mögliche Doppelzählungen geringer eingeschätzt als die Unterschätzung ohne eine Betrachtung der aktuellen Mehraufwendungen.

2.2 Ermittlung von forstlichen Maßnahmentypen

Zunächst wurden bestehende gesetzliche und nichtgesetzliche Verpflichtungsgrundlagen analysiert, um die bedeutendsten Maßnahmentypen zur Erbringung von Schutz- und Erholungsleistungen mit potenziellen Minderertrags- und Mehraufwandstatbeständen zu identifizieren (z. B. dauerhafter Erhalt von Habitatbäumen oder Vorgaben bei der Baumartenwahl) und deren forstbetriebliche Steuerungsgrößen zu ermitteln. Hierfür wurden unterschiedliche Bundes- und Landesgesetze und nichtgesetzliche (Selbst-) Verpflichtungen (z. B. forstliche Zertifizierungssysteme) im Hinblick auf ihre Wirkungen als Minderertrags- und Mehraufwandstatbestände ausgewertet. Einzelgebietsverordnungen (z. B. Schutzgebietsverordnungen) oder Maßnahmenpläne für einzelne FFH-Gebiete wurden aus forschungsökonomischen Gründen nicht berücksichtigt.

Bei der Auswertung der Verpflichtungsgrundlagen wurden folgende forstbetriebliche Steuergrößen identifiziert, aus welchen (potenzielle) Minderertrags- und Mehraufwandstatbestände für die Rohholzerzeugung resultieren können:

- (1) Baumartenwahl,
- (2) Produktionszeiträume (Umtriebszeiten der Baumarten),
- (3) Nutzungsintensität des Derbholzes und des Nichtderbholzes,
- (4) flächige oder punktuelle (einzelbaumweise) Stilllegung von Holzbodenfläche für die Rohholzproduktion und
- (5) nicht für die Rohholzproduktion genutzte Nichtholzbodenfläche für Schutz- und Erholungsleistungen.

Diese können bspw. folgende Auswirkungen auf Forstbetriebe haben: Spätere und geringere Erlöse durch Veränderung der Baumartenanteile hin zu mehr Laubholz, kurzfristige Liquiditätseinbußen durch Nutzungsaufschub erntereifer Bäume, Verlust an Holzangebotsmengen (z. B. Erhalt des Totholzvorrates) und durch Nutzungsverzicht von Einzelbäumen (z. B. Habitatbäume) sowie durch Stilllegungsflächen, Erhöhung der Holzerntekosten (z. B. Arbeitssicherheit in totholzreichen Altbeständen), Erhöhung des Verwaltungsaufwandes in der Rohholzerzeugung (z. B. Abstimmung von Hiebsmaßnahmen mit den Naturschutzverwaltungen) oder ein reduzierter wirtschaftlicher Wert des stehenden Holzvorrates.

2.3 Referenzbildung

In der vorliegenden Studie werden kalkulatorische Mindererträge und Mehraufwendungen in der Rohholzerzeugung zur Erbringung der Schutz- und Erholungsleistungen gegenüber einer Referenz ermittelt, in der die Erbringung dieser Leistungen in den ausgewählten forstlichen Maßnahmentypen freigestellt ist. Dabei ist es nicht von Bedeutung, ob die Maßnahmen aufgrund gesetzlicher Vorgaben oder nichtgesetzlicher Verpflichtungsgrundlagen erbracht werden. Es wird daher im Weiteren zwischen zwei Waldbewirtschaftungskonzepten unterschieden:

2.3.1 Realbetrieb

Das Bewirtschaftungskonzept „Realbetrieb“ entspricht der tatsächlichen Bewirtschaftungsplanung für die Zukunft. Es wird unterstellt, dass dieses 200 Jahre fortgeführt wird. Bei diesem sind alle aktuellen gesetzlichen und nichtgesetzlichen Verpflichtungsgrundlagen für Schutz- und Erholungsfunktionen in Form von forstbetrieblichen Steuerungsgrößen mit kalkulatorischen Minderertrags- und Mehraufwandstatbeständen berücksichtigt.

2.3.2 Referenzbetrieb

Die betriebsindividuelle Handlungsalternative „Referenzbetrieb“ ist eine alternative Bewirtschaftungskonzeption, bei der dem Forstbetrieb die Berücksichtigung dieser Verpflichtungsgrundlagen bei der Setzung der betriebsindividuellen Steuerungsgrößen freigestellt ist. Im Extremfall könnte eine solche Handlungsalternative z. B. eine Waldbewirtschaftung darstellen, bei der als einziges Betriebsziel ein möglichst schnell realisierbarer Massenertrag in der Rohholzerzeugung definiert wird.

Da Bewirtschaftungsziele in der Forstwirtschaft teilweise nur über einen längeren Zeitraum realisiert werden können, wird zudem der aktuelle „Status quo“ der naturalen Ausstattung und der forstbetrieblichen Steuerungsgrößen der Forstbetriebe erfasst. Der „Status quo“ wird somit als Ausgangspunkt für die Modellierung, aber auch für die Einordnung der Steuerungsgrößen in den beiden Bewirtschaftungsvarianten erhoben.

2.4 Betriebsmodell

Die naturalen und in der Folge ökonomischen Auswirkungen der Waldbewirtschaftungskonzepte sind für die Ermittlung der Ertragswertdifferenzen zwingend erforderlich. In dieser Studie wurden die naturalen Auswirkungen mit dem Strugholtz-Englert-Simulationsmodell berechnet (Strugholtz, 2010). Mit diesem Modell können verschiedene forstliche Handlungsentscheidungen für einen Zeitraum von bis zu 200 Jahren abgebildet werden. Es eignet sich daher auch für die Bewertung von Änderungen der forstlichen Bewirtschaftung, wie bspw. Veränderungen der Umtriebszeiten oder der Baumartenwahl. Das Modell basiert auf forstbetriebsindividuellen Eingangsdaten und wurde bereits erfolgreich zur Ermittlung von kalkulatorischen Mindererträgen und Mehraufwendungen durch FFH-Maßnahmenplanungen (Rosenkranz et al., 2014; Seintsch et al., 2012) und zur Berechnung der Opportunitätskosten in der Rohholzerzeugung bei einer Implementierung des naturschutzorientierten Waldbehandlungskonzepts „Neue Multifunktionalität“ (Rosenkranz und Seintsch, 2015) angewendet.

Mit dem Modell können u. a. die Entwicklung der Holzerntemengen, der Baumartenverteilung, des stehenden Holzvorrates, der erntekostenfreien Holzerlöse (Deckungsbeitrag (DB I) und des waldbaulichen Deckungsbeitrags (DB I abzüglich Kultur- und Läuterungskosten) berechnet werden. In der vorliegenden Studie wird der waldbauliche Deckungsbeitrag zur Charakterisierung der kalkulatorischen

Mindererträge und Mehraufwendungen verwendet. Von ihm werden im „Realbetrieb“ noch die zusätzlichen Verwaltungskosten im PB 1 abgezogen, die sich gegenüber dem „Referenzbetrieb“ ergeben. Der Kürze wegen wird im Folgenden nur noch von Deckungsbeiträgen und deren Differenzen gesprochen.

Wesentliche Bestandteile des Simulationsmodells sind die Waldwachstumsmodellierung sowie die Modellierung des forstlichen Nutzungsverhaltens. Die waldwachstumskundliche Modellierung erfolgt auf Grundlage der ertrags-tafelbasierten, parametrisierten Waldwachstumsfunktionen von Smaltschinski (1998) und der naturalen Eingangsdaten der jeweils untersuchten Betriebe. Die Vornutzungen werden über den Bestockungsgrad und die Endnutzungen über den baumartenspezifischen Verjüngungsgang über maximal 40 Jahre gesteuert. Zu Beginn der Simulation erstellt das Modell einen Ausgangszustand des Forstbetriebes anhand der betriebsindividuellen Eingangsdaten. Die Stammzahlen der Folgeperioden werden altersklassenabhängig mit einer Regressionsfunktion berechnet. Sie bilden zusammen mit dem Grundflächenmittelstamm, berechnet nach Wippermann (2005), und der mittleren Bestandeshöhe, berechnet nach Smaltschinski (1998) die Grundlage für die Ermittlung des Bestandesvolumens jeder Periode. Bei der Modellierung des Nutzungsverhaltens werden Holzmengen aus Vornutzungen und Endnutzungen auf Grundlage der betriebsindividuellen, baumartenspezifischen Durchforstungsvarianten und Produktionszeiten ermittelt. Anschließend nutzt das Modell für die Endnutzungsflächen die angegebenen Pflanzenzahlen und gewünschten Anteile der Holzartengruppen für die Bestockung des Folgebestandes.

Das Strugholtz-Englert-Modell ist ein dynamisches, kontinuierliches Simulationsmodell mit statischen und diskreten Elementen. Das Modell simuliert kontinuierlich, da die Zustandsgrößen in kontinuierlichen Funktionen berechnet werden und dynamisch, weil die Simulation über einen Zeitraum von 200 Jahren abläuft. Weitere dynamische Elemente sind die Steuerungsgrößen Umtriebszeit und Baumartenwahl. Die Statik ist durch die einmalig einzugebenden und sich dann nicht mehr ändernden Eingangsdaten, wie z. B. Holzerlöse, Holzerntekosten oder Kultur- und Läuterungskosten, gegeben. Durch die Verwendung konstanter Preise im Modell werden somit die aktuellen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen in die Zukunft fortgeschrieben. Die diskreten Elemente des Modells sind die unterliegenden Ertragstafeln, die ökonomischen Berechnungen und die Ergebnisdarstellung in fünfjährigen Perioden.

2.5 Berechnung von kalkulatorischen Mindererträgen und Mehraufwendungen

Ausgangspunkt für die Berechnung von kalkulatorischen Mindererträgen und Mehraufwendungen sind die naturalen Differenzen in der Struktur des stehenden Holzvorrates und des Holzaufkommens zwischen den Bewirtschaftungskonzepten „Realbetrieb“ und „Referenzbetrieb“. Die Struktur des stehenden Holzvorrates kann hierbei für jede Fünfjahresperiode oder direkt aus dem Strugholtz-Englert-Modell abgelesen

werden. Für die Berechnung der betriebsindividuellen potenziellen Angebotsmenge (Holzaufkommen) wird zunächst das Mengengerüst des ausscheidenden Bestandes V_{aus} (Derbholz) mit dem Strugholtz-Englert-Modell simuliert. Die potenzielle Angebotsmenge an Baumholz (sie umfasst Derbholz über 7 cm Durchmesser und Nichtderbholz unter 7 cm Durchmesser) wird mit Hilfe der betriebsindividuellen Nutzungsintensität (Nutzungsmengenfaktor f_{Nutz}) ermittelt. Der dimensionslose Nutzungsmengenfaktor wird durch Abzug des betriebsindividuellen, prozentualen Anteils nicht verwerteten Derbholzes (n_{vD}) und eines betriebsindividuellen, prozentualen Zuschlags von verwertetem Nichtderbholz (v_{ND}) (Reisholz) ermittelt:

$$f_{Nutz} = \frac{100 - \text{Anteil}_{n_{vD}} + \text{Zuschlag}_{v_{ND}}}{100}$$

Die potenzielle Angebotsmenge an Baumholz errechnet sich dann aus:

$$V_A = V_{aus} \cdot f_{Nutz}$$

V_A = potenzielle Angebotsmenge Baumholz
 V_{aus} = Volumen ausscheidender Bestand (Derbholz)
 f_{Nutz} = Nutzungsmengenfaktor

Der maximal mögliche prozentuale Zuschlag verwertbaren Nichtderbholzes wird unter Anwendung der Expansionsfaktoren im Mittel des WEHAM-Basissszenarios 2002 je Holzartengruppe berechnet (BMELV, 2005a; BMELV, 2005b). Das WEHAM-Basissszenarios 2002 wurde verwendet, da zum Zeitpunkt der Berechnungen das aktuellere WEHAM-Basissszenario 2012 noch nicht verfügbar war (BMEL, 2016). Ebenso kommen bei der Berechnung des Erntevolumens aus dem Vorratsvolumen Reduktionsfaktoren im Mittel des WEHAM-Basissszenarios 2002 zur Anwendung (Tabelle 1).

Tabelle 1

Umrechnungsfaktoren der potenziellen Angebotsmenge an Baumholz

Holzartengruppe	Eiche	Buche	Fichte	Kiefer
Expansionsfaktor Derbholz → Baumholz	1,275	1,188	1,205	1,153
Reduktionsfaktor Vorratsvolumen → Erntevolumen	0,74	0,82	0,80	0,75

Auf Basis dieses Mengengerüsts werden die Deckungsbeiträge für jede Fünfjahresperiode und für jede Holzartengruppe berechnet. Die Berechnung der Deckungsbeiträge erfolgt mit betriebsindividuellen Holzdurchschnittserlösen über alle Sortimenten einer Holzartengruppe sowie betriebsindividuellen durchschnittlichen Holzerntekosten über alle Holzartengruppen, Kultur- und Lägerungskosten jeder Holzartengruppe und den zusätzlichen Holzernte- und Verwaltungskosten im „Realbetrieb“ gegenüber dem „Referenzbetrieb“. Zur Erhöhung des Rücklaufes in der

TBN-Zusatzbefragung wurde auf die für Forstbetriebe aufwendige Erhebung der Erlöse für die einzelnen Holzsortimente und differenzierter Holzerntekosten verzichtet. Deren Berücksichtigung ist im Strugholtz-Englert-Modell jedoch möglich.

Aus den Deckungsbeiträgen der jeweiligen Simulationsperiode sowie dem Abtriebswert an deren Ende wird für jedes Waldbehandlungskonzept durch Diskontierung der Ertragswert errechnet. Mit den Abtriebswerten werden die unterschiedlichen wirtschaftlichen Voraussetzungen zum Ende der jeweiligen Betrachtungsperiode zumindest im Ansatz berücksichtigt. Ein Wechsel von endlicher dynamischer zu unendlicher komparativ statischer Modellierung nach 200 Jahren wäre zwar möglich gewesen, aber die Bodenertragswerte hätten wegen der langen Diskontierung die Ergebnisse kaum verändert. Dieses Vorgehen erfordert zunächst die Berechnung der Differenzen im Mengengerüst der potenziellen Angebotsmenge, die im Wesentlichen die Differenzen der Deckungsbeiträge bestimmen. Mengendifferenzen und Differenzen der Deckungsbeiträge können im reinen Zeitreihenvergleich (komparativ statisch) dargestellt werden und geben einen Überblick über die zeitliche Entwicklung der jeweiligen Größen.

Die Ertragswertdifferenz der beiden untersuchten Bewirtschaftungsalternativen „Realbetrieb“ und „Referenzbetrieb“ drücken dann den Barwert der kalkulatorischen Mindererträge und Mehraufwendungen aus. Die Zahlungsströme, die zu Deckungsbeitragsdifferenzen führen, werden bei der forstlichen Produktion im Zeitverlauf sehr unregelmäßig generiert und sind eng an die Maßnahmen in einzelnen Bestandesentwicklungsphasen (z. B. Bestandesbegründung, Durchforstung und Endnutzung), aber auch an die Naturalausstattung der betrachteten Forstbetriebseinheit (z. B. Altersklassenstruktur und Flächenanteile der Holzartengruppen) gekoppelt. Um solche unregelmäßigen Zahlungsströme als jährlich gleichbleibende Renten abbilden zu können, ist die Verwendung der sogenannten Annuität eine adäquate Methode. Die Annuität der Ertragswertdifferenz wurde nach Möhring et al. (2006) berechnet.

Die beschriebenen Berechnungen wurden zunächst für jeden Einzelbetrieb durchgeführt und die Ergebnisse anschließend für die Besitzarten Körperschafts- und Privatwald auf das Bundesgebiet für Forstbetriebe größer 200 ha Holzboden hochgerechnet. Die Hochrechnung erfolgt, in Anlehnung an die Vorgehensweise des TBN-Forst, über einen gewichteten Hochrechnungsfaktor der Betriebsanzahl innerhalb der Betriebsgrößenklassen 200 bis 500 ha, 500 bis 1000 ha und über 1000 ha auf Basis der aktuellsten Agrarstrukturserhebung mit Berichtsjahr 2010 (StBA, 2011). Aufgrund der Betriebsanzahl in der TBN-Unterstichprobe erfolgt die Hochrechnung ausschließlich für das Bundesgebiet und nicht differenziert nach Bundesländern.

2.6 Eingangsdaten

Um die Waldbewirtschaftungskonzepte „Realbetrieb“ und „Referenzbetrieb“ mit dem Strugholtz-Englert-Modell modellieren zu können, wurden die betriebsindividuellen

Tabelle 2

Eingangsdaten für die Modellierung

	Betriebsindividuelle Eingangsdaten	Einheitliche Setzungen
Naturalausstattung	→ Naturalausstattung (Flächenanteile der Holzartengruppen differenziert nach Altersstufen)	→ Bestockungsgrad
	→ zukünftige Holzartengruppenverteilung	→ Ertragsklasse
	→ Flächen ohne wirtschaftliche Nutzung (i. d. R. naturschutzfachliche Stilllegungsflächen und Nichtholzbodenflächen)	
Waldbauliche Kenngrößen	→ Produktionszeiträume (durchschnittlicher Produktionszeitraum je Holzartengruppe bzw. Zeit bis Erreichen der Zielstärke)	→ Verjüngungsgang → Hochdurchforstung
Ökonomische Kenngrößen	→ Holzerlöse und durchschnittliche Holzerntekosten	→ Kulturkosten
	→ Nutzungsmenge (Berücksichtigen der Anteile von nicht verwertetem Derbholz und verwertetem Nichtderbholz)	→ Läuterungskosten → Zinssatz
	→ Verwaltungsmehraufwand im Vergleich zum „Status quo“	

Steuerungsgrößen der ausgewählten forstlichen Maßnahmentypen im Rahmen einer TBN-Zusatzbefragung erhoben. Um den Befragungsaufwand für die teilnehmenden TBN-Forstbetriebe gering zu halten und den Befragungsrücklauf zu erhöhen, wurden die abgefragten Daten in der TBN-Zusatzbefragung auf ein Minimum reduziert. Die für die Modellierung zusätzlich erforderlichen Eingangsdaten wurden als betriebsindividuelle Werte aus den regulären TBN-Jahresmeldungen der teilnehmenden Betriebe (sofern verfügbar) sowie durch einheitliche Setzungen für alle Forstbetriebe ergänzt. Ein Überblick zu den verwendeten betriebsindividuellen Eingangsdaten und den Setzungen wird in Tabelle 2 geboten.

2.6.1 Betriebsindividuelle Eingangsdaten aus der TBN-Zusatzbefragung

Aufgrund der freiwilligen Teilnahme der Forstbetriebe ist das TBN-Forst eine jährlich erhobene Beurteilungsstichprobe für Forstbetriebe größer 200 ha Holzbodenfläche im Bundesgebiet. Von der aktuellsten Agrarstrukturhebung werden für das Berichtsjahr 2010 als Grundgesamtheit der Forstbetriebe größer 200 ha Holzbodenfläche 1.365 Privatwaldbetriebe und 2.374 Körperschaftswaldbetriebe im Bundesgebiet ausgewiesen (StBA, 2011). Die Teilnehmerzahl des TBN-Forst schwankt in den einzelnen Berichtsjahren leicht, da einzelne Betriebe ausscheiden, neue hinzukommen oder mit Jahresmeldungen aussetzen. Im Durchschnitt der Jahre 2003 bis 2012 meldeten rund 350 Betriebe, davon zwischen 112 und 135 Privatwaldbetriebe und zwischen 208 und 232 Körperschaftswaldbetriebe (Ermisch et al., 2015a).

Die TBN-Zusatzbefragung wurde von Oktober bis November 2013 durchgeführt. Der Fragebogen wurde anonym über die TBN-Verantwortlichen der Bundesländer postalisch oder digital an alle im Jahr 2011 teilnehmenden TBN-Betriebe versendet. Zum Zeitpunkt der Erhebung wurden mit dem Berichtsjahr 2011 die aktuellsten TBN-Daten verwendet.

Hervorzuheben ist, dass dem TI-WF bei dieser Zusatzbefragung die Identität der teilnehmenden TBN-Betriebe unbekannt blieb, da nur die TBN-Betriebsnummern abgefragt und

von den Länderverantwortlichen an das TI-WF übermittelt wurden. Ebenso liegen dem TI-WF nur die Betriebsnummern zu den TBN-Jahresmeldungen der Einzelbetriebe vor.

Mit dem Fragebogen der TBN-Zusatzbefragung wurden drei Bereiche abgefragt (Anhang 2):

- (1) Zusatzangaben zur Altersklassenverteilung der Holzartengruppen über 120 Jahre
- (2) Steuergrößen der forstlichen Maßnahmentypen (Baumartenwahl, Produktionszeiten, Anteile nicht verwertetes Derb- und Nichtderbholz, punktuelle und flächige Stilllegungsflächen, Nichtholzbodenflächen), jeweils für den „Status quo“ sowie den „Realbetrieb“ und den „Referenzbetrieb“
- (3) Angaben zu den Verpflichtungsgrundlagen, Aufwandsunterschiede in den Holzernte- und Verwaltungskosten im „Referenzbetrieb“ sowie Informationen zur Buchungspraxis

Der Rücklauf der TBN-Zusatzbefragung belief sich auf 96 verwertbare Antworten, davon entfielen 35 Antworten auf den Privatwald und 61 Antworten auf den Körperschaftswald. Zur Vollständigkeit wurden die Staatswaldbetriebe auch befragt. Es antworteten aber nur drei Betriebe. Die insgesamt 96 Betriebe des Privat- und Körperschaftswaldes stellen somit eine „TBN-Unterstichprobe“ dar, welche für die Ermittlung der Belastungen aus der Schutz- und Erholungsfunktion genutzt werden konnte. Es ist allerdings festzustellen, dass diese 96 Betriebe nicht repräsentativ für den gesamten Privat- und Körperschaftswald in Deutschland sind, da auch das TBN-Forst eine Beurteilungsstichprobe darstellt. Gleichwohl handelt es sich um eine so große Betriebsstichprobe, dass sie nicht durch Besonderheiten einzelner Betriebe verzerrt ist.

2.6.2 Betriebsindividuelle Eingangsdaten aus den TBN-Jahresmeldungen

Die Angaben der teilnehmenden Betriebe der TBN-Zusatzbefragung wurden um weitere Eingangsdaten für die Modellierung aus ihren TBN-Jahresmeldungen für das Berichtsjahr 2011 ergänzt. Die Verknüpfung erfolgte hierbei über die TBN-Betriebsnummern. Als naturale Eingangsdaten aus

den TBN-Jahresmeldungen wurde die Altersklassenstruktur der Holzartengruppen bis 120 Jahre übernommen. Als ökonomische Kenngrößen wurden die durchschnittlichen Holzerlöse über alle Sortimenten einer Holzartengruppe, die durchschnittlichen Holzerntekosten über alle Holzartengruppen sowie die Verwaltungskosten im PB 1 des Jahres 2011 für die betriebsindividuelle Simulation verwendet.

2.6.3 Einheitliche Setzungen als Eingangsdaten

Als einheitliche Setzungen für die TBN-Unterstichprobe wurden die waldwachstumskundlichen Größen Bestockungsgrad und Ertragsklasse festgelegt, welche auf Basis der Bundeswaldinventur (BWI) 2002 (BMELV, 2004) und dem WEHAM-Basiszenario 2002 (BMELV, 2005a; BMELV, 2005b) abgeleitet wurden. Des Weiteren wurde bei der Modellierung eine Hochdurchforstung und Verjüngungsgänge in Anlehnung an allgemeine und in der Forstwirtschaft anerkannte Werte für die Holzartengruppe unterstellt. Als einheitliche Setzungen zu den ökonomischen Kennzahlen wurden die Kulturbegründungs- und Läuterungskosten auf Grundlage aktueller, marktüblicher Werte abgeschätzt. Dabei wurden, aufgrund der möglichen allgemeinen und betriebsindividuellen Differenziertheit der Verfahren, einheitliche Werte für alle Holzartengruppen eingesetzt. Bei den Bestandesbegründungskosten wurden für einen Erhalt der jeweiligen Holzartengruppe im Folgebestand unterschiedliche Anteile von Naturverjüngung (NV) und Nachbesserung mit entsprechenden Kosten für künstliche Verjüngung unterstellt. Für einen Baumartenwechsel im Folgebestand wurden auf der ganzen Fläche Kosten für künstliche Verjüngung angesetzt (Tabelle 3). Für die Diskontierung wurde ein Zinssatz von einheitlich 1,5 % für alle Holzartengruppen und Betriebe angewendet (Möhring, 2014). Dieser gewählte Kalkulationszinsfuß liegt in der Größenordnung der langfristigen, internen Durchschnittsverzinsung des Kapitaleinsatzes in deutschen Forstbetrieben. Von Möhring (2001) wurden die Grenzrenditen der Fichten- und Buchenbewirtschaftung in einer Größenordnung von 1,5 % bis 2 % berechnet.

Tabelle 3

Setzungen zu den Bestandesbegründungs- und Läuterungskosten

	Eiche	Buche	Fichte	Kiefer
Kulturkosten für Baumarten-erhaltung [€/ha]	3.800	1.460	620	2.850
Anteil der Naturverjüngung bei Baumarterhaltung [%]	50	80	80	50
Kulturkosten für Baumarten-wechsel [€/ha]	7.600	7.300	3.100	5.700
Läuterungskosten [€/ha]	500	500	500	500

3 Ergebnisse

Als Startjahr der 200jährigen Simulation mit dem Strugholtz-Englert-Modell wurde das Jahr 2011 gewählt (Simulationszeitraum: 2012 bis 2211), da der überwiegende Teil der betriebsindividuellen naturalen und ökonomischen Eingangsgrößen aus den TBN-Jahresmeldungen mit Berichtsjahr 2011 der befragten TBN-Unterstichprobe entnommen wurde. Da das Strugholtz-Englert-Modell die Ergebnisse jeweils zum Ende der fünfjährigen Simulationsperioden ausweist, sind die Ergebnisse der ersten Periode 2012 bis 2016 beginnend mit dem Jahr 2016 in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

3.1 Betriebsindividuelle Steuergrößen

Vergleichend zum „Status Quo“ der Naturalausstattung und des Betriebsvollzuges sind in Tabelle 4 die Mittelwerte der TBN-Zusatzbefragung für den Privat- und Körperschaftswald zu den betrieblichen Steuergrößen für die Modellierung der Waldbewirtschaftungsvarianten „Realbetrieb“ und „Referenzbetrieb“ mit dem Strugholtz-Englert-Modell dargestellt. Für die beiden Eigentumsarten Privat- und Körperschaftswald bestehen hierbei zum Teil deutliche Unterschiede in den Steuergrößen.

Die angestrebten Anteile der Holzartengruppen haben als forstliche Steuergröße einen wesentlichen Einfluss auf den zukünftigen Holzertrag und die entstehenden Kosten für Begründung und Läuterung der Bestände. Im Strugholtz-Englert-Modell werden die Folgebestände von hiebsreifen Beständen nach deren Nutzung mit betriebsindividuellen Anteilen der vier Holzartengruppen begründet (d. h. Erhalt der Holzartengruppe im Folgebestand oder Baumartenwechsel in eine andere Holzartengruppe). Ausgehend vom „Status quo“ werden daher die beabsichtigten Anteile der Holzartengruppen in Abhängigkeit von der Altersklassenstruktur und den Produktionszeiten der Einzelbetriebe zu unterschiedlichen Zeitpunkten erreicht. Die im „Realbetrieb“ geplanten Baumartenanteile in Zukunft unterscheiden sich deutlich von der Handlungsalternative „Referenzbetrieb“, sowohl im Privat- als auch im Körperschaftswald. Während die Baumartenanteile der betriebsindividuellen Referenz eine Reduktion des Laubbaumanteils, insbesondere der Holzartengruppe Buche, zu Gunsten der Holzartengruppe Fichte vorsieht, soll im „Realbetrieb“ in beiden Eigentumsarten der Laubholzanteil zu Lasten des Nadelholzes erhöht werden.

Die von den Privatwaldbetrieben angegebenen Produktionszeiten der Holzartengruppen zeigen, sowohl im „Realbetrieb“ als auch in der Referenz, dass der Erntezeitpunkt durchschnittlich eher erreicht werden soll als gegenwärtig gegeben, wobei die Produktionszeiträume im „Referenzbetrieb“ am kürzesten sind. Die im Mittel der Körperschaftswaldbetriebe angegebenen Produktionszeiten im „Referenzbetrieb“ sind ebenfalls kürzer als im „Status quo“ im „Realbetrieb“, welche nur geringfügig voneinander abweichen.

Für die Anteile nicht verwerteten Derbholzes (nvD) und nicht verwerteten Nichtderbholzes (nvND) sind keine

Tabelle 4

Mittelwerte der betriebsindividuellen Eingangsgrößen in die Modellierung

Eingangsgröße	Einheit	Status quo	Privatwald		Körperschaftswald		
			Real-betrieb	Referenz-betrieb	Status quo	Real-betrieb	Referenz-betrieb
Anteile der Holzartengruppen							
Eiche	%	8,5	9,6	8,0	7,2	9,3	8,3
Buche	%	30,3	33,9	28,5	30,6	36	32,4
Fichte	%	36,5	34,4	41,8	40,3	36,8	41,0
Kiefer	%	24,7	22,1	21,7	21,9	17,9	18,3
Produktionszeiten der Holzartengruppe							
Eiche	Jahre	166	161	154	150	150	146
Buche	Jahre	139	131	121	136	136	130
Fichte	Jahre	100	96	87	107	105	102
Kiefer	Jahre	113	111	102	120	122	118
Anteil des nicht verwerteten Derbholzes je Holzartengruppe							
Eiche	%	5,5	7,8	5,2	9,4	7,5	6,4
Buche	%	4,4	7,3	4,5	9,7	10,1	8,2
Fichte	%	4,2	4,7	3,8	6,9	7,5	6,3
Kiefer	%	5,0	5,6	3,8	5,9	7,0	6,5
Anteil des nicht verwerteten Nichtderbholzes je Holzartengruppe							
Eiche	%	63,1	63,5	57,5	55,5	56,8	55,1
Buche	%	63,3	66,0	58,6	63,3	65,7	61,0
Fichte	%	61,4	56,2	56	70,2	70,4	64,2
Kiefer	%	65,5	59,3	61,2	65,6	65,5	43,2
Anteil der Stilllegungsflächen am Holzboden je Holzartengruppe							
Eiche	%	4,0	4,9	1,2	3,9	7,3	2,6
Buche	%	3,4	4,8	1,7	5,7	8,8	4,2
Fichte	%	0,3	0,3	0,1	2,2	3,2	1,8
Kiefer	%	0,2	0,2	0,0	1,3	2,0	1,4
Flächenanteil des nicht bestockten Nichtholzbodens							
	%	3,8	3,4	3,3	4,3	4,4	4,2
Holzerntekostenfreier Erlös je Holzartengruppe							
Eiche	€/m³	67,19	67,19	67,83	66,55	66,55	67,00
Buche	€/m³	32,74	32,74	33,20	31,28	31,28	31,68
Fichte	€/m³	51,29	51,29	51,75	55,37	55,37	57,09
Kiefer	€/m³	44,98	44,98	45,30	43,21	43,21	43,91
Zusätzlicher Verwaltungsaufwand							
	€/ha			-6,60			-5,52

großen Unterschiede zu erkennen. Tendenziell steigen die Anteile des nicht verwerteten Baumholzes im „Realbetrieb“, während sie in der betriebsindividuellen Referenz leicht sinken. Hier liegt der Anteil nicht verwerteten Baumholzes zumeist auch unter dem aktuellen Niveau („Status Quo“). Im Privat- und Körperschaftswald wurde für den „Realbetrieb“ eine Zunahme der Stilllegungsflächen, namentlich im Laubholz, angegeben. In der Referenz würde die Stilllegungsfläche hingegen reduziert werden. Diese Flächenzugänge und Flächenabgänge für die Rohholzerzeugung wurden flächengewogen auf alle Altersstufen der jeweiligen Holzartengruppe bei der Modellierung verteilt, da

individuelle Ziele zur Stilllegung und Reaktivierung von Holzbodenfläche für die Rohholzerzeugung sowie der Bestandsstrukturen nicht bekannt sind.

In ähnlicher Weise wurde mit den Zugängen und Abgängen von Flächen des Nichtholzbodens verfahren. Hierunter subsumiert sich die Nichtholzbodenfläche zur Erbringung von Schutz- und Erholungsleistungen im Wald (z. B. Waldparkplätze oder Waldspielplätze oder Offenland für Naturschutz), welche für die Rohholzerzeugung genutzt werden könnte. Die mittlere Flächenänderung der bewirtschafteten Holzbodenfläche (durch Nutzungsänderung von Nichtholzbodenflächen) liegt im Privatwald bei +0,4 % in der realen

Planung und +0,5 % in der Referenz, sowie im Körperschaftswald bei +0,09 % im „Realbetrieb“ und -0,12 % im „Referenzbetrieb“. Als prozentuales Flächenänderungsmittel der Nichtholzbodenflächen (durch Nutzungsänderung von bewirtschafteter Holzbodenfläche) berechnen sich für den Privatwald -10,3 % in der realen Planung und -13,0 % in der Referenz, sowie im Körperschaftswald -1,9 % im „Realbetrieb“ und +2,5 % im „Referenzbetrieb“. Insgesamt kommt der Aktivierung bzw. Deaktivierung von Nichtholzbodenfläche somit für die Rohholzerzeugung eine nur geringe Bedeutung zu. Der Zu- und Abgang wurde bei der Modellierung flächengewogen der ersten Altersklasse jeder Holzarten-gruppe zugeschlagen.

Die ökonomischen Kenngrößen zu den holzerntekosten-freien Erlösen und dem zusätzlichen Verwaltungsaufwand in der Rohholzerzeugung basieren auf den Jahresmeldungen der TBN-Betriebe (Berichtsjahr 2011). Die zukünftigen Veränderungen der Werte wurden auf Grundlage von relativen Angaben der Betriebe aus der TBN-Zusatzbefragung errechnet. In der TBN-Zusatzbefragung wurde hierbei die relative Veränderung dieser Werte in der betriebsindividuellen Handlungsalternative („Referenzbetrieb“) im Vergleich zum „Status Quo“ (Basis 100 %) abgefragt. Da die Forstbetriebe des Privat- und Körperschaftswaldes im „Referenzbetrieb“ im Mittel geringfügig reduzierte Holzerntekosten angaben, erhöhen sich in der Referenz die holzerntekostenfreien Erlöse in den Holzartengruppen geringfügig. Ebenso gaben die Forstbetriebe der TBN-Zusatzbefragung einen höheren Verwaltungsaufwand im „Realbetrieb“ gegenüber dem „Referenzbetrieb“ in der aufgeführten Größenordnung an.

3.2 Entwicklung der Holzeinschlags- und Deckungsbeitragsdifferenzen

Zum Vergleich der Waldbewirtschaftungskonzeptionen „Realbetrieb“ und „Referenzbetrieb“ werden zunächst die Differenzen der potenziellen Angebotsmengen an Baumholz und der Deckungsbeiträge in der Zeitreihe komparativ statisch aufgezeigt.

Aufgrund von „Einhängeeffekten“ der angegebenen forstlichen Steuerungsgrößen des „Realbetriebes“ und „Referenzbetriebes“ in die tatsächliche naturale Ausstattung der Forstbetriebe ergeben sich bei der Betriebssimulation für beide Waldbewirtschaftungsvarianten in der ersten Betrachtungsperiode deutlich höhere Nutzungsmengen als in den Folgeperioden, wodurch auch die Deckungsbeiträge entsprechend beeinflusst werden. Diese „Bugwelle“ wurde nicht durch eine zeitliche Verschiebung von Nutzungen in spätere Simulationsperioden geglättet.

3.2.1 Entwicklung der Angebotsmengen-differenzen

Im Modellierungszeitraum von 2012 bis 2211 liegen die absoluten potenziellen Angebotsmengen an Baumholz im Mittel pro Jahr zwischen 7,34 m³/ha und 8,56 m³/ha, wobei sowohl in der realen Planung als auch im „Referenzbetrieb“

die Holzeinschlagsmenge aus dem Privatwald etwas größer ist als diejenige aus dem Körperschaftswald (Tabelle 5).

Tabelle 5

Mittlere Angebotsmengen an Baumholz des Privat- und Körperschaftswaldes im Modellierungszeitraum 2012 bis 2211

Mittelwerte der Angebotsmenge (m ³ /ha*a)	Realbetrieb	Referenzbetrieb
Privatwald	8,07	8,56
Körperschaftswald	7,34	7,79

Für die beiden Eigentumsarten ergeben sich die in Abbildung 1 dargestellten Differenzen der Angebotsmenge an Baumholz im Simulationszeitraum 2012 bis 2211. Ausgehend von einer Differenz der Angebotsmenge von -3,97 m³/ha*a im „Realbetrieb“ des Privatwaldes gegenüber der „Referenz“ in der ersten Periode (2012 bis 2016) reduzieren sich die Abweichungen in den Folgeperioden deutlich. Im Zeitraum der Jahre 2032 bis 2056 berechnet sich im Mittel eine um 0,17 m³/ha*a höhere Angebotsmenge im „Realbetrieb“ als im „Referenzbetrieb“, was teilweise mit zeitverzögerten Nutzungen im „Realbetrieb“ in Folge höherer Umtriebszeiten begründet sein dürfte. In den folgenden Simulationsperioden errechnet sich durchgängig eine negative Differenz der Angebotsmengen im „Realbetrieb“ gegenüber dem „Referenzbetrieb“. Die Ursache hierfür dürfte vor allem die höhere Einbringung von ertragsstärkerem Nadelholz in die Folgebestände im „Referenzbetrieb“ sein. Über den gesamten Modellierungszeitraum würde im „Referenzbetrieb“ die potenzielle Angebotsmenge an Baumholz im Privatwald um 0,49 m³/ha*a höher ausfallen als in der realen Planung.

Im Körperschaftswald ist die Angebotsmenge an Baumholz in der Referenz zu jeder Zeit größer als in der realen Planung. Die geringste Differenz zwischen beiden Bewirtschaftungsvarianten wird in der Simulationsperiode 2032 bis 2036 nach einer möglichen Umstellung der Bewirtschaftung mit 0,07 m³/ha erreicht. Die maximale Differenz der Angebotsmenge an Baumholz, abgesehen von der angesprochenen „Bugwelle“, berechnet sich für die Periode 2132 bis 2136 mit -0,92 m³/ha. Über den gesamten Betrachtungszeitraum würde beim Körperschaftswald im „Referenzbetrieb“ die potenzielle Angebotsmenge an Baumholz im Mittel um 0,45 m³/ha*a höher ausfallen als in der realen Planung.

Es lässt sich nachvollziehen, dass eine von der aktuellen Planung abweichende, durch die Eigentümer und Betriebsleiter selbst bestimmte Waldbewirtschaftungskonzeption veränderte Angebotsmengen an Baumholz zur Folge haben würde. Für die privaten und körperschaftlichen Forstbetriebe größer 200 ha Holzbodenfläche im Bundesgebiet verdeutlichen die Modellierungsergebnisse, dass bei Umsetzung der betriebsindividuellen Referenzen dem Holzmarkt jährlich eine höhere Angebotsmenge an Baumholz zur Verfügung

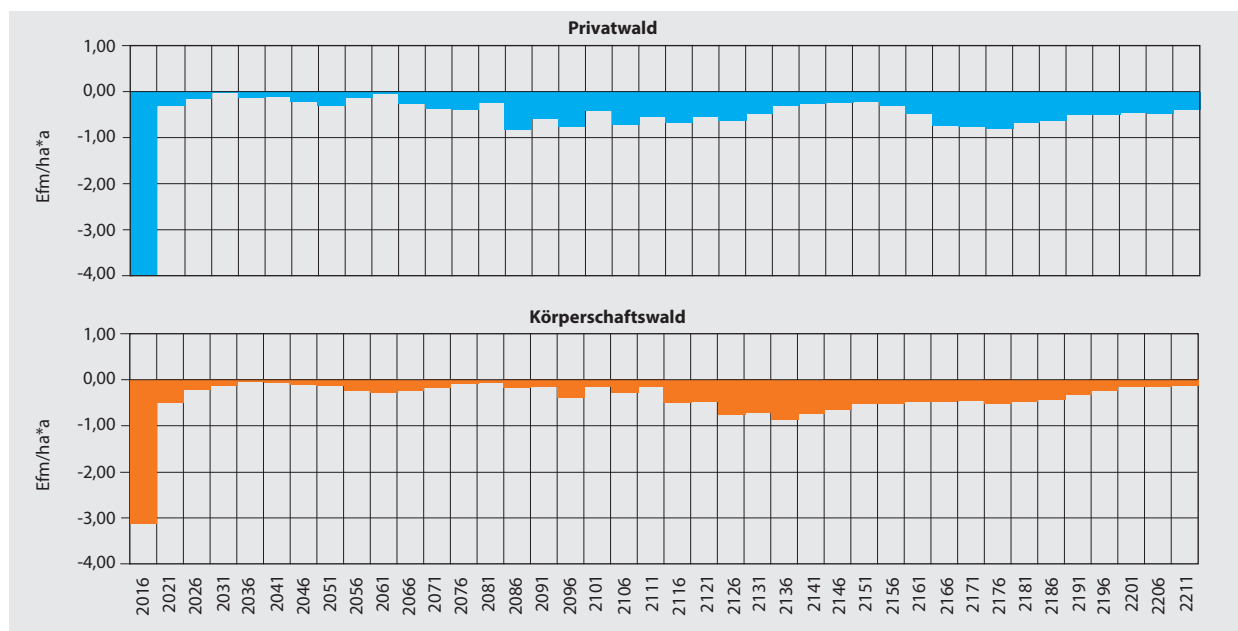


Abbildung 1

Entwicklung der Differenzen der potentiellen Angebotsmengen an Baumholz zwischen den Bewirtschaftungskonzepten „Realbetrieb“ und „Referenzbetrieb“ im Privat- und Körperschaftswald im Modellierungszeitraum 2012 bis 2211

gestellt werden könnte, als dies bei einer Waldbewirtschaftung entsprechend der realen Planung der Fall wäre. Im Mittel des gesamten Simulationszeitraumes errechnet sich hierbei für den Privat- und Körperschaftswald jeweils eine um 6 % höhere Angebotsmenge an Baumholz (vgl. Tabelle 5).

3.2.2 Entwicklung der Deckungsbeitragsdifferenzen

Bei der nachfolgenden Interpretation der Deckungsbeitragsdifferenzen ist zu berücksichtigen, dass sich die

Deckungsbeiträge in der vorliegenden Studie auf Basis der Holzerlöse abzüglich der Holzerntekosten, der Bestandesbe gründungs- und Läuterungskosten sowie im „Realbetrieb“ mit den gegenüber dem „Referenzbetrieb“ höheren Holzerntekosten und Verwaltungskosten berechnen.

Wie aus Abbildung 2 ersichtlich wird, folgt die Entwicklung der Deckungsbeitragsdifferenzen grundsätzlich dem Verlauf der Differenzen der potenziellen Angebotsmengen an Baumholz (Abbildung 1). Dies ist nicht verwunderlich, da eine zentrale Größe der Deckungsbeiträge die mit den holzerntekostenfreien Erlösen monetär bewerteten

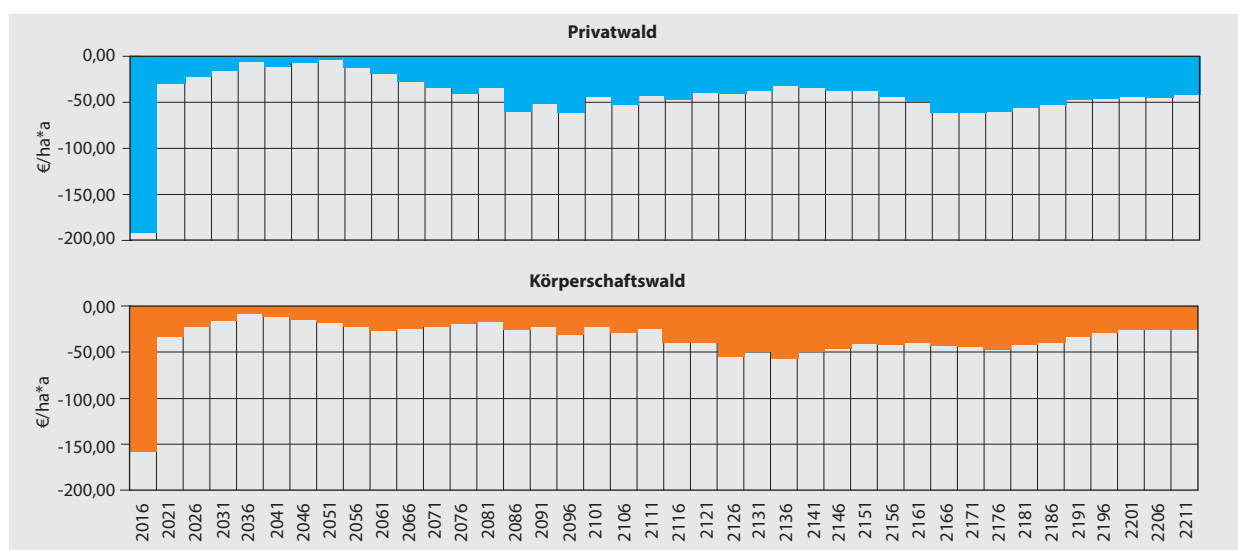


Abbildung 2

Entwicklung der Deckungsbeitragsdifferenzen zwischen den Bewirtschaftungskonzepten „Realbetrieb“ und „Referenzbetrieb“ im Privat- und Körperschaftswald im Modellierungszeitraum 2012 bis 2211

Angebotsmenge darstellt und mit konstanten Preisen gerechnet wurde. Sowohl im Körperschafts- als auch Privatwald zeigt sich die Referenz über den gesamten Simulationszeitraum als wirtschaftlich vorteilhafter als die reale Planung, da in die Deckungsbeitragsberechnung insgesamt noch weitere Aufwandspositionen eingehen. Wie bereits bei den Differenzen der Angebotsmengen an Baumholz, zeigen sich auch für die Differenzen der Deckungsbeiträge Unterschiede zwischen den Eigentumsarten (Tabelle 6).

Im Privatwald wird das Maximum der Deckungsbeitragsdifferenz des „Realbetriebes“ gegenüber dem „Referenzbetrieb“ in der Periode 2012 bis 2016 mit -189,41 €/ha*a erreicht. Am geringsten fällt die Differenz hingegen in der Periode 2047 bis 2051 mit -3,86 €/ha*a aus. Im Mittel des 200jährigen Betrachtungszeitraumes berechnet sich für den Privatwald eine Differenz der realen Planung gegenüber der vorteilhafteren Referenz von -42,07 €/ha*a (Tabelle 6).

Tabelle 6

Mittelwerte und Spannweite der Deckungsbeitragsdifferenzen des Privat- und Körperschaftswaldes im Modellierungszeitraum 2012 bis 2211

Differenzen der Deckungsbeiträge (€/ha*a)	Mittelwert	Maximum	Minimum
Privatwald	-42,07	-189,41	-3,86
Körperschaftswald	-35,20	-158,36	-8,64

Im Körperschaftswald fallen die Deckungsbeitragsdifferenzen zwischen dem „Realbetrieb“ und dem „Referenzbetrieb“

etwas geringer als im Privatwald aus. Im 200jährigen Mittel berechnet sich eine Differenz der Deckungsbeträge der realen Planung gegenüber der Referenz von 35,20 €/ha*a. Das Maximum der Deckungsbeitragsdifferenz liegt auch im Körperschaftswald in der ersten Periode mit -158,36 €/ha*a. Die geringsten Abweichungen zwischen den Deckungsbeiträgen der beiden Waldbewirtschaftungskonzepte berechnen sich in der Periode 2032 bis 2036 mit -8,64 €/ha*a.

3.3 Entwicklung der Ertragswertdifferenzen

Die Berechnung von Annuitäten aus den Ertragswertdifferenzen der beiden modellierten Bewirtschaftungsvarianten ermöglicht es, kalkulatorische Mindererträge und Mehraufwendungen als eine jährlich gleichbleibende Größe für definierte Berechnungsperioden zu vergleichen. Neben den gerade vorgestellten (diskontierten) Deckungsbeitragsdifferenzen gehen in die Ertragswertdifferenzen auch die diskontierten Differenzen im Abtriebswert des gesamten stehenden Holzvorrates zum Ende der jeweiligen Betrachtungsperiode ein. Diese Ertragswertdifferenzen können auch als Wertverlust der Forstbetriebe durch Erbringung von Schutz- und Erholungsleistungen interpretiert werden. Bei den nachfolgend berechneten Annuitäten der Ertragswertdifferenzen entspricht der Wirkzeitraum auch dem Zeitraum der Ertragswertberechnung.

Aus Abbildung 3 ist zu erkennen, dass die durchschnittlichen Annuitäten zunächst deutlich zunehmen, wenn der Bewertungszeitraum verlängert wird. Bis zum Bewertungszeitraum von 80 Jahren steigt die Annuität der Ertragswertdifferenz im Privatwald auf -37,79 €/ha*a und im Körperschaftswald auf -35,68 €/ha*a deutlich an. Danach bleiben

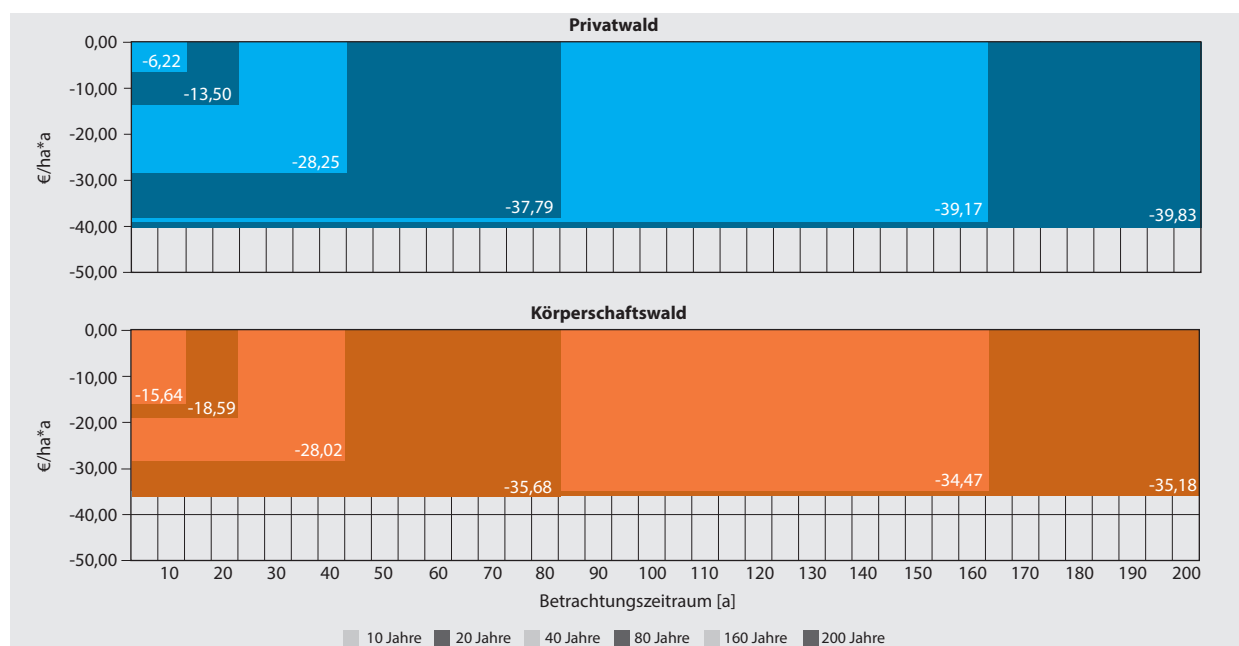


Abbildung 3

Annuitäten der Ertragswertdifferenzen zwischen den Bewirtschaftungskonzepten „Realbetrieb“ und „Referenzbetrieb“ im Privat- und Körperschaftswald für unterschiedliche Bewertungszeiträume innerhalb des Modellierungszeitraumes 2012 bis 2211

bei beiden Eigentumsarten die Annuitäten über die beiden längsten Bewertungszeiträume (160 Jahr und 200 Jahren) fast gleich. Diese Entwicklung ist damit zu erklären, dass sich die Steuerungsgrößen Stilllegung, Umtriebszeitverlängerung und Baumartenwahl (z. B. Verzicht auf zusätzliches Nadelholz) zunächst akkumulieren und ihren Höhepunkt erreichen, wenn die ersten zusätzlichen Nadelholzbestände im „Referenzbetrieb“ hiebsreif werden, die Laubholzbestände der realen Planung aber noch nicht. Mit deren späteren Hiebsreife wachsen die weiter bestehenden kalkulatorischen Mindererträge und Mehraufwendungen aber nicht weiter an. Durch die langen Diskontierungszeiträume wird der Einfluss der späten kalkulatorischen Mindererträge und Mehraufwendung auf den Ertragswert und dessen Annuitäten stark gemindert.

Da die Entwicklung der Deckungsbeitragsdifferenzen und Annuitäten der Ertragswertdifferenzen zwischen dem „Realbetrieb“ und dem „Referenzbetrieb“ bisher ausschließlich im Mittel des Privat- und Körperschaftswaldes dargestellt wurde, wird in Anhang 3 ein differenziertes Bild der Simulationsergebnisse geboten. Neben den absoluten Werten der Deckungsbeiträge pro Hektar sind in der tabellarischen Darstellung zusätzlich zu den Mittelwerten die Minima und Maxima sowie das 25 %-Quartil und 75 %-Quartil für die einzelnen Fünfjahresperioden aufgeführt. Es wird deutlich, dass die Deckungsbeitragsdifferenzen und Annuitäten der Ertragswertdifferenzen innerhalb der untersuchten 35 Privatwaldbetriebe und 61 Körperschaftswaldbetriebe eine hohe Spannweite aufweisen.

3.4 Aufteilung der kalkulatorischen Mindererträge und Mehraufwendungen auf die Schutz- und Erholungsfunktion und deren Verpflichtungsgrundlagen

Da sich Abweichungen in den Steuerungsgrößen der forstlichen Maßnahmentypen in der realen Planung und im „Referenzbetrieb“ in unterschiedlichem Maß in Schutz- und Erholungsfunktionen begründen dürften, wurden die Forstbetriebe in der TBN-Zusatzbefragung um eine Einschätzung gebeten, zu welchen Anteilen sich ihre kalkulatorischen Mindererträge auf die Schutz- und Erholungsfunktionen zurückführen lassen (Abbildung 4).

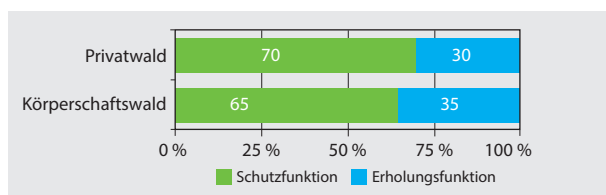


Abbildung 4

Anteil der Schutz- und Erholungsfunktion als Ursachen für kalkulatorische Mindererträge im Privat- und Körperschaftswald

Im Mittel der Privatforstbetriebe wurden der Anteil der Schutzfunktion mit 70 % und der Anteil der Erholungsfunktion mit 30 % als Ursache für die betrieblichen Mindererträge abgeschätzt. Von den Körperschaftswaldbetrieben wurden ähnliche Größenordnungen mit 65 % für die Schutzfunktion und 35 % für die Erholungsfunktion angegeben.

Weiterhin wurden die Betriebe der TBN-Zusatzbefragung um eine Abschätzung zu den Verpflichtungsgrundlagen für die Erbringung von Schutz- und Erholungsleistungen in den forstlichen Maßnahmentypen gebeten. Wie aus Abbildung 5 ersichtlich wird, gaben Privat- und Körperschaftswaldbetriebe jeweils zu 61 % gesetzliche Vorgaben als Verpflichtungsgrundlagen für Schutzfunktionen an. Als Verpflichtungsgrundlagen für Erholungsfunktionen wurden hingegen zu 73 % vom Privatwald und zu 70 % vom Körperschaftswald freiwillige Selbstverpflichtungen bzw. nichtgesetzliche Vorgaben angegeben.

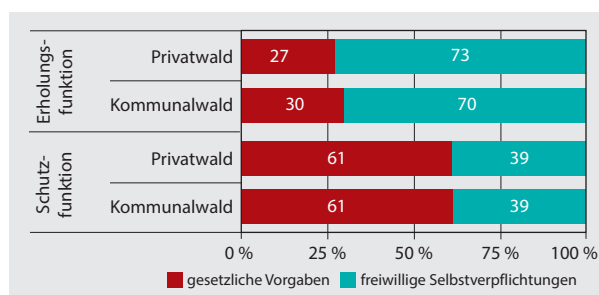


Abbildung 5

Anteil der gesetzlichen Vorgaben und freiwilligen Selbstverpflichtungen als Verpflichtungsgrundlagen für Schutz- und Erholungsfunktionen im Privat- und Körperschaftswald

4 Diskussion und Schlussfolgerung

4.1 Methodendiskussion

Im Zuge des BeSEFu-Forschungsprojektes wurde eine neue Berechnungsmethodik zur Ermittlung von Belastungen aus der Schutz- und Erholungsfunktion des Waldes im Rahmen der Berichtspflicht nach § 41 (3) des BWaldG entwickelt, welche die aktuellen Mehraufwendungen in PB 2 und PB 3 aus der Buchführung der TBN-Forstbetriebe nach dem Ansatz von Küppers und Dieter (2008) um die kalkulatorischen Mindererträge und Mehraufwendungen in der Rohholzerzeugung ergänzt. Zur ergänzenden Berechnung von kalkulatorischen Mindererträgen und Mehraufwendungen in der Rohholzerzeugung wurden in einer TBN-Zusatzbefragung die betriebsindividuellen Handlungsalternativen für forstbetriebliche Maßnahmentypen zur Erbringung von Schutz- und Erholungsleistungen mit potenziellen Minderertrags- und Mehraufwandstatbeständen abgefragt. Dieser Analyseansatz ist in die Zukunft gerichtet und stellt ein rechnerisches Herleiten von kalkulatorischen Mindererträgen und Mehraufwendungen als Ergänzung zur Auswertung tatsächlicher Buchführungsergebnisse dar.

Bei einer Aufsummierung der aktuellen Mehraufwendungen und dem in die Zukunft gerichteten eigenen Ansatz mit betrieblichen Handlungsalternativen können grundsätzlich Doppelzählungen auftreten. Diese sind möglich, wenn die Teilnehmerbetriebe des TBN-Forst die ausgewählten forstlichen Maßnahmentypen mit potenziellen Minderertrags- und Mehraufwandstatbeständen in der Rohholzerzeugung, wie z. B. Waldumbau, anteilig auf PB 1, PB 2 und PB 3 verbuchen. Die eigene Zusatzbefragung des TBN-Forst („TBN-Unterstichprobe“) liefert hierzu ein uneinheitliches Bild, da jeweils die eine Hälfte der Körperschafts- und Privatwaldbetriebe eine anteilige Verbuchung auf alle betroffenen Produktbereiche und die andere Hälfte eine Verbuchung nach dem Schwerpunktprinzip auf einen Produktbereich angaben. Bei einer auf kalkulatorische Mindererträge und Mehraufwendungen in der Rohholzerzeugung isolierten Betrachtung würden im Umkehrschluss nennenswerte aktuelle Mehraufwendungen in PB 2 und PB 3 durch Maßnahmen, wie z. B. Artenschutzmaßnahmen, Bereitstellung von Erholungseinrichtungen oder Müllbeseitigung, unberücksichtigt bleiben. Vor diesem Hintergrund wird die Wirkung einer Überschätzung der Belastungen aus der Schutz- und Erholungsfunktion durch mögliche Doppelzählungen geringer eingeschätzt als die Unterschätzung durch Vernachlässigung der aktuellen Mehraufwendungen in der summarischen Betrachtung.

Gemeinsam ist der neuen Berechnungsmethodik mit dem Ansatz von Küppers und Dieter (2008) der Rückgriff auf das TBN-Forst als zentrale Datengrundlage zur Ermittlung von Belastungen aus der Schutz- und Erholungsfunktion des Waldes. Das TBN-Forst stellt als Datenquelle eine jährlich erhobene Beurteilungsstichprobe dar und gewährleistet die Wiederholbarkeit der Untersuchung mit der neu entwickelten Methode. Die am TBN-Forst teilnehmenden Betriebe (als Beurteilungsstichprobe) repräsentieren die deutschen Forstbetriebe größer 200 ha Holzbodenfläche gut (Ermisch et al., 2015a) und sind die einzige Datenquelle für ökonomische Analysen auf Bundesebene. Da das TBN-Forst insgesamt und die eigene TBN-Unterstichprobe freiwillige Beurteilungsstichproben darstellen, kann nicht beurteilt werden, ob ergebnisbeeinflussende Schweigeverzerrungseffekte („non-response bias“) bei der Ermittlungen der Belastungen aus der Schutz- und Erholungsfunktion vorliegen. Da im TBN-Forst nur die Betriebsgrößenklassen größer 200 ha Holzbodenfläche erfasst sind, haben die Ergebnisse keine Gültigkeit für private und körperschaftliche Betriebe kleiner Betriebsgrößenklassen in Deutschland.

Die durchgeführte kalkulatorische Minderertrags- und Mehraufwandsermittlung in Form des Vergleichs zweier Bewirtschaftungsvarianten liefert nachvollziehbare Ergebnisse. Die Schwierigkeit des Ansatzes besteht in der Bestimmung einer betriebsindividuellen Handlungsalternative, in der die Erbringung von Schutz- und Erholungsleistungen freigestellt ist. Von den befragten Eigentümern und Betriebsleitern erfordert dies ein abstraktes Denken in langfristigen Handlungsalternativen zu Teilaspekten des Betriebsvollzuges. In einer multifunktionalen Waldbewirtschaftung werden zudem mit einzelnen forstlichen Maßnahmen häufig

Nutz-, Schutz- und Erholungsfunktionen gemeinsam verfolgt und realisiert. Bewusst wurden bei der Referenzbildung die betriebsindividuellen Ziele in den Mittelpunkt gestellt. Gegenüber einer fiktiven gewinnmaximierenden Rohholzerzeugung als Referenz sind die kalkulatorischen Mindererträge und Mehraufwendungen wahrscheinlich deutlich reduziert. Eine solche Referenzbildung würde allerdings die Eigentümerrechte und -ziele der Forstbetriebe negieren und wäre auch von geringer Relevanz für die Politikberatung, da diese Form der Waldbewirtschaftung von den Forstbetrieben nicht verfolgt wird. Weiterhin wurde den Forstbetrieben bei der Referenzbildung die Erbringung von Schutz- und Erholungsleistungen auf Basis gesetzlicher und nichtgesetzlicher Verpflichtungsgrundlagen freigestellt. Es wird davon ausgegangen, dass Maßnahmen auf Basis von nichtgesetzlichen Verpflichtungsgrundlagen für die Forstbetriebe hierbei nicht komplett freiwillig sind. Teilweise dürften sie auch informelle Bewirtschaftungsstandards im Sinne des unbestimmten Rechtsbegriffes „ordnungsgemäße“ Bewirtschaftung des Waldes nach § 11 BWaldG darstellen. Ebenso kann die freiwillige Teilnahme an einem forstlichen Zertifizierungssystem für deutsche Forstbetriebe mittlerweile als Marktstandard bzw. als Markteintrittsbarriere interpretiert werden.

Weiterhin ist denkbar, dass von den Befragten aus taktischen Gründen extreme Handlungsalternativen mit dem Ziel einer Maximierung der Belastungen aus der Schutz- und Erholungsfunktion angegeben werden. In der Zusatzbefragung des TBN-Forst wurde als Handlungsalternative jedoch jeweils eine gut nachvollziehbare, nachhaltige Waldbewirtschaftung genannt, die nicht einer auf kurzfristige Gewinnmaximierung ausgerichteten Extremvariante (z. B. „Power-Forestry“) entspricht. Die „Bugwelle“ in den absoluten Angebotsmengen des „Realbetriebes“ und des „Referenzbetriebes“ sowie im Saldo zwischen beiden in der ersten Simulationsperiode deuten darauf hin, dass in der forstlichen Praxis die waldbaulichen Konzepte und die tatsächliche Umsetzung, erkennbar in der gegebenen Altersklassenausstattung, abweichen. Die kalkulatorischen Mindererträge und Mehraufwendungen dürften daher tendenziell überschätzt werden. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die Abschätzung der Wirkung der formulierten Steuerungsgrößen im Zusammenspiel mit der Flächen- und Altersklassenausstattung für die befragten Eigentümer oder Betriebsleiter nicht leicht war. Von Rosenkranz et al. (2014) wurde den Eigentümern oder Betriebsleitern daher die Möglichkeit geboten, auf Basis vorläufiger Modellierungsergebnisse die Steuerungsgrößen nochmals anzupassen. Für die vorliegende Studie wäre dieses Vorgehen wünschenswert gewesen, was aber aus forschungsökonomischen Gründen nicht möglich war.

Um den Aufwand für die teilnehmenden Forstbetriebe gering zu halten und den Befragungsrücklauf zu erhöhen, wurden die abgefragten Daten in der TBN-Zusatzbefragung auf ein Minimum reduziert und um Werte aus den regulären TBN-Jahresmeldungen und um einheitliche Setzungen ergänzt. Grundsätzlich wurde hierbei versucht, auf möglichst viele betriebsindividuelle Eingangsdaten zurückzugreifen. Zu sämtlichen Eingangsdaten der Modellierung,

insbesondere zu denen, welche als einheitliche Setzungen verwendet wurden, wurden vorab Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um deren Einfluss auf die Ergebnisse abschätzen zu können. Differenziertere Eingangsdaten, bspw. zu den betriebsindividuellen Bonitäten, Bestockungsgraden oder sortimentspezifischen Holzerlösen und Holzerntekosten, wären wünschenswert und mit dem Strugholtz-Englert-Modell modellierbar gewesen. Aufgrund dieser Verallgemeinerung bei den Eingangsdaten sind Verzerrungen bei den einzelbetrieblichen Simulationsergebnissen denkbar. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass sich diese möglichen Verzerrungen über die TBN-Unterstichprobe im Privat- und Körperschaftswald ausgleichen.

Aufgrund der langen forstlichen Produktionszeiträume entfalten zahlreiche Maßnahmen zur Erbringung von Schutz- und Erholungsleistungen ihre Wirkung stark zeitversetzt und sind nur mit einem forstbetrieblichen Simulationsmodell ermittelbar. Das für die Berechnungen des Mengengerüstes verwendete Strugholtz-Englert-Modell ist hierfür geeignet. Die Ergebnisse müssen unter Berücksichtigung der durch das Modell vorgegeben Rahmenbedingungen interpretiert werden. Da die Berechnungen der Waldentwicklung durch das Modell ertragstafelbasiert vorgenommen werden, können vom Altersklassenwald abweichende Strukturen nicht hinreichend simuliert werden. Mit der dargestellten Methodik ist es bisher nicht möglich, Kosten und Erlöse im 200jährigen Simulationszeitraum dynamisch anzupassen. Die Simulationsperiode selbst ist auf 200 Jahre begrenzt und stellt damit den normativen Rahmen des Modellierungszeitraums dar. Das hat zur Folge, dass Holzartengruppen mit abweichenden Produktionszeiten unterschiedlich gewichtet in die Berechnung einfließen. In der Zeitreihenbetrachtung wird dies durch die „Wellenbewegung“ der potenziellen Angebotsmenge an Baumholz in Folge der Altersklassenverteilung deutlich. Durch die Berücksichtigung des Abtriebswertes am Ende des Simulationszeitraumes wird dieser Effekt bei der Ertragswertberechnung allerdings abgeschwächt. Bei dem hier verwendeten Kalkulationszinssatz von 1,5 % ist zudem zu beobachten, dass die Veränderungen der Ergebnisse bereits ab einem Bewertungszeitraum von 80 Jahren nur noch gering sind. Der Modellierungszeitraum von 200 Jahren wird somit als ausreichend angesehen.

Die auf dieser Grundlage berechneten ökonomischen Kenngrößen gehen in Form von Salden (Differenzen der Deckungsbeiträge und der Ertragswerte) in die Ermittlung der kalkulatorischen Mindererträge und Mehraufwendungen ein und können als Annuität mit den aktuellen Mehraufwendungen addiert werden. Die dargestellten Rahmenbedingungen betreffen demnach die untersuchten Bewirtschaftungsvarianten alle gleichermaßen (*ceteris paribus*).

4.2 Ergebnisdiskussion

Im Mittel des 200jährigen Simulationszeitraumes wurde für die Privatwaldbetriebe eine um $0,49 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{a}$ reduzierte potenzielle Angebotsmenge an Baumholz im „Realbetrieb“ gegenüber der betrieblichen Referenz als kal-

kulatorischer, natürlicher Minderertrag ermittelt. Hiervon weichen die Ergebnisse für den Körperschaftswald der TBN-Unterstichprobe nicht grundlegend ab. Die Angebotsmenge an Baumholz liegt im Körperschaftswald im „Realbetrieb“ im Mittel um $0,45 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{a}$ unter der des „Referenzbetriebes“. Für die Erbringung von Schutz- und Erholungsleistungen verzichten die Forstbetriebe nach ihrer realen Planung somit zukünftig auf ein zusätzliches Holzaufkommen von 6 %. Hierbei ist zu bedenken, dass die Erträge aus dem Holzverkauf aktuell das wirtschaftliche Standbein der Forstbetriebe darstellen. Der Anteil der Holzerträge am Gesamtertrag im Zeitraum 2003 bis 2013 belief sich relativ konstant auf 82 % bei den Privatwaldbetrieben und 85 % bei den Körperschaftswaldbetrieben des TBN-Forst (Ermisch et al., 2015b).

Zur Erbringung von Schutz- und Erholungsleistungen entsteht ein Deckungsbeitragsverlust durch kalkulatorische Mindererträge und Mehraufwendungen in der Rohholzerzeugung. Dieser beläuft sich nach den eigenen Berechnungen im 200jährigen Mittel im Privatwald auf jährlich $42,07 \text{ €/ha}$ und im Körperschaftswald auf jährlich $35,20 \text{ €/ha}$. Als Annuität der Ertragswertdifferenz für den 200jährigen Bewertungszeitraum berechnen sich für den Privatwald $-39,83 \text{ €/ha}$ und für den Körperschaftswald $-35,18 \text{ €/ha}$. Werden zu dieser Annuität der kalkulatorischen Mindererträge und Mehraufwendungen in der Rohholzerzeugung für einen 200jährigen Bewertungszeitraum die aktuellen Mehraufwendungen in PB 2 und PB 3 des TBN-Forst addiert, errechnet sich in Summe für das Jahr 2011 eine Belastung aus der Schutz- und Erholungsfunktion von $45,03 \text{ €/ha}$ für die Privatwaldbetriebe und $52,03 \text{ €/ha}$ für die Körperschaftswaldbetriebe größer 200 ha Holzbodenfläche. Der 200jährige Bewertungszeitraum für die summarische Gesamtbewertung der Belastungen aus der Schutz- und Erholungsfunktion wird als angemessen betrachtet, da aufgrund der langen forstlichen Produktionszeiträume sämtliche Maßnahmen-typen hinreichend umgesetzt sind.

Aufgrund des abweichenden methodischen Vorgehens sind diese Ergebnisse mit den kalkulatorischen Mindererträgen und Mehraufwendungen der Vorläuferstudien nur sehr eingeschränkt vergleichbar. Dies erscheint angesichts der langfristigen forstbetrieblichen Simulation der Wirkungen und der Berücksichtigung anderer und teilweise umfangreicherer Minderertrags- und Mehraufwandstatbestände plausibel. Von Dahm et al. (1999) wurden für das Jahr 1996 die Mindererträge im Privatwald mit $3,38 \text{ €/ha}$ und für den Körperschaftswald mit $3,79 \text{ €/ha}$ berechnet. In die Minderertragsberechnungen von Dahm et al. (1999) gingen Nutzungsverzichte, Produktionsverzichte auf Freiflächen, Wertzuwachsminderungen, Hiebsunreife sowie sonstige Mindererträge ein. Es wurden Minderertragstatbestände aufgrund gesetzlicher Vorgaben und nichtgesetzlicher Verpflichtungsgrundlagen berücksichtigt. In der Studie von Bartelheimer und Baier (1991) wurden Mindererträge und Mehraufwendungen durch die Schutz- und Erholungsfunktion differenziert für Verdichtungsgebiete, Kurz- und Ferienerholungsgebiete sowie sonstige Gebiete berechnet. Für den Privatwald liegen die gebietsspezifischen Mindererträge und

Mehraufwendungen in einer Größenordnung zwischen 17,03 €/ha*a und 24,22 €/ha*a und für den Körperschaftswald zwischen 33,13 €/ha*a und 152,75 €/ha*a. Von Küppers und Dieter (2008) wurde der Minderertrag auf Waldflächen, die nach Waldgesamtrechnungen für die Rohholzerzeugung nicht zur Verfügung stehen, bezogen auf die bundesweite Holzbodenfläche mit 1,30 €/ha für das Jahr 2006 berechnet.

Während in der Studie von Bartelheimer und Baier (1991) noch 78 % der Belastungen des Körperschaftswaldes und 70 % der Belastungen des Privatwaldes der Erholungsfunktion zugeordnet wurden, hat sich dieses Verhältnis nach Einschätzung der befragten Forstbetriebe in der eigenen TBN-Zusatzbefragung umgekehrt. Von den Privatforstbetrieben wurde der Anteil der Schutzfunktion mit 70 % und von den Körperschaftswaldbetrieben mit 65 % als Ursache für kalkulatorische Mindererträge abgeschätzt.

4.3 Schlussfolgerung

Wie die eigene Studie aufzeigt, werden Schutz- und Erholungsfunktionen des Waldes durch deutsche Forstbetriebe in einem nennenswerten Umfang nicht durch aktive betriebliche Leistungserstellung erbracht, sondern durch gezielte Unterlassungen in der Rohholzerzeugung. Diese kalkulatorischen Mindererträge und Mehraufwendungen reduzieren das Betriebsergebnis in Form von entgangenen Erträgen und zusätzlichen Aufwendungen gegenüber der nicht realisierten Handlungsalternative. Nach den eigenen Berechnungen liegen diese kalkulatorischen Mindererträge und Mehraufwendungen der betrieblichen Bewirtschaftungskonzeptionen deutlich über den aktuell in PB 2 und PB 3 verbuchten negativen Ergebnissen (inklusive Förderung) der Privat- und Körperschaftswaldbetriebe des TBN-Forst. Zur Information des Deutschen Bundestages und für eine gegebenenfalls erforderliche Kompensation der Belastungen der deutschen Forstwirtschaft aus der Schutz- und Erholungsfunktion des Waldes sind diese kalkulatorischen Mindererträge und Mehraufwendungen regelmäßig zu erheben. Sie vermitteln für mögliche Ausgleichszahlungen eine Größenordnung zu den Ausgleichsuntergrenzen. Für einen „gerechten“ Preis wäre zusätzlich eine Produzentenrente zu berücksichtigen. Weiterhin ist bei einer auf Mittelwerte reduzierten Ergebnisbetrachtung zu berücksichtigen, dass die ermittelten kalkulatorischen Mindererträge und Mehraufwendungen zur Erbringung von Schutz- und Erholungsleistungen im zeitlichen Verlauf und zwischen Einzelbetrieben deutliche Spannweiten aufweisen.

Für Folgestudien im Rahmen der Berichtspflicht nach § 41 (3) BWaldG nach der vorgestellten Methodik wäre es wünschenswert, wenn die Verbuchungsregeln in der „Ausführungsanweisung zum Erhebungsbogen für Forstbetriebe“ des TBN-Forst hinsichtlich der Verbuchung auf die Produktbereiche sowie der Verbuchung nach Anteilen und dem Schwerpunktprinzip eindeutiger gefasst wären und von den Forstbetrieben angewendet würden. Eine überarbeitete TBN-Ausführungsanweisung soll für das Erhebungsjahr 2015 Anwendung finden. Da beim TBN-Forst als freiwillige

Beurteilungsstichproben ergebnisverzerrende Schweigeverzerrungseffekte („non-response bias“) bei der Ermittlung der Belastungen aus der Schutz- und Erholungsfunktion nicht auszuschließen sind, wäre eine systematische Stichprobe wünschenswert. Dies würde aber letztendlich eine Auskunftspflicht der Forstbetriebe im Rahmen der Berichterstattung nach § 41 (3) BWaldG erfordern.

Danksagung

Der Dank der Autoren gilt allen teilnehmenden Betrieben der TBN-Zusatzbefragung und den TBN-Länderverantwortlichen für die Unterstützung der Befragung. Ein weiterer Dank gilt den Mitgliedern der projektbegleitenden Expertengruppe des BeSFu-Forschungsprojektes für die fachliche Expertise: Martin Koch, Eberhard Kreysen, Peter Lohner, Christoph Menzel, Prof. Dr. Bernhard Möhring, Dr. Eberhard Piest, Jörg Sander, Sebastian Stoll und Dr. Stefan Schaefer. Cornelia Vogler gilt unser Dank für die Auswertung der Verpflichtungsgrundlagen. Abschließend gilt unser Dank den beiden anonymen Gutachtern für die hilfreichen Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge.

Literatur

- Bartelheimer P, Baier M (1991) Belastungen der Forstbetriebe aus der Schutz- und Erholungsfunktion des Waldes. Münster : Landwirtschaftsverl, 150 p, Angew Wiss 399
- BMEL - Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2016) Wald und Rohholzpotenzial der nächsten 40 Jahre: Ausgewählte Ergebnisse der Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung 2013 bis 2052. Berlin: BMEL, 64 p
- BMELV - Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2005a) Das Waldentwicklungsmodell 2003 bis 2042 : Modell und Ergebnisse. Berlin : BMELV, 99 p
- BMELV - Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2005b) Das potenzielle Rohholzaufkommen 2003 bis 2042 : zu den Bundeswaldinventur-Erhebungen 2001 bis 2002 und 1986 bis 1988 (Teil 2: Tabellen und Methoden). Berlin : BMELV, 91 p
- BMELV - Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2012) Buchführung der Testbetriebe (Forstwirtschaft) : Ausführungsanweisung zum Erhebungsbogen für Forstbetriebe (gültig ab FWJ 2011). Berlin : BMELV, 65 p
- BMVEL - Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (2004) Die zweite Bundeswaldinventur - BWI2: Das Wichtigste in Kürze. Bonn : BMVEL, 87 p
- BWaldG - Bundeswaldgesetz (2015) Gesetz zur Erhaltung des Waldes und zur Förderung der Forstwirtschaft (Bundeswaldgesetz) vom 2. Mai 1975 (BGBl. I S. 1037), das zuletzt durch Artikel 413 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist [online]. Zu finden in <<https://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bwaldg/gesamt.pdf>> [zitiert am 20.04.2016]
- Dahm S, Elsasser P, Englert H, Küppers J-G, Thoroe C (1999) Belastungen der Forstbetriebe aus der Schutz- und Erholungsfunktion des Waldes. Münster : Landwirtschaftsverl, 75 p, Angew Wiss 478
- DFWR - Deutscher Forstwirtschaftsrat (1998) Empfehlungen des DFWR zur Vereinheitlichung des forstlichen Rechnungswesens 1998 [online]. Zu finden in <https://www.google.de/url?sa=t&rc=tj&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwiO2NWS4_DLahWHVSwKH-aqHak8QFggdMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.dfwr.de%2Fdownload%2FEmpfehlungen_des_DFWR.doc&usq=AFQjCNF94IM0aNO8odSUN-MWGYbko3APA&cad=rja> [zitiert am 20.04.2016]

- Ermisch N, Seintsch B, Englert H (2015a) Holzeinschlag des TBN-Forst im Vergleich zur BWI. *AFZ Wald* 70(23):11-13
- Ermisch N, Seintsch B, Englert H (2015b) Anteil des Holzertrages am Gesamtertrag der TBN-Forstbetriebe. *AFZ Wald* 70(23):14-16
- Kroth W, Fischer H, Bartelheimer P (1984) Belastungen der Forstwirtschaft aus der Schutz- und Erholungsfunktion. Münster : Landwirtschaftsverl, 83 p, Angew Wiss 298
- Küppers J-G, Dieter M (2008) Belastungen der Forstbetriebe aus der Schutz- und Erholungsfunktion des Waldes (2003-2006). Hamburg : vTI, 29 p, Arbeitsber Inst Ökon Forst Holzwirtschaft vTI 2008/04
- Möhring B (2001) Nachhaltige Forstwirtschaft und Rentabilitätsrechnung – ein Widerspruch? *Allg Forst Jagdzeitg* 172(4):61-66
- Möhring B (2014) Gibt es einen „richtigen“ Zinssatz bei der forstlichen Wertermittlung? *Wertermittlungsforum* 32(2):72-78
- Möhring B, Rüping U, Leefken G, Ziegeler M (2006) Die Annuität – ein „missing link“ der Forstökonomie? *Allg Forst Jagdzeitg* 177(2):22-29
- Rosenkranz L, Seintsch B (2015) Opportunitätskostenanalyse zur Implementierung des naturschutzorientierten Waldbehandlungskonzepts „Neue Multifunktionalität“. *Landbauforsch Appl Agric Forestry Res* 65(3/4):145-160, DOI: 10.3220/LBF1452524672000
- Rosenkranz L, Seintsch B, Wippel B, Dieter M (2014) Income losses due to the implementation of the Habitats Directive in forests : conclusions from a case study in Germany. *Forest Pol Econ* 38:207-218, doi:10.1016/j.forpol.2013.10.005
- Seintsch B, Rosenkranz L, Englert H, Dieter M, Wippel B, Becker G, Stratmann J, Gerst J, Möhring B (2012) FFH-Impact : Teil 2: Auswirkungen von FFH-Maßnahmenplanungen auf Forstbetriebe. Hamburg : Institut für Ökonomie der Forst- und Holzwirtschaft, 144 p, Arbeitsber Inst Ökon Forst Holzwirtschaft vTI 2012/05
- Smaltschinski T (1998) Regionale Waldwachstumsprognose. Freiburg : Forstl Versuchs Forschungsanst Baden-Württemberg, 121 p, SchrR Freiburger Forstl Forsch 12
- StBA - Statistisches Bundesamt (2011) Land- und Forstwirtschaft, Fischerei : Betriebe mit Waldflächen, Landwirtschaftszählung / Agrarstrukturerhebung (Berichtsjahr 2010) ; Fachserie 3, Reihe 2.1.1 [online]. Zu finden in <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/WaldundHolz/BetriebeWaldflaechen2030211109004.pdf?__blob=publicationFile> [zitiert am 20.04.2016]
- Strugholtz A (2010) Ein forstbetriebliches Simulationsmodell zur ökonomischen Bewertung strategischer forstlicher Produktionsentscheidungen. Göttingen : Univ, 77 p
- Wippermann C (2005) Ökonomische Optimierung von Durchforstungen und Umtriebszeit : untersucht an einem Bestandeswuchsmodell für die Kiefer. Frankfurt a M : Sauerländer, 131 p, Schr Forstökön 30

Anhang 1: Aufwand und Ertrag im PB 1 bis PB 3 des TBN-Forst für den Privat- und Körperschaftswald im Zeitraum 2003 bis 2011 (Quelle: TBN-Forst)

(€/ha HB)	Jahre	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Produktbereich 1										
Privatwald										
Ertrag		275,11	264,32	288,11	357,43	574,53	414,73	324,52	385,27	431,75
Aufwand		227,35	229,77	236,84	246,23	314,61	282,27	246,98	249,79	249,22
davon Verwaltungsaufwand		99,20	95,09	92,45	93,97	98,67	103,29	93,57	92,40	91,26
Ergebnis		47,76	34,55	51,27	111,20	259,92	132,46	77,54	135,49	182,53
Förderung		13,88	10,73	13,65	10,59	8,03	9,03	17,47	11,09	8,82
Ergebnis inkl. Förderung		61,64	45,28	64,92	121,79	267,95	141,49	95,01	146,58	191,35
Körperschaftswald										
Ertrag		273,88	278,85	285,89	338,45	438,37	397,91	334,26	382,73	415,44
Aufwand		263,78	270,23	262,55	270,14	297,86	285,26	274,23	286,02	288,19
davon Verwaltungsaufwand		84,56	85,31	83,52	80,81	79,46	82,49	84,18	85,98	87,70
Ergebnis		10,10	8,62	23,34	68,31	140,51	112,65	60,02	96,71	127,25
Förderung		7,79	8,31	6,54	7,08	4,17	11,98	9,17	5,48	2,90
Ergebnis inkl. Förderung		17,89	16,94	29,88	75,90	144,84	125,42	69,78	102,20	130,64
Produktbereich 2										
Privatwald										
Ertrag		0,63	0,23	0,41	0,51	0,25	1,07	0,51	1,66	0,82
Aufwand		2,74	3,08	2,43	1,43	2,11	1,92	2,27	2,50	3,27
davon Verwaltungsaufwand		1,09	1,62	0,73	0,71	1,01	0,96	0,95	1,17	1,94
Ergebnis		-2,12	-2,85	-2,02	-0,92	-1,86	-0,84	-1,76	-0,85	-2,45
Förderung		1,75	1,77	1,15	1,49	2,87	2,88	2,02	1,28	1,47
Ergebnis inkl. Förderung		-0,37	-1,08	-0,87	0,56	1,01	2,04	0,26	0,43	-0,98
Körperschaftswald										
Ertrag		1,36	5,96	4,07	2,77	1,77	1,69	0,59	1,04	1,35
Aufwand		6,47	9,69	8,86	9,14	9,11	9,62	9,12	9,55	9,70
davon Verwaltungsaufwand		2,64	3,60	3,34	2,79	3,02	3,53	3,07	3,37	3,42
Ergebnis		-5,11	-3,73	-4,79	-6,37	-7,34	-7,94	-8,53	-8,50	-8,36
Förderung		2,54	2,43	3,04	2,70	2,78	10,94	6,68	2,04	2,91
Ergebnis inkl. Förderung		-2,57	-1,30	-1,75	-3,67	-4,56	3,00	-1,86	-6,46	-5,44
Produktbereich 3										
Privatwald										
Ertrag		0,39	0,40	0,21	0,16	0,12	0,15	0,26	0,19	0,41
Aufwand		0,85	1,35	0,91	0,62	0,83	1,01	0,89	1,07	4,64
davon Verwaltungsaufwand		0,48	0,76	0,54	0,37	0,40	0,49	0,41	0,43	1,96
Ergebnis		-0,46	-0,95	-0,69	-0,47	-0,70	-0,87	-0,62	-0,88	-4,23
Förderung		0,00	0,00	0,06	0,01	0,03	0,02	0,78	0,02	0,01
Ergebnis inkl. Förderung		-0,46	-0,94	-0,64	-0,45	-0,68	-0,84	0,16	-0,86	-4,22
Körperschaftswald										
Ertrag		1,43	1,37	1,60	1,16	0,78	0,87	0,82	0,60	0,56
Aufwand		11,44	12,99	13,82	13,28	10,34	11,29	12,15	12,55	12,59
davon Verwaltungsaufwand		4,68	5,74	6,09	4,81	3,91	4,62	4,65	5,22	5,29
Ergebnis		-10,01	-11,62	-12,22	-12,12	-9,55	-10,42	-11,33	-11,95	-12,02
Förderung		0,17	0,76	1,00	1,19	0,92	0,68	0,96	0,87	0,61
Ergebnis inkl. Förderung		-9,84	-10,86	-11,22	-10,93	-8,63	-9,75	-10,37	-11,09	-11,41

Anhang 2: Erhebungsbogen der TBN-Zusatzbefragung

Ökonomische Bewertung von Schutz- und Erholungsleistungen
der Forstwirtschaft

ERHEBUNGSBOGEN

TBN-Betriebsnummer		Bundesland	
--------------------	--	------------	--



1. Naturalausstattung des Betriebes

1.1. Altersklassenverteilung der Holzartengruppen ab Alter 121 Jahre

	Eiche	Buche, sonst. Laubholz	Fichte, Tanne, Douglasie	Kiefer, Lärche, sonst. Nadelholz	Einheit
Blöße und 1- 20 Jahre					ha
21- 40 Jahre					ha
41- 60 Jahre					ha
61- 80 Jahre					ha
81-100 Jahre					ha
101-120 Jahre					ha
121-140 Jahre					ha
141-160 Jahre					ha
161-180 Jahre					ha
über 180 Jahre					ha
Summe der Flächen über 121 Jahre					ha

Bemerkungen und Hinweise

Die Altersklassen und Holzbodenfläche der Holzartengruppen bis zum Alter 120 Jahre sind aus ihrem TBN-Erhebungsbogen (Stand 2011) übernommen.

In der letzten Zeile finden Sie die Holzbodenfläche ab Alter 121 Jahre in Summe.

Bitte nehmen Sie hierzu ggf. Korrekturen vor und ergänzen die Verteilung der höheren Altersklassen.

2. Steuergrößen forstlicher Maßnahmen beim Erbringen von Schutz- und Erholungsleistungen

Die Fragen 2.1 bis 2.6 beziehen sich jeweils auf die oben angegebenen Holzartengruppen. Geben Sie bitte nach dem folgenden Muster jeweils die Steuergrößen Ihrer Waldbewirtschaftung unter den Varianten a), b) und c) an:

a) Ausgangssituation (Status quo): Wie stellen sich in Ihrem Betrieb die aktuellen Steuergrößen Ihrer forstwirtschaftlichen Maßnahmen dar, mit denen Nutz-, Schutz- und Erholungsfunktionen erfüllt werden?

b) zukünftige Betriebsplanung: Welche Veränderung dieser Steuergrößen Ihrer forstwirtschaftlichen Maßnahmen, mit denen Nutz-, Schutz- und Erholungsfunktionen erfüllt werden, planen Sie in Zukunft?

c) betriebsindividuelle Handlungsalternative: Wie würden sich diese Steuergrößen in Ihrem Betrieb darstellen, wenn Ihnen das Erbringen von Schutz- und Erholungsleistungen freigestellt ist? (Dies beinhaltet ggf. kein gezieltes Erbringen von Schutz- und Erholungsleistungen.) (Hinweis: Summenfelder werden beim digitalen Ausfüllen direkt berechnet.)

2.1 Baumartenwahl

a) aktuelle Flächenanteile der Holzartengruppen

Ei	Bu, sonst. LH	Fi, Ta, Dgl	Ki, Lär, sonst. NH	Sum.
				100 %

Ihre aktuelle Verteilung der Holzartengruppen unter a) ist aus Ihrem TBN-Erhebungsbogen (siehe 1.1) errechnet.

b) zukünftig geplante Flächenanteile der Holzartengruppen

				100 %
--	--	--	--	-------

Die Zeilensumme unter b) und c) (je Holzartengruppe) muss 100% ergeben.

c) Flächenanteile der Holzartengruppen Ihrer betriebsindividuellen Handlungsalternative

				100 %
--	--	--	--	-------

2.2 Produktionszeiten (durchschnittliche Umtriebszeiten bzw. Endnutzungsalter)

a) aktuell realisierte Produktionszeiten

				Jahre
--	--	--	--	-------

Die Produktionszeit (bzw. der Zeitraum, in dem i.d.R. die Zielstärke erreicht wird) ist als gesamtbetrieblicher Mittelwert anzugeben.

b) zukünftig geplante Produktionszeiten

				Jahre
--	--	--	--	-------

c) Produktionszeiten Ihrer betriebsindividuellen Handlungsalternative

				Jahre
--	--	--	--	-------

(Einzelne Bäume/Bestände können demzufolge das Produktionsziel auch früher oder später erreichen.)

2.3 Anteil des nicht verwerteten Derbholzes (nvD) am Holzeinschlag

a) aktueller nvD-Anteil

				%
--	--	--	--	---

Unter a) ist der Anteil des nicht verwerteten Derbholzes (oberirdische Holzmasse ab 7 cm Durchmesser in Rinde) am Holzeinschlag aus ihrem TBN-Erhebungsbogen (Stand 2011) übernommen.

b) zukünftig geplanter nvD-Anteil

				%
--	--	--	--	---

c) nvD-Anteil Ihrer betriebsindividuellen Handlungsalternative

				%
--	--	--	--	---

Nehmen Sie hierzu bitte ggf. Korrekturen bzw. Ergänzungen vor.

2.4 Anteil des nicht verwerteten Nichtderbholzes (Reisholz)

a) aktueller Anteil des nicht verwerteten Nichtderbholzes

				%
--	--	--	--	---

Nichtderbholz (auch Reis- oder Reisigholz) ist die oberirdische Holzmasse unter 7 cm Durchmesser in Rinde.

b) zukünftig geplanter Anteil des nicht verwerteten Nichtderbholzes

				%
--	--	--	--	---

Bei einem vollständigen Nutzungsverzicht von Reisholz ist der Wert 100% anzugeben.

c) Anteil des nicht verwerteten Nichtderbholzes Ihrer betriebsindividuellen Handlungsalternative

				%
--	--	--	--	---

2.5 Stilllegungsflächen (Holzbodenfläche)**a) Summe aktueller Stilllegungsflächen**

Ei	Bu, sonst. LH	Fi, Ta, Dgl	Ki, Lā, sonst. NH	ha

b) Summe zukünftiger Stilllegungsflächen

				ha
--	--	--	--	----

c) Summe Stilllegungsflächen Ihrer betriebsindividuellen Handlungsalternative

				ha
--	--	--	--	----

Stilllegungsflächen sind die Summe der (freiwillig oder gesetzlich) stillgelegten/dauerhaft ungenutzten Holzbodenflächen für den Gesamtbetrieb.
Beziehen Sie punktuelle (z.B. Biotop- oder Habitatbäume, Bäume als Naturdenkmal), linienförmige (z.B. Waldränder, Sichtschneisen) und (klein-)flächige Stilllegungen (z.B. Quellbereiche, Referenzflächen, unwirtschaftliche Bestände) mit ein.
Für Einzelbäume kann der durchschnittliche Standraum als Stilllegungsfläche (z.B. 0,01ha) angenommen werden.

2.6 Nichtholzbodenflächen**a) aktuelle Nichtholzbodenfläche**

	ha
--	----

b) zukünftig geplante Nichtholzbodenfläche

	ha
--	----

c) Nichtholzbodenfläche Ihrer betriebsindividuellen Handlungsalternative

	ha
--	----

Die aktuelle Nichtholzbodenfläche Ihres Forstbetriebes (inklusive sonstiger Flächen die kein Wald sind, aber dem Betrieb zugerechnet werden) unter a) ist aus dem TBN-Erhebungsbogen (Stand 2011) übernommen.
Erhöhen Sie diese Fläche unter b) oder c) nur, wenn zusätzliche Schutz- und Erholungsleistungen erbracht werden sollen (z. B. Park- oder Spielplätze); reduzieren Sie diese Fläche nur, wenn sie in Flächen zur Holzproduktion überführt werden soll.

3. Aufteilung des durch Schutz- und Erholungsleistungen bedingten betrieblichen Minderertrags

	Schutzleistungen	Erholungsleistungen	Summe	
Anteil			100	%

Bitte schätzen Sie für Ihre Angaben unter 2.1 bis 2.6 ab, welcher Anteil des betrieblichen Minderertrags (Differenz zwischen Varianten b) und c)) auf Schutzleistungen und welcher Anteil auf Erholungsleistungen zurückzuführen ist. Die Zeilensumme muss 100% ergeben.

4. Verpflichtungsgrundlagen von Schutz- und Erholungsleistungen

	(I) gesetzliche Vorgaben	(II) freiwillige Selbstverpflichtungen	Summe	
Schutzleistungen			100	%
Erholungsleistungen			100	%

Bitte schätzen Sie für Ihre Angaben unter 2.1 bis 2.6 ab, zu welchem Anteil die von Ihnen erbrachten Schutz- und Erholungsleistungen (unter a) und b)) auf (I) gesetzlichen Vorgaben (z.B. Regelungen des Wald- oder Naturschutzgesetzes; Schutzgebietsverordnungen) oder (II) freiwilligen Selbstverpflichtungen (z.B. Zertifizierung) beruhen.
Die Zeilensumme muss jeweils 100% ergeben.

5. Aufwand der betriebsindividuellen Handlungsalternative**Aufwand in der Holzernte**

	%
--	---

Verwaltungsaufwand im Produktbereich 1

("Produktion von Holz und anderen Erzeugnissen")

	%
--	---

Bitte schätzen Sie ab, wie hoch der Aufwand in der Holzernte und der Verwaltungsaufwand in Ihrer betriebsindividuellen Handlungsalternative (entspricht c) Ihrer Angaben unter 2.1 bis 2.6) wäre.
Der Aktuelle Aufwand (unter a)) entspricht 100%.
Verringert sich bspw. der Aufwand um 2% wäre ein Wert von 98% anzugeben.

6. TBN-Buchungspraxis im jährlichen Erhebungsbogen**6.1 Auf welcher Grundlage werden aktuell Ihre Verwaltungskosten auf die Produktbereiche 1-5 verteilt?**

betriebliche Dokumentation (z.B. Stundenaufschriebe)

qualitative Schätzung

	%
	%
Summe	100

Bitte schätzen Sie ab, zu welchem Anteil die jeweilige Methode für die Verteilung Ihrer Verwaltungskosten im TBN-Erhebungsbogen angewendet wird. (Summe=100%)

6.2 Wie wird der Aufwand einzelner forstlicher Maßnahmen auf die Produktbereiche 1-5 verbucht?

Verbuchung nach dem Schwerpunktprinzip

Anteilige Verbuchung auf alle betroffenen Produktbereiche

	%
	%
Summe	100

Bitte schätzen Sie ab, zu welchem Anteil die jeweilige Methode angewendet wird? (Summe=100%)
Schwerpunktprinzip: die Buchung der Maßnahme erfolgt ausschließlich im dem Produktbereich, der den größten Anteil am Aufwand verursacht.

Rücksendung an:

Institution
Anrede
Name
Adresse
PLZ Ort

Anhang 3: Deckungsbeitragsdifferenzen und Annuitäten der Ertragswertdifferenzen zwischen den Bewirtschaftungskonzepten „Realbetrieb“ und „Referenzbetrieb“ im Privat- und Körperschaftswald für unterschiedliche Bewertungszeiträume innerhalb des Modellierungszeitraumes 2012 bis 2211

		Jahre																			
		2016	2021	2026	2031	2036	2041	2046	2051	2056	2061	2066	2071	2076	2081	2086	2091	2096	2101	2106	2111
Deckungsbeitrag (€/ha*a)																					
Privatwald																					
Realbetrieb	Mittelwert	713,97	300,80	281,13	278,69	275,51	294,88	304,74	308,30	315,71	319,28	328,98	336,27	350,04	354,33	364,50	347,14	350,65	330,75	328,35	312,62
	Minimum	52,18	40,17	39,58	39,01	35,69	35,69	33,88	31,99	31,05	30,35	29,20	28,18	28,65	28,95	30,89	32,29	33,50	32,89	29,91	27,40
	25% Quartil	335,63	227,16	206,58	203,24	201,24	223,83	241,80	242,44	237,38	230,02	236,95	244,71	263,50	262,38	282,12	270,52	262,41	246,71	234,56	222,72
	75% Quartil	850,00	365,62	338,93	326,36	329,99	345,27	340,81	344,97	365,47	387,80	388,63	402,33	411,51	421,80	438,21	434,41	437,14	451,81	417,66	382,57
	Maximum	1.395,23	490,07	531,44	589,72	671,29	711,25	694,65	665,46	620,76	598,20	586,90	594,44	651,04	669,69	698,64	733,58	765,96	673,81	645,32	628,95
Referenzbetrieb	Mittelwert	903,38	331,74	303,38	294,09	282,47	306,67	311,68	312,16	327,35	338,62	357,42	370,80	389,88	388,45	424,41	398,66	411,66	374,94	381,41	355,42
	Minimum	59,59	45,65	45,19	44,72	41,36	42,62	42,28	41,84	42,48	43,52	44,44	45,74	48,96	52,16	57,26	61,88	66,33	68,90	82,89	86,70
	25% Quartil	471,95	254,46	225,25	217,33	202,29	233,77	240,42	243,16	256,56	265,86	282,69	295,17	280,42	275,55	292,58	280,00	270,33	260,67	281,90	292,15
	75% Quartil	1.016,52	391,88	360,29	355,49	349,88	363,47	393,02	403,89	397,11	402,64	417,80	432,37	457,85	452,55	523,18	482,00	508,17	476,24	462,93	420,58
	Maximum	1.668,78	539,16	551,26	611,84	697,24	739,10	701,33	670,04	632,05	614,28	602,70	657,03	750,41	781,27	743,65	708,83	777,14	703,02	653,51	638,53
Differenzen	Mittelwert	-189,41	-30,95	-22,25	-15,40	-6,97	-11,79	-6,94	-3,86	-11,64	-19,35	-28,43	-34,53	-39,84	-34,13	-59,91	-51,53	-61,01	-44,19	-53,06	-42,81
	Minimum	-997,14	-264,97	-202,58	-142,55	-92,44	-99,26	-109,08	-113,35	-116,08	-133,37	-195,16	-207,26	-214,14	-183,62	-251,03	-218,02	-193,54	-169,32	-206,36	-156,37
	25% Quartil	-252,61	-48,97	-35,31	-27,89	-22,97	-27,62	-18,86	-22,48	-35,19	-39,80	-41,93	-43,65	-44,74	-40,62	-49,94	-40,25	-59,23	-54,92	-61,64	-52,13
	75% Quartil	-7,73	-2,38	-1,41	0,19	7,87	7,13	12,56	9,39	2,40	4,01	0,00	0,09	0,25	4,75	5,15	6,10	1,03	0,66	-0,32	-0,42
	Maximum	275,22	96,72	83,45	60,61	101,27	105,32	123,97	123,44	115,32	92,25	53,22	65,36	137,07	153,92	113,41	106,36	123,20	89,97	77,14	52,96
Körperschaftswald																					
Realbetrieb	Mittelwert	614,73	330,53	304,90	293,97	282,58	292,09	299,29	301,42	310,61	316,68	326,25	331,46	337,37	335,95	330,10	318,71	321,80	312,79	330,99	316,55
	Minimum	144,11	84,46	66,19	57,44	38,30	38,16	36,85	36,41	40,81	44,65	47,19	49,19	57,96	65,13	78,69	88,27	100,98	101,98	92,82	82,86
	25% Quartil	389,07	252,39	221,69	217,01	200,17	211,37	218,51	228,08	241,99	238,24	241,14	251,37	245,02	241,35	241,11	238,65	252,06	244,76	253,72	252,39
	75% Quartil	806,41	462,37	415,52	391,85	370,67	387,31	393,84	391,49	407,45	415,21	420,71	418,04	440,78	449,97	414,41	401,38	388,89	383,26	429,89	418,27
	Maximum	2.549,32	788,73	693,56	677,67	579,30	643,70	722,21	746,19	633,06	595,15	637,08	648,11	646,57	629,58	936,28	820,15	917,58	812,38	919,86	694,27
Referenzbetrieb	Mittelwert	773,09	365,84	327,88	310,65	291,22	303,92	314,62	319,88	334,36	343,60	350,73	354,15	357,08	353,57	355,65	341,38	354,23	334,89	360,82	341,58
	Minimum	148,22	86,85	68,07	59,05	39,64	39,36	37,99	37,52	41,99	45,89	48,51	50,57	59,61	67,00	80,93	90,78	103,86	104,90	95,51	85,31
	25% Quartil	428,81	267,89	236,62	227,37	212,25	211,17	219,27	221,31	236,29	248,42	262,61	251,56	245,15	244,40	248,93	243,51	265,09	257,74	259,94	261,87
	75% Quartil	937,21	489,60	428,40	398,95	374,83	378,48	415,53	400,71	413,26	426,81	439,38	444,09	453,99	448,93	436,87	416,87	455,37	430,42	463,58	440,22
	Maximum	2.549,15	788,73	693,56	677,67	576,10	522,68	605,00	667,85	746,50	766,29	668,97	656,86	790,21	751,99	936,20	820,05	945,66	664,91	730,15	754,10
Differenzen	Mittelwert	-158,36	-35,31	-22,98	-16,68	-8,64	-11,83	-15,33	-18,46	-23,75	-26,92	-24,47	-22,69	-19,71	-17,62	-25,55	-22,67	-32,43	-22,09	-29,82	-25,03
	Minimum	-1.122,88	-282,95	-198,09	-124,46	-67,49	-79,81	-93,62	-101,57	-140,58	-235,11	-244,02	-183,71	-280,37	-231,24	-454,32	-382,32	-460,14	-285,55	-258,23	-251,82
	25% Quartil	-208,84	-37,64	-29,30	-27,81	-26,18	-29,76	-29,50	-25,34	-33,89	-34,93	-26,51	-21,08	-27,69	-20,46	-20,14	-24,24	-48,90	-39,52	-46,09	-43,49
	75% Quartil	0,00	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	3,50	3,86	4,20	0,00	4,75	1,88	1,75	1,08	0,00	0,83	0,23	1,83
	Maximum	393,87	136,16	98,61	101,45	109,77	153,10	122,21	78,35	44,75	41,82	69,34	88,40	92,23	84,97	84,68	76,35	116,20	159,43	359,25	319,03
Annuität der Ertragswertdifferenz (€/ha*a)																					
Privatwald																					
Differenzen	Mittelwert	1,21	-6,22	-9,45	-13,50	-16,70	-20,64	-24,72	-28,25	-31,02	-33,08	-34,64	-35,79	-36,65	-37,30	-37,59	-37,79	-37,85	-37,97	-37,86	-37,83
	Minimum	-155,82	-81,78	-57,09	-45,00	-37,86	-33,76	-38,24	-42,23	-47,09	-51,97	-56,57	-60,86	-64,57	-67,96	-70,99	-74,00	-69,36	-65,46	-61,46	-63,53
	25% Quartil	0,00	0,00	0,04	-0,04	-0,09	-1,06	-0,64	-3,82	-7,22	-13,25	-14,71	-14,34	-18,49	-18,74	-19,30	-18,81	-20,67	-23,42	-24,36	-29,51
	75% Quartil	247,03	171,87	138,92	109,43	84,51	64,99	46,93	30,34	18,29	13,37	16,46	17,32	16,04	12,22	4,52	2,96	5,06	3,20	0,01	0,10
	Maximum	1.361,87	676,21	447,07	416,95	389,71	366,91	337,80	306,78	278,48	260,61	228,73	189,93	148,74	106,32	92,53	73,21	62,89	59,96	67,92	70,44
Körperschaftswald																					
Differenzen	Mittelwert	-18,14	-15,64	-16,45	-18,59	-20,62	-23,32	-25,91	-28,02	-29,64	-30,89	-32,03	-33,03	-33,96	-34,73	-35,29	-35,68	-35,82	-35,91	-35,86	-35,78
	Minimum	-350,25	-228,23	-162,50	-119,05	-93,09	-115,86	-130,74	-137,42	-116,06	-78,79	-79,80	-99,87	-110,72	-116,73	-91,04	-108,17	-126,69	-144,80	-141,44	-135,67
	25% Quartil	-1,35	-9,31	-6,25	-5,12	-6,18	-3,88	-5,86	-9,35	-5,61	-8,87	-10,21	-10,56	-18,79	-21,29	-25,88	-25,35	-21,49	-22,29	-21,11	-21,11
	75% Quartil	202,09	135,51	107,17	74,03	58,56	47,73	37,07	29,83	20,27	16,67	10,13	4,13	5,09	1,48	0,76	0,70	0,37	0,21	0,05	0,05
	Maximum	729,27	498,06	386,26	306,83	239,84	183,02	129,35	84,60	86,21	84,84	77,61	67,11	55,34	44,85	77,66	119,92	135,40	129,26	102,63	74,67

	Jahre	2116	2121	2126	2131	2136	2141	2146	2151	2156	2161	2166	2171	2176	2181	2186	2191	2196	2201	2206	2211
Deckungsbeitrag (€/ha*a)																					
Privatwald																					
Realbetrieb																					
Mittelwert		326,98	320,11	341,02	333,86	362,85	340,73	343,38	332,84	339,54	331,58	335,37	324,80	327,93	321,46	326,35	325,39	331,73	332,61	336,95	337,41
Minimum		22,54	21,02	22,50	24,49	28,79	31,00	33,94	34,89	37,80	37,16	36,57	36,12	35,33	34,64	33,90	33,20	32,68	32,25	32,09	32,10
25% Quartil		236,73	238,56	246,53	248,68	252,62	249,67	248,31	253,32	255,42	250,58	262,27	242,74	245,32	243,89	246,46	246,46	243,13	247,62	257,23	265,12
75% Quartil		363,31	362,00	393,15	385,65	400,86	385,72	400,71	397,71	402,03	408,38	404,85	406,56	406,34	385,30	396,57	386,96	386,76	388,59	395,44	403,71
Maximum		612,42	614,86	582,93	563,06	579,85	520,53	549,79	579,27	628,04	651,17	651,04	636,92	618,35	604,53	589,38	579,28	579,64	595,25	604,17	608,27
Referenzbetrieb																					
Mittelwert		373,38	358,99	382,54	370,56	394,72	375,44	380,16	370,38	383,72	381,07	396,03	385,90	389,34	377,12	379,02	372,76	378,72	376,83	381,94	378,91
Minimum		93,09	94,62	102,40	106,29	115,70	122,79	130,62	135,72	142,37	145,21	148,89	152,32	152,91	154,41	155,11	153,17	154,81	156,22	159,96	161,49
25% Quartil		306,88	290,76	295,71	275,86	299,35	290,48	281,28	267,99	273,53	274,36	300,36	304,81	315,18	291,36	276,26	277,50	275,37	278,25	294,20	300,99
75% Quartil		445,83	405,69	432,18	433,08	467,48	431,89	411,29	408,86	447,39	451,93	484,82	459,62	462,33	427,23	441,65	440,39	455,65	444,54	450,22	427,23
Maximum		632,28	639,75	593,93	545,24	554,22	554,89	577,71	597,50	652,05	672,92	670,78	653,43	668,03	617,10	625,99	685,90	724,53	726,10	697,43	658,96
Differenzen																					
Mittelwert		-46,41	-38,88	-41,52	-36,70	-31,87	-34,71	-36,78	-37,74	-44,18	-49,49	-60,67	-61,10	-61,41	-55,66	-52,67	-47,37	-47,00	-44,22	-44,99	-41,50
Minimum		-188,05	-212,54	-260,91	-237,97	-249,92	-188,81	-162,99	-178,55	-185,36	-204,36	-247,14	-224,77	-176,34	-180,72	-208,31	-244,02	-264,12	-235,04	-175,49	-154,77
25% Quartil		-69,19	-81,93	-89,33	-86,79	-98,99	-75,39	-73,20	-64,41	-63,39	-63,41	-70,26	-69,76	-91,75	-85,52	-87,01	-56,29	-52,02	-59,55	-56,53	-58,85
75% Quartil		0,00	0,00	-0,93	-0,59	-1,70	-0,31	0,06	0,03	0,88	0,00	0,00	0,00	-1,24	-4,61	0,00	0,00	-0,18	0,00	1,29	0,00
Maximum		47,48	78,82	164,25	183,27	218,04	124,00	50,27	57,32	105,68	114,03	101,60	101,22	100,30	82,76	70,67	93,10	114,49	105,45	72,73	82,14
Kommunalwald																					
Realbetrieb																					
Mittelwert		321,64	302,54	305,84	292,45	300,72	295,67	304,80	301,98	310,76	310,04	318,63	318,00	325,54	323,28	324,83	321,15	326,71	323,80	326,42	319,99
Minimum		63,87	54,23	50,96	50,94	52,27	55,52	59,67	63,64	76,62	82,46	94,57	96,36	108,46	98,55	87,69	78,04	68,77	63,51	60,43	59,42
25% Quartil		250,49	241,16	246,00	226,07	240,31	237,18	239,77	244,82	246,99	247,13	258,07	262,92	267,32	248,95	249,40	241,48	251,73	257,48	259,69	266,94
75% Quartil		423,88	423,66	404,25	356,98	383,10	387,17	381,58	388,25	387,54	396,66	398,54	412,94	407,74	406,77	397,53	389,09	395,66	408,53	427,47	424,14
Maximum		742,35	611,10	610,83	657,00	663,74	637,60	715,74	684,22	647,27	608,72	718,15	691,26	676,50	664,94	802,84	790,12	782,27	676,46	687,19	658,80
Referenzbetrieb																					
Mittelwert		362,55	342,35	360,76	344,03	358,19	345,70	351,15	343,32	352,53	351,72	362,18	362,47	372,30	366,93	365,20	355,14	356,73	350,22	352,61	346,19
Minimum		65,80	55,88	52,41	52,31	53,54	56,81	61,02	65,08	78,41	84,41	96,87	98,70	111,20	101,01	89,87	79,95	70,49	65,10	61,95	60,94
25% Quartil		269,54	266,57	276,59	275,16	286,88	278,45	276,59	270,50	271,08	266,83	276,72	281,57	285,52	282,83	278,73	271,76	280,48	276,52	277,43	267,34
75% Quartil		471,90	459,34	459,19	432,55	451,56	425,18	418,85	409,67	418,47	431,89	446,03	446,95	442,01	446,87	456,59	447,44	449,96	434,30	444,74	436,24
Maximum		688,24	579,91	622,02	585,33	651,91	666,55	758,30	739,90	771,14	701,68	811,94	786,87	769,84	664,64	666,25	660,64	643,70	623,83	604,50	654,37
Differenzen																					
Mittelwert		-40,91	-39,81	-54,92	-51,57	-57,48	-50,03	-46,35	-41,35	-41,77	-41,68	-43,54	-44,47	-46,76	-43,65	-40,38	-34,00	-30,02	-26,42	-26,18	-26,20
Minimum		-330,75	-267,73	-293,86	-264,75	-321,44	-248,38	-271,85	-274,56	-289,13	-294,89	-333,15	-313,25	-301,85	-264,35	-240,62	-201,05	-170,55	-178,26	-252,21	-257,25
25% Quartil		-47,25	-37,59	-63,05	-63,77	-64,51	-78,29	-67,77	-44,46	-52,10	-54,22	-48,72	-45,59	-73,83	-44,38	-58,77	-55,35	-49,11	-38,81	-45,93	-45,94
75% Quartil		3,38	3,39	0,22	0,00	0,00	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,18	0,00	0,00	0,00	0,24	1,89
Maximum		289,16	148,31	127,36	160,19	123,27	70,86	78,45	90,20	77,24	63,38	63,87	72,35	78,65	82,96	274,24	351,44	371,67	266,06	186,92	162,59
Annuität der Ertragswertdifferenz (€/ha*a)																					
Privatwald																					
Differenzen																					
Mittelwert		-37,80	-37,86	-37,91	-38,02	-38,18	-38,34	-38,51	-38,68	-38,83	-38,97	-39,08	-39,17	-39,27	-39,36	-39,45	-39,54	-39,63	-39,71	-39,77	-39,83
Minimum		-62,23	-66,37	-72,35	-78,31	-85,80	-92,05	-97,45	-102,03	-105,96	-109,20	-112,01	-114,60	-115,56	-115,60	-113,51	-111,14	-108,16	-106,70	-106,56	-108,18
25% Quartil		-27,92	-25,26	-21,04	-18,22	-18,41	-18,76	-19,26	-19,23	-20,91	-23,81	-22,29	-25,00	-24,94	-25,35	-26,61	-22,46	-25,31	-28,35	-31,29	-33,36
75% Quartil		1,85	2,42	6,14	8,93	7,31	6,03	3,91	3,95	8,07	4,47	3,50	5,15	5,46	5,72	5,94	6,06	8,58	4,73	3,19	3,58
Maximum		68,43	60,00	42,42	36,50	69,82	94,02	108,40	113,39	110,66	102,52	92,23	82,52	75,36	72,44	66,29	51,10	45,80	41,47	38,25	38,89
Kommunalwald																					
Differenzen																					
Mittelwert		-35,57	-35,37	-35,10	-34,87	-34,64	-34,48	-34,38	-34,34	-34,34	-34,36	-34,41	-34,47	-34,53	-34,61	-34,69	-34,79	-34,89	-35,00	-35,10	-35,18
Minimum		-123,03	-124,36	-108,91	-97,92	-89,70	-97,84	-93,49	-91,68	-108,93	-117,85	-113,84	-103,51	-87,02	-82,95	-87,81	-95,17	-105,61	-118,32	-133,07	-147,90
25% Quartil		-19,51	-18,50	-25,02	-23,18	-25,41	-24,46	-21,81	-21,98	-23,66	-25,00	-27,48	-29,26	-29,71	-28,85	-28,80	-31,84	-28,54	-22,28	-29,70	-34,69
75% Quartil		0,05	0,00	0,00	0,00	1,59	3,96	2,57	4,11	4,66	3,91	4,48	4,72	3,70	2,20	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Maximum		48,79	33,79	31,08	32,04	33,24	41,02	46,27	48,97	48,02	44,80	69,09	104,17	130,34	139,65	128,83	107,03	78,45	53,46	40,61	40,52

Experimental system for the prevention of O₂- and air contamination during biogas upgrading with phototrophic microalgae

Gunnar Mann*, Mathias Schlegel*, Norbert Kanswohl*, and Rhena Schumann**

Abstract

Several alternative biogas purification techniques are currently being examined for increasing the efficiency of the biogas production. Phototrophic microalgal strains have been tested for converting large quantities of CO₂ from biogas into algal biomass. However, nearly all studies on biogas upgrading with microalgae resulted in contamination of upgraded gas with O₂ caused by photosynthesis or air due to algal culturing in open ponds. To avoid impurities in upgraded biogas, we tested a discontinuous system at bench scale. We grew the well-studied green algae *Chlorella vulgaris* and the recently described green algae *Chloroparva pannonica* in a tubular photobioreactor with 3NBB medium. Subsequently, we used a detached gas scrubber to transfer CO₂ from biogas into dark-adapted microalgal suspensions. During the gas upgrading, the O₂- and CO₂ concentrations in biogas were monitored and corresponding reaction kinetics of mass transfer from biogas into algal medium were determined. The upgrading experiments resulted in a virtually complete removal of CO₂ from all biogas batches. Simultaneously, no O₂ or air was added to the upgraded biogases. Furthermore, we found varying CO₂ kinetics which indicated an algal-specific effect upon the CO₂ removal from biogas. These findings proved the suitability of our experimental system for detailed studies on biogas upgrading with phototrophic microalgae, including their culture media. Moreover, we demonstrated the feasibility of bench-scale biogas upgrading with microalgae without simultaneous contamination of the upgraded gas.

Keywords: Bench-scale, Biogas upgrading, Gas contamination, Microalgae

Zusammenfassung

Versuchsaufbau zur Vermeidung von Sauerstoff- und Lufteinträgen während der Biogasaufbereitung mit phototrophen Mikroalgen

Gegenwärtig werden verschiedene Mikroalgen als alternatives Biogasaufbereitungsverfahren untersucht. Bei der Umwandlung von Biogas-CO₂ in Algenbiomasse treten jedoch in nahezu allen Studien Verunreinigungen der aufbereiteten Gase auf. Diese erfolgen in Form von Sauerstoff durch Photosynthese sowie Luft infolge der Algenkultivierung in Becken. Um Gaskontaminationen zu vermeiden, kultivierten wir *Chlorella vulgaris* und *Chloroparva pannonica* in einem Photobioreaktor. In einem separaten Gaswäscher überführten wir anschließend Biogas in die dunkel-adaptierten Algensuspensionen. Während der Gasaufbereitung wurden die O₂- und CO₂-Konzentrationen überwacht und entsprechende Kinetiken des Massentransfers von Biogas zu Algenmedium bestimmt. Die Experimente zeigten eine nahezu vollständige Entfernung des CO₂ aus allen eingesetzten Biogascargen. Gleichzeitig wurde den aufbereiteten Gasen weder O₂ noch Luft hinzugefügt. Darüber hinaus fanden wir abweichende CO₂-Kinetiken, die auf eine algen-spezifische Beeinflussung der CO₂-Entfernung schließen lassen. Die Ergebnisse belegen die Eignung unseres Versuchsaufbaus für detaillierte Untersuchungen zur Biogasaufbereitung mit phototrophen Mikroalgen, einschließlich deren Kulturmedien. Zudem wurde die Machbarkeit der Biogasaufbereitung mittels phototropher Mikroalgen ohne die gleichzeitige Verunreinigung aufbereiteter Gase im Labormaßstab gezeigt.

Schlüsselworte: Labormaßstab, Biogasaufbereitung, Gasverunreinigung, Mikroalgen

* University of Rostock, Faculty for Agricultural and Environmental Sciences, Dept. Agricultural Technology and Process Engineering, Justus-von-Liebig Weg 6b, 18059 Rostock, Germany

** University of Rostock, Institute of Biological Sciences, Applied Ecology and Phycology, Biological Station Zingst, Albert-Einstein-Str. 3, 18059 Rostock, Germany

Contact: gunnar.mann@uni-rostock.de

1 Introduction

Biogas typically consists of 40 to 75 % v/v methane (CH_4), 15 to 60 % v/v carbon dioxide (CO_2), water vapour, hydrogen sulphide and other trace gases, such as carbon monoxide, nitrogen and atmospheric oxygen (O_2) (Andriani et al., 2014). Particularly, the CO_2 proportion influences the energetic properties of biogas since higher CO_2 levels result in a decreasing calorific value of the gas mixture. Further, the efficiency of four-stroke biogas engines decreases with rising CO_2 concentrations in biogas (Bari, 1996; Edelman, 2001; Deublein and Steinhauser, 2011). Besides energetic aspects, high CO_2 concentrations increase the biogas volume and the corresponding storage space. Biogas storage at atmospheric pressure in large, plastic bags is associated with size- or transportation problems (Andrea et al., 2011; Khoiyangbam et al., 2011). Therefore, the generation of biogas generally benefits from a CO_2 separation procedure. Chemico-physical processes, e.g. pressure swing adsorption and amine scrubbing, are state of the art for industrial biogas upgrading (Petersson and Wellinger, 2009). Besides these energy-intensive processes, biological approaches have high potential for CO_2 separation from biogas.

Particularly, photosynthetic microorganisms are well investigated in terms of removing CO_2 from gaseous waste streams (Benemann et al., 2003; Wang et al., 2008; Kumar et al., 2010). Moreover, several studies on biogas purification with photosynthetic microalgae have been conducted (e.g. Schmack et al., 2009; Kaštánek et al., 2010). However, apart from a sophisticated multi-species process (Bahr et al., 2014), the large-scale approaches resulted in contamination of the upgraded biogas. These contaminations were either oxygen- (O_2) due to algal photosynthesis or air caused by algal culturing in open ponds. As a consequence, studies on biogas upgrading with phototrophic microalgae focus on the optimal biomass, whereas effects of the algal medium on biogas upgrading are disregarded. In order to prevent contaminations of upgraded biogas and to examine potential influences of the algal medium on the process, we follow a small-scale approach. In a first step, we tested a bench-scale system in which biogas is upgraded by microalgal suspension without simultaneous oxygen- or air contamination. For this purpose, the green algae *Chlorella vulgaris* and *Chloroparva pannonica* served as model organisms and were cultured under monitored conditions in a tubular photobioreactor. Subsequently, biogas was upgraded with dark-adapted algal suspension in a detached gas scrubber and reaction kinetics of the O_2 - and CO_2 mass transfer from biogas into algal medium were determined.

2 Materials and Methods

2.1 Microalgal strain and culture medium

Two microalgal strains were grown as model organisms for biogas upgrading. The axenic *Chlorella vulgaris* 211-11B and the non-axenic *Chloroparva pannonica* 2358 were obtained from the SAG culture collection, University of Göttingen.

Both strains grew in 3NBB medium according to the recipe of Starr and Zeikus (1993). We selected unicellular and agitation resistant green algal strains (Trebouxiophyceae, Chlorophyta) due to the expected mechanical stress during biogas upgrading. Both strains were phototrophic in order to be independent from organic nutrients and the associated risk of contamination.

2.2 Culturing of microalgae

A closed tubular photobioreactor (PBR) was used to culture *Chlorella vulgaris* and *Chloroparva pannonica* constantly at 20 °C with a light-dark cycle of 16/8 h and a photon flux density (PFD) of 60 μE . The PBR had a total volume of 4.9 l and consisted of transparent borosilicate glass tubes with an inner diameter of 25 mm and a total length of 9 m. Its glass components were arranged helically and connected with flange mountings. The PBR was equipped with sampling- and effluent junctions, a vertical backflow as well as a headspace with junctions for medium- and inoculum inlet. Culture conditions were monitored online with temperature and pH sensors PHD 2 (PCE-Germany).

Culture experiments with *Chlorella* were performed under sterile conditions. For this purpose, the PBR was cleansed by circulating a sodium hypochlorite solution (1.5 % v/v) for one hour. Subsequently, the tubes were rinsed twice with sterilised deionised water for 30 min. The PBR was filled with sterile 3NBB medium via a peristaltic pump Ismatec IP-ISM 942 and microalgal suspension was inoculated through the headspace via a custom setup for inoculation (Figure 1). After inoculation, the algal suspension circulated constantly through the bioreactor. The suspension flow was driven by a constant airstream of 0.75 l·min⁻¹ provided by a micro membrane pump, model NPM NF-05D004 (Reichert Chemietechnik, Germany). Air was filtered with sterile syringe filter (Rotilabo®, Germany) and inserted through a cannula at the lowest part of the PBR. After passage of the tubing, the air was vented in the headspace.

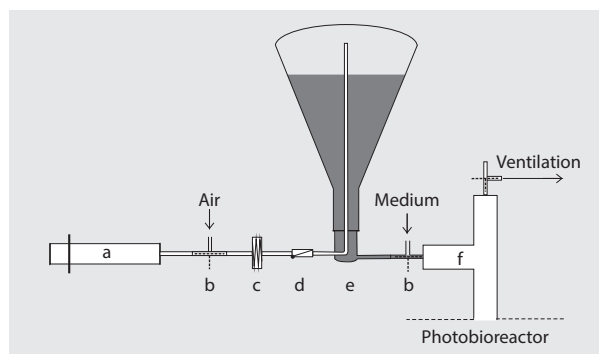


Figure 1

Custom setup for sterile inoculation of the photobioreactor; (a) gas syringe, (b) three-way valve, (c) sterile filter, (d) check valve, (e) conical flask with sterile algal suspension, (f) inoculum/medium junction at headspace of photobioreactor

Samples of algal suspension were taken daily from the bioreactor to determine biomass growth. The samples were filtered onto pre-weighted glass microfibre filters (WHATMAN, GF/F), dried at 60 °C for 24 hours and weighted again. In addition, algal growth was determined by triplicate cell countings using a Thoma counting chamber. The resulting cell densities are represented as mean and growth rates (μ) were calculated by stepwise optimization of the least deviation squares (Excel Solver). Losses of suspension by sampling and evaporation were compensated with 3NBB medium from an attached reservoir.

2.3 Biogas upgrading at bench scale

Carbon dioxide was separated from biogas in a darkened gas scrubber. The scrubber was built up of two circuits, which were detached from the photobioreactor (Figure 2 b). The first circuit consisted of a loop-shaped gas scrubber with online sensors for pH (PHD 2, PCE-Germany) and dissolved O_2 (GMH3630, Greisinger Germany). This liquid-circuit was interconnected to a gas-circuit, in which biogas was driven by a membrane pump, model NPM NF-830 D005 (Reichert Chemietechnik, Germany). Within the closed gas circuit, the biogas was transported through gastight hoses (Tygon®LP-1500) to a catalytic sensor for O_2 , model GMH3691+GGO3695 (Greisinger, Germany), and an infra-red sensor for CO_2 (Pewatron Carbonoxy). A cooled (3 °C) liquid trap was installed to prevent condensation inside the pump and sensors. The gas flow was monitored by a flow meter (AMW 3300V; Honeywell, USA). The experimental setup included a N_2 -inlet for nitrogen purging, a bypass for the insertion of biogas and a ventilation junction.

Prior to the upgrading experiments, the gas scrubber was cleaned with ethanol (75 % v/v) and rinsed with autoclaved

deionised water to remove contaminants. Subsequently, 520 ml of *Chlorella vulgaris*- and *Chloroparva pannonica* suspension, respectively, were pumped from the photobioreactor to the scrubber via a peristaltic pump (Reefdoser R02, Aqua Medic, Germany). Within the scrubber, the algal suspension circulated anticlockwise for 40 min with a flow rate of 3.1 l·min⁻¹.

The flow was driven by 840 ml biogas, which was upgraded simultaneously by passing the algal suspension. The upgrading experiments were performed as duplicates within one day. Experiments with *Chlorella* were performed with two batches of 34.33 mmol (ca. 840 ml) biogas with a mean content of 13.73 mmol CO_2 and 787 μ mol O_2 before upgrading. In *Chloroparva* experiments, two batches of 34.33 mmol biogas with a mean content of 13.73 mmol CO_2 and 743 μ mol were tested. All upgrading experiments were performed at constant 20 °C and 1004 ± 2 mbar atmospheric pressure.

3 Results

3.1 Preparation of algal suspension

Chlorella vulgaris and *Chloroparva pannonica* were successfully cultured in our tubular photobioreactor at bench scale (Figure 3). *Chlorella vulgaris* grew with a ratio of 0.55·d⁻¹ to a maximum of approximately $40 \cdot 10^6$ cells·ml⁻¹. *Chloroparva pannonica* showed a growth ratio of 0.49·d⁻¹ and a maximum cell density of approximately $248 \cdot 10^6$ cells·ml⁻¹. Both growth curves were characterised by a short lag phase of approximately two days, followed by a log phase of approximately five days. For both algal strains, the transition from exponential growth to stationary growth phase was detected after circa seven culture days.

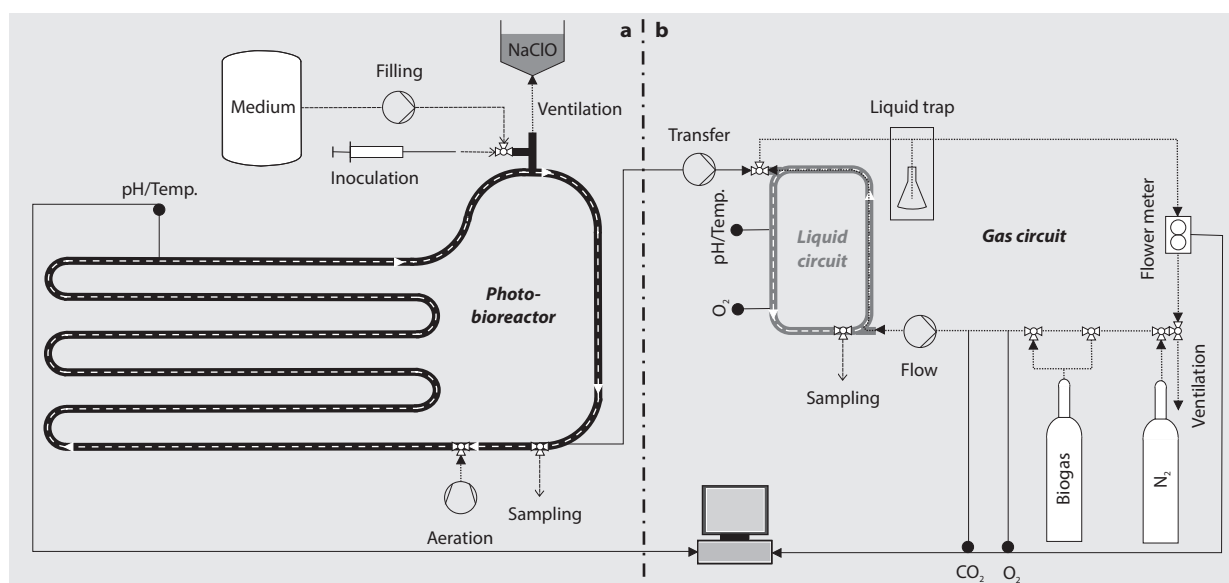


Figure 2

Scheme of a bench-scale system for biogas upgrading. (a) Closed tubular photobioreactor for culturing 4.9 l phototrophic microalgae, at 20 °C with a light-dark cycle of 16/8 h and a PFD of 60 μ E. (b) Darkened gas scrubber for upgrading 34.33 mmol biogas with 520 ml microalgal suspension, at constant 20 °C and 1004 ± 2 mbar atmospheric pressure.

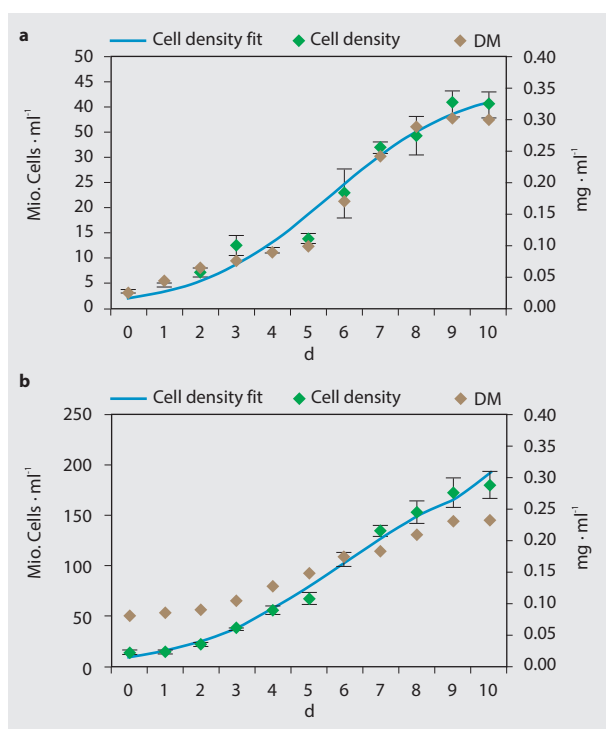


Figure 3

Cell density in Mio. cells per ml ($n = 3$) and algal biomass in mg per ml dry matter (DM) of (a) *Chlorella vulgaris* 211-11B and (b) *Chloroparva pannonica* 2358 in 3NBB-medium over a period of 10 days. Fit = fitted curve based on stepwise optimization of least deviation squares. Fed-batch cultures in a closed tubular photobioreactor at 20 °C, with a light-dark cycle of 16/8 h and a PFD of 60 μE .

Axenic *Chlorella* was cultured with a start biomass of 0.03 mg dry mass · ml⁻¹, whereas the non-axenic *Chloroparva* culture grew with a start biomass of 0.08 mg dry mass · ml⁻¹. Regarding maximum biomass concentration, *Chloroparva* grew to 0.23 mg · ml⁻¹ and *Chlorella* to 0.30 mg · ml⁻¹, both after nine culture days. The cell growth curves of *Chlorella* corresponded with their biomass growth curves. In contrast, the usage of non-axenic cultures led to deviations between biomass growth rates and cell growth rates during the preparation of *Chloroparva* suspension.

3.2 Biogas upgrading

All upgrading experiments with dark-adapted algal suspensions resulted in a virtually complete removal of the CO₂ from the biogas batch within a short time (Figure 4). In each trial, a biogas batch was upgraded for 40 min at a fix gas to liquid ratio of 0.6 due to the construction of the gas scrubber. In tests with *Chlorella*, the CO₂ content of 34.33 mmol biogas dropped sharply by 94 % from 13.73 to 0.89 mmol within the first 10 seconds of the experiments. Subsequently, the CO₂ content decreased slightly to 0.02 mmol at 2:30 minutes and remained stable. Likewise, the pH of the *Chlorella* suspensions declined steeply from 8.91 to 6.57 during the first 10 seconds of the experiments. Subsequently, the pH dropped

further to 6.14 at 1:10 minute and remained constant at 6.10 from 2:10 minutes onwards. Biogas scrubbing in *Chloroparva* suspension was characterised by a nearly logarithmic decline of CO₂ by 99 % from 13.73 to 0.02 mmol within 2:50 minutes. The pH in *Chloroparva* cultures declined steeply from 9.22 to 5.79 within the first 20 seconds of the tests. Subsequently, the pH dropped to 5.75 at 1:20 minute and 5.74 at 2:20 minutes.

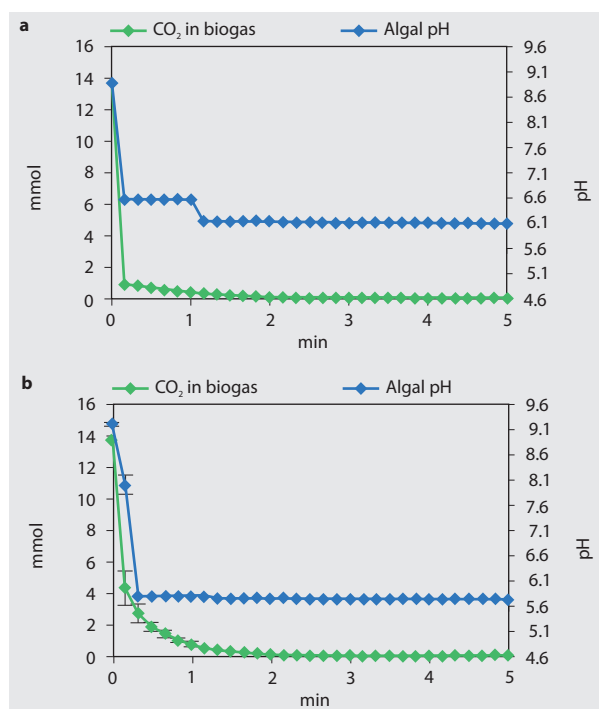


Figure 4

Removal of CO₂ [mmol] from biogas batches and pH value of darkened microalgal suspension during the first 5 min of biogas upgrading experiments. (a) Batches of 34.33 mmol (840 ml) biogas with an original CO₂ content of 13.73 mmol scrubbed in *Chlorella vulgaris* suspension with a start pH of 8.91. (b) Batches of 34.33 mmol (ca. 840 ml) biogas with an original CO₂ content of 13.73 mmol scrubbed in *Chloroparva pannonica* suspension with a start pH of 9.22. Biogas sparged repeatedly through 520 ml algal suspension in a darkened, loop-shaped gas scrubber for 40 min. CO₂ contents measured in the gas compartment and pH values measured in the liquid compartment of the gas scrubber at constant 20 °C and 1004 ± 2 mbar atmospheric pressure. $N = 2$.

3.3 Biogas contamination

No air- or O₂ contaminations were detected subsequent to biogas upgrading experiments. During upgrading, the aggregated levels of O₂ in the liquid and gaseous compartment were consistently lower than the O₂ contents in biogas prior to upgrading (Figure 5). Biogas upgrading in *Chlorella* suspension resulted initially in an increase of dissolved O₂ in the algal suspension. The maximum of dissolved O₂ in algal suspension (72 μmol) was reached after 12 minutes of biogas upgrading. This increase was followed by a decrease to 42 μmol , which was sustained through minute 40. The O₂

content in biogas reached a maximum of 733 μmol at minute 28 while passing the suspension repeatedly. Accordingly, the aggregated O_2 content in gas- and liquid compartment of the gas scrubber (O_2 total) increased to a steady maximum of 776 μmol at minute 28. Likewise, biogas upgrading with *Chloroparva* suspension showed a steady increase of dissolved O_2 in algal suspension. A peak of 42 μmol was measured after 4 minutes. Subsequently, dissolved O_2 declined to 30 μmol during the further progress of the experiments. A maximum of 700 μmol O_2 was detected in biogas after 27 minutes of passing the algal suspension repeatedly. As a result of the *Chloroparva* upgrading, the aggregated O_2 levels grew to a constant maximum of 732 μmol at minute 27.

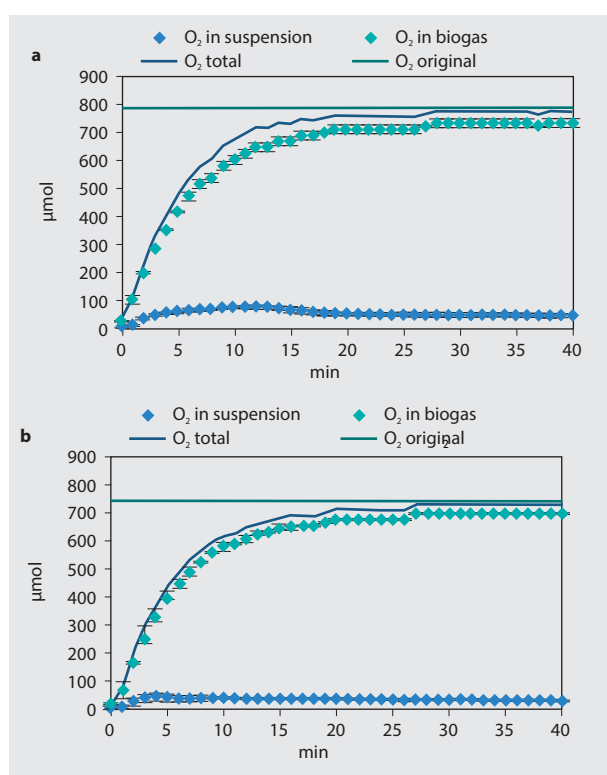


Figure 5

Increase of O_2 content [μmol] in 840 ml biogas and 520 ml darkened microalgal suspension during 40 minutes of biogas upgrading. (a) Batches of 34.33 mmol biogas with an original O_2 content of 787 μmol scrubbed in *Chlorella vulgaris* suspension. (b) Batches of 34.33 mmol biogas with an original O_2 content of 743 μmol scrubbed in *Chloroparva pannonica* suspension. O_2 content in biogas measured in the gas compartment and O_2 content in algal suspension measured in the liquid compartment of a darkened, loop-shaped gas scrubber at constant 20 °C and 1004 ± 2 mbar atmospheric pressure. Dotted line = original O_2 content of biogas prior to upgrading. $N = 2$.

4 Discussion

The use of microalgae for lowering the CO_2 content in biogas has been studied extensively. Scrubbing of biogas in 15 l

Arthrospira sp. resulted in a CO_2 decrease from 44 to 48 % to 2.5 to 11.5 % in an unspecified biogas volume (Travieso et al., 1993). Similar results were achieved by Conde et al. (1993) with *Chlorella vulgaris*, under the same experimental conditions. Tietze et al. (2006) reported a CO_2 reduction as well as simultaneous O_2 formation in 34.9 l biogas after passing through 6 l of *Chlorella vulgaris* C-1 (IPPAS, Moscow) suspension. Their experiments were performed in two different illuminated gas scrubbers and resulted in a CO_2 reduction from 30.1 % to 6.1 % and 31.3 % to 7.6 %. Simultaneously, O_2 increased from 1.7 % to 26.6 % and 0.8 % to 25.4 %. Studies of Converti et al. (2009) resulted in a nearly complete removal of CO_2 from 140 to 200 l biogas when scrubbed in 1 l *Arthrospira platensis* suspension. The removal was accompanied by enrichment of O_2 in the upgraded gas in the range of 10 to 24 %. Similar results were achieved by scrubbing 3 l biogas in 450 ml *Chlorella vulgaris* 211 to 11B suspension by Mann et al. (2009). In these experiments the CO_2 proportion in biogas was lowered from 41 % to 1.2 % while O_2 increased from 1.0 % to 23.4 %. Schmack et al. (2009) reported a CO_2 removal of 92 % with a simultaneous increase of 2 % O_2 and 7 % N_2 to the cleaned gas.

Virtually all approaches in which photosynthetic microalgae were applied to biogas upgrading resulted in oxygenation of the upgraded gas. However, literature on the utilization of this type of product is scarce. Oxygenated biogas can be used, e.g., for the production of polyhydroxy butyric acid by methanotrophic organisms (Bäzold et al., 1998) or biochemical desulphurization of biogas (Krüger et al., 2007). Another promising process is based on the assimilation of CO_2 and O_2 by a microalgal-bacterial consortium (Bahr et al., 2014). However, this approach is H_2S -dependent and still subject of optimization.

In the present study, CO_2 was successfully removed from biogas. The reaction kinetics of the CO_2 removal from biogas and the pH value of the algal suspensions during upgrading (Figure 4) indicate that CO_2 was nearly completely absorbed by the algal medium. The CO_2 mass transfer was primarily affected by the volumetric ratio of biogas and liquid upgrading suspension (G/L ratio) as well as the pH of the upgrading suspension. In our experiments, 99 % of CO_2 (13.72 mmol) were removed from biogas at a fixed G/L ratio of 0.6 at pH values of 8.91 (*Chlorella*) and 9.22 (*Chloroparva*). The comparison of our findings with the literature is limited due to missing information about molar concentrations of CO_2 as well as varying parameters of CO_2 mass transfer in other studies. For example, the pH values of the algal suspension ranged from 6.8 (Tietze et al., 2006) to 9.5 (Converti et al., 2009). In addition, G/L ratios were between 0.6 and 200. However, Schmack et al. 2009 reported a CO_2 removal from biogas of 92 %. The biogas was upgraded in a mixture of *Chlorella* and *Spirulina* at a pH of 8.8 and a G/L of 0.6. Compared to these findings, the CO_2 removal of 99 % in our experiments resulted in upgraded biogas with a higher calorific value and less of a requirement for storage space. The mass transfer of CO_2 from biogas to *Chloroparva* suspension was also almost complete (13.718 mmol). However, in contrast to the *Chlorella* experiments, we found higher pH shifts in algal

suspension and slightly delayed CO₂ decreases in biogas. The deviations indicate a biological effect on CO₂ removal from biogas since the upgrading experiments with both algal species were performed under identical physical and chemical conditions. Such an effect could be caused by carbon concentration mechanisms (CCM), which can be found in other Trebouxiophyceae (Meyer and Griffith, 2013). However, further analyses of algal biomasses and -media are required to determine the exact mechanisms of this algal-specific influence on the CO₂ mass transfer.

Unlike previous reports on biogas upgrading with microalgae, we removed CO₂ from biogas without simultaneous oxygenation. During upgrading, the aggregated amounts of dissolved O₂ in algal media and gaseous O₂ in biogases were constantly lower than the original O₂ content in biogases prior to upgrading (Figure. 5). The apparent increase of O₂ in biogas until minute 28 (*Chlorella*) and 27 (*Chloroparva*) was a result of the biogas distribution within the gas scrubber and did not reflect the actual amount of substance in the system. In contrast, the absorption of O₂ in algal media was detected in real-time. The transition of O₂ into media was feasible since the media were undersaturated with O₂ which was a result of dark adaption prior to biogas upgrading. We assume that a part of the dissolved O₂ was respired by the dark-adapted algae since the aggregated O₂ levels in the gas scrubber were 1.4 % (*Chlorella*) and 1.5 % (*Chloroparva*) below the original O₂ contents. The respiration, in turn, lead to the formation of CO₂ during the upgrading process. However, the minimal CO₂ input did not have a significant impact on the overall CO₂ removal.

In our photobioreactor, we grew *Chlorella vulgaris*, which is a well-studied organism with respect to carbon dioxide removal from gaseous waste streams (Yun et al., 1996; Keffer and Kleinheinz, 2002; Douskova et al., 2009). In addition, we tested the recently described *Chloroparva pannonica* (Somogyi et al., 2011) for its growth characteristics in a photobioreactor. The photobioreactor cultures yielded 0.30 g·l⁻¹ (*Chlorella*) and 0.23 g·l⁻¹ (*Chloroparva*) dry matter. At the start of culturing, cell densities and biomasses of *Chloroparva* were higher than in *Chlorella*. On the one hand, this resulted from the comparatively small *Chloroparva* cells, which hindered matching the cell densities of the *Chlorella* cultures during the preparation of the photobioreactor inoculum. On the other hand, the *Chloroparva* cultures were not axenic and their biomass could not be used for matching the start biomass of the *Chlorella* cultures. Hence, the differences in algal growth characteristics in the photobioreactor cannot be clearly attributed to a specific factor. Nevertheless, the bench-scale photobioreactor proved to be suitable for the preparation of algal suspension for biogas upgrading. We grew *Chlorella* without contamination since sterilisable components and a custom setup for sterile inoculation were applied. Moreover, we demonstrated that *Chloroparva* can be grown in a photobioreactor.

Different from Schmack et al. (2009) and Bahr et al. (2014), we applied a discontinuous procedure to avoid contamination of upgraded biogas. We prevented air-contamination by culturing microalgae in a detached photobioreactor and

inhibited oxygenation by upgrading in a darkened scrubber. In addition, we determined reaction kinetics of O₂- and CO₂ mass transfer from biogas into algal suspension in an innovative gas scrubbing loop. The present study also revealed potential for improvement of the system. During our experiments, a small quantity biogas was upgraded and, so far, effects on the methane content in the biogas were not determined. Also, the contact time for the phase transition of O₂ and CO₂ during gas scrubbing needs to be optimized since it was limited by the height of the gas scrubber and large bubble sizes. Finally, discontinuous processes are generally time-intensive. Despite its few technical limitations, our experimental system proved to be appropriate for studying the effects of microalgae and their culture media on biogas upgrading. These studies comprise the enhancement of the upgrading performance since the energy surplus from upgraded biogas determines the energy expenditure for its upgrading. In addition, valuable algal strains will be studied since a profitable algal production can compensate potential costs of biogas upgrading.

5 Conclusion

The present study describes a bench-scale system for detailed studies on the effects of microalgal strains and -media on the biogas upgrading process. In particular, the effects of the algal medium upon the CO₂- and O₂ mass transfers during biogas purification, which are largely disregarded in the literature, have been illustrated. Moreover, we demonstrated that the recently described green alga *Chloroparva pannonica* can be grown in a bench-scale photobioreactor. With our experimental upgrading system we created the basis for future studies on biogas upgrading with phototrophic microalgae. These studies include analyses of buffering substances, which cannot be used as carbon sources by microalgae, and biogas upgrading with alkaline algal suspensions.

References

- Andrea M, Aspell J, Epathite P, Faupel J, Clifford M (2011) Appropriate technology: biogas : design and development of a biogas compression and storage system capable of implementation in the developing world ; final report. Nottingham : Univ, 5 p
- Andriani D, Wresta A, Atmaja TD, Saepudin A (2014) A review on optimization production and upgrading biogas through CO₂ removal using various techniques. Appl Biochem Biotechnol 172:1909-1928
- Bahr M, Díaz I, Domínguez A, Díaz I, González A, Muñoz R (2014) Microalgal-biotechnology as a platform for an integral biogas upgrading and nutrient removal from anaerobic effluents. Environ Sci Technol 48:573-581
- Bari S (1996) Effect of carbon dioxide on the performance of biogas/diesel dual-fuel engine. Renew Energy 9(1-4):1007-1010
- Bäzold D, Kretschmer A, Menschel C, Pannig F, Schar S (1998) Verfahren und Vorrichtung zur photobiologischen Trennung von kohlendioxid- und methanhaltigen Gasgemischen. Patent No DE19721280A1, 19 11 1998
- Benemann J, Pedroni PM, Davison J, Beckert H, Bergman P (2003) Technology roadmap for biofixation of CO₂ and greenhouse gas abatement with microalgae [online]. To be found at <<http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/03/carbon-seq/PDFs/017.pdf>> [quoted 14.07.2016]

- Conde JL, Moro LE, Travieso L, Sanches EP, Leiva A, Dupeirón R, Escobedo R (1993) Biogas purification process using intensive microalgae cultures. *Biotechnol Lett* 15(3):317-320
- Converti A, Oliveira RPS, Torres BR, Lodi A, Zilli M (2009) Biogas production and valorization by means of a two-step biological process. *Bioresour Technol* 100:5771-5776
- Deublein D, Steinhauser A (2011) Biogas from waste and renewable resources : an introduction. Weinheim : Wiley-VCH, 486 p
- Douskova I, Doucha J, Livansky K, Machat J, Novak P, Umysova D, Zachleder V, Vitova M (2009) Simultaneous flue gas bioremediation and reduction of microalgal biomass production costs. *Appl Microbiol Biotechnol* 82(1):179-85
- Edelmann W (2001) Biogaserzeugung und Nutzung. In: Kaltschmitt M, Hartmann H (eds) *Energie aus Biomasse*. Berlin : Springer, pp 680
- Kaštánek F, Šabata S, Šolcova O, Maléterová Y, Kaštánek P, Brányiková I, Kuthan K, Zachleder V (2010) In-field experimental verification of cultivation of microalgae *Chlorella sp.* using the flue gas from a cogeneration unit as a source of carbon dioxide. *Waste Manage Res* 28(11):961-966
- Keffer JE, Kleinheinz GT (2002) Use of *Chlorella vulgaris* for CO₂ mitigation in a photobioreactor. *J Ind Microbiol Biotechnol* 29(5):275-280
- Khoiyangbam RS, Gupta N, Kumar S (2011) Biogas technology : towards sustainable development. New Delhi : Energy and Ressources Inst, 200 p
- Krüger K, Hirtz E, Fürstenhof U (2007) Verfahren und Vorrichtung zur Erzeugung von methanreichem Biogas. Patent No DE102005025040B4, 16 p
- Kumar A, Ergas S, Yuan X, Sahu A, Zhang Q, Dewulf J, Malcata FX, van Langenhove H (2010) Enhanced CO₂ fixation and biofuel production via microalgae : recent developments and future directions. *Trends Biotechnol* 28(7):371-380
- Mann G, Schlegel M, Schumann R, Sakalauskas A (2009) Biogas-conditioning with microalgae. *Agron Res* 7(1):33-38
- Meyer M, Griffiths H (2013) Origins and diversity of eukaryotic CO₂-concentrating mechanisms : lessons for the future. *J Exp Bot* 64(3):769-786
- Petersson A, Wellinger A (2009) Full scale technology for biogas upgrading. In: Petersson A, Wellinger A (eds) *Biogas upgrading technologies - developments and innovations*. IEA Bioenergy, pp 9-12
- Schmack D, Schneider G, Nusko R (2009) Effizienzsteigerung der Biogasnutzung durch Solarenergie : EBSIE-Technikumsphase ; Abschlussbericht [online]. To be found at <<http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/berichte/22017105.pdf>> [quoted 14.07.2016]
- Somogyi B, Felföldi T, Solymosi K, Makk J, Homonnay ZG, Horváth G, Turcsi E, Böddi B, Márialigeti K, Vörös L (2011) *Chloroparva pannonica* gen. et sp. nov. (Trebouxiophyceae, Chlorophyta) : a new picoplanktonic green alga from a turbid, shallow soda pan. *Phycologia* 50:1-10
- Starr RC, Zeikus JA (1993) UTEX - the culture collection of algae at the University of Texas at Austin. *J Phycol* 29(Suppl S2):1-47
- Tietze M, Schalk T, Hoeft S, Kühn V, Krebs P (2006) Verbundvorhaben: Labor- und halbertechnische Untersuchungen zur Entwicklung eines Algenreaktors für die Anreicherung von Methan in Biogasen aus der anaeroben Klärschlammfaulung : Abschlussbericht ; Teil 2 [online]. To be found at <http://www.cleaner-production.de/fileadmin/assets/bilder/BMBF-Projekte/02WS0182_-_Abschlussbericht.pdf> [quoted 14.07.2016]
- Travieso L, Sanches EP, Benitez F, Conde JL (1993) Intensive cultures for food and biogas purification. *Biotechnol Lett* 15(10):1091-1094
- Wang B, Yanqun L, Wu N, Lan CQ (2008) CO₂ bio-mitigation using microalgae. *Appl Microbiol Biotechnol* 79:707-718
- Yun YS, Park JM, Yang JW (1996) Enhancement of CO₂ tolerance of *Chlorella vulgaris* by gradual increase of CO₂ concentration. *Biotechnol Tech* 10(9):713-716

Anpassung der Lasteinträge landwirtschaftlicher Maschinen an die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens – Grundlagen für ein bodenschonendes Befahren von Ackerland

Marco Lorenz*, Joachim Brunotte*, Thomas Vorderbrügge**, Robert Brandhuber***, Heinz-Josef Koch****, Marion Senger*****, Norbert Fröba***** und Franz-Josef Löpmeier*****

Zusammenfassung

Landwirtschaftliche Maschinen haben in den letzten Jahrzehnten vor allem aufgrund ökonomischer und arbeitswirtschaftlicher Vorteile an Größe und Gesamtmasse zugenommen. Teure Spezialmaschinen fordern hohe Auslastungsgrade, werden mitunter auch dann eingesetzt, wenn die Böden zu feucht und damit verdichtungsempfindlich sind und stoßen damit allzu oft an die Grenzen einer bodenschonenden Befahrbarkeit. Das vorgestellte Konzept zur ‚Anpassung des Maschineneinsatzes an die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden‘ verknüpft bodenkundliche Grundlagendaten zur Bodenart und Ergebnisse des Bodenwassermodells AMBAV zur Bodenfeuchte mit Expertenwissen und leitet für typische Standorte Deutschlands die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden im langjährigen Jahresverlauf und verfügbare Befahrbarkeitstage ab. Zur Abschätzung der Verdichtungsgefährdung erfolgte eine Verknüpfung der standortabhängigen Verdichtungsempfindlichkeit (Tragfähigkeit) der Böden mit der Bodenbelastung durch die jeweilige Maschine. Hieraus werden mittlere regionale Einsatzzeiten (Befahrbarkeitstage) der jeweiligen Mechanisierungsverfahren abgeleitet. Die Angabe von regionalen Befahrbarkeitstagen in den wichtigsten Zeitspannen der Feldarbeiten sind für den Landwirt eine wertvolle Hilfe, Maschineninvestitionen und Einsatzzeiten zu planen und eine Anpassung der Maschine an die vorherrschenden Bodenverhältnisse im Sinne eines bodenschonenden Befahrens von Ackerflächen umzusetzen.

Schlagwörter: *Verdichtungsempfindlichkeit, Bodenbelastung, Befahrbarkeit, bodenschonendes Befahren von Ackerflächen, landwirtschaftliche Technik*

Abstract

Adaption of load input by agricultural machines to the susceptibility of soil to compaction – Principles of soil conserving traffic on arable land

The sizes and total weights of agricultural machinery have increased steadily over the last decades. This has primarily been for economic and process-efficiency reasons. Highly specialized machinery requires high operating levels. Under adverse conditions, considerable negative changes in soil structure and in multiple soil functions occur. The presented concept to ‘adapt machinery specifications to the susceptibility of soil to compaction’ combines basic soil data of soil texture and results of the soil water model AMBAV of soil moisture, with expert knowledge, and derives the susceptibility of soil to compaction and the long term trafficability of typical sites in Germany for main time spans of field work. Therefore the susceptibility of soil to compaction was compared with the soil load of the agricultural machinery. From this data, average days of trafficability of agricultural soil were derived depending on machinery and agricultural technique. The information on days of trafficability for main time spans of field work within a year will be helpful for the farmer to plan new investments and operating levels of machinery, and to adapt machinery specifications to the prevailing soil conditions to carry out soil-conserving traffic on arable land.

Keywords: *susceptibility of soil to compaction, soil load, trafficability, soil conserving traffic on arable land, agricultural technique*

* Johann Heinrich von Thünen Institut, Institut für Agrartechnologie, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig

** Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), Rheingaustraße 186, 65203 Wiesbaden

*** Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Institut für Ökologischen Landbau, Bodenkultur und Ressourcenschutz, Lange Point 12, 85354 Freising

**** Institut für Zuckerrübenforschung (IFZ), Holtenser Landstraße 77, 37079 Göttingen

***** Landwirtschaftskammer Niedersachsen (LWK), Hans-Böckler-Allee 20, 30173 Hannover

***** Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Bartningstraße 49, 64289 Darmstadt

***** Deutscher Wetterdienst, Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung (ZAMF), Bundesallee 50, 38116 Braunschweig

1 Hintergrund und Zielsetzung

Landwirtschaftliche Maschinen haben in den letzten Jahren und Jahrzehnten vor allem aufgrund ökonomischer und arbeitswirtschaftlicher Vorteile an Größe und Gesamtmasse zugenommen. Teure Spezialmaschinen fordern allerdings hohe Auslastungsgrade, werden deshalb mitunter auch dann eingesetzt, wenn die Böden zu feucht und damit verdichtungsempfindlich sind und stoßen damit allzu oft an die Grenzen einer bodenschonenden Befahrbarkeit. Parallel dazu hat sich auch die Fahrwerkstechnik (z. B. Hundegangelenkung, 3-Rad, Bandlaufwerke) fortlaufend weiterentwickelt. So sind heute Reifen verfügbar, die hohe Radlasten bei vergleichsweise geringen Reifeninnendrücken und damit größeren Aufstandsflächen bodenschonend abstützen können (Typ IF (improved flexion) oder VF (very high flexion)). Ebenso lässt sich die Fahrwerkslast schwerer Erntemaschinen, wie z. B. Rübenroder oder Mähdrescher, auf modernen Bandlaufwerken mit großen Aufstandsflächen bodenschonend abstützen. Bei modernen Traktoren sorgen Schlupfregelung, Allradantrieb, Differenzialsperre, Zugkraftregelung, Reifeninnendruckverstellanlage, Aufsattelgeräte etc. für eine möglichst bodenschonende Befahrung von Ackerflächen. Dies sind Entwicklungen, die prinzipiell zu einer höheren Bodenschonung führen sollen. Diese bodenschonenden Effekte werden jedoch z. T. zunichte gemacht, wenn gleichzeitig Arbeitsbreiten und Bunkerkapazitäten und damit die Gesamtmassen der Maschinen vergrößert werden oder häufiger bei ungünstigen Bodenverhältnissen befahren wird. Daher fordert beispielsweise Brandhuber (2005) „Maschinen und Arbeitsverfahren bodenschonend auszurichten und den technischen Fortschritt in der Reifen- und Fahrzeugentwicklung künftig vermehrt zur Senkung der mechanischen Belastung der Böden zu nutzen, um die Funktionsfähigkeit des Bodengefüges zu erhalten“.

Der Einsatz großer Maschinen ist jedoch nicht pauschal negativ zu beurteilen. Größere Arbeitsbreiten erhöhen die Schlagkraft, Zeitfenster mit günstigen Bodenbedingungen können damit prinzipiell für die Erledigung der Feldarbeiten besser genutzt werden. Mit weniger Überfahrten kann ein höherer Feldanteil unbefahren bleiben. Außerdem können durch den Einsatz moderner Maschinen mit aktueller Fahrwerks- und Reifentechnologie auch höhere Radlasten bodenschonend abgestützt werden, sofern bei der Befahrung der aktuelle Bodenzustand berücksichtigt wird.

Um schädliche Bodenveränderungen und negative Auswirkungen auf Bodenfunktionen zu vermeiden, sollte daher immer eine Bewertung und Anpassung der Maschine bzw. der gesamten Verfahrenskette und deren Lastenbeiträge an die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens und die aktuellen Randbedingungen erfolgen. Hierzu ist es jedoch erforderlich, sowohl die Bodenbelastungen durch die jeweilige Maschine bzw. Verfahrenskette, als auch die jeweilige Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens einzuschätzen und zu bewerten. Durch die Gegenüberstellung von Belastung (Maschine) und Belastbarkeit (Boden) lassen sich dann mögliche schädliche Bodenveränderungen abschätzen sowie Maßnahmen zu deren Vermeidung ableiten.

Die Vermeidung bzw. Verminderung anthropogen verursachter Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen bzw. schädlichen Bodenveränderungen ist Bestandteil des Leitbilds einer nachhaltigen Bodennutzung in der Pflanzenproduktion. Schädliche Bodenveränderungen sind vom Landwirt nicht nur hinsichtlich des Ertrags der Kulturpflanzen (Produktionsfunktion des Bodens) zu vermeiden, sondern haben ebenfalls negative Auswirkungen auf Stoff- und Wasserkreisläufe (Puffer- und Regelungsfunktion) sowie auf Bodenlebewesen (Lebensraumfunktion).

Im Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG, 1998) schreibt der Gesetzgeber vor, dass Landbewirtschaftung entsprechende Vorsorge (§§7, 17) und gegebenenfalls Gefahrenabwehr (§4) zu berücksichtigen hat. Befolgt der Landwirt die Vorgaben des §17 zur guten fachlichen Praxis bei der landwirtschaftlichen Bodennutzung, erfüllt er seine Vorsorgepflicht nach §7. In §17 (2) werden die wesentlichen Grundsätze der ‚Guten fachlichen Praxis‘ (GfP) in den Punkten 1 bis 7 genauer erläutert. Unter Punkt 3. wird dabei festgelegt, dass „Bodenverdichtungen, insbesondere durch Berücksichtigung der Bodenart, Bodenfeuchtigkeit und des von den zur landwirtschaftlichen Bodennutzung eingesetzten Geräten verursachten Bodendrucks, so weit wie möglich vermieden werden“ sollen. Der Konkretisierung speziell zu diesem Punkt widmet sich der nachfolgende Beitrag.

Deutschland hat mit dem Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG, 1998) und der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV, 1999) einen hohen Standard, der in konkreten Handlungsempfehlungen für die „Gute fachliche Praxis (GfP)“ ausführlicher beschrieben wird. Diese Handlungsempfehlungen wurden jüngst durch eine Expertenkommission aktualisiert und geben dem Landwirt eine Vielzahl von Hinweisen und Empfehlungen zur Umsetzung der GfP an die Hand (aid Nr. 3614, 2015).

Was zur Einschätzung der potenziellen Bodenerosionsgefährdung durch Wasser oder Wind bereits umgesetzt ist (Gefährdungskarten in Abhängigkeit von Hangcharakteristik oder Windströmungsverhältnissen und Bodeneigenschaften), gestaltet sich bei der Beurteilung der Verdichtungsempfindlichkeit ungleich schwieriger. Die Herausforderungen bei der Charakterisierung eines Bodens hinsichtlich seiner Verdichtungsempfindlichkeit und den möglicherweise schädlichen Auswirkungen einer Verdichtung auf Bodenfunktionen (Bodenschadverdichtung) liegen vor allem darin, die aktuelle Bodenfeuchte, die über das Entstehen und das Ausmaß einer Verdichtung wesentlich mitbestimmt und räumlich wie zeitlich hoch variabel ist, entsprechend zu berücksichtigen sowie die physikalischen Eigenschaften des Bodens und deren Änderungen unter der jeweiligen Belastung mit einzubeziehen. Der seit einigen Jahren eingeführte Begriff „potenzielle Verdichtungsempfindlichkeit“ meint dabei eine langjährige, bewirtschaftungsunabhängige Verdichtungsempfindlichkeit auf Grundlage von statischen Bodeneigenschaften (abgeleitet aus verfügbaren Daten mit entsprechendem Generalisierungsgrad) und klimatischen Einflussgrößen. Damit ist allerdings nur eine grobe Vorabschätzung der Verdichtungsempfindlichkeit zu erzielen. Finden darüber hinaus der aktuelle Bodenzustand, die

aktuelle Nutzung und die Bewirtschaftung Berücksichtigung, kann aus der „potenziellen Verdichtungsempfindlichkeit“ die „aktuelle Verdichtungsempfindlichkeit“ bzw. „aktuelle Verdichtungsgefährdung“ abgeleitet werden.

Darüber hinaus liefern Statuserhebungen und Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF), die den tatsächlichen Bodenstrukturzustand und eine evtl. Gefährdung der Bodenfunktionen beschreiben, Klarheit über das Ausmaß und die Verteilung von Bodenverdichtungen in Deutschland. Leider liegen solche Untersuchungen bislang nur in wenigen Bundesländern bzw. Regionen vor (z. B. Brandhuber, 2005; Brunotte et al., 2008; Cramer et al., 2006; Eckert et al., 2006; Harrach et al., 2003; Isensee und Schwark, 2006). Übersichten finden sich u. a. bei Brunotte et al. (2008) oder Lorenz (2008). Einen Überblick zu Arbeiten und Erhebungen zum Status der Bodenverdichtung in Europa geben Vorderbrügge und Brunotte (2011).

Im Gegensatz zur asphaltierten Straße mit mehr oder weniger konstanten Befahrungsbedingungen, verändert sich die Fahrbahn ‚Boden‘ zeitlich fortwährend. Die Tragfähigkeit und damit Befahrbarkeit des Bodens hängt neben der aufgetragenen mechanischen Belastung durch die Maschine v. a. von der aktuellen Bodenfeuchte, der Bodenart, dem Bodengefüge, dem Anteil an organischer Substanz und dem Wechsel dieser Eigenschaften innerhalb eines Bodenprofils (Horizontabfolge), sowie der angebauten Kultur ab. In Abhängigkeit dieser Parameter ändert sich auch die Fahrsituation von festem, befahrbarem Boden bis hin zu plastisch verformbarem Boden, dessen Befahren zur Schädigung des Bodens und seiner Funktionen bis hin zu Ertragsminderungen führen kann. Generell nimmt die Tragfähigkeit der Böden mit zunehmender Bodenfeuchte ab und die Verdichtungsempfindlichkeit nimmt zu.

Somit müssen, um eine realistische Einschätzung der Verdichtungsgefährdung von landwirtschaftlich genutzten Böden zu erhalten und den tatsächlichen Bodenzustand sowie die relevanten Bodeneigenschaften bestmöglich abzubilden, zum einen die jeweiligen Bodeneigenschaften sowie das standörtliche Klima und damit die mittleren Bodenfeuchteverläufe berücksichtigt werden. In einem weiteren Schritt muss die jeweilige Belastungssituation durch die Maschinen bzw. Verfahrensketten verlässlich abgebildet werden, und schließlich ist die jeweilige Anbaukultur zu berücksichtigen, um Bodenfeuchteänderungen ableiten und Zeitfenster mit ausreichender Bodentragfähigkeit bei den unterschiedlichen Feldarbeiten mit berücksichtigen zu können. Für einige der Bodenparameter existieren nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarten (z. B. BÜK 1000N, BÜK 200, BÜK 50), z. T. auch in digitaler Form. Zur Ableitung der mittleren Bodenfeuchte können Bodenwasserhaushaltsmodelle herangezogen werden, die unter Berücksichtigung von Niederschlag, kapillarem Aufstieg, Versickerung, Verdunstung, Bodenart, Pflanzenbestand und -entwicklung, etc., Aussagen zur täglichen Bodenfeuchte in unterschiedlichen Bodentiefen zulassen. Modelle und Ansätze zur Einschätzung und Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden, wie z. B. das Vorbelastungskonzept, müssen die genannten Einflussfaktoren angemessen berücksichtigen.

Für die Beurteilung der mechanischen Belastung von landwirtschaftlichen Maschinen sind die relevanten technischen Daten, wie z. B. Radlast, Reifeninnendruck, Kontaktfläche, zu messen und mithilfe von Belastungsversuchen und Statuserhebungen in ihren Auswirkungen auf die Bodenstruktur zu quantifizieren (Brunotte et al., 2015). Grundlage der hier dargestellten Untersuchungsergebnisse sind eine Vielzahl von Messungen aus z. T. 20-jährigen Versuchsreihen (Befahrungsversuchen) zum Bodendruck, der Bodensetzung und zur Veränderung bodenphysikalischer Parameter. Diese Daten ermöglichen die Einschätzung und Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden und der Belastung durch landwirtschaftliche Maschinen. Auch die Lasteinträge landwirtschaftlicher Maschinen können mithilfe von Modellen (z. B. Terranimo (Stettler et al., 2014), TASC (Diserens und Battiato, 2013), SOILFlex (Keller et al., 2007; 2015), FRIDA (Schjønning et al., 2008; 2015), SOCOMO (Van den Akker, 2004), Compsol (O’Sullivan et al., 1999) u. a.) berechnet werden. Diese basieren hauptsächlich auf Grundlagen von Bussinesq (1885), Fröhlich (1934) und Söhne (1953). Der Boden wird meist als homogenes, isotropes und damit ungeschichtetes Medium betrachtet. Da der Boden in der Realität in Oberkrume, Unterkrume, Krumenbasis und Unterboden mit jeweils unterschiedlichen bodenphysikalischen Ausprägungen gegliedert ist, liefern solche Druckberechnungen nur idealisierte Annäherungen. Die Übertragung in reale Verhältnisse kann im Einzelfall zu Fehlinterpretationen führen. Sie können daher reale Messungen unter den Maschinen hinsichtlich Bodendruck, Bodendeformation (-setzung) und bodenphysikalischen Parametern nicht ersetzen, sollten jedoch ergänzend eingesetzt werden.

Das **Konzept** zur „Anpassung der Lasteinträge landwirtschaftlicher Maschinen an die Verdichtungsempfindlichkeit von Ackerböden“ verfolgt, aufgrund der räumlichen und zeitlichen Komplexität des Systems Boden und der derzeit noch unzureichenden Praxistauglichkeit von Modellen in diesem Bereich, einen von Experten gestützten Ansatz mit praxisnahen Lösungen unter Berücksichtigung der aktuellen Bodenverhältnisse anstelle der Vorgabe von Grenzwerten, z. B. der Radlast oder des Kontaktflächendrucks.

Das Konzept besteht aus **drei Bausteinen**:

1. **Ableitung der Verdichtungsempfindlichkeit von Ackerböden für Deutschland** auf der Basis der Haupteinflussfaktoren Bodenart und Bodenfeuchte, sowie der Unterscheidung in Ober- und Unterboden,
2. **Ableitung der mechanischen Belastung durch Landmaschinen und Verfahrensketten** auf der Basis langjähriger Feldmessungen und technischer Maschinenparameter,
3. **Verknüpfung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden mit der mechanischen Belastung durch Landmaschinen und Verfahrensketten** und die Ableitung von mittleren regionalen **Befahrbarkeitstagen** für unterschiedliche Kulturen, Arbeitsgänge und Mechanisierungen anhand von Beispielstandorten.

2 Stand des Wissens zur Interaktion Maschine – Boden

Bodenverdichtung ist sowohl ein Zustand als auch ein Prozess infolge mechanischer Belastung und Umorientierung der Bodenpartikel, der in aller Regel mit einer Zunahme der Bodendichte (Abnahme des Gesamtporenvolumens) verbunden ist (VDI, 2007). Damit gehen eine veränderte Funktionalität des Porensystems und eine Erhöhung der mechanischen Stabilität einher. Im Gegensatz zu Verdichtungen im regelmäßig bearbeiteten Oberboden sind Unterbodenverdichtungen als kaum reparabel einzustufen, weil die Intensität von Regenerationsprozessen mit zunehmender Tiefe in Abhängigkeit von Boden- und Klimaverhältnissen abnimmt (Håkansson, 2005; Horn et al., 2009; Garrigues et al., 2013).

Unter **Bodenschadverdichtung** wird eine Bodenverdichtung verstanden, die sich auf physikalische, chemische und biologische Vorgänge im Boden auswirkt, sodass Bodenfunktionen nachhaltig negativ beeinträchtigt werden (Sommer, 1998; Sommer et al., 2001; BMVEL, 2001; Brunotte et al., 2008). Im BBodSchG wird nicht von Schadverdichtung gesprochen, sondern stattdessen der Rechtsbegriff „schädliche Bodenveränderung“ verwendet, definiert als „Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen, die geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Beeinträchtigungen für den Einzelnen oder die Allgemeinheit herbeizuführen“. „Bodenschadverdichtung“ und „schädliche Bodenveränderung durch Bodenverdichtung“ sind jedoch keine identischen Begriffe.

Die Literatur zum Problembereich Bodenverdichtung in der pflanzlichen Produktion ist umfangreich und widmet sich dabei vielen Themen (Ursachen, Folgen, Verbreitung, Schutzmaßnahmen, Theorien, Modellierung, Prüfkonzeppte mit Schlüsselindikatoren, Messmethoden). An dieser Stelle sollen jedoch nur die für das Konzept relevanten Themenfelder näher beleuchtet werden.

Tabelle 1

Kriterien, Parameter und Schadensschwelen für Unterböden sowie verwendete Quellen nach Lebert et al. (2004)

Kriterien	Parameter	Schadensschwelle	Quellen
Durchlüftung	Luftkapazität	Krume: 8 Vol% Unterboden: 5 Vol%	Flühler (1973), Blume (1968), Dumbeck (1986), Werner und Paul (1999)
Leitfähigkeit	gesättigte Wasserleitfähigkeit	10 cm/d	DVWK (1999), Blume (1968), Zakosek (1960), Werner und Paul (1999)
morphologische Beschaffenheit	effektive Lagerungsdichte	Stufen 4 und 5	AG-Boden (1994)
	Packungsdichte	Stufen 4 und 5	DIN 19682-10 (1998)
	Spatendiagnose	Stufen 4 und 5	Diez und Weigelt (1997)

Lebert et al. (2004) beschreiben und vergleichen vier „**Prüfkonzeppte**“ zur Gefahrenerkennung hinsichtlich zu erwartender Gefügeänderungen im Unterboden und kommen zu dem Schluss, dass diese zur Bewertung von Bodenschadverdichtungen noch nicht vollständig ausreichen. Daher entwickelten sie ein **Indikatorsystem** zur Identifikation einer Bodenschadverdichtung. Dabei beziehen sie drei Kriterien und fünf Parameter in die Betrachtungen ein (Tabelle 1). Erst die Einbeziehung aller drei Kriterien bringt Klarheit über das Auftreten einer Bodenschadverdichtung.

Für Oberböden wird ein Messwert für die Luftkapazität von 8 Vol% als prinzipielle Schadensschwelle angegeben. Alle anderen Parameter werden analog zum Unterboden auch für den Oberboden verwendet. Cramer et al. (2006) halten die Identifikation einer Schadverdichtung nach Lebert et al. (2004) grundsätzlich für möglich, sehen jedoch Überarbeitungsbedarf insbesondere hinsichtlich der Schadensschwelen für Sandböden. Horn et al. (2009) stellen am Beispiel der Bodenverdichtung ein Belastbarkeitskonzept vor und schlagen ebenfalls „(...) die vorrangige Berücksichtigung der die Bodenfunktionen berücksichtigenden Kenngrößen (z. B. Luftkapazität, Luft- und Wasserleitfähigkeit) vor.“ Horn et al. (2009) und Horn und Fleige (2009) definieren darüber hinaus auf Grundlage zahlreicher Untersuchungen für Nordwest-Deutschland Vorsorge- und Maßnahmenwerte zur Bewertung von Bodenschadverdichtungen für eine Reihe von weiteren Bodenparametern, wie z. B. die Sauerstoffdiffusionsrate, der Redoxwiderstand oder das Verhältnis von Kationenaustauschkapazität zu -intensität. Einen Überblick, u. a. auch zu existierenden Prüfkonzeppte und der Verbreitung von Bodenverdichtungen in Deutschland, geben Lebert et al. (2004); Brunotte et al. (2008); Lorenz (2008); Horn et al. (2009) und UBA (2015). Ein Überblick zum Status der Bodenverdichtung in Europa ist u. a. bei Vorderbrügge und Brunotte (2011); Houskova und Montanarella (2008 a; b) und Le Bas et al. (2006) zu finden.

Nach Vorderbrügge und Brunotte (2011) kommt es „(...) Mangels einer ausreichend validen und plausiblen Datengrundlage zum Status der Bodenverdichtung bzw. zur Verdichtungsanfälligkeit der Böden in Deutschland, insbesondere der Unterböden, (...) zu einer vermehrten Anwendung von Regressionsmodellen (Pedotransferfunktionen) zur Berechnung der Gefährdung durch Verdichtung.“ So veröffentlichte z. B. die Bundesregierung in ihrem ‚Zweiten Bodenschutzbericht‘ eine Karte der ‚Potenziellen mechanischen Verdichtungsempfindlichkeit für Ackerflächen in Deutschland zur Identifizierung der sensiblen Gebiete‘ (Deutscher Bundestag, 2009). Diese Karte resultierte aus der Studie ‚Entwicklung eines Prüfkonzepptes zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden‘, die im Auftrag des Umweltbundesamtes erstellt wurde (Lebert, 2010; Glante et al., 2009; Lebert und Marahrens, 2009; 2010 Marahrens und Lebert, 2009) und basiert auf dem Vorbelastungskonzept. In dieser Studie werden Pedotransferfunktionen zur Bestimmung der Vorbelastung aus unterschiedlichen Bodenparametern verifiziert und modifiziert, um die mechanische Verdichtungsempfindlichkeit nach DVWK (1995, 1997); DIN-V-19688 (2001) und ATV-

DVWK (2002) abzuleiten. In einem weiteren Schritt werden auf Grundlage der verfügbaren Datenbasis die Gleichungen der drei Verfahren nach einem visuellen ‚best-fit‘ Verfahren den Bodenartenhauptgruppen der ‚Bodenkundlichen Kartieranleitung‘ (KA5, AG Boden, 2005) zugewiesen. Auf Grundlage der ‚Nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1 : 1 000 000‘ (BÜK 1000N) werden die ermittelten Vorbelastungswerte der Unterböden für die landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands regionalisiert. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass 68 % der ackerbaulich genutzten Flächen im Unterboden bei einer der Feldkapazität ($pF_{1,8}$) entsprechenden Bodenfeuchte eine hohe bis sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeit aufweisen. Bei einem Bodenwassergehalt von 80 % Feldkapazität sind es noch 32 % (Lebert, 2010). Besonders betroffen sind demnach die Böden der Jungmoränenlandschaften, des Lössgürtels, des Tertiärhügellandes und der Marschen im Küstenbereich (Deutscher Bundestag, 2009; Vorderbrügge und Brunotte, 2011). So werden z. B. für Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Bayern großflächig Böden mit hoher bis sehr hoher Verdichtungsempfindlichkeit ausgewiesen.

Überprüfungen anhand von Ergebnissen aus Statuserhebungen und Bodendauerbeobachtungsflächen (BDF) aus Sachsen (Harrach et al., 2003) und Bayern (Brandhuber, 2005) zeigen jedoch keine flächenhaften Schadverdichtungen in diesen Regionen. Nach Harrach et al. (2003) wurden Schadverdichtungen im landwirtschaftlich intensiv genutzten Mittelsächsischen Lösshügelland „... nur in Sonderfällen, nämlich auf vernässten Stellen und gehäuft auch im Vorgehende festgestellt. (...) Auch die systematische Bonitur der Kulturpflanzenbestände im Zusammenhang mit Bodengefügeuntersuchungen (Spatendiagnose und Porengrößenanalyse) hat weder bei pflugloser noch bei konventioneller Bewirtschaftungsweise auf durchschnittlichen Ackerflächen Anhaltspunkte für das Vorliegen von Schadverdichtungen, die die Bodenfunktionen beeinträchtigen, erbracht.“ Auch Brandhuber (2005) stellte anhand von 29 Dauerbeobachtungsflächen unter Ackernutzung in Bayern fest, dass alle untersuchten Flächen eine Krumbasisverdichtung aufwiesen, bei der „... in etwa der Hälfte der Fälle (...) die Ausprägungen der Luftkapazität nahe am kritischen Wert von 5 Vol%, in wenigen Fällen auch darunter“ lagen. Unterhalb der Pflugsohle lagen die Gefügewerte mit wenigen Ausnahmen in einem Bereich, der auf ausreichende Funktionsfähigkeit schließen lässt. Bei der bodenkundlichen Aufnahme der Vergleichsstücke (VSt.) und der Musterstücke (MSt.) der Bodenschätzung in Hessen durch das HLUNG (Zeitraum 2000 bis 2015, ca. 1.500 Profile) wurden keine Anhaltspunkte für flächendeckende „Schad“-Verdichtungen gefunden. Ausnahmen finden sich auch hier vereinzelt in Vorgewenden, Fahrgassen und z. T. in der Krumbasis (Vorderbrügge, 2016, mündl. Mitteilung)

Zur Identifikation einer Bodenschadverdichtung wird von einigen Autoren auch die **Bodendichte** bzw. das **Porenvolumen** herangezogen (Gieska et al., 2003; Ehlers et al., 2003), z. B. nach dem Konzept des optimalen Porenvolumens (Czeratzki, 1972) oder mit oberen Grenzwerten des

optimalen Trockenrohdichtebereiches (Petelkau et al., 1998). Für die Beurteilung des Bodenverdichtungsgrades reicht die Trockenrohdichte alleine jedoch nicht aus (Renger et al., 2014), es ist zusätzlich zumindest die Textur zu berücksichtigen (Petelkau et al., 1998). Die **effektive Lagerungsdichte** (LD_{eff}) ist nach Renger et al. (2014) ein Kennwert, der den kombinierten Einfluss der Textur und der Trockenrohdichte auf den Grad der Bodenverdichtung bzw. der Verfestigung des Bodens beschreibt. Für die quantitative und qualitative Beschreibung von Verdichtungsprozessen durch Laboruntersuchungen ist jedoch auch der Parameter LD_{eff} nach Lebert et al. (2004) nicht geeignet. Renger et al. (2014) kommen zu dem gleichen Schluss. Sie stellen beim Vergleich mit Felderhebungen fest, dass die nach der aktuellen bodenkundlichen Kartieranleitung (KA5) aus Trockenrohdichte und Tongehalt berechneten LD_{eff} nicht unabhängig von der Textur sind und leiten auf Grundlage einer Vielzahl von Feld- und Labormessungen eine neue Gleichung zur Bestimmung der LD_{eff} ab, bei der neben der Trockenrohdichte und dem Tongehalt auch der Schluffgehalt mit einbezogen wird. Durch Einbeziehung der Arbeiten von Petelkau (1984), Petelkau und Seidel (1986) und Petelkau et al. (1998) zu oberen Grenzwerten der optimalen Trockenrohdichte kommen Renger et al. (2014) zu dem Schluss, dass der obere Grenzwert der optimalen LD_{eff} im Unterboden, bei dem noch keine Ertragsminderungen auftreten, bei $1,71 \text{ g/cm}^3$ liegt, berechnet nach der neu entwickelten Gleichung. Dieser Grenzwert gilt „für sämtliche Bodenarten und weist nur minimale Abweichungen von $0,01 \text{ g/cm}^3$ auf. Nur bei den reinen Sanden treten Abweichungen von $0,03$ bis $0,04 \text{ g/cm}^3$ auf. (...) Die erste Stufe der Bodenschadverdichtungen im Krumbasisbereich, bei der gesicherte Mindererträge nach Petelkau (1984) zu erwarten sind, tritt bei LD_{eff} -Werten von $1,76 \text{ g/cm}^3$ auf und liegt damit bereits im Bereich der LD-Klasse 4 (hoch).“ Weiterhin geben sie mit Bezug auf Petelkau et al. (1998) relative Ertragsabnahmen für Winterroggen bei ansteigender Lagerungsdichte an (vgl. Abbildung 1). Petelkau und Seidel (1986) geben darüber hinaus Ertragskurven bei steigender Lagerungsdichte und LD-Grenzwerte für Winterweizen und Sommergerste an.

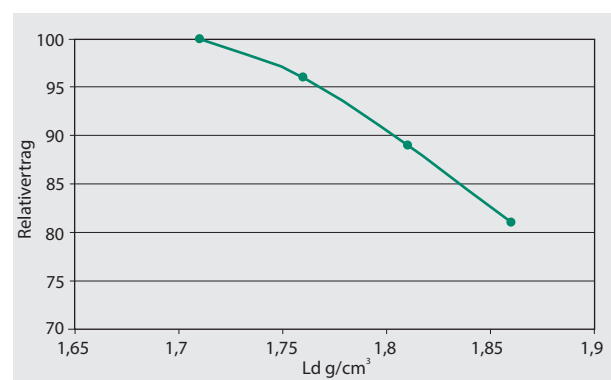


Abbildung 1

Einfluss der effektiven Lagerungsdichte LD_{eff} des Unterbodens auf den Korntrag von Winterroggen (Renger et al., 2014, Ertragsergebnisse von Petelkau et al., 1998)

Auch wenn die Überschreitung dieses Grenzwertes einen Hinweis auf eine mögliche Bodenschadverdichtung geben kann, sollte dennoch zur Identifikation einer Schadverdichtung das Indikatorsystem von Lebert et al. (2004) herangezogen werden, bei dem zusätzlich die Luftkapazität und die gesättigte Wasserleitfähigkeit einbezogen werden. Letztendlich Sicherheit geben aber weiterhin nur eine Profilsprache des Bodens (z. B. nach der Packungsdichte), eine Spatendiagnose und das Wurzelbild in Kombination mit den laborativ bestimmten Bodenparametern, um das Vorliegen einer Bodenschadverdichtung zu verifizieren.

Um die tatsächliche **Belastung des Bodens durch landwirtschaftliche Maschinen** zu beurteilen und daraus praxisrelevante Schlussfolgerungen zu ziehen, sind sowohl die Radlast und der Kontaktflächendruck als auch die Überrollhäufigkeit von Bedeutung. Eine Reihe von Studien haben gezeigt, dass die **Radlast** direkten Einfluss auf Verdichtungsprozesse im Unterboden hat. Diserens (2009) gibt an, dass Achslasten über 10 Mg/Achse zu Bodenverdichtungen auf Ackerflächen und im Grünland führen. Weiterhin können mehrfache Überrollungen auch bei geringeren Reifen- bzw. Achslasten schon zu Verdichtungen auch im Unterboden führen (Botta et al., 1999; 2009; Hamza und Anderson, 2005; Koch et al., 2008; Schjønning et al., 2016). Der mittlere **Kontaktflächendruck** beschreibt die Wirkung der Radlast auf die Radaufstandsfläche in der Berührungsfläche Reifen-Boden und somit die Wirkung der Befahrung auf die Bodenoberfläche. Die Kontaktfläche und damit auch der Kontaktflächendruck werden maßgeblich vom **Reifeninnendruck** mitbestimmt (Bolling und Söhne, 1982). Um den Boden zu schonen, muss daher der Reifeninnendruck auf ein Radlastabhängiges Minimum nach Herstellerangaben gesenkt werden, um zum einen eine möglichst große Kontaktfläche zu erzeugen, zum anderen aber den Reifen nicht zu überlasten (Brunotte et al., 2015). Reifeninnendruckregelanlagen können hier helfen, den Reifeninnendruck lastabhängig anzupassen.

Radlasten nehmen bei gleichzeitig steigender Leistungsfähigkeit der Maschinen und der Fahrzeuge zu, allerdings führen die damit häufig einhergehenden größeren Arbeitsbreiten zu einer Abnahme der zurückgelegten Fahrtstrecke je Hektar. Es ist also nötig, die Kenngrößen **Überrollhäufigkeit** und **Spurflächenanteil** ebenfalls mit einzubeziehen, um Produktionsverfahren im Hinblick auf Bodenbelastung differenziert betrachten zu können (Brunotte und Fröba, 2007; Brunotte et al., 2015).

Neben der Radlast, Überrollhäufigkeit und dem Kontaktflächendruck sind auch die **Bodenart**, die **Bodenfeuchte** und die **Bodenstruktur** maßgebend für Bodenverdichtungsprozesse, letztere auch für die Verdichtungsempfindlichkeit eines Bodens (Bakker und Davis, 1995; Garrigues et al., 2013; Seehusen et al., 2014; Schjønning et al., 2016; Destain et al., 2016). Auch Keller et al. (2015) weisen auf die Abhängigkeit von Verdichtungsprozessen von der Bodenfeuchte und der Bodenart hin und beziehen in ihre Untersuchungen zur Bodenverdichtung mit Hilfe des SOILFlex Modells die Least Limiting Water Range (LLWR) mit ein. Sie kommen zu dem Schluss, dass Verdichtungsprozesse über die Veränderung der Trockenrohdichte auch das Porensystem im Boden

beeinflussen und so wiederum auf Kenngrößen des Bodenwasserhaushalts wirken. Sie verknüpfen das SOILFlex-Modell mit dem Least Limiting Water Range-Konzept und schätzen so die Auswirkungen von Bodenverdichtungen auf das pflanzenverfügbare Bodenwasser ab.

Es existiert eine Reihe von **Modellen** zur Berechnung der Lasteinträge landwirtschaftlicher Maschinen und deren Auswirkungen auf Bodenverdichtungsprozesse (z. B. Terranimo (Stettler et al., 2014), TASC (Diserens und Battiato, 2013), SOILFlex (Keller et al., 2007; 2015), FRIDA (Schjønning et al., 2008; 2015), SOCOMO (Van den Akker, 2004), Compsol (O'Sullivan et al., 1999) u. a.). Diese betrachten in der Mehrzahl nur den Bodendruck in unterschiedlichen Tiefen als Haupteinflussgröße und basieren überwiegend auf Grundlagen von Bussinesq (1885), Fröhlich (1934) und Söhne (1953). Hierfür werden z. T. vereinfachte Berechnungsformeln für die Kontaktfläche und die Druckausbreitung im Boden herangezogen. Keller et al. (2007) berechnen neben dem Bodendruck und dessen Ausbreitung in die Tiefe auch die Änderung der Trockenrohdichte und die Bodenverformung (-deformation) und beziehen in ihre Berechnungen eine elliptische Kontaktfläche ein. Schjønning et al. (2015) leiten aus Belastungsversuchen und deren Charakteristik Schätzformeln für die Kontaktfläche und die Druckausbreitung im Boden ab. Die Kontaktfläche wird dabei als Superellipse betrachtet.

Einige dieser Modelle (z. B. Terranimo, Stettler et al., 2014) beziehen bei Ihren Betrachtungen das Vorbelastungskonzept (z. B. Horn et al., 1989) mit ein und vergleichen den modellierten bzw. sensorisch gemessenen Bodendruck mit dem im Labor bzw. über Pedotransferfunktionen ermittelten Vorbelastungswert zur Identifikation einer Verdichtung. Nach Keller und Lamandé (2010) können diese Werte jedoch nicht die Bedingungen einer realen dynamischen Überrollung von landwirtschaftlichen Maschinen von wenigen Sekunden abbilden und liefern daher nur Vorabschätzungen der Auswirkungen von Befahrungen auf die Bodenverdichtung.

Im Gegensatz zum aktuellen Wissen zu den vielfältigen Effekten von landwirtschaftlichen Maschinen und Befahrungen auf den Boden und dessen Funktionen gibt es nur wenige Studien zur **räumlichen Verteilung der Belastungen** (z. B. Radlast, Kontaktflächendruck) auf einem Feld während unterschiedlicher Feldarbeiten. Kroulík et al. (2009) verwendeten Daten eines DGPS zur Bestimmung der Befahrungsintensität bei wendender (Pflug) und minimaler, nicht wendender Bodenbearbeitung sowie Direktsaat (no-till) während einer Vegetationsperiode. Bei der Bodenbearbeitung mit dem Pflug wurden danach bei Verwendung von Zwillingsbereifung bis zu 95 % der Ackerfläche mindestens einmal im Jahr überrollt. Die gesamte überrollte Fläche kann dabei unter Einbeziehung der Mehrfachüberrollungen bis zu 145 % betragen. Duttman et al. (2013; 2014) zeigten für eine Silomaisernte, dass mehr als 62 % der Ackerfläche während einer einzigen Silomaisernte überfahren werden. Hierbei wurden 44 % mindestens einmal mit einer Radlast von > 50kN überrollt. Nach Gasso et al. (2013) und Tullberg (2010) kann die überrollte Fläche innerhalb eines Feldes drastisch reduziert werden, in dem Maßnahmen des Controlled Traffic Farming (CTF) angewendet werden.

Ausführliche Beschreibungen der vielfältigen Effekte von landwirtschaftlicher Befahrung auf Bodenverdichtungsprozesse finden sich z. B. bei Van den Akker et al. (2003); Nevens und Reheul (2003); Håkansson (2005); Horn et al. (2005; 2008); Horn (2011); NJF (2012); Brunotte et al. (2015).

3 Konzept zur Anpassung von Lasteinträgen landwirtschaftlicher Maschinen an die Verdichtungsempfindlichkeit von Ackerböden

Das hier vorgestellte Konzept zur Anpassung der Lasteinträge landwirtschaftlicher Maschinen an die Verdichtungsempfindlichkeit von Ackerböden stützt sich auf drei Bausteine:

1. Ableitung der Verdichtungsempfindlichkeit von Ackerböden für Deutschland auf der Basis der Haupteinflussfaktoren Bodenart und Bodenfeuchte für Ober- und Unterboden (Kap. 4.1)
2. Ableitung der mechanischen Belastung durch Landmaschinen und Verfahrensketten auf der Basis langjähriger Feldmessungen und technischer Maschinenparameter (Kap. 4.2)
3. Verknüpfung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden mit der mechanischen Belastung durch Landmaschinen und Verfahrensketten und die Ableitung von mittleren regionalen Befahrbarkeitstagen für unterschiedliche Kulturen, Arbeitsgänge und Mechanisierungen (Kap. 4.3)

Der **1. Baustein** befasst sich mit der Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit von Ackerböden in Deutschland. Die wichtigsten Einflussfaktoren sind Bodenart und Bodenfeuchte. Dabei wird nicht nur der Unterboden, sondern auch der Oberboden berücksichtigt, da die Druckausbreitung bis in den Unterboden und damit einhergehende Verdichtungsprozesse vom gesamten Bodenprofil beeinflusst werden. Um sowohl Schichtungen als auch Unterschiede im Bodenprofil z. B. hinsichtlich Bodenfeuchte berücksichtigen zu können, wurde zwischen Ober- (0 bis 30 cm) und Unterboden (30 bis 60 cm) unterschieden. Hierbei wurde aus der Horizontbeschreibung der BÜK 1000N (BGR, 2013a) die Hauptbodenart des jeweiligen Tiefenbereiches abgeleitet (siehe auch Tabelle 4, Kap. 4.3). Die Verdichtungsempfindlichkeit wurde in Abhängigkeit von Bodenart und Bodenfeuchte von den Autoren und einer erweiterten Expertengruppe in einem mehrstufigen Verfahren eingeschätzt, bewertet und auf ihre Plausibilität geprüft.

Im **2. Baustein** erfolgt die Einbeziehung der regionalen Flächenbewirtschaftung hinsichtlich unterschiedlicher Anbaukulturen und verschiedener Mechanisierungsketten. Dabei soll die Belastung des Bodens durch landwirtschaftliche Flächenbewirtschaftung regional möglichst präzise, gleichzeitig jedoch mit einem hinreichenden Generalisierungsgrad, abgebildet werden. Die in Modellen hauptsächlich angestellte Betrachtung eines einzelnen Rades (bzw. einer einzelnen Maschine), welches sich auf dem homogenen Medium Boden abstützt, wird durch die Betrachtung der Belastungen durch ganze Arbeitskettens ersetzt.

Datengrundlagen sind umfangreiche mehrjährige Feldmessungen sowie Technikdatenbanken z. B. des KTBL (2014).

Im **3. Baustein** wird die Belastbarkeit des Bodens mit der mechanischen Belastung durch Landmaschinen verknüpft. Für die wichtigsten Arbeitskettens (z. B. Gülleausbringung, Mähdrusch-, Silomais-, Zuckerrüben-ernte) können so mittlere regionale Befahrbarkeitstage für die gängigen Zeitfenster der jeweiligen Feldarbeiten abgeleitet und Anpassungsstrategien für unterschiedliche Regionen und Einsatzsituationen erarbeitet werden.

Bei der Betrachtung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden, unter Nutzung verschiedener Datenquellen und Kartenwerke sind unterschiedliche Skalenebenen zu beachten. So erfolgt die Ermittlung der Verdichtungsempfindlichkeit der Böden, u. a. auch aufgrund der Zielstellungen und der zur Verfügung stehenden Daten, flächendeckend für ganz Deutschland (Deutschlandebene). Die Betrachtung der jeweiligen Bewirtschaftung und die Ableitung sinnvoller Handlungsempfehlungen für den Praktiker müssen dagegen auf regionaler und lokaler Ebene, z. T. auch auf Schlagebene, erfolgen. Ein Herunterbrechen der Ergebnisse der deutschlandweiten Betrachtung auf einzelne Flächen oder Schläge ist, aufgrund des Generalisierungsgrades sowohl der Boden- als auch der Klimadaten, nicht zulässig. Hierfür sind weitere Untersuchungen notwendig.

Abbildung 2 zeigt ein vereinfachtes Schema des Vorgehens, der einbezogenen Daten und deren Quellen sowie der geplanten Ergebnisse. Grundlage der Betrachtungen ist der einzelne Gitterasterpunkt eines 1 x 1 km Rasters. Aus dem Bodenwasserhaushaltsmodell AMBAV werden die Zeitreihen der Wetterstationen des DWD in Deutschland für die Modellberechnungen verwendet und die Ergebnisse für den jeweiligen Gitterasterpunkt im Abstand von 1 km für Deutschland generiert. Für jeden dieser Gitterasterpunkte werden aus der BÜK 1000N (BGR, 2013a) das Ausgangssubstrat, die Bodenart und Horizontierung abgefragt. Da in diesen Untersuchungen zwei Tiefenbereiche einbezogen werden (Oberboden 0 bis 30 cm, Unterboden 30 bis 60 cm), die Horizontierungen der einzelnen Bodenprofile jedoch sehr unterschiedlich sein können, wurden in einem ersten Schritt die Bodenarten des jeweiligen Tiefenbereiches extrahiert. Hierbei wurden in Abhängigkeit der Horizontmächtigkeiten die Bodenarten extrahiert, die für den jeweiligen Tiefenbereich (Ober-/Unterboden) die größte Relevanz aufweisen. Nur diese werden für die weiteren Betrachtungen und Berechnungen verwendet. Dieses Vorgehen ist notwendig, um die Bandbreite der unterschiedlichen Böden in Deutschland für die Untersuchungen handhabbar zu machen. Für diese Bodenarten werden aus den Daten des Bodenwasserhaushaltsmodells des DWD die entsprechenden Werte der Feldkapazität abgeleitet. Dadurch können neben unterschiedlichen Tiefenbereichen auch Substratwechsel im Profil mit berücksichtigt werden.

Auf der Grundlage der ermittelten Bodenarten für die unterschiedlichen Tiefenstufen erfolgt dann eine datenbankgestützte Analyse, Auswertung und Verknüpfung mit den Klimadaten des DWD (Modell AMBAV), um den Jahresverlauf der täglichen Bodenfeuchte in %FK ableiten zu können. Auf

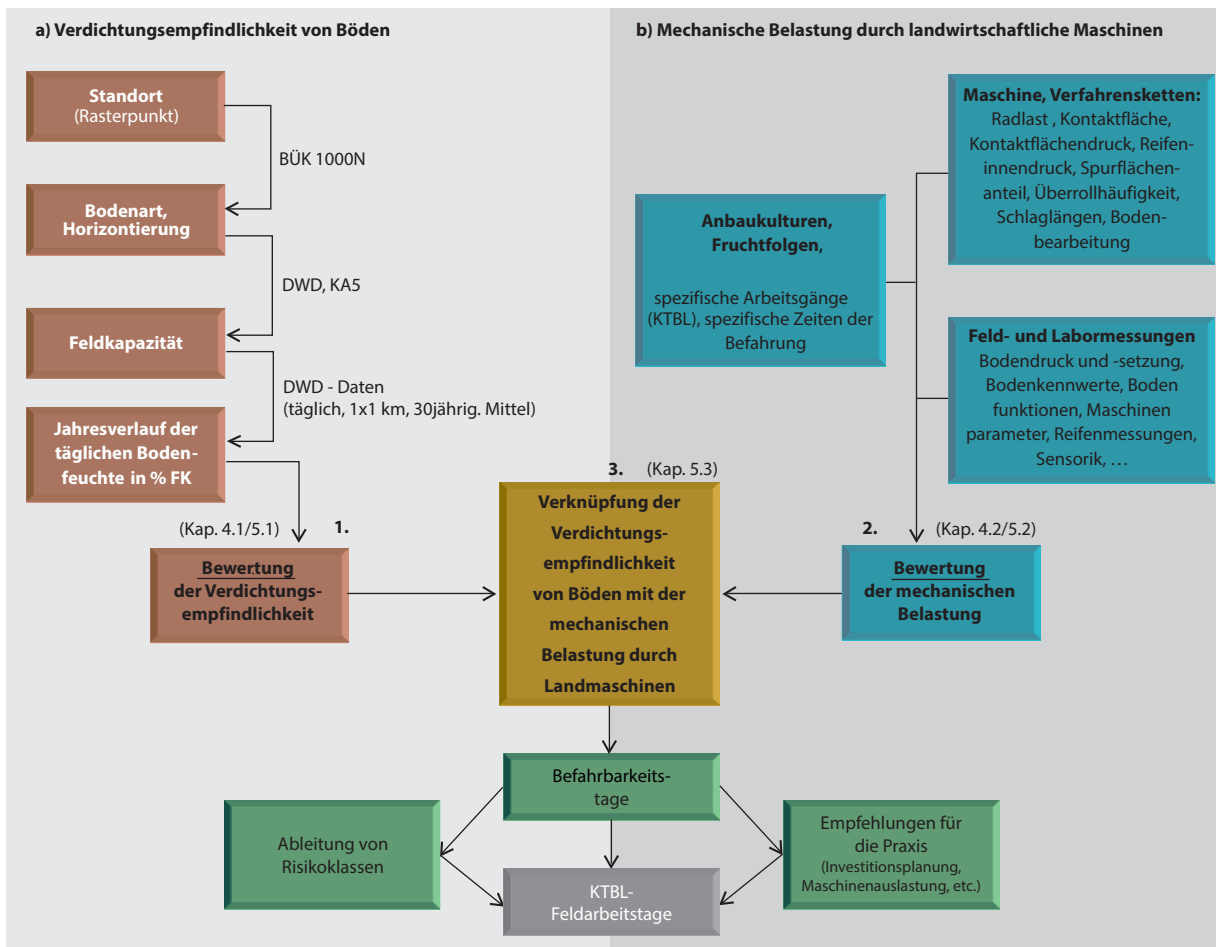


Abbildung 2

Vereinfachtes Schema des Vorgehens

diese Weise lassen sich Zeiten hoher bzw. niedriger Bodenfeuchten auf Tagesbasis ableiten. Um darauf aufbauend Aussagen zu Zeiten hoher bzw. niedriger Verdichtungsempfindlichkeit oder zu Befahrbarkeitstagen treffen zu können, bedarf es einer Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit in Abhängigkeit der jeweiligen Bodenfeuchte und der Bodenart. Die diesbezüglichen Bewertungsansätze sind im Kapitel 4.1 (Verdichtungsempfindlichkeit) dargestellt.

Für die Einschätzung der mechanischen Belastung durch landwirtschaftliche Maschinen wurde auf umfangreiche langjährige Feldmessungen des Thünen-Instituts (TI), des Instituts für Zuckerrübenforschung (IFZ) und der Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) Bayern zurückgegriffen (z. B. Brunotte et al., 2007; Brunotte und Fröba, 2007; Koch et al., 2002; 2008; Brandhuber et al., 2010; Geischeder, 2011). Hieraus wurden für unterschiedliche kulturartspezifische Arbeitsverfahren und Variationen unter Einbeziehung der Technikdatenbanken des KTBL typische Werte für Radlasten, Reifeninnendrucke, Kontaktflächendrücke, Spurflächenanteile, Überrollhäufigkeiten etc. abgeleitet. Diese wurden dann mit den Feldmessungen von Bodendruck, -setzung und den Änderungen bodenfunktionaler Größen und Parameter, wie z. B. der gesättigten Wasserleitfähigkeit und der Luftkapazität, verknüpft. Durch Wichtung der unterschiedlichen Parameter

einer Technikvariante hinsichtlich ihrer Wirkung auf Bodenverdichtungsprozesse konnten die landwirtschaftlichen Verfahren bezüglich ihrer Bodenbelastung bewertet werden. Weiterhin können typische Zeiten unterschiedlicher Arbeitsgänge abgeleitet und in die Untersuchungen einbezogen werden. Das Vorgehen ist detailliert in Kap. 4.2 beschrieben.

Um Zeiten hoher Verdichtungsgefährdung und die Anzahl der Befahrbarkeitstage zu bestimmen, werden die Daten (Kap. 4.3) in einem GIS zusammengeführt und mit den Anbaukulturen, Mechanisierungen und Verfahrensketten verknüpft. Das Vorgehen und die Ergebnisse werden am Beispiel von neun über Deutschland verteilten Standorten dargestellt. Weiterhin erfolgt am Ende eine Plausibilitätsprüfung durch den Vergleich der real festgestellten Befahrbarkeitstage und der mit dem Konzept ermittelten Befahrbarkeitstage für das Jahr 2014 und den Beispielstandort Adenstedt.

4 Grundlagen und Methodik

4.1 Expertengestützter Bewertungsansatz zur Verdichtungsempfindlichkeit von Ackerböden

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise bei der Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit von Ackerböden in

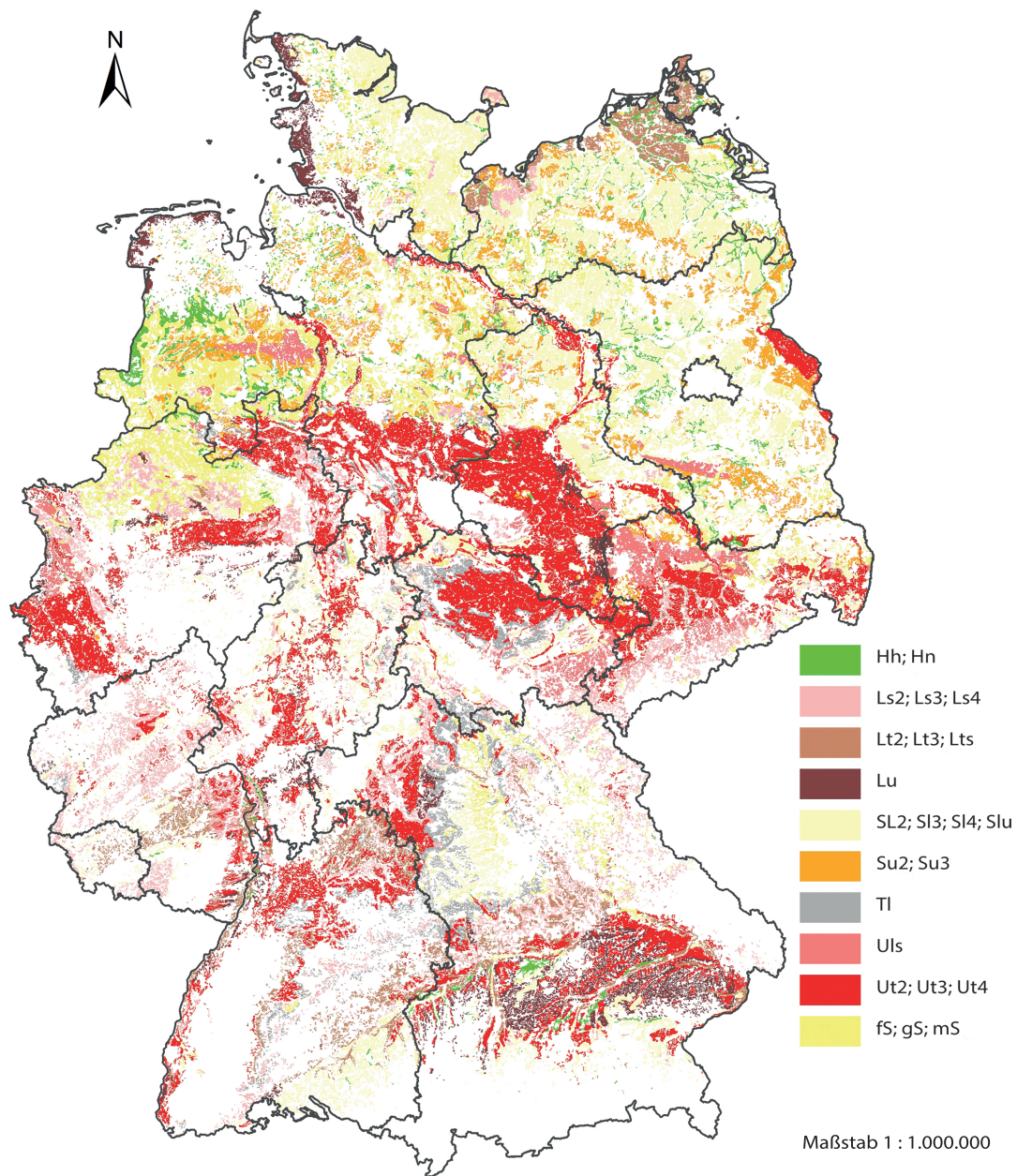


Abbildung 3
 Bodenarten des Oberbodens, BÜK 1000N Ackernutzung (verändert nach BGR, 2013a)

Deutschland in Abhängigkeit von Bodenart und Bodenfeuchte dargestellt. Im ersten Schritt (Kap. 4.1.1) werden die verfügbaren Bodendaten und die Herleitung der verwendeten Bodenarten aus der Horizontbeschreibung der BÜK gezeigt. Im zweiten Schritt (Kap. 4.1.2) wird das Modell AMBAV des DWD und die Herleitung der mittleren Tageswerte der Bodenfeuchte erläutert. Zusammenführend wird daraus im 3. Schritt die Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit von ackerbaulich genutzten Böden in Deutschland in Abhängigkeit der Bodenart und Bodenfeuchte dargestellt. Hierbei wird ein expertengestützter Ansatz verfolgt, bei dem die Verdichtungsempfindlichkeit in Abhängigkeit von Bodenart und Bodenfeuchte von den Autoren und einer

erweiterten Expertengruppe in einem mehrstufigen Verfahren eingeschätzt, bewertet und auf ihre Plausibilität geprüft wurde.

4.1.1 Bodenkennwerte

Um Bodendaten flächendeckend für ganz Deutschland in die Betrachtungen einbeziehen zu können, muss auf verfügbare digitale Bodenkarten zurückgegriffen werden. Derzeit stellt die nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:1.000.000 (BÜK 1000N) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR, 2013a) die einzige einheitliche, flächendeckende, digital verfügbare Bodenkarte dar.

1. Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:1.000.000 (BÜK 1000N) – Auszug Ackerböden (Version 2.31, Stand: 22.02.2013).

Die BÜK 1000N – Auszug Ackerböden (Abbildung 3 (BGR, 2013a)) stellt bundesweit die Verbreitung der Böden und deren Vergesellschaftung in einheitlicher Form auf dem Aggregierungsniveau der Leitbodenassoziationen dar. Diese umfasst 14 Landnutzungsklassen bei einer Mindestflächen-größe der Einzelpolygone von ca. 4 km².

Die flächenbezogenen Inhaltsdaten des Teilauszugs Ackerböden setzen sich aus 78 Acker-Referenzprofilen mit je 3 auf Bodenformen und 16 auf Horizonte bezogenen Parametern zusammen (BGR, 2013a). Abbildung 3 zeigt die Bodenarten des Oberbodens, abgeleitet aus der BÜK 1000N, wie sie für diese Untersuchungen verwendet werden.

2. Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK 200)

Die Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK 200) wird von der BGR in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Länder (SGD) erstellt und herausgegeben (BGR, 2013b). Die BÜK 200 ist ein blattschnittfreies Kartenwerk, das für länderübergreifende Aussagen zu Bodennutzung und -schutz eine detaillierte, bundesweit einheitliche und flächendeckende Informationsgrundlage liefert. Sie stellt die Verbreitung und Vergesellschaftung der Böden und ihrer Eigenschaften in Deutschland dar. Weiterhin lassen sich Flächeninhalte (Leit- und Begleitböden mit Informationen zu Bodentyp, Bodenart, Bodenausgangsgestein, Humus- und Carbonatgehalt, Schicht- u. Horizonttiefe, Grundwasserstand usw.) sowie Grafikdaten (Grenzen der Kartiereinheiten) der Bodenkarte abrufen (BGR, 2013b).

Die Kartenserie umfasst derzeit 50 von insgesamt 55 Karten (Stand Juli 2015). Die noch ausstehenden fünf Kartenblätter werden ab 2016 bearbeitet (Bodenschutz 02/2015, S. 64).

3. Bodenübersichtskarte 1:50.000 (BÜK 50)

Bodeninformation in höherer räumlicher Auflösung für regionale Darstellungen und Auswertungen bieten die Kartenwerke und Informationssysteme der SGD in Maßstäben von z. B. 1:50.000 oder 1:25.000.

4. Bodenschätzungsdaten

In der Maßstabsebene bis 1:10.000 dominieren Boden-karten, die auf Basis der Bodenschätzungsdaten oder darauf aufbauender Datensätze erarbeitet wurden. Diese Daten sind bundesweit flächendeckend für alle Acker- und Grünlandflächen erhoben worden. Sie liegen aber meist in einer Nomenklatur vor, die keine weitere direkte Auswertung in Methoden Anwendungen ermöglicht. Die konkrete Verfügbarkeit der Daten wird durch die unterschiedliche Art der Datenbereitstellung erschwert. Während z. B. in Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg große Teile der Landesfläche digital und in moderne Nomenklatur übersetzt vorliegen und damit direkt auswertbar sind, können andere Bundesländer nur analoge Originaldaten zur Verfügung stellen.

Aufgrund der noch fehlenden Kartenausschnitte in der BÜK 200 stellt die nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte BÜK 1000N derzeit die einzige einheitliche, flächendeckende, digital verfügbare Bodenkarte dar und wird daher im Folgenden verwendet.

Zukünftig ist geplant, die entwickelte Methodik auf einzelne Kartenblätter der BÜK 200 und für einzelne Regionen in Niedersachsen auf die BÜK 50 und die Bodenschätzungsdaten anzuwenden, um die Aussagefähigkeit der Ergebnisse zu überprüfen und skalenbedingte Unterschiede und Verallgemeinerungen aufzudecken und bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

4.1.2 Klimadaten

Der Bodenwasserhaushalt hat sowohl für die pflanzlichen Wachstumsprozesse und die Ertragsbildung als auch für die Durchführung landwirtschaftlicher Arbeiten eine zentrale Bedeutung. Insbesondere auf leichten (sandigen, humusarmen) Standorten ist das Wasserspeichervermögen des Bodens häufig der maßgebliche ertragsbegrenzende Faktor, wenn nicht bewässert werden kann. Die Bodenfeuchte ist der entscheidende Faktor für die Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit der Böden und der Verdichtungsgefährdung durch landwirtschaftliche Maschinen.

Um regionale und kleinräumige klimatische Unterschiede des Verlaufs der Bodenfeuchte, in Abhängigkeit der jeweiligen Bodeneigenschaften und Anbaukultur, darstellen zu können, wurden räumlich und zeitlich hoch auflösende Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) ausgewertet. Mit Hilfe des Modells AMBAV (Agrometeorologisches Modell zur Berechnung der aktuellen Verdunstung, Löpmeier, 2013) wurden auf Grundlage von Daten aus ca. 500 Wetterstationen Bodenfeuchtedaten auf Tagesbasis als 30-jähriges Mittel (1971 bis 2000) für die Bodentiefen 0 bis 30 cm (Oberboden) und 30 bis 60 cm (Unterboden) berechnet. Das Modell AMBAV basiert auf der klassischen Penman-Monteith-Beziehung. Wesentliche Merkmale sind (Löpmeier, 2013):

- Koppelung mit einem Bodenwasserhaushaltsmodell, das u. a. in AMBETI / BEKLIMA (weitere Modelle des DWD; Löpmeier (1994); Braden (1995)) Anwendung findet. AMBAV ist ein physikalisch begründetes Standortmodell, das in umfangreicher Weise für Standorte in Deutschland validiert wurde und u. a. in der Bewässerungsberatung des DWD eingesetzt wird.
- Bestimmung des kulturspezifischen Stomata-/Bestands-widerstandes über Lysimetermessungen und umfangreiche Bodenfeuchtemessungen,
- Beschreibung der Pflanzenparameter wie Blattflächenindex, Pflanzenbedeckungsgrad, Durchwurzelungstiefe über charakteristische phänologische Phasen,
- deterministische Behandlung der Interzeption des Niederschlags im Pflanzenbestand,
- Nutzung von Daten meteorologischer Routinemessungen und Wetterstationsdaten.

Das Modell AMBAV ist ein Wasserbilanzmodell, in dem der Niederschlag und der kapillare Aufstieg als Quellen und die Versickerung sowie die Verdunstung als Senken behandelt werden (Löpmeier, 2013). Um exakt bilanzieren zu können, muss die Wechselwirkung Boden – Pflanze und Pflanze – Atmosphäre möglichst genau beschrieben werden. Der jeweilige Boden mit seinen charakterisierenden Boden-

kenngößen wie Feldkapazität, Permanenter Welkepunkt, Trockenrohdichte (z. B. AG Boden, 2005; Wessolek et al., 2009) sowie die Pflanzenart sind fest vorzugebende Randbedingungen. Zum Startzeitpunkt des Modells muss die momentane Pflanzenentwicklung in Form von Höhe, Blattflächenindex, Durchwurzelungstiefe und -dichte sowie die Wasserverteilung im Boden angegeben werden.

Das Wachstum der Pflanzen wird mit Hilfe von phänologischen Phasen simuliert, die von ca. 500 Beobachtungsstationen zur Verfügung stehen. Mit fünf über den Pflanzenzyklus verteilten Pflanzenphasen wird eine genormte Pflanzenentwicklung abgeleitet. Weitere variable Einflussgrößen für das Modell sind Strahlung, Niederschlag, Windgeschwindigkeit, relative Luftfeuchte und Lufttemperatur. Besonders schwierig sind die Wasserbewegungen im Boden zu simulieren, denn zum einen wird je nach Wurzeldichteverteilung und Bodenwassergehalt den 10 cm mächtigen Bodenschichten Wasser durch die Pflanzen entzogen, zum anderen wird das Bodenwasser je nach Bodenart und Wassergehalt vertikal zwischen den Bodenschichten verlagert. Neben den äußeren meteorologischen Rahmenbedingungen ist auch das momentane Bodenwasser bzw. pflanzenverfügbares Wasser für die Höhe der tatsächlichen Verdunstung verantwortlich. Bei nahezu ausgetrockneten Böden geht daher die tatsächliche Verdunstung gegen Null (Löpmeier, 2013).

Aus den Angaben aus der Bodenfeuchteberechnung zur nutzbaren Feldkapazität (nFK), Feldkapazität (FK) und permanentem Welkepunkt (PWP) wurden standortspezifische Tageswerte in %FK oder %nFK abgeleitet. Die räumliche Auflösung liegt dabei bei 1 x 1 km.

Die Berechnungen erfolgten für **sechs Bodenarten**:

1. schwach lehmiger Sand (SI2)
2. stark lehmiger Sand (SI4)
3. toniger Schluff (Ut3)
4. schluffiger Lehm (Lu)
5. toniger Lehm (Lt3)
6. lehmiger Ton (TI)

und für **vier Kulturarten sowie eine unbewachsene Variante**:

1. Winterweizen (WW)
 2. Sommerweizen (SW)
 3. Silomais (SM)
 4. Zuckerrüben (ZR)
- + unbewachsen.

Es bestehen somit 30 Kombinationen aus Boden- und Kulturart, um den Einfluss der Bodenfeuchte auf die Verdichtungsempfindlichkeit der Böden in Abhängigkeit von Bodenart, Pflanzenbestandsentwicklung und Witterungsverlauf zu quantifizieren. Ziel ist es die Bodenfeuchte auf Tagesbasis für unterschiedliche Bodenschichten unter Einbeziehung der aktuellen Pflanzenentwicklung und Klimadaten zu berechnen. Der nachfolgend vorgestellte Ansatz zur Ableitung der Verdichtungsempfindlichkeit sollte nur in Verbindung mit einem für unterschiedliche Standorte in Deutschland validierten Bodenwasserhaushaltsmodell verwendet werden, um die Änderungen der Bodenfeuchte für unterschiedliche Schichten tagesgenau abbilden zu können. Das Modell AMBAV des DWD bietet diese Voraussetzungen und wurde daher für diese Untersuchungen verwendet. Es hat sich

weiterhin in verschiedenen Ensemble-Simulationen und in der Bewässerungsberatung des DWD über Jahre bewährt (Löpmeier, 1994; Braden, 1995). Um die Einflüsse modellimmanenter Voraussetzungen und Festlegungen zu prüfen und den Modellfehler in den Ausgabeparametern zu verifizieren, ist bei einer Weiterentwicklung die Einbindung weiterer Bodenwasserhaushaltsmodelle zu empfehlen.

4.1.3 Expertengestützter Bewertungsansatz zur Verdichtungsempfindlichkeit

Bewertungsansätze zur Verdichtungsempfindlichkeit von Böden basieren hauptsächlich auf expertengestützten Ansätzen (z. B. Houskova und Montanarella, 2008 a; b; Jones et al., 2008; Le Bas et al., 2006; Fraters, 1996) oder physikalischen Messgrößen, wie z. B. dem Bodendruck (z. B. BAFU und BLW, 2013; Horn et al., 2005; Van den Akker und Simota, 2008; Van den Akker, 1997).

Das hier vorgestellte **Konzept** zur „Anpassung der Lastenträge landwirtschaftlicher Maschinen an die Verdichtungsempfindlichkeit von Ackerböden“ verfolgt aufgrund der räumlichen und zeitlichen Komplexität des Systems Boden und der derzeit noch unzureichenden Praxistauglichkeit von Modellen in diesem Bereich einen von Experten gestützten Ansatz. Dieser wurde auf Grundlage langjähriger Erfahrungen einer Expertengruppe, einer Vielzahl von Feldmessungen (z. B. TI Braunschweig, LFL Bayern, IFZ Göttingen) und unter Einbeziehung einschlägiger Tabellenwerke (z. B. Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage, (KA5; AG Boden, 2015) u. a.) entwickelt. Dabei erfolgte eine Einschätzung und Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden in Abhängigkeit von der Bodenart und der Bodenfeuchte.

Im ersten Schritt wurden hierzu die Bodenarten in ihrer Abstufung zueinander bewertet und geordnet. Hierzu wurde zunächst eine Einstufung von Petelkau et al. (1998) herangezogen, welche die Bodenarten hinsichtlich ihres Ton- und Feinschluffgehaltes unterscheidet und klassifiziert. Da im hier vorgestellten Ansatz die Eigenschaften und Veränderungen der Verdichtungsempfindlichkeit unterschiedlicher Bodenarten bei unterschiedlichen Feuchtegehalten berücksichtigt werden sollten, wurden zusätzlich die Bodenarten hinsichtlich ihrer Wasserretentionsfunktion unterschieden und klassifiziert. Weiterhin wurde eine Anpassung an die aktuelle Nomenklatur der KA5 vorgenommen (AG Boden, 2005). Hierdurch kam es v. a. bei Bodenarten mit sehr hohen Schluffgehalten zu Anpassungen bzw. Änderungen der Klassifizierung gegenüber der von Petelkau et al. (1998). Um sowohl die Bodenfeuchte als auch die DWD-Daten berücksichtigen und einbeziehen zu können, wurde auch hier die Bodenfeuchte in %FK verwendet. Im Ergebnis ergibt sich eine Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit landwirtschaftlich genutzter Böden in Abhängigkeit der Bodenfeuchte, wie sie in Abbildung 4 dargestellt ist.

Bei Sanden ist der Wassergehalt bei Feldkapazität (FK = nutzbare FK (nFK) + Totwasser (PWP)) generell erheblich geringer (z. B. Ss 10 bis 15 Vol%, SI2 23 bis 28 Vol%) als bei Lehmen oder Tonen (z. B. Tt 35 bis 51 Vol%). Hierin wird u. a.

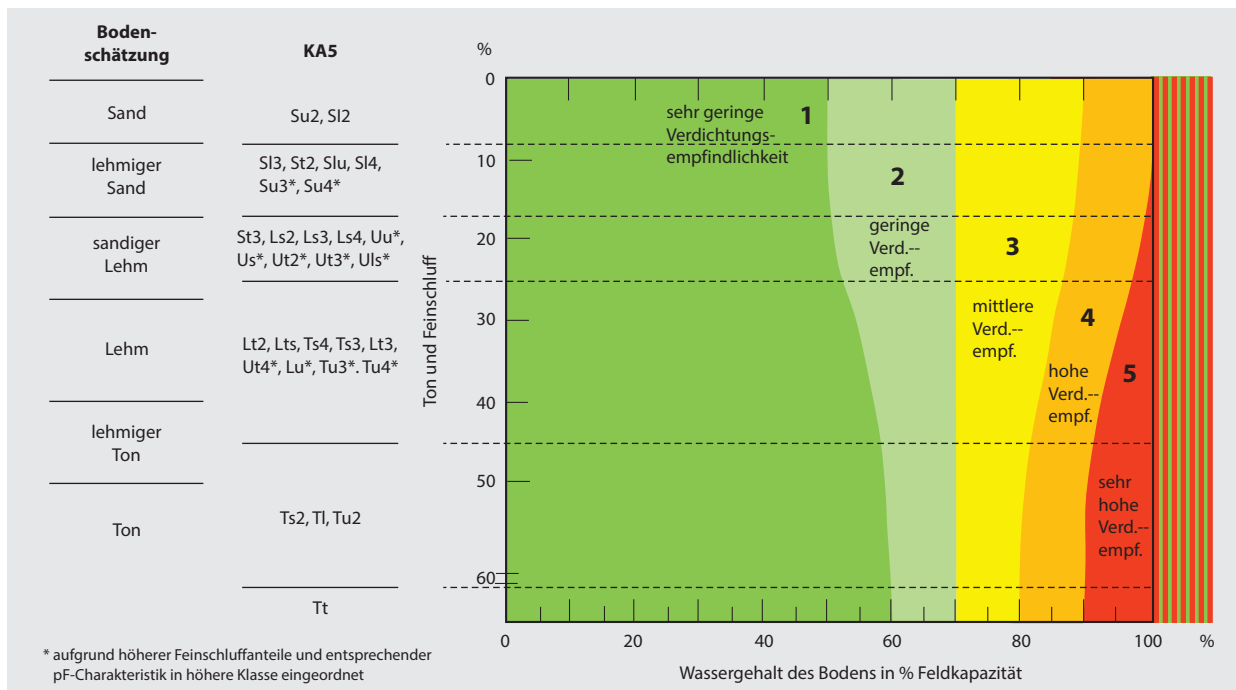


Abbildung 4

Bodenart- und feuchteabhängige Klassen der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden

auch deutlich, dass z. B. bei Sanden mit sehr geringer Feldkapazität (z. B. 15 Vol%) schon kleine Wassergehaltsänderungen (z. B. -3 Vol%) große Änderungen des Wertes der %FK bewirken (im Beispiel: -20 %), wohingegen bei Tönen mit hoher Feldkapazität (z. B. Tl 40 Vol%) diese Wassergehaltsänderung (z. B. -3 Vol%) nur eine Änderung des Wertes der %FK von -7,5 % hervorrufen. Weiterhin ist der z. T. erhebliche Totwasseranteil (PWP) bei steigenden Tongehalten bei der Betrachtung der Feldkapazität zu beachten.

Für die weiteren Betrachtungen wurden dann die entsprechenden Feldkapazitätswerte (%FK) der Klassenmitte der jeweiligen Bodenartenklasse ermittelt (vgl. Abbildung 4). Weiterhin wurden die Werte der oberen und unteren Grenzen herangezogen, um die Spannweite der einzelnen Klassen mit zu berücksichtigen. Auf Grundlage der täglichen Bodenfeuchten (%FK) aus den Daten des DWD wurde für jeden Tag im Jahr die mittlere langjährige Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens bestimmt. Hierzu werden die jeweiligen Bodenfeuchten des Ober- und Unterbodens verwendet. Die Ergebnisse für neun über Deutschland verteilte Beispielstandorte finden sich in Kapitel 4.3.

4.2 Methodik zur Ableitung der mechanischen Belastung durch landwirtschaftliche Maschinen

Um die mechanische Belastung von Böden durch landwirtschaftliche Maschinen spezifizieren zu können, ist die Berücksichtigung der gängigen Mechanisierungen der jeweiligen Arbeitsgänge und deren Spannweite von großer Bedeutung. Hierzu wurden sowohl Literaturquellen ausgewertet als auch auf Expertenwissen des Thünen Instituts für Agrartechnologie und einer Arbeitsgruppe des KTBL zu

verfügbaren Feldarbeitstagen zurückgegriffen. Die Fülle an Mechanisierungsmöglichkeiten lässt sich im Rahmen dieser Studie in ihrer Detailliertheit nicht darstellen, findet aber Eingang in das vorgestellte Konzept und wird über das beschriebene Schema (siehe Kap. 4.3) der standortabhängigen Verdichtungsempfindlichkeit gegenübergestellt.

Um die jeweilige Mechanisierung vor dem Hintergrund der mechanischen Belastung durch Landmaschinen (vgl. z. B. Abbildung 19) einordnen und der standortabhängigen Verdichtungsempfindlichkeit von Böden gegenüber stellen zu können, wurde ein Ansatz entwickelt, der im ersten Schritt den Einfluss von Radlast, Reifeninnendruck, Kontaktflächen- druck, Anzahl Überrollungen und Anteil der überrollten Fläche gewichtet. Die so bestimmten Belastungsanteile werden aufsummiert und durch Division mit der Summe der Wichtungen normiert. Der so ermittelte Wert ermöglicht die Einordnung in eine der fünf Belastungsklassen. Tabelle 2 zeigt das Vorgehen am Beispiel eines Feldhäckslers bei der Silomais- ernte mit parallel fahrendem Häckselgutwagen, der das Häckselgut direkt zum Silo transportiert und deshalb mit Reifeninnendrücken für Straßenfahrten auch auf dem Acker fährt. Im Vergleich dazu ist dieses Verfahren in Abbildung 19 zwei alternativen Silomaisernteverfahren mit Trennung von Feld- und Straßentransport gegenübergestellt.

Bei diesem Vorgehen sind die Radlast und der Kontakt- flächendruck höher gewichtet als die anderen Parameter (vgl. C7 und C9 in Tabelle 2), da Änderungen dieser Parameter einen größeren und direkteren Einfluss auf die Boden- belastung haben (Tijink, 2003; Brunotte et al., 2007; Brunotte und Fröba, 2007; Horn et al., 2008; 2009; Diserens, 2009). Weiterhin werden die Gewichtungsfaktoren für die Parameter ‚Anzahl der Überrollungen‘ und ‚Anteil der überrollten

Tabelle 2

Beispiel Feldhäcksler und Häckselwagen direkt zum Silo (Technikvariante 1)

		A	B	C	D	E	F	G	H	I
	Maschine und Anzahl der zu berücksichtigenden Achsen	Traktor		Anhänger			Häcksler		Maxi-	Mittel-
		Vorderachse	Hinterachse				Vorderachse	Hinterachse	mum	werte
		1. Achse	2. Achse	3. Achse	4. Achse	5. Achse	6. Achse	7. Achse		
1	Radlast [t]	1,5	4,75	4,75	4,75	4,75	7,0	2,0	7,0	4,21
2	Reifeninnendruck [bar]	1,2	1,6	3,0	3,0	3,0	1,5	1,0	3,0	2,04
3	Kontaktfläche [m ³]									
4	Kontaktflächendruck [bar]	1,0	1,0	1,2	1,2	1,2	0,85	0,9	1,2	1,05
5	Anzahl Überrollungen pro Spur	7								
6	Anteil der überrollten Fläche [%]	33								

		Wertebereich von	Wertebereich bis	Wichtung	Belastungs-anteil
7	Radlast [t]	0,5	12,0	2,00	1,17
8	Reifeninnendruck [bar]	0,6	4,0	1,00	0,51
9	Kontaktflächendruck [bar]	0,4	2,5	2,00	0,84
10	Anzahl Überrollungen	1	6	0,70	0,82
11	Anteil der Überrollten Fläche	0	100	0,176	0,058
12	Summe der Wichtungen			5,88	
13	Belastungssumme				3,40
14	Belastungskennwert gesamt				0,58

Belastungskennwerte/Belastungsklassen	1	2	3	4	5
obere Grenze	0,38	0,46	0,54	0,62	0,70
untere Grenze	0,30	0,38	0,46	0,54	0,62

Berechnung der Wichtungsfaktoren der Parameter ‚Anzahl Überrollungen‘ und ‚Anteil der überrollten Fläche‘:

- (1) $C10 = (I1/B7) \cdot C7$
- (2) $C11 = C10 \cdot (A6/100)$

Berechnung der Belastungsanteile:

- (3) $D7 = (H1/B7) \cdot C7$
- (4) $D8 = (I2/B8) \cdot C8$
- (5) $D9 = (I4/B9) \cdot C9$
- (6) $D10 = (A5/B10) \cdot C10$
- (7) $D11 = (A6/B11) \cdot C11$

Fläche‘ dynamisch an die Radlast gekoppelt (vgl. Formeln (1) und (2), Tabelle 2), so dass für höhere Radlasten auch eine höhere Gewichtung der Überrollhäufigkeiten erfolgt.

Darüber hinaus wird der jeweilige Wert der Technikvariante auf die in der Praxis übliche obere Begrenzung des Wertebereiches der Parameter bezogen (z. B. 12 t beim Parameter ‚Radlast‘, vgl. B7 in Tabelle 2), um Abweichungen vom praxisüblichen Verfahren mit in die Betrachtungen einbeziehen zu können. Zusammen mit dem Wichtungsfaktor ergibt sich ein Belastungsanteil des jeweiligen Parameters an der Gesamtbelastung (vgl. Formeln (3) bis (7), Tabelle 2). Die sich aus allen Parametern ergebende Belastungssumme (D13, Tabelle 2) wird dann durch die Summe der Wichtungen (C12, Tabelle 2) geteilt, um den Belastungskennwert (D14, Tabelle 2) zu ermitteln und damit die Technikvarianten auf einer Skala von 0,3 bis 0,7 bewerten und in fünf Belastungs-

klassen einteilen zu können. Mit diesem Verfahren wird es möglich, unter Berücksichtigung der jeweiligen Maschinenspezifikationen (Berücksichtigung von Radlast, Reifeninnendruck, Kontaktflächendruck, Anzahl Überrollungen und Anteil der überrollten Fläche) eine Einordnung der jeweiligen Mechanisierung in eine der 5 Belastungsklassen (siehe Abbildung 5; sehr gering bis sehr hoch) bzw. auch in feineren Abstufungen vorzunehmen, verschiedene Mechanisierungen gegenüberzustellen und hinsichtlich ihrer Bodenbelastung zu bewerten sowie der jeweiligen Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens gegenüberzustellen (vgl. Abbildung 5).

Zur Verknüpfung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden mit der mechanischen Belastung durch Landmaschinen wurde ein Schema von Brunotte et al. (2015, verändert nach Chamen et al., 2003) verwendet und angepasst (Abbildung 5). Hierbei wird auf der Ordinate die

mechanische Belastung der Maschine bzw. Verfahrenskette in Abhängigkeit der dargestellten Parameter, wie z. B. Radlast, Kontaktflächendruck etc. klassifiziert in 5 Belastungsklassen von 1 (sehr gering) bis 5 (sehr hoch) dargestellt. Die jeweiligen mechanischen Belastungen der verschiedenen Mechanisierungen wurden aus einer Vielzahl von Feldmessungen abgeleitet. Auf der Abszisse wird die standortabhängige Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens in Abhängigkeit von Bodenart und -feuchte, ebenfalls in einer 5-stufigen Klasseneinteilung von 1 (sehr geringe Verdichtungsempfindlichkeit) bis 5 (sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeit) eingestuft. Hierbei wurde der bisher verwendete Ansatz zur Bestimmung der standortabhängigen Verdichtungsempfindlichkeit nach Konsistenzbereichen nach Brunotte et al. (2015), verändert nach Chamen et al. (2003) durch den hier vorgestellten, neu entwickelten Bewertungsansatz zur Bestimmung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden (vgl. Kap. 4.1) ersetzt.

Der „Feldhäcksler mit Häckselwagen direkt zum Silo“ (Technikvariante 1) erreicht mit diesen Spezifikationen (max. 7 t Radlast, max. 3 bar Reifeninnendruck, max. 1,2 bar mittlerer Kontaktflächendruck bei 7-facher Überrollung und einem Spurfächenanteil von 33 %) einen Belastungskennwert von 0,58 und ist demnach in Belastungsklasse 4 (hoch) einzuordnen (vgl. auch rote Linie in Abbildung 19 und 20, Kap. 5.3). Nach gleichem Prinzip wurden auch die anderen betrachteten Verfahren eingeordnet. Die Ergebnisse finden sich in Kap. 5.3.

Die mechanische Belastung durch die jeweilige Mechanisierungsvariante (5 Klassen) wird dabei der Verdichtungsempfindlichkeit des jeweiligen Bodens (5 Klassen)

gegenübergestellt (vgl. Abbildung 5). Hierbei wird ersichtlich, ob der Boden unter den gegebenen Bedingungen mit den Spezifikationen der jeweiligen Technikvariante bodenschonend befahren werden kann oder nicht. Liegt der Schnittpunkt der Geraden der mechanischen Belastung und der Geraden der Verdichtungsempfindlichkeit unterhalb der Diagonalen (grün bis gelber Bereich), so ist eine bodenschonende Befahrung gegeben. Liegt der Schnittpunkt oberhalb der Diagonalen (gelb bis roter Bereich), so ist eine bodenschonende Befahrung schwierig bis nicht gegeben und es ist ggf. mit schädlichen Bodenveränderungen zu rechnen. Weiterhin können verschiedene Technikvarianten hinsichtlich ihrer Bodenbelastung verglichen werden, wodurch eine Optimierung der Befahrung unter den gegebenen Bedingungen möglich wird. Die Ergebnisse können die Entscheidungsfindung für mittel- bis langfristige Investitionsplanungen unterstützen, da über das Bodenwasserhaushaltsmodell mittlere, langjährige Verhältnisse abgebildet werden können. In Kapitel 5.3 ist dieses Verfahren am Beispiel der Silomaiserte mit drei unterschiedlichen Ernteverfahren dargestellt.

4.3 Verdichtungsempfindlichkeit von Böden – Charakteristik von neun Beispielstandorten

Um die Plausibilität und Ergebnisse der gezeigten Methodik zu überprüfen, wurde diese an neun Beispielstandorten, verteilt über ganz Deutschland, angewendet. Hierzu wurden die Standorte so ausgewählt, dass 1. möglichst unterschiedliche Bodenarten des Oberbodens berücksichtigt wurden (vgl.

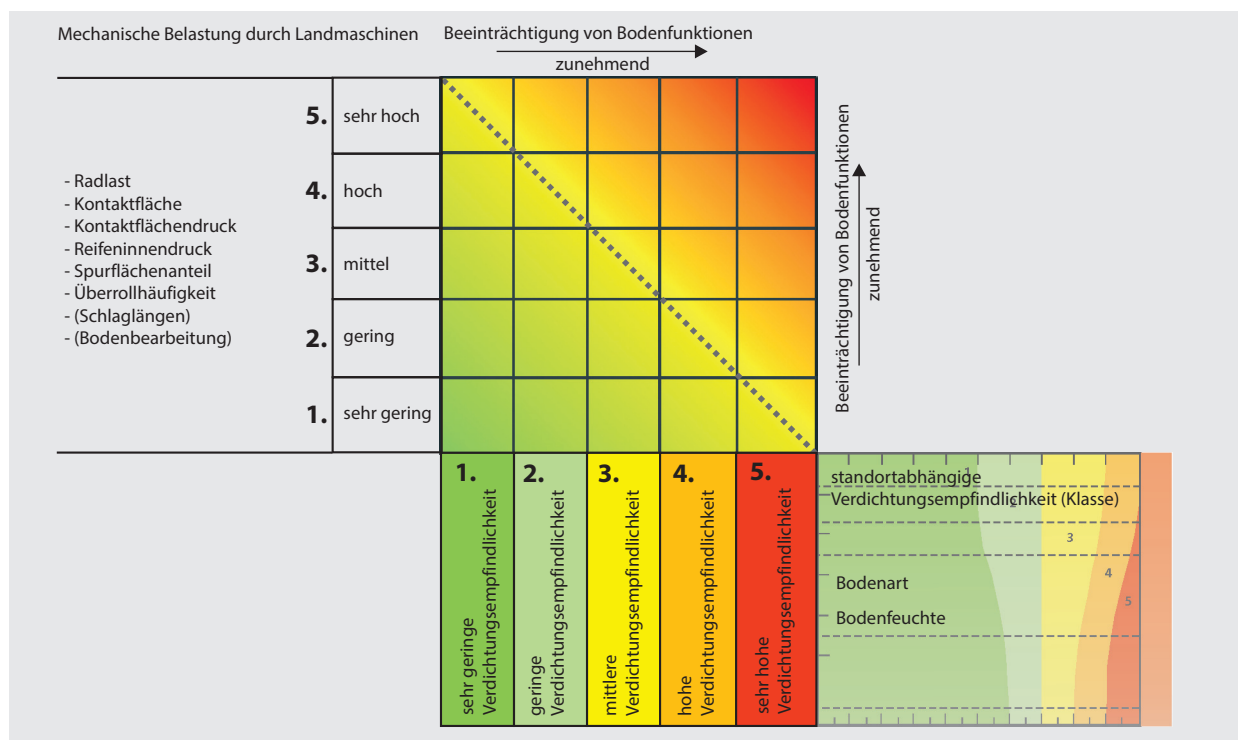


Abbildung 5

Schema der Verknüpfung der Verdichtungsempfindlichkeit mit der mechanischen Belastung durch landwirtschaftliche Maschinen

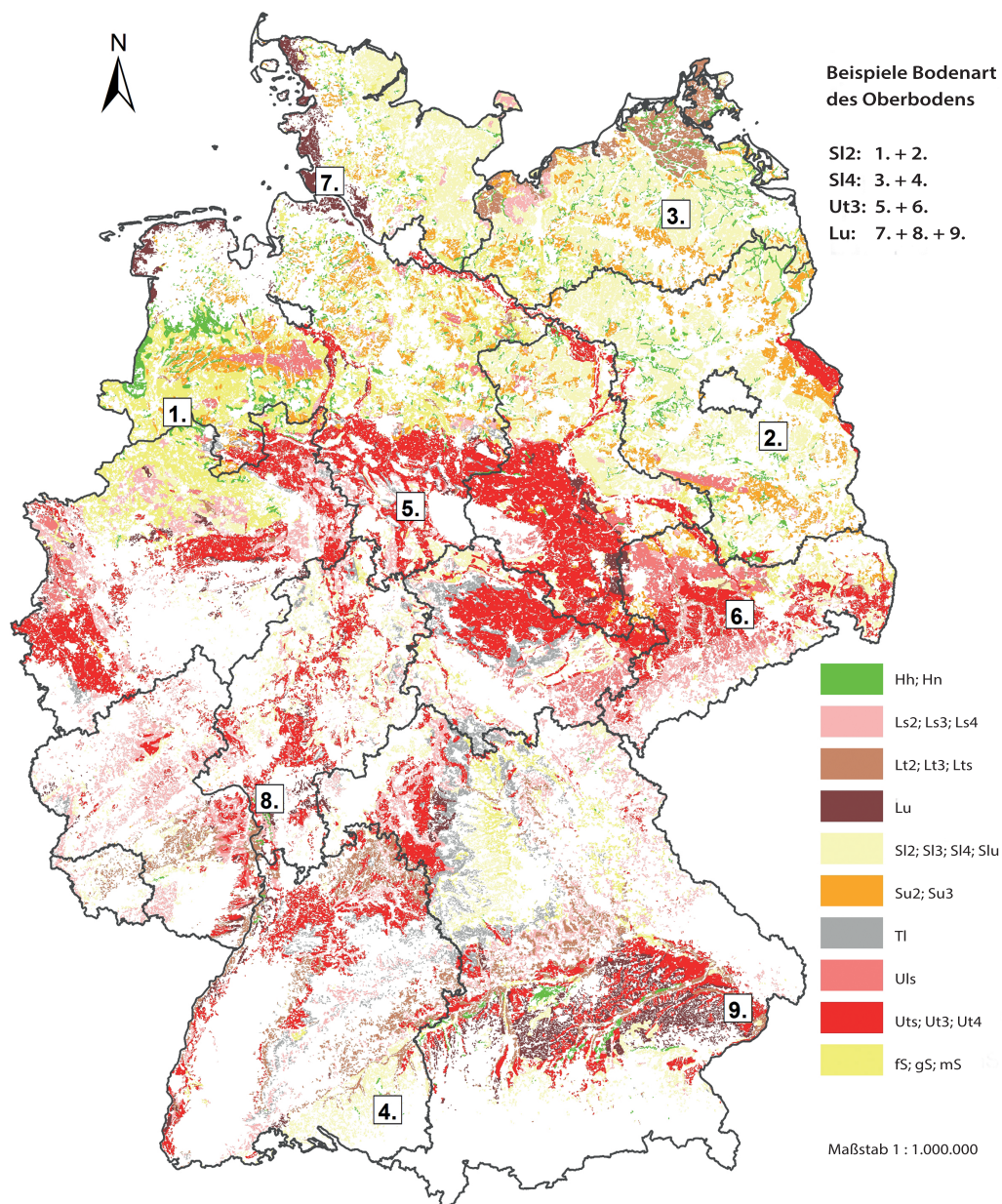


Abbildung 6

Beispielstandorte auf Grundlage der BÜK 1000N Ackernutzung (BGR, 2013a)

Abbildung 6 und Tabelle 4) und 2. mindestens je zwei Standorte die gleiche Bodenart aufweisen, jedoch in Regionen mit sehr unterschiedlicher Niederschlagshöhe und -verteilung liegen (vgl. Tabelle 3). Hierdurch sollte eine möglichst weite Spannweite an Bodenart – Klima – Variationen einbezogen werden. Abbildung 6 zeigt die Lage der Standorte und die zugehörigen Bodenarten des Oberbodens.

Die Standorte 1 und 2 sind schwach lehmige Sande (SI2) im westlichen Niedersachsen (bei Lingen (Ems)) und in Brandenburg, südöstlich von Berlin (bei Storkow). Die Standorte 3 und 4 sind stark lehmige Sande (SI4) in Mecklenburg-Vorpommern (bei Neubrandenburg) und im südlichen Baden-Württemberg (bei Bad Waldsee). Die Standorte 5 und 6 sind tonige Schluffe aus Löss im südlichen Niedersachsen (bei Adenstedt) und in Sachsen (bei Lommatzsch). Die

Standorte 7, 8 und 9 sind schluffige Lehme (Lu) aus unterschiedlichen Ausgangssubstraten. Auf Standort 7 liegt ein schluffiger Lehm (Lu) aus der Marsch in Schleswig-Holstein (bei Marne), auf Standort 8 ein schluffiger Lehm (Lu) über Festgestein in Hessen (bei Griesheim) und auf Standort 9 ein schluffiger Lehm (Lu) aus Löss im südöstlichen Bayern (bei Eggenfelden) vor. In nachfolgender Tabelle 3 sind die entsprechenden Jahres- und Monatsniederschläge der Beispielstandorte dargestellt.

Tabelle 4 zeigt die Charakteristik der Beispielstandorte mit den jeweiligen Daten zur Horizontierung und der Bodenart aus der BÜK 1000N. Hieraus wurden die Bodenarten für Ober- und Unterboden bestimmt und die entsprechenden Bodenarten zu den verfügbaren Bodenarten des DWD zugewiesen.

Tabelle 3

Mittlere Jahres- und Monatsniederschlagshöhen der Beispielstandorte für den Zeitraum 1971 bis 2000

Standort-Nr.	Lage bei ...	Niederschlag Jahreswerte (1971 bis 2000)	Monatsniederschläge (1971 bis 2000)												
			Jan.	Feb	Mrz.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.	
1.	Lingen (Ems)	MW	777	71	48	60	45	59	73	76	68	70	65	69	74
		Min.	582	6	2	7	1	8	12	13	15	5	15	6	16
		Max.	1084	160	136	146	94	127	157	176	154	172	246	125	171
2.	Storkow	MW	579	44	34	38	34	55	63	66	59	49	40	44	52
		Min.	387	1	4	9	1	3	6	10	11	8	5	1	9
		Max.	834	112	89	113	89	147	166	185	156	135	134	102	132
3.	Neubrandenburg	MW	584	49	34	41	36	48	64	61	54	51	46	46	52
		Min.	384	0	4	9	1	4	10	13	12	8	12	5	10
		Max.	776	135	92	91	80	135	130	279	159	144	183	103	110
4.	Bad Waldsee	MW	850	45	47	50	64	84	105	102	89	73	63	63	63
		Min.	627	2	9	13	11	14	32	19	14	26	7	1	9
		Max.	1072	118	103	144	158	187	232	212	191	164	143	182	159
5.	Adenstedt	MW	817	75	54	67	52	68	71	76	79	65	67	67	75
		Min.	620	0	10	5	5	5	20	18	19	4	12	0	32
		Max.	1150	154	110	143	126	170	124	197	135	184	193	136	188
6.	Lommatzsch	MW	714	36	33	37	46	56	71	75	64	47	44	41	44
		Min.	413	1	5	9	3	5	15	12	13	7	10	0	2
		Max.	938	142	72	149	104	166	171	200	235	126	178	133	147
7.	Marne	MW	821	67	42	52	39	54	79	83	78	85	86	81	75
		Min.	487	2	3	7	5	11	4	5	16	32	28	8	13
		Max.	1189	129	120	130	98	118	182	183	179	200	220	161	196
8.	Griesheim	MW	677	39	40	50	46	73	66	78	64	54	57	56	54
		Min.	448	3	9	10	13	13	18	18	2	11	15	9	7
		Max.	1034	101	101	119	109	243	137	188	171	117	153	93	170
9.	Eggenfelden	MW	848	53	43	60	55	83	101	110	100	68	54	61	60
		Min.	568	4	7	20	2	13	31	19	36	10	8	9	5
		Max.	1086	160	93	143	123	185	266	219	179	157	128	125	127

Tabelle 4

Charakteristik der Beispielstandorte und Zuordnung zu den Bodenarten und Gitterasterpunkten

Standort-Nr.	Lage bei ...	Bodenart	Bodenart DWD	Tiefe DWD	Oberboden			Übergang		
					Bodenart BÜK 1000	Tiefe BÜK 1 000	Horizont BÜK 1000	Bodenart BÜK 1000	Tiefe BÜK 1000	Horizont BÜK 1000
1.	Lingen (Ems)	SI2	SI2	0-30	SI2	0-10/10-20	Ap/Ae			
2.	Storkow	SI2	SI2	0-30	SI2	0-15/15/30	Ap/Ae			
3.	Neubrandenburg	SI4	SI4	0-30	SI4	0-25	Ap			
4.	Bad Waldsee	SI4	SI4	0-30	SI4	0-25	Ap	SI3	AI	25-40
5.	Adenstedt	Ut3	Ut3	0-30	Ut3	0-25	Ap	Aep	Ut4	30-40
6.	Lommatzsch	Ut3	Ut3	0-30	Ut3	0-25	Ap			
7.	Marne	Lu	Lu	0-30	Lu	0-25	Ap-Go			
8.	Griesheim	Lu	Lu	0-30	Lu	0-30	Ap	Bv	Ls3	30-40
9.	Eggenfelden	Lu	Lu	0-30	Lu	0-30	Ap	AI	Ut4	30-40

Standort-Nr.	Lage bei ...	Bodenart	Bodenart DWD	Tiefe DWD	Unterboden			Übergang		
					Bodenart BÜK 1000	Tiefe BÜK 1000	Horizont BÜK 1000	Bodenart BÜK 1000	Tiefe BÜK 1000	Horizont BÜK 1000
1.	Lingen (Ems)	SI2	SI2	30-60	fS	20-60	Bhs	fS	60-95	Bhs-Go
2.	Storkow	SI2	SI2	30-60	mS	30-200	Bs/Bv/C			
3.	Neubrandenburg	SI4	SI4 (Lu)	30-60	Ls3	25-50	AI	Lts	50-90	Bt
4.	Bad Waldsee	SI4	Lt3 (Lu)	30-60	Lt2	40-80	Bt			
5.	Adenstedt	Ut3	Ut3 (Lu)	30-60	Ut4	40-120	Bvt			
6.	Lommatzsch	Ut3	Ut3 (Lu)	30-60	Ut4	30-55	Sw			
7.	Marne	Lu	SI2 (SI4)	30-60	Su3	25-45	Go	Su2	45-105	Gro
8.	Griesheim	Lu	SI2	30-60	SI2	40-100	IIbV			
9.	Eggenfelden	Lu	Lt3 (Lu)	30-60	Tu3	40-80	Bt			

Für jeden Beispielstandort wurden aus der BÜK 1000N die Bodenart (nach KA5) und Horizontierung bestimmt und den entsprechenden Tiefenstufen zugeordnet (vgl. Abbildung 2 links: zeigt das vereinfachte Schema des Vorgehens). Aufgrund der unzureichenden Detailliertheit der Daten der BÜK 1000N bezüglich der Trockenrohdichte (TRD) und der Humusgehalte wird für die Beispielstandorte von einer mittleren Trockenrohdichte (TRD3) und einem geringen bis mittleren Humusgehalt (h2 bis 3) ausgegangen.

Die Ergebnisse zur Verdichtungsempfindlichkeit der gezeigten Beispielstandorte finden sich in Kap. 5.1. In Kap. 5.2 wird die mechanische Belastung für unterschiedliche landwirtschaftliche Mechanisierungen (z. B. Traktoren, Erntemaschinen, Transport) anhand umfangreicher Messdaten dargestellt. In Kap. 5.3 werden darauf aufbauend die Ergebnisse der Verknüpfung der Verdichtungsempfindlichkeit der Böden mit der mechanischen Belastung und die Ableitung von Befahrbarkeitstagen am Beispiel der Silomaisernte gezeigt.

5 Ergebnisse

5.1 Standort- und kulturartspezifische Verdichtungsempfindlichkeit von Böden

Die in Kap. 4.1 beschriebene Methodik wurde für die in Kap. 4.3 beschriebenen neun Beispielstandorte umgesetzt. Das Ergebnis sind standort- und kulturartspezifische Zeiträume unterschiedlicher Verdichtungsempfindlichkeit im langjährigen Mittel der Witterung. Diese werden für die einzelnen Tage der Kalendermonate als Säulenabschnitte dargestellt. Dabei wurden die Zeiträume zur besseren Übersichtlichkeit entsprechend Abbildung 4 farblich unterschieden.

Abbildung 7 zeigt die Tage mit unterschiedlicher Verdichtungsempfindlichkeit für die **Kulturart Silomais** im **Oberboden**. Die Darstellung erfolgt in Form gestapelter Säulen, daher werden nur Summen der Tage in der jeweiligen Klasse angezeigt. Rückschlüsse auf die Verhältnisse eines einzelnen Tages im jeweiligen Monat sind in

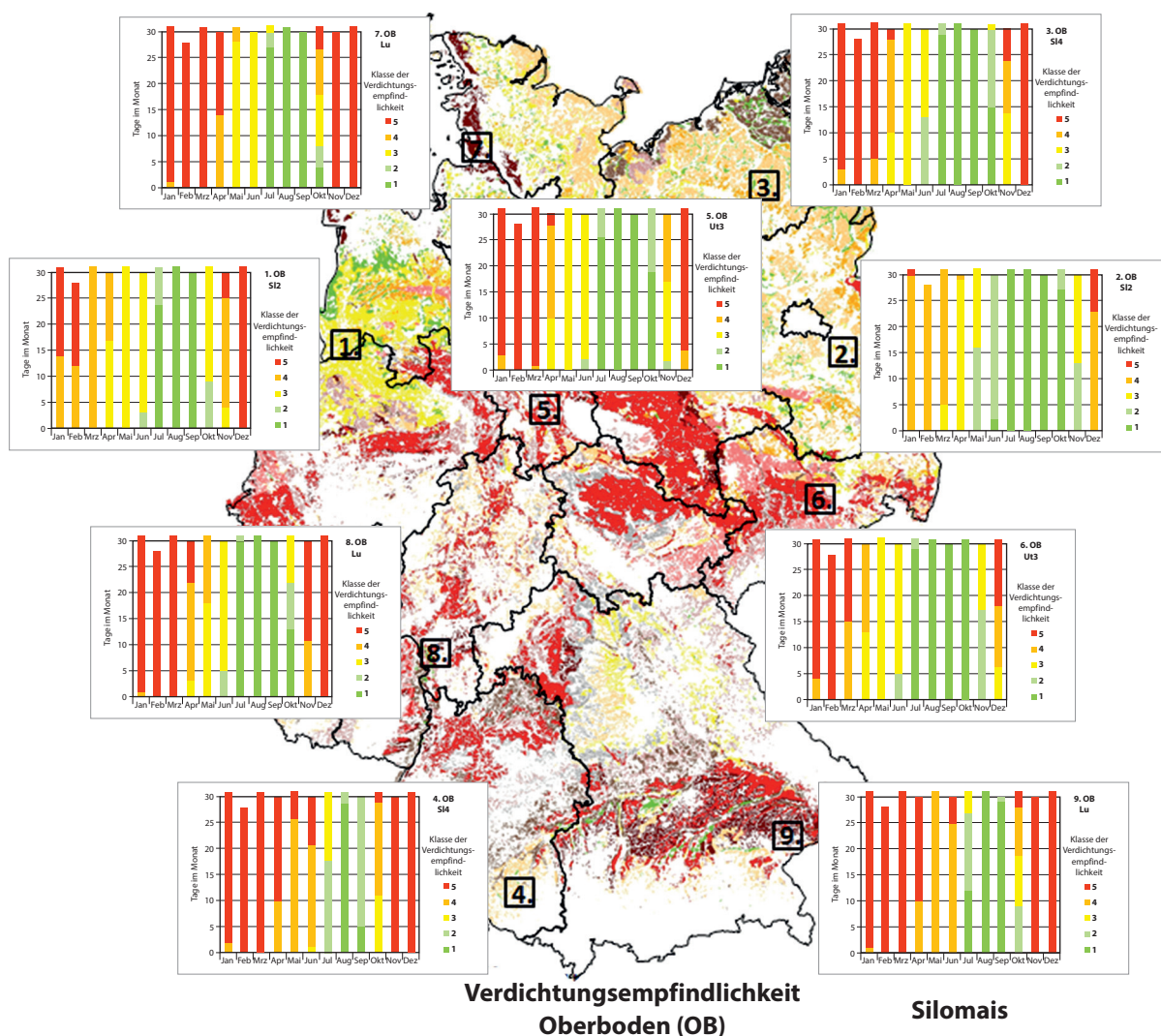


Abbildung 7

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5, sehr gering bis sehr hoch) des Oberbodens (OB) für Silomais an den Standorten 1 bis 9

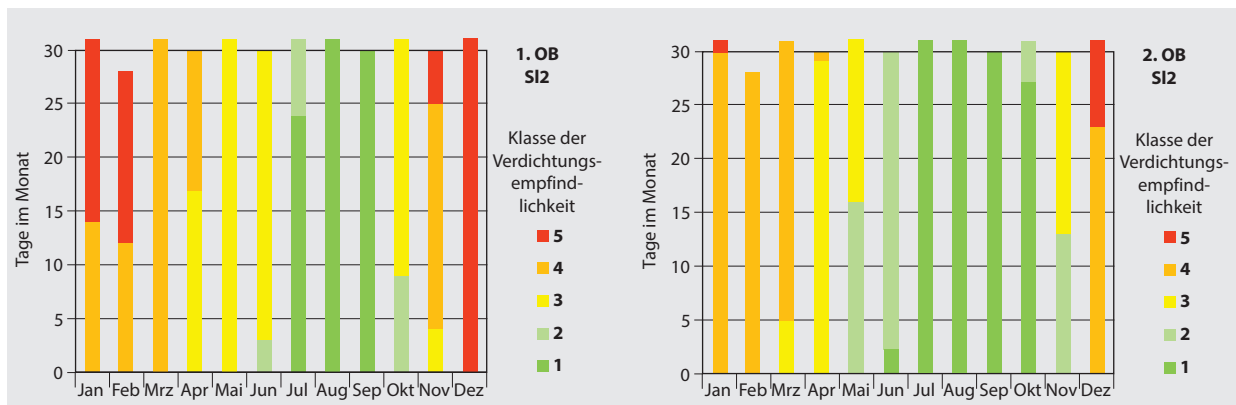


Abbildung 8

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5) des Oberbodens (OB) beim Anbau von Silomais an den Standorten 1 (links) und 2 (rechts)

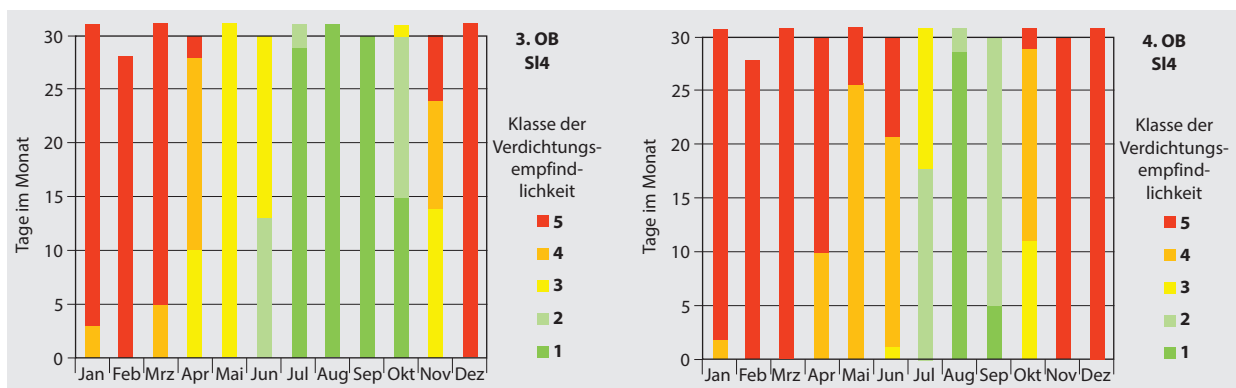


Abbildung 9

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5) des Oberbodens (OB) beim Anbau von Silomais an den Standorten 3 (links) und 4 (rechts)

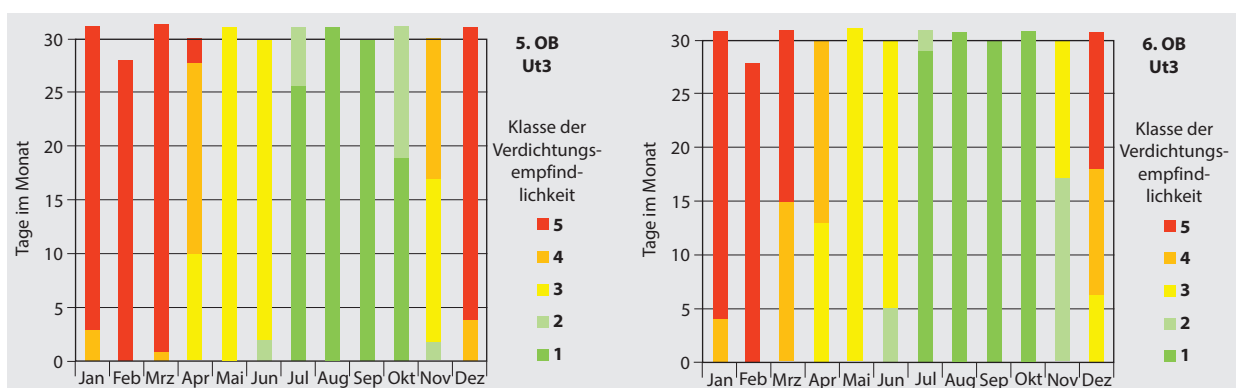


Abbildung 10

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5) des Oberbodens (OB) beim Anbau von Silomais an den Standorten 5 (links) und 6 (rechts)

dieser Darstellung nicht möglich, generelle Tendenzen können dennoch abgeleitet werden.

Am **Standort 1** (Lingen (Ems), Niedersachsen, Bodenart: SI2) besteht von Anfang November bis Anfang-Mitte April eine hohe bis sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeit. Von Juni bis Anfang-Mitte Oktober herrschen gute

Befahrungsbedingungen mit niedrigen bis sehr niedrigen Verdichtungsempfindlichkeiten vor.

Am **Standort 2** (Storkow, Brandenburg, Bodenart: SI2) bestehen im Vergleich dazu, aufgrund der geringeren Niederschläge, nur von Mitte-Ende November bis Mitte-Ende März hohe bis sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeiten. Im

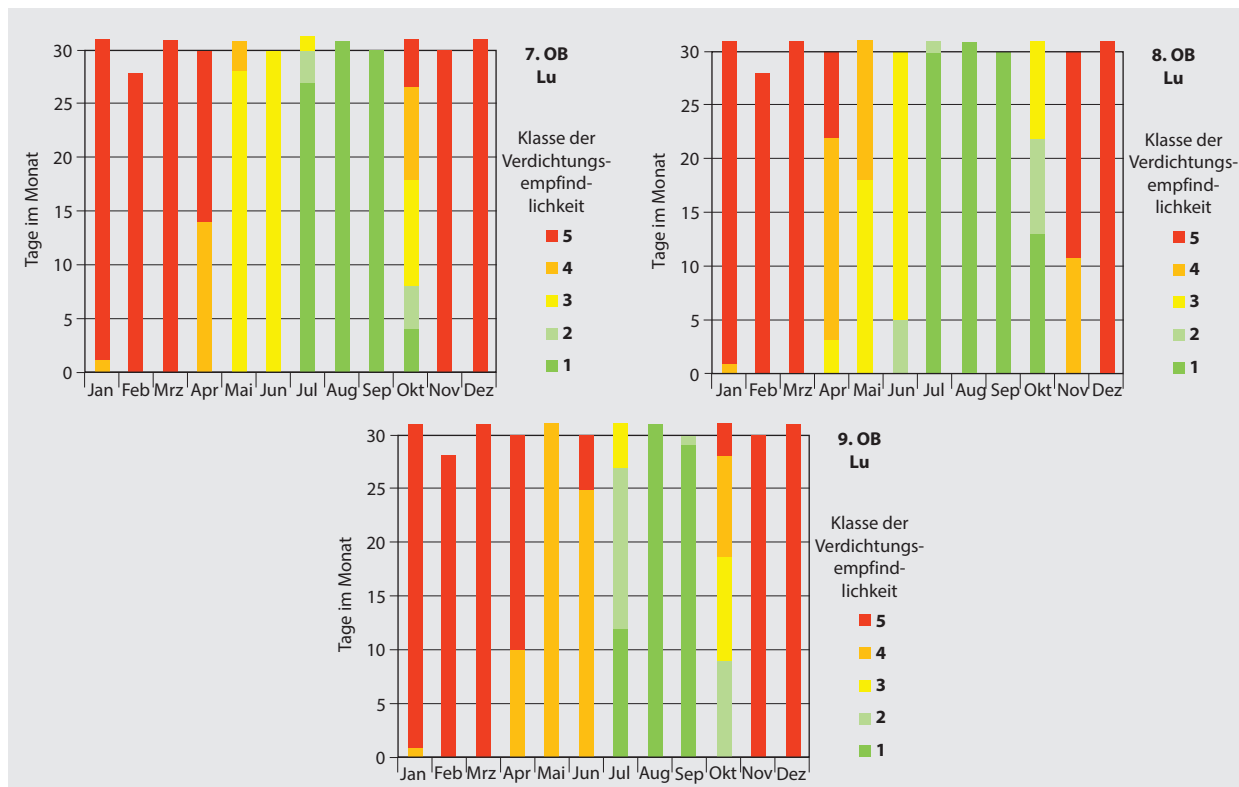


Abbildung 11

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5) des Oberbodens (OB) beim Anbau von Silomais an den Standorten 7 (links), 8 (rechts) und 9 (unten)

Großteil des Jahres (Anfang-Mitte Mai bis Mitte November) bestehen niedrige bis sehr niedrige Verdichtungsempfindlichkeiten.

Standort 3 (Neubrandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Bodenart: SI4) weist von Ende Oktober bis Mitte April hohe bis sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeiten auf. Von Juni bis Ende Oktober herrschen dagegen niedrige bis sehr niedrige Verdichtungsempfindlichkeiten vor.

Standort 4 (Bad Waldsee, Baden-Württemberg, Bodenart: SI4) zeigt, aufgrund der höheren Niederschläge (vgl. Tabelle 3), dagegen ein völlig anderes Bild. Hier herrschen von Mitte Oktober bis in den Juni hinein hohe bis sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeiten vor. Nur von Anfang-Mitte Juli bis Ende September bestehen niedrige bis sehr niedrige Verdichtungsempfindlichkeiten.

Standort 5 (Adenstedt, Niedersachsen, Bodenart: Ut3) weist von Mitte November bis Mitte April eine hohe bis sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeit auf, wohingegen von Ende Juni bis Anfang November niedrige, im Großteil dieses Zeitraums sogar sehr niedrige Verdichtungsempfindlichkeiten herrschen.

Standort 6 (Lommatsch, Sachsen, Bodenart: Ut3) zeigt eine ähnliche Verteilung, wobei geringe Verdichtungsempfindlichkeiten noch bis Mitte November vorherrschen und hohe bis sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeiten erst ab Anfang Dezember zu erwarten sind.

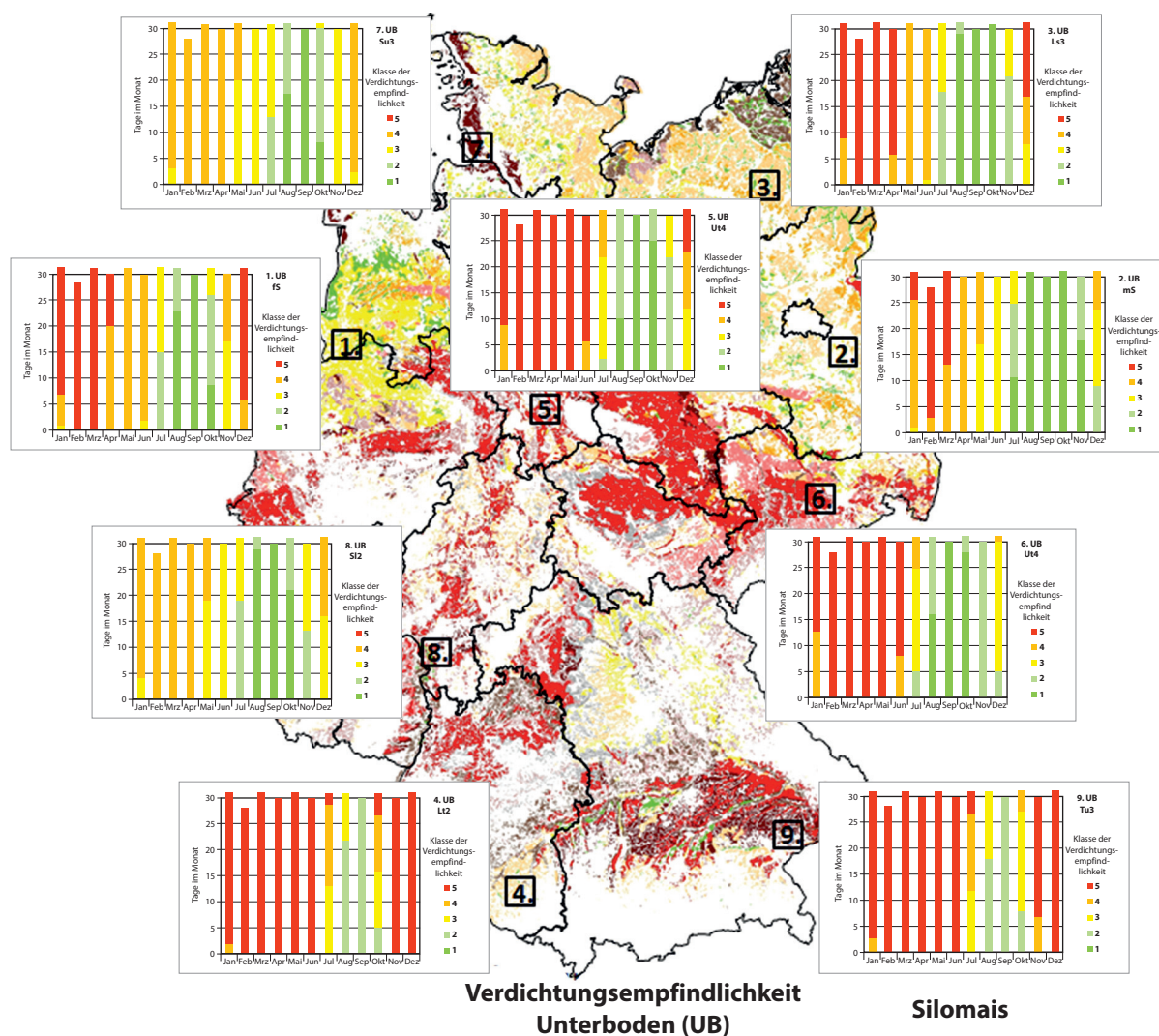
Die Standorte 7, 8 und 9 zeigen, aufgrund des höheren Tongehaltes und entsprechender Niederschlagsmengen, im

Großteil des Jahres hohe bis sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeiten. Auf **Standort 7** (Marne, Schleswig-Holstein, Bodenart: Lu, Marsch) herrschen lediglich von Anfang Juli bis Anfang-Mitte Oktober niedrige, z. T. auch sehr niedrige Verdichtungsempfindlichkeiten vor, auf **Standort 8** (Griesheim, Hessen, Bodenart: Lu, Festgestein) von Ende Juni bis Mitte-Ende Oktober. **Standort 9** (Eggenfelden, Bayern, Bodenart: Lu, Löss) zeigt von Juli bis Anfang-Mitte Oktober niedrige bis sehr niedrige Verdichtungsempfindlichkeit. Im Großteil des Jahres herrschen auf diesem Standort, aufgrund der sehr hohen Niederschlagsmengen, hohe bis sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeiten vor.

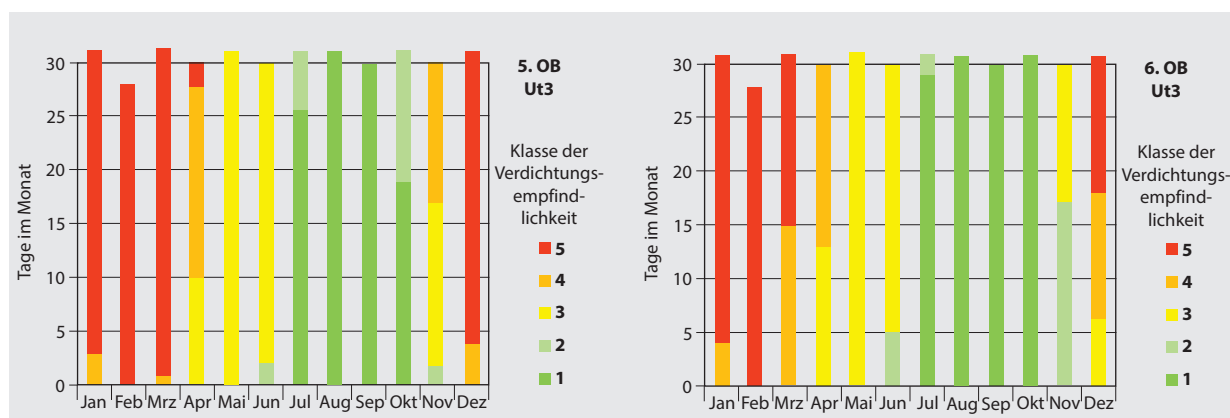
In Tabelle 10 (Anhang Kap.9) ist zusammenfassend die mittlere langjährige Anzahl der Tage im jeweiligen Monat in der Klasse der Verdichtungsempfindlichkeit (1 bis 5) für den Oberboden beim Anbau von Silomais auf den betrachteten Standorten (1 bis 9) dargestellt.

Im **Unterboden** zeigen sich im Vergleich dazu die Auswirkungen unterschiedlicher Bodenarten, Horizontierungen, Bodenfeuchteverläufe und Horizontunterschiede (vgl. Abbildung 12, Tabelle 4 und Tabelle 6). Auf **Standort 1** (Lingen (Ems), Niedersachsen, Bodenart: fS) bleibt der Unterboden noch bis Ende Juni feucht und damit verdichtungsempfindlich, befeuchtet jedoch im Herbst etwas langsamer und zeigt ab Mitte November wieder hohe bis sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeiten.

Auf **Standort 2** (Storkow, Brandenburg, Bodenart: mS) trocknet der Unterboden im Frühjahr dagegen etwas

**Abbildung 12**

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5, sehr gering bis sehr hoch) des Unterbodens (UB) für Silomais an den Standorten 1 bis 9

**Abbildung 13**

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5) des Unterbodens (UB) beim Anbau von Silomais an den Standorten 1 (links) und 2 (rechts)

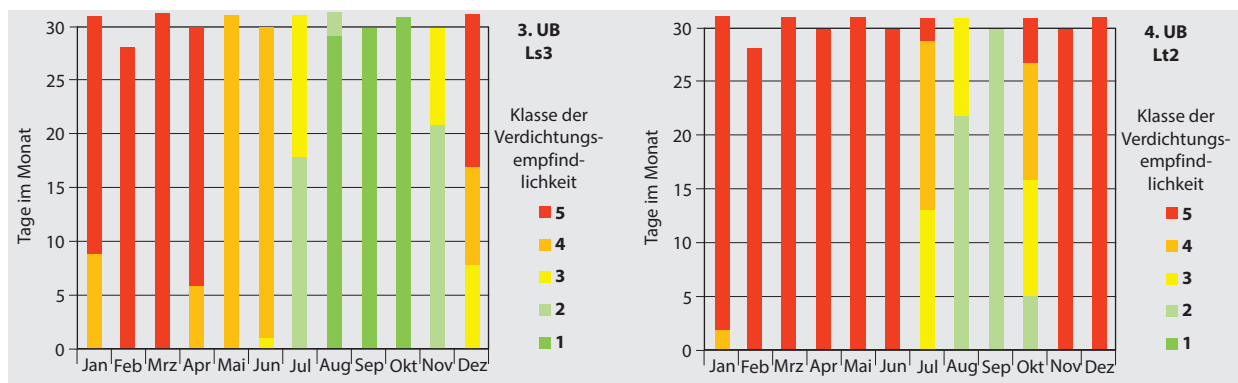


Abbildung 14

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5) des Unterbodens beim Anbau von Silomais an den Standorten 3 (links) und 4 (rechts)

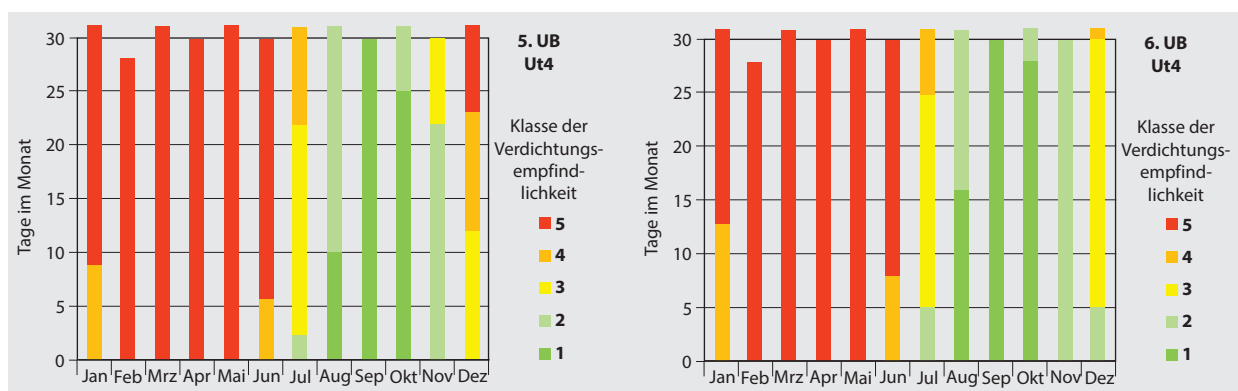


Abbildung 15

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5) des Unterbodens beim Anbau von Silomais an den Standorten 5 (links) und 6 (rechts)

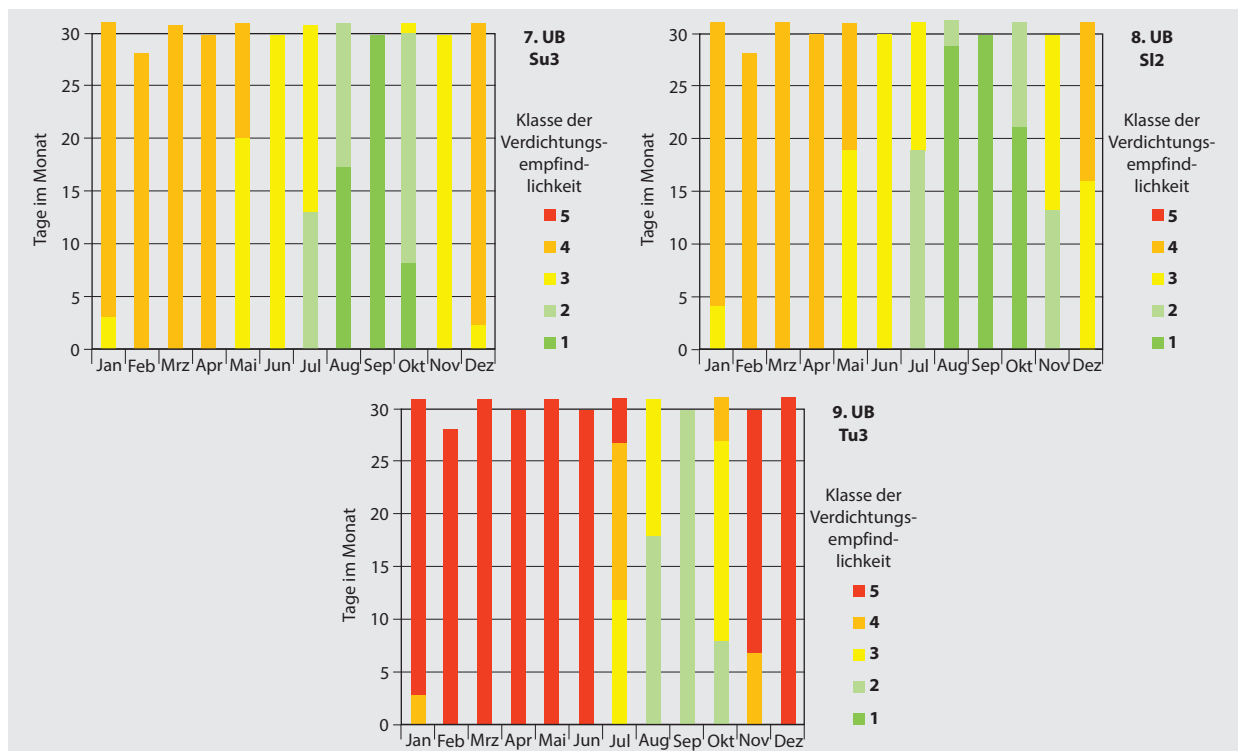


Abbildung 16

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5) des Unterbodens beim Anbau von Silomais an den Standorten 7 (links), 8 (rechts) und 9 (unten)

schneller ab, zeigt jedoch bis weit in den Dezember hinein noch geringe bis mittlere Verdichtungsempfindlichkeiten.

Bei den etwas tonigeren Substraten treten ähnliche Verläufe und Verschiebungen im Vergleich zum Oberboden auf (Abbildung 14 und 15). Lediglich die **Standorte 7 (Su3) und 8 (Sl2)** zeigen aufgrund des Substratwechsels zu sandigeren Substraten etwas geringere Verdichtungsempfindlichkeiten im Vergleich zum Oberboden v.a. im Herbst und Winter (Abbildung 16). Die Verschiebungen aufgrund der Durchfeuchtungsfront sind jedoch auch hier zu sehen.

Die Unterböden der sehr feuchten **Standorte 4 (Lt2) und 9 (Tu3)** trocknen, auch aufgrund der sehr tonigen Substrate, im Jahresverlauf nicht ausreichend ab und zeigen überwiegend hohe bis sehr hohe Verdichtungsempfindlichkeiten. Lediglich von Juli bis Oktober treten geringe bis mittlere Verdichtungsempfindlichkeiten auf. Die Ernte des Silomais sollte im Mittel der Jahre, aufgrund der geringen Verdichtungsempfindlichkeiten in diesem Zeitraum, auf diesen Standorten jedoch kein größeres Problem sein. Bei der Gülleausbringung zu Mais und der Bestellung im Frühjahr, sowie den nachfolgenden Pflegemaßnahmen ist jedoch erhöhte Vorsicht geboten. In feuchteren Einzeljahren kann es jedoch aufgrund des höheren Tongehaltes und Bodenfeuchten zu Gefährdungen des Bodens bei der Silomaisernte kommen.

In Tabelle 11 (Anhang Kap. 9) ist zusammenfassend die mittlere langjährige Anzahl der Tage im jeweiligen Monat in der Klasse der Verdichtungsempfindlichkeit (1 bis 5) für den Unterboden beim Anbau von Silomais auf den betrachteten Standorten (1 bis 9) dargestellt.

Diese Berechnungen wurden neben Silomais auch für die Kulturen Winterweizen, Sommerweizen und Zuckerrübe für die beschriebenen Standorte durchgeführt. Die entsprechenden Abbildungen finden sich im Anhang (Kap. 9, Abbildung 25 bis 30).

Die Ergebnisse zeigen, dass mit diesem Ansatz die Verdichtungsempfindlichkeit in Abhängigkeit der Bodenart und Bodenfeuchte im Jahresverlauf abgeschätzt werden kann. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Verdichtungsempfindlichkeit der Böden in Abhängigkeit der Bodenfeuchte im Jahresverlauf sehr stark schwankt. Daher macht die Einschätzung der Verdichtungsempfindlichkeit anhand einer einzigen Bodenfeuchte (z. B. der Feldkapazität hier 100%FK) keinen Sinn, da diese nur in einem Bruchteil des Jahres vorkommen kann. Vielmehr muss das jeweilige Zeitfenster der Befahrung in die Untersuchungen einfließen, um eine realistische Einschätzung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden zu erlangen. Im nachfolgenden Kap. 5.2. wird daher die mechanische Belastung durch unterschiedliche Technikvarianten abgeleitet und bewertet und in Kap. 5.3 der Verdichtungsempfindlichkeit des jeweiligen Bodens im jeweiligen Zeitfenster der Befahrung gegenübergestellt, um Aussagen über deren Gefährdungspotenzial bzw. Optimierungsvarianten ableiten zu können.

5.2 Bewertung der mechanischen Belastung durch landwirtschaftliche Maschinen

Zur Spezifizierung der mechanischen Belastung von Böden durch landwirtschaftliche Maschinen konnte auf einen umfangreichen Datensatz aus Feldmessungen und Messungen im Reifenprüfstand des Thünen Instituts für Agrartechnologie zurückgegriffen werden. Dieser wurde durch Feldmessungen der LfL Bayern, des IFZ Göttingen und weitere Literaturquellen ergänzt (u. a. Brunotte et al., 2007; Brunotte und Fröba, 2007; Koch et al., 2002; 2008; Brandhuber et al., 2010; Geischeder, 2011).

Aus diesen Daten wurde der mittlere Kontaktflächen- druck in Abhängigkeit von der Radlast ermittelt. Dieser ist in Abbildung 17 dargestellt. Aufgrund der großen Spannweite der Daten wurden diese weiter unterteilt in Radfahrwerke, wie Traktoren, Fahrzeuge mit Transportbereifung, Erntemaschinen und Bandfahrwerke z. B. am Rübenroder. Die höchsten mittleren Kontaktflächendrücke ($> 2,5$ bar) treten bei Transportfahrzeugen auf. Hier sind meist Reifen mit geringeren Querschnitten und kleineren Volumen montiert, die auch bei moderaten Radlasten (hier 4 bis 5 t) schon hohe mittlere Kontaktflächendrücke ($> 3,0$ bar) erzeugen können. Hier kommt es speziell auf eine Fahrwerksoptimierung und angepasste Reifeninnendrücke an. Auch im Bereich der Erntemaschinen treten einzelne höhere Werte hervor. Hierbei handelt es sich um Feldmessungen, bei denen suboptimale Kombinationen aus Reifen, Radlast und Reifeninnendruck gewählt wurden. Weiterhin fallen die Werte für die Bandlaufwerke auf, die auch bei hohen Radlasten (13,0 bis 16,5 t) mittlere Kontaktflächendrücke $< 1,5$ bar ermöglichen. Hierbei ist jedoch darauf hinzuweisen, dass mittlere Kontaktflächendrücke dargestellt sind, welche die gesamte Fläche des Bandlaufwerks als Aufstandsfläche einbeziehen. Druckspitzen z. B. durch die Bandlaufwerksrollen sind dabei nicht berücksichtigt. Gleiches gilt für die Reifen, bei denen der Anteil der Stollen und des Zwischenraumes an der Kontaktfläche nicht klar unterschieden werden kann, da je nach Einsinktiefe des Reifens Stollen und Zwischenbereiche tragen. Dennoch sollte man bei Radlasten $> ca. 12$ t generell besser auf Bandlaufwerke zurückgreifen, sofern diese sehr hohen Radlasten nicht vermieden werden können, da dann eine größere Aufstandsfläche genutzt werden kann.

Aus den Untersuchungen der einzelnen Fahrwerkskombinationen können, unter Berücksichtigung verschiedener Optimierungsvarianten, radlastabhängige Spannweiten und Bereiche des Kontaktflächendrucks abgeleitet werden (vgl. Abbildung 17, gestrichelte Linie). Hierbei wird nach Radlast gestaffelt ein maximaler Kontaktflächendruck angegeben, bei dem die gängigen Reifen und Fahrwerkskombinationen einbezogen werden und je nach Randbedingungen von einer weitgehenden Optimierung ausgegangen werden kann. Darüber hinaus lassen sich zusammen mit weiteren Parametern, wie z. B. bei der jeweiligen Maschine durch Fahrwerksausstattung, Überrollhäufigkeiten, Spurfächenanteil, Aussagen zur jeweiligen mechanischen Belastung ableiten. Diese können dann der standortspezifischen Verdichtungsempfindlichkeit von Böden gegenübergestellt werden (Kap. 5.3).

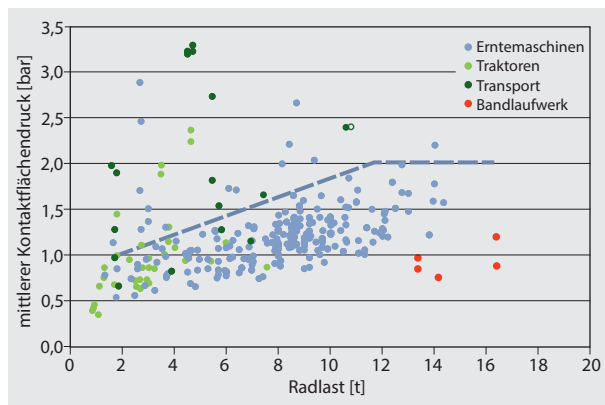


Abbildung 17

Mittlerer, radlastabhängiger Kontaktflächendruck für Erntemaschinen, Traktoren und Transportfahrzeuge auf Grundlage umfangreicher Messungen (u. a. Brunotte et al., 2007; Koch et al., 2002; 2008; Brandhuber et al., 2010; Geischeder, 2011)

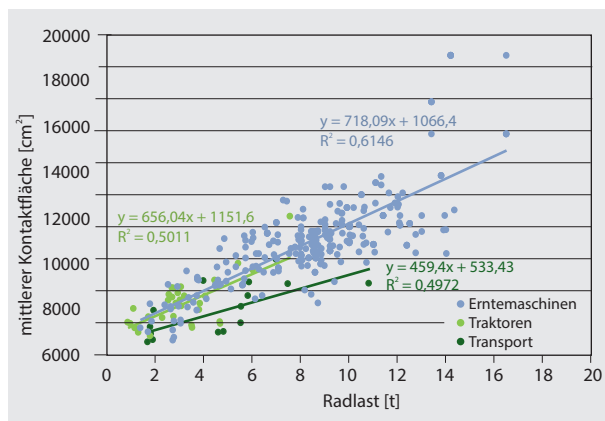


Abbildung 18

Mittlere, radlastabhängige Kontaktfläche für Erntemaschinen, Traktoren und Transportfahrzeuge auf Grundlage umfangreicher Messungen (u. a. Brunotte et al., 2007; Koch et al., 2002; 2008; Brandhuber et al., 2010; Geischeder, 2011)

In Abbildung 18 ist die mittlere Kontaktfläche der jeweiligen Radlast gegenübergestellt. Die Daten wurden auf Normalverteilung getestet (Kolmogorow-Smirnow 0,098, crit. value 0,134) und diese bestätigt. Die Bestimmtheitsmaße (R^2) der Regressionsgeraden liegen zwischen 0,49 und 0,61. In der Gegenüberstellung von Erntemaschinen-, Traktor- und Transportbereifung zeigt sich das grundlegende Problem der Transportbereifung. Bei dieser sind die Kontaktflächen bei gleicher Radlast im Vergleich zu Traktoren und Erntemaschinen generell kleiner und steigen mit zunehmender Radlast weniger stark an. Dies führt in der Konsequenz zu hohen Kontaktflächendrücken und einer hohen mechanischen Bodenbelastung insbesondere in der Krume. Aus den Untersuchungen wird deutlich, dass hohe Radlasten (in gewissen Grenzen) nicht per se als ungünstig zu beurteilen sind. Es muss vielmehr das gesamte Fahrwerk mit Maschinenspezifikationen bzw. die gesamte Verfahrenskette angepasst und

optimiert werden, um einen maximalen Bodenschutz zu gewährleisten. Am Beispiel der Transportbereifung wird deutlich, dass bei einer Befahrung des Ackers mit Reifeninnendruck für die Straßenfahrt (z. B. 3 bar) auch schon bei geringen bis mittleren Radlasten (z. B. 2 bis 6 t) hohe Kontaktflächendrücke ($> 2,5$ bar) entstehen können. Die Untersuchungen zeigen, dass der Transport auf dem Feld ohne angepasste Bereifung und angepassten Reifeninnendruck einen Problembereich hinsichtlich bodenschonenden Befahrens darstellt. Hier besteht zukünftig verstärkt Optimierungsbedarf. Das vorgestellte Konzept und Verfahren kann hierbei einen wichtigen Beitrag leisten.

Die mechanische Belastung unterschiedlicher landwirtschaftlicher Technik konnte aus einer Vielzahl von Prüfstand- und Feldmessungen (z. B. Kontaktflächen, Kontaktflächendruck, Bodendruck etc.) zu Maschinenparametern (wie z. B. Reifengröße, Reifeninnendruck, Radlast etc.) und verfahrensspezifischen Parametern (Überrollhäufigkeit, Spurflächenanteil etc.) abgeleitet werden. Die Ergebnisse der Verknüpfung der mechanischen Belastung mit der Verdichtungsempfindlichkeit der Böden und der Ableitung von Befahrbarkeitsagen werden im nachfolgenden Kapitel 5.3 am Beispiel der Silomaisernnte gezeigt.

5.3 Verknüpfung der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden mit der mechanischen Belastung durch landwirtschaftliche Maschinen

Zur Abschätzung der Verdichtungsgefährdung muss eine Verknüpfung der Verdichtungsempfindlichkeit mit der mechanischen Bodenbelastung durch die jeweilige Maschine bzw. die Verfahrenskette erfolgen. Hierbei müssen zwangsläufig die regionalen Einsatzzeiten der jeweiligen Maschine zur angebauten Kulturart berücksichtigt werden.

Zur Ableitung der mechanischen Belastung der jeweiligen Maschine bzw. Verfahrenskette für die Silomaisernnte wurde das in Kap. 4.2 beschriebene Verfahren zur Ermittlung des jeweiligen Belastungskennwertes auf drei unterschiedliche Technikvarianten angewendet (vgl. Abbildung 19). Zur besseren Verständlichkeit sind in den Abbildungen 20 und 21 die drei untersuchten Technikvarianten der Silomaisernnte illustriert und beschrieben.

Technikvariante 1 besteht aus dem Häcksler und der Transporteinheit (Traktor plus Häckselgutwagen), der das Häckselgut direkt zum Silo fährt. Dieser Häckselgutwagen verfügt nicht über eine Reifeninnendruckverstellanlage, deshalb muss er mit dem Reifeninnendruck für die Straßenfahrt (ca. $> 3,0$ bar) auch auf dem Feld fahren. Durch die hohen Reifeninnendrucke und eine 6-fache Überrollung kommt es zu hohen mechanischen Belastungen. Der „**Feldhäcksler mit Häckselwagen direkt zum Silo**“ (Technikvariante 1) erreicht dabei mit den Spezifikationen (max. 7 t Radlast, max. 3 bar Reifeninnendruck, max. 1,2 bar mittlerer Kontaktflächendruck bei 7-facher Überrollung und einem Spurflächenanteil von 33 %) einen Belastungskennwert von 0,58 und ist demnach in Belastungsklasse 4 (hoch) einzuordnen (vgl. Tabelle 2, Kap. 4.2 und rote Linie in Abbildung 19 und Abbildung 20 links).

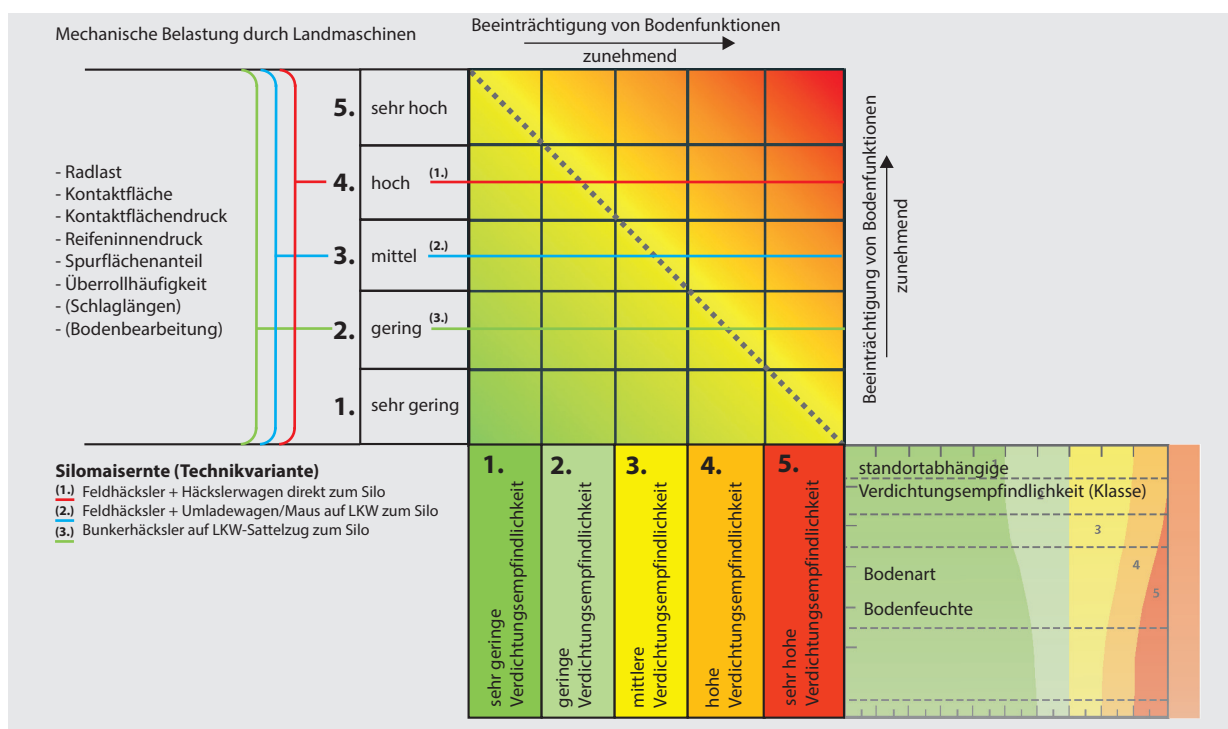


Abbildung 19

Schema der Verknüpfung der Verdichtungsempfindlichkeit mit der mechanischen Belastung durch landwirtschaftliche Maschinen am Beispiel der Silomaiserte (verändert nach Brunotte et al., 2015)



Abbildung 20

Technikvariante 1 (links: Häcksler + Häckslerwagen direkt zum Silo, rote Linie in Abbildung 19, Foto: Ortmeier, TI), Technikvariante 2 (rechts: Häcksler + Umladewagen auf LKW zum Silo, Trennung von Feld- und Straßenfahrt, blaue Linie in Abbildung 19, Foto: Brunotte, TI)

Bei **Technikvariante 2** werden durch das Überladen auf LKW am Feldrand Feld- und Straßenfahrt getrennt, so dass das Überladefahrzeug mit einem geringen Reifeninnendruck (ca. 1,5 bar) fahren kann und so die Bodenbelastung reduziert wird, obwohl der Boden auch hier 6-fach überrollt wird. Für das Verfahren „**Häcksler + Überladewagen auf LKW zum Silo**“ (Technikvariante 2), d. h. Trennung von Feld- und Straßenfahrt (max. 7 t Radlast, max. 1,6 bar Reifeninnendruck, max. 1,0 bar mittlerer Kontaktflächendruck bei 6-facher Überrollung und einem Spurflächenanteil von 33 %) ergibt sich

danach ein Belastungskennwert von 0,51. Technikvariante 2 wird somit in Belastungsklasse 3 (Mittel) eingeordnet (blaue Linie in Abbildung 19 und Abbildung 20 rechts).

Technikvariante 3 ist der Bunkerhäcksler. Das Häckselgut wird im Bunker des Häckslers transportiert und am Feldrand auf LKW umgeladen. Durch breite Bereifung und an den Acker angepassten Reifeninnendruck entstehen größere Reifenaufstandsflächen und der Kontaktflächendruck wird gesenkt. Das dritte Verfahren „**Bunkerhäcksler auf LKW-Sattelzug zum Silo**“ (Technikvariante 3: max. 8 t Radlast, max.



Abbildung 21

Technikvariante 3 (Bunkerhäcksler auf Straßentransportfahrzeug (LKW-Sattelzug/Traktor mit Häckselgutwagen) zum Silo, grüne Linie in Abbildung 19), (Foto: Claas, Harsewinkel)

1,5 bar Reifeninnendruck, max. 1,0 bar mittlerer Kontaktflächendruck bei 1-facher Überrollung (Hundegang) und einem Spurfächenanteil von 66 %) kommt auf einen Belastungskennwert von 0,44 und wird damit in Belastungsklasse 2 (gering) eingestuft (grüne Linie in Abbildung 19 und Abbildung 21). Diese Technikvariante ist hinsichtlich Bodenschonung die günstigste der betrachteten Varianten.

Hieraus lassen sich für bestimmte Einsatzzeiträume, z. B. bei der Silomaisern, für unterschiedliche Mechanisierungen Tage mit hoher bzw. niedriger Verdichtungsempfindlichkeit bzw. Tage mit hoher oder niedriger Verdichtungsgefahr (Befahrbarkeitstage) ableiten. Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse für die neun Beispielstandorte und die drei Technikvarianten für die Silomaisern im Zeitraum 01.09. bis 31.10. Angegeben ist die Anzahl der Befahrbarkeitstage für die jeweilige Technikvariante (vgl. Abbildung 19) bis zur jeweiligen

zulässigen Verdichtungsempfindlichkeitsklasse, berechnet aus dem Mittelwert der entsprechenden Bodenartenklasse (vgl. Abbildung 4). Die Werte in Klammern kennzeichnen die obere und untere Grenze der jeweiligen Bodenartenklasse und damit die bodenartbedingte Schwankungsbreite.

Es wird deutlich, dass die verfügbaren Befahrbarkeitstage sowohl zwischen den Standorten, als auch zwischen den Mechanisierungsvarianten schwanken. Beispielhaft sollen die Standorte 3 und 4 verglichen werden. In der Technikvariante 1 mit der höchsten mechanischen Belastung (Häcksler + Häckselwagen direkt zum Silo, Abbildung 19) stehen auf dem eher trockeneren Standort 3 im Zeitraum 01.09. bis 31.10. insgesamt 60 (± 1) Tage für eine bodenschonende Befahrung während der Ernte zur Verfügung. Auf dem sehr feuchten Standort 4 sind es mit ca. 30 (± 2) Tagen nur halb so viele. In der Technikvariante mit mittlerer Belastung

Tabelle 5

Befahrbarkeitstage bei der Silomaisern für die Technikvarianten 1 bis 3 und die Standorte 1 bis 9 für die Kulturart Silomais (01.09. bis 31.10.)

Oberboden			
insg. 61	Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.09. bis 31.10)		
Beispielstandorte	(1.) Feldhäcksler + Häckselwagen direkt zum Silo	(2.) Feldhäcksler + Umladewagen/ Maus auf LKW zum Silo	(3.) Bunkerhäcksler auf LKW-Sattel- zug zum Silo
SI2 1.	39 (± 2)	61	61
SI2 2.	61	61	61
SI4 3.	60 (± 1)	61	61
SI4 4.	30 (± 2)	41 (± 2)	59 (± 2)
Ut3 5.	61	61	61
Ut3 6.	61	61	61
Lu 7.	38 (± 2)	48 (± 3)	57 (± 3)
Lu 8.	52 (± 2)	61	61
Lu 9.	39 (± 2)	49 (± 3)	58 (± 3)

Unterboden			
insg. 61	Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.09. bis 31.10)		
Beispielstandorte	(1.) Feldhäcksler + Häckselwagen direkt zum Silo	(2.) Feldhäcksler + Umladewagen/ Maus auf LKW zum Silo	(3.) Bunkerhäcksler auf LKW-Sattel- zug zum Silo
fs 1.	56 (± 2)	61	61
mS 2.	61	61	61
LS3 3.	61	61	61
Lt2 4.	35 (± 2)	46 (± 3)	57 (± 3)
Ut4 5.	61	61	61
Ut4 6.	61	61	61
Su3 7.	60 (± 1)	61	61
SI2 8.	61	61	61
Tu3 9.	38 (± 2)	57 (± 3)	61

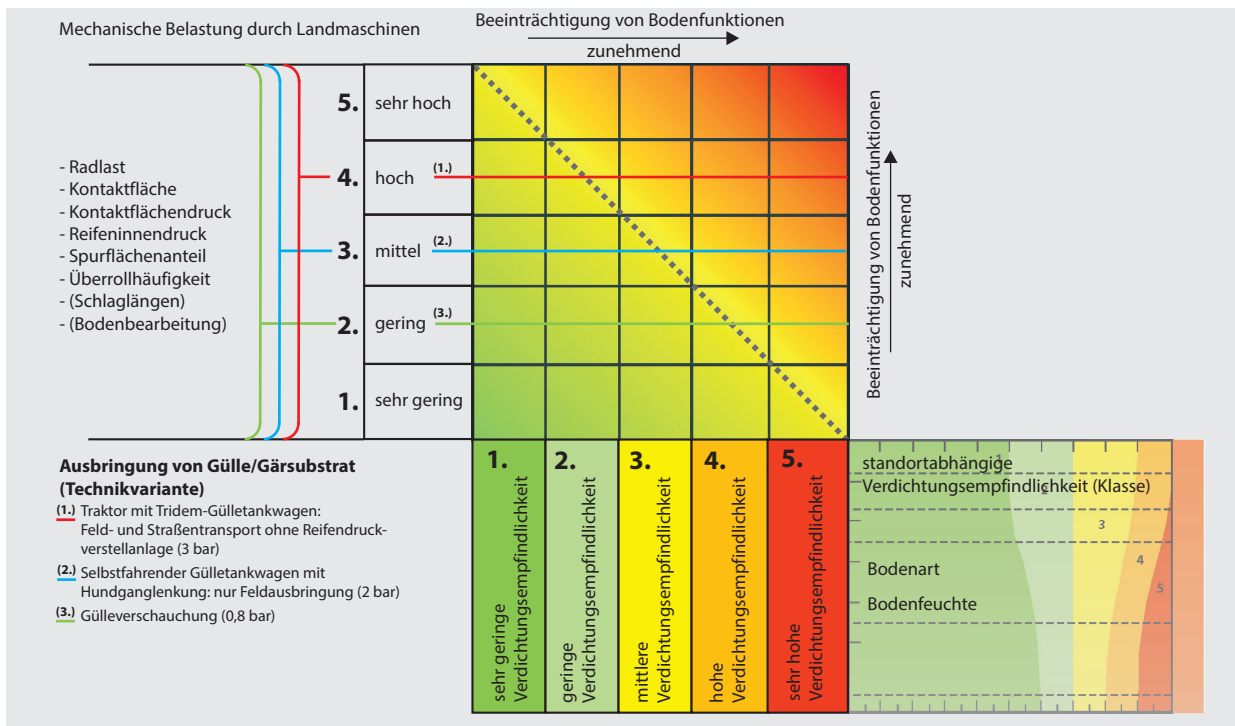


Abbildung 22

Schema der Verknüpfung von standortabhängiger Verdichtungsempfindlichkeit mit der mechanischen Belastung durch landwirtschaftliche Maschinen am Beispiel der Ausbringung von Gülle und Gärsubstrat

(Häcksler + Umladewagen auf LKW zum Silo, Trennung von Feld- und Straßenfahrt) sind es immer noch ca. 20 Tage weniger und in Technikvariante 3 bei geringerer mechanischer Belastung (Bunkerhäcksler auf LKW-Sattelzug zum Silo) stehen auf dem feuchten Standort 4 mit 59 (± 2) fast genauso viele Tage wie auf dem trockeneren Standort 3 (61 Tage) zur Verfügung.

Auch zwischen den Mechanisierungsvarianten treten deutliche Unterschiede auf. Auf Standort 4 stehen z. B. bei der Technikvariante 1 (Häcksler + Häckselwagen direkt zum Silo, Straßenluftdruck auf dem Feld, Abbildung 19 und 20 links) im Zeitraum 01.09. bis 31.10. nur die Hälfte der Tage (ca. 30 von insgesamt 61) zur Verfügung. Durch Trennung von Feld- und Straßenfahrt (Technikvariante 2: Häcksler + Umladewagen auf LKW zum Silo, Abbildung 19 und 20 rechts) sind es 11 Tage mehr. Bei Verwendung eines Bunkerhäckslers und damit Reduzierung der Bodenbelastung durch größere Bereifung und Reduzierung der Überrollhäufigkeit (Technikvariante 3) kann nahezu der gesamte Zeitraum genutzt werden (59 Tage).

Dies zeigt deutlich die Möglichkeiten auf, die sich durch angepasste Mechanisierung und Maschinenparameter für ein bodenschonendes Befahren ergeben. Weiterhin wird deutlich, dass die Mechanisierung unbedingt an die jeweiligen aktuellen Standortverhältnisse angepasst werden muss. So zeigt sich auf dem feuchten Standort 4, dass durch eine Verfahrensoptimierung sehr große Erfolge hin zu einem bodenschonenden Befahren erzielt werden können. Auf dem trockeneren Standort 3 mit generell geringerer

Verdichtungsempfindlichkeit in diesem Zeitraum treten zwischen den Technikvarianten auch geringere Unterschiede auf. Speziell auf Standorten mit hoher bzw. im Jahresverlauf stark schwankender Bodenfeuchte und damit Verdichtungsempfindlichkeit, sollte in verstärktem Maße auf eine Anpassung der Mechanisierung an die vorherrschenden Bodenverhältnisse geachtet werden, um auch hier eine bodenschonende Befahrung der Flächen zu realisieren.

Bei der Ausbringung von **Gülle und Gärsubstrat** (Abbildung 22 und Tabellen 6 und 7) wurden sowohl die Herbst- als auch die Frühjahrsausbringung untersucht. Hierbei wird deutlich, dass die Gülleausbringung im Spätwinter bzw. im zeitigen Frühjahr generell mit hohem Risiko für Bodenverdichtungen verbunden ist. Hohe Belastungen werden zu einer Zeit aufgebracht, in der eine hohe Bodenfeuchte und damit auch eine hohe Verdichtungsempfindlichkeit der Böden vorherrschen. Dies wird in der Zahl der Befahrbarkeitstage (vgl. Tabellen 6 und 7) und deren Vergleich zwischen Herbst- und Frühjahrsausbringung deutlich. Im Herbst (vgl. Tabelle 6) steht z. B. auf Standort 5 in den Varianten Güllselbstfahrer und Gülleverschlauchung im Zeitraum 01.09. bis 31.10. noch die komplette Zeit von 61 Tagen für die Gülleausbringung zur Verfügung. Gleiches gilt für Standort 6. In der Variante Traktor mit Tridemgülewagen sind es in diesem Zeitraum auf Standort 5 noch ca. 36 Tage und auf Standort 6 ca. 50 Tage. Im Frühjahr (Tabelle 7) gibt es auf beiden Standorten im Mittel der Jahre im Zeitraum 01.02. bis 30.04. (89 Tage) für die Variante Traktor mit Tridemgülewagen keinen Tag an dem die Gülle bodenschonend ausgebracht

werden kann. Die beiden anderen Varianten zeigen am Standort 5 im Oberboden 9 bzw. 24 Tage am Standort 6, 11 bzw. 39 Tage. Der Unterboden ist jedoch zu dieser Zeit auf beiden Standorten für eine Gülleausbringung zu feucht.

Dies zeigt deutlich die Problematik, die sich aus einer Verschiebung eines großen Teils der Gülleausbringung

vom Herbst in das Frühjahr aus Sicht des Bodenschutzes und der Befahrbarkeit ergibt. In einzelnen Jahren, in denen ein trockeneres Frühjahr vorherrscht, stehen mehr Befahrbarkeitstage zur Verfügung, in feuchten Jahren allerdings noch weniger. Die Verwendung mittlerer, langjähriger Daten soll die langfristige Planung unterstützen und mögliche

Tabelle 6

Befahrbarkeitstage für die Standorte 1 bis 9 und die Ausbringung von Gülle zu Winterweizen im Herbst (01.09. bis 31.10.)

Oberboden				Unterboden			
insg. 62	Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.07. bis 31.08)			insg. 62	Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.07. bis 31.08)		
Herbst	(1.)	(2.)	(3.)	Herbst	(1.)	(2.)	(3.)
Beispielstandorte	Traktor mit Tridem-Güلتankwagen: Feld- und Straßen-transport ohne Reifendruck-verstellanlage (3,0 bar)	Selbstfahrender Güلتankwagen mit Hundegang-lenkung: nur Feldaus-bringung (2,0 bar)	Gülle-verschlauchung (0,8 bar)	Beispielstandorte	Traktor mit Tridem-Güلتankwagen: Feld- und Straßen-transport ohne Reifendruck-verstellanlage (3,0 bar)	Selbstfahrender Güلتankwagen mit Hundegang-lenkung: nur Feldaus-bringung (2,0 bar)	Gülle-verschlauchung (0,8 bar)
SI2 1.	8 (± 2)	36 (± 2)	61	fs 1.	11 (± 2)	48 (± 2)	61
SI2 2.	57 (± 2)	61 (± 2)	61	mS 2.	61	61	61
SI4 3.	35 (± 2)	60 (± 1)	61	Ls3 3.	51 (± 2)	61	61
SI4 4.	0 (+2)	0 (+2)	34 (± 2)	Lt2 4.	0 (+2)	0 (+2)	9 (± 3)
Ut3 5.	36 (± 2)	61	61	Ut4 5.	37 (± 2)	61	61
Ut3 6.	56 (± 2)	61	61	Ut4 6.	50 (± 2)	61	61
Lu 7.	9 (± 2)	25 (± 2)	36 (± 2)	Su3 7.	14 (± 2)	61	61
Lu 8.	35 (± 2)	49 (± 3)	61	SI2 8.	31 (± 2)	61	61
Lu 9.	0 (+2)	2 (± 1)	26 (± 4)	Tu3 9.	0 (+2)	0 (+2)	18 (± 5)

Tabelle 7

Befahrbarkeitstage für die Standorte 1 bis 9 und die Ausbringung von Gülle zu Mais im Frühjahr (01.02. bis 30.04.)

Oberboden				Unterboden			
insg. 89	Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.02. bis 30.04)			insg. 89	Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.02. bis 30.04)		
Frühjahr	(1.)	(2.)	(3.)	Frühjahr	(1.)	(2.)	(3.)
Beispielstandorte	Traktor mit Tridem-Güلتankwagen: Feld- und Straßen-transport ohne Reifendruckver-stellanlage (3,0 bar)	Selbstfahrender Güلتankwagen mit Hundegang-lenkung: nur Feldausbringung (2,0 bar)	Gülle-verschlauchung (0,8 bar)	Beispielstandorte	Traktor mit Tridem-Güلتankwagen: Feld- und Straßen-transport ohne Reifendruckver-stellanlage (3,0 bar)	Selbstfahrender Güلتankwagen mit Hundegang-lenkung: nur Feldausbringung (2,0 bar)	Gülle-verschlauchung (0,8 bar)
SI2 1.	0 (+2)	17 (±2)	73 (±2)	fs 1.	0 (+2)	0 (+2)	20 (±2)
SI2 2.	0 (+2)	34 (±2)	89 (±2)	mS 2.	0 (+2)	0 (+2)	46 (±2)
SI4 3.	0 (+2)	14 (±2)	33 (±2)	Ls3 3.	0 (+2)	0 (+2)	6 (±3)
SI4 4.	0 (+2)	0 (+2)	10 (±2)	Lt2 4.	0 (+2)	0 (+2)	0 (+2)
Ut3 5.	0 (+2)	10 (±2)	29 (±4)	Ut4 5.	0 (+2)	0 (+2)	0 (+2)
Ut3 6.	0 (+2)	13 (±2)	45 (±5)	Ut4 6.	0 (+2)	0 (+2)	0 (+2)
Lu 7.	0 (+2)	0 (+2)	14 (±3)	Su3 7.	0 (+2)	0 (+2)	89
Lu 8.	0 (+2)	3 (±3)	22 (±4)	SI2 8.	0 (+2)	0 (+2)	89
Lu 9.	0 (+2)	0 (+2)	10 (±2)	Tu3 9.	0 (+2)	0 (+2)	0 (+2)

mittel- und langfristige Probleme aufzeigen. Bei der Diskussion um die Novellierung der Düngeverordnung sollten daher beim dargestellten Problembereich Gülleausbringung im Frühjahr verstärkt auch Bodenschutzaspekte mit einbezogen werden. Die Integration von Boden- und Gewässerschutz (Anforderungen der Düngeverordnung) gelingt letztlich nur mit ausreichender Güllelagerkapazität, die es erlaubt, die Gülle zu Zeiten des Pflanzenbedarfs auf tragfähigen Böden auszubringen.

Dieses Verfahren zur Ableitung der Befahrbarkeitstage wurde auch für die Getreideernte (Anhang Kap. 9, Abbildung 32, Winterweizen Tabelle 13, Sommerweizen Tabelle 14), die Zuckerrübenenernte (Abbildung 31, Tabelle 12), und die Kartoffelernte (Abbildung 33, Tabelle 15) angewendet. Die entsprechenden Abbildungen und Tabellen finden sich im Anhang (Kap. 9).

6 Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse anhand des Standortes Adenstedt

Um die ermittelten Werte für die Befahrbarkeitstage für unterschiedliche Zeiträume und unterschiedliche Kulturen auf ihre Plausibilität prüfen zu können, wurden im Jahr 2014 weiterführende Untersuchungen durchgeführt. Hierzu wurde auf Standort 5 (Adenstedt) ein mit Winterweizen bestellter Schlag vom Landwirt selbst täglich auf seine Befahrbarkeit hinsichtlich der zum jeweiligen Zeitpunkt verwendeten Technik eingeschätzt und in die 5 Klassen des Bewertungssystems eingestuft. Dies sollte die Plausibilität der Werte des vorgestellten Verfahrens überprüfen. Um Abweichungen im klimatischen Verlauf des Jahres 2014 von den 30-jährigen Mittelwerten berücksichtigen zu können, wurden die täglichen Bodenfeuchten für den Standort für das Jahr 2014 mit dem Modell AMBAV (Löpmeier, 2013) modelliert. Grundlagen waren Wetterstationsdaten der nächstgelegenen Wetterstation Alfeld, die ebenfalls bei den Berechnungen der 30-jährigen Mittel einbezogen wurden, und eigene Messungen am Standort. Weiterhin wurden die modellierten täglichen Bodenfeuchten des AMBAV Modells

als 30-jährige Mittel mit in die Untersuchungen einbezogen. Hieraus ergeben sich 3 Verfahren, die nachfolgend vergleichend gegenübergestellt werden sollen:

1. Reale Experteneinschätzung der Befahrbarkeit vor Ort,
2. Ermittlung der Befahrbarkeitstage auf Grundlage der modellierten Bodenfeuchtedaten des DWD aus dem Modell AMBAV für das Jahr 2014,
3. Ermittlung der Befahrbarkeitstage auf Grundlage der langjährigen modellierten Bodenfeuchtedaten des DWD aus dem Modell AMBAV des DWD (30-jährige Reihe)

Für die Verfahren 2. und 3. wurden die Tage im jeweiligen Monat den fünf Klassen der Verdichtungsempfindlichkeit nach der beschriebenen Methodik (vgl. Kap. 4) zugeordnet. Der Boden wurde am jeweiligen Tag als befahrbar eingeordnet, wenn an diesem Tag geringe (Klasse 2.) oder sehr geringe Verdichtungsempfindlichkeit (Klasse 1.) vorlag.

Abbildung 23 zeigt die Niederschlagsverteilung als Monatswerte des Jahres 2014 (rot) im Vergleich zum langjährigen mittleren Niederschlag (1989 bis 2013, schwarz). Weiterhin sind die Minimum- und Maximum-Werte des jeweiligen Monats für den langjährigen Zeitraum 1989 bis 2013 unterhalb der Monatsbezeichnungen angegeben. Der Jahresniederschlag des Jahres 2014 lag mit 767 mm genau 50 mm unter dem langjährigen Niederschlag von 817 mm.

Bei Betrachtung der einzelnen Monate zeigen sich Abweichungen des Jahres 2014 von den mittleren langjährigen Werten. So gibt es sehr trockene Monate mit geringen Niederschlägen, wie z. B. März und November, aber auch sehr feuchte Monate mit überdurchschnittlich hohen Niederschlägen, wie z. B. Mai und Juli. Weiterhin gibt es Monate mit Niederschlägen, die dem langjährigen Mittel entsprechen, wie z. B. Juni und Dezember.

In Abbildung 24 sind die Ergebnisse der täglichen Vor-Ort-Beurteilung des Landwirtes zur Befahrbarkeit (grün) und die entsprechenden täglichen Niederschläge (blau) dargestellt. Ein Wert der Befahrbarkeit von 2 bedeutet sehr gute Befahrbarkeit, ein Wert von 1 gute Befahrbarkeit. Es zeigt sich ein plausibler Zusammenhang zwischen hohen Tagesniederschlägen und der Befahrbarkeit des Standortes. Nach hohen Niederschlägen und damit Durchfeuchtung des Bodens ist

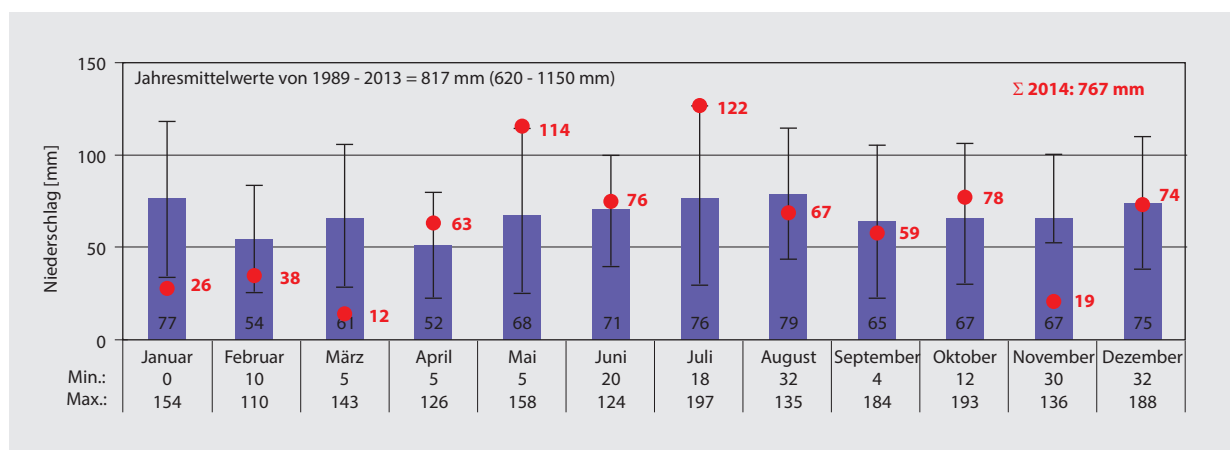


Abbildung 23

Niederschlagsverteilung für Standort 5 (Adenstedt) von 1989 bis 2013 im Vergleich zu den Monatswerten aus 2014

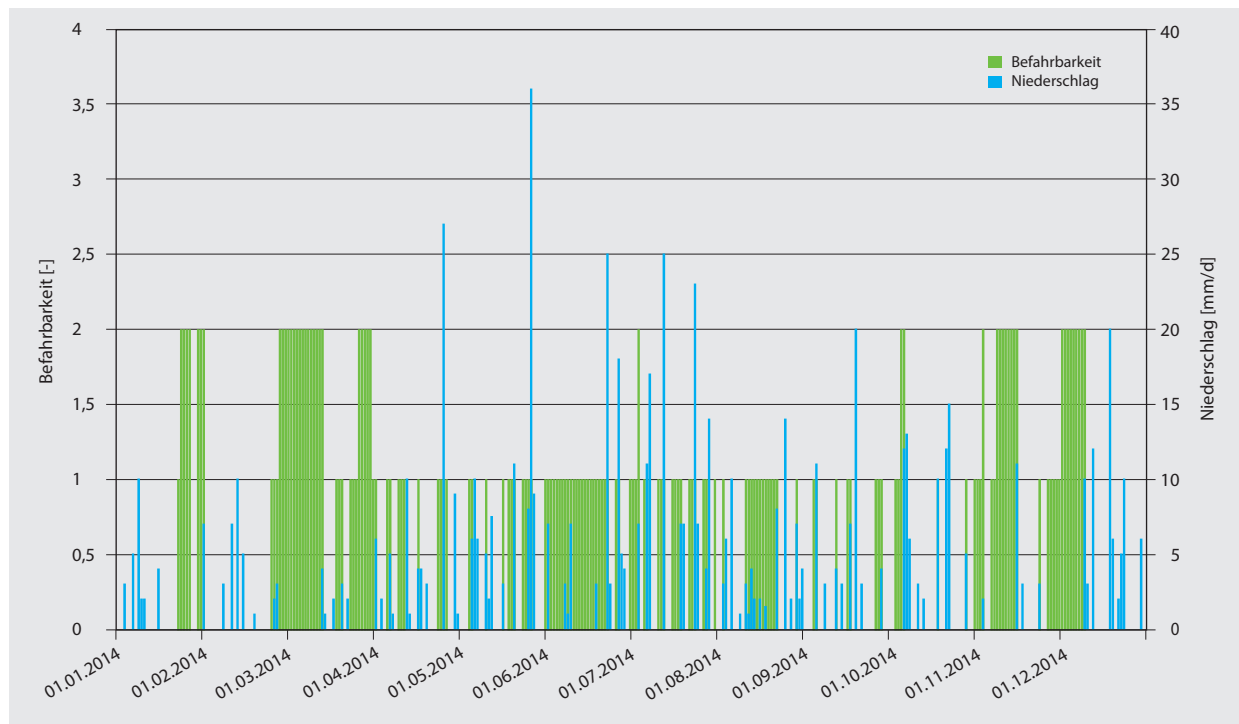


Abbildung 24
Niederschläge und Befahrbarkeitstage auf Standort 5 (Adenstedt) 2014

der Boden z. T. mehrere Tage danach nicht befahrbar und muss erst wieder abtrocknen, bevor er befahren werden kann. Im Sommer bei höheren Temperaturen und geringeren Bodenfeuchten kann diese Phase sehr kurz sein, im Herbst bei niedrigeren Temperaturen und höheren Bodenfeuchten auch länger.

Die in Abbildung 24 dargestellte erste Phase der Befahrbarkeit Ende Januar bis Anfang Februar ist auf vorherrschenden Bodenfrost zurückzuführen. Im zu Grunde liegenden Modell AMBAV wird Bodenfrost nicht in die Modellierung einbezogen, so dass es dadurch im Januar und Februar zu Abweichungen kommen kann. Weiterhin treten eine Reihe von Starkregenereignissen (≥ 20 mm/ 6 h, DWD, 2016) auf. Zwischen Anfang Mai und Ende Juli wurden im Jahr 2014 auf dem Standort insgesamt 5 Starkregenereignisse registriert.

In Tabelle 8 sind die ermittelten Befahrbarkeitstage nach den drei beschriebenen Verfahren dargestellt. Es zeigen sich generell recht gute Übereinstimmungen zwischen der realen Begutachtung der Befahrbarkeit und der Modellierung für das gleiche Jahr 2014. Zwischen den verschiedenen Monaten und den langjährigen Werten treten jedoch gewisse Unterschiede auf.

Im **Januar** und **Februar** finden sich in beiden Modellberechnungen (Verfahren 2. und 3.) keine Tage mit ausreichender Befahrbarkeit. Die Unterschiede zur realen Begutachtung treten durch die Berücksichtigung von Bodenfrost auf, der in den Modellbetrachtungen nicht integriert ist. Der **März** war im Jahr 2014 ein sehr trockener Monat. Die Berechnungen für das Jahr 2014 (Verfahren 2.) stimmen gut mit den realen Beobachtungen überein. Im Vergleich zu den langjährigen mittleren Werten treten aufgrund der sehr trockenen

Tabelle 8

Befahrbarkeitstage nach drei Verfahren (1. Reale Experteneinschätzung, 2. Wetterdaten DWD für 2014, 3. Langjährige Wetterdaten des DWD (30-jährige Reihe))

Winterweizen	Jan.	Feb.	Mrz.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.
(1.) Befahrbarkeitstage 2014 (real)	8	5	25	13	12	25	19	17	16	14	19	9
(2.) Befahrbarkeitstage 2014 (DWD - AMBAV)	0	0	23	18	9	25	17	17	14	12	10	2
(3.) Befahrbarkeitstage 1971 bis 2000 (DWD - AMBAV)	0	0	0	13	24	27	31	31	30	21	6	0
Tage im Monat	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31

Bedingungen jedoch größere Unterschiede auf. Für den **April** und auch den **Juni** als durchschnittliche Monate liefern beide Modellierungen im Vergleich zu den realen Beobachtungen gute Übereinstimmungen. Die Monate **Mai** und **Juli** waren im Jahr 2014 sehr feuchte Monate mit hohen Niederschlagssummen. Daher fallen auch die Befahrbarkeitstage im Vergleich zum langjährigen Mittel geringer aus. Die berechneten Werte für das Jahr 2014 stimmen jedoch sehr gut mit den Beobachtungen überein. Im **August, September** und **Oktober** zeigen sich ähnliche Tendenzen. Die ermittelten Befahrbarkeitstage für diese Monate stimmen gut mit den Beobachtungen überein, liegen jedoch beide deutlich unter den langjährigen mittleren Werten. Der **November** war im Jahr 2014 ein sehr trockener Monat. Daher liegen die Berechnungen ebenso wie die Beobachtungen der Befahrbarkeitstage über denen des langjährigen Mittels.

In Tabelle 9 sind in Ergänzung dazu die Befahrbarkeitstage nach Halbjahren aufgeteilt dargestellt. Es zeigt sich, dass die Berechnungen der Befahrbarkeitstage in der **Vegetationszeit** von April bis September des Jahres 2014 gut mit den Beobachtungen übereinstimmen. Im **Winterhalbjahr** treten jedoch, u. a. auch aufgrund der Berücksichtigung von Bodenfrost, modellbedingt Unterschiede auf. Für das gesamte Jahr liefern die langjährigen mittleren Werte der Befahrbarkeit eine gute Übereinstimmung mit den Beobachtungen, in den einzelnen Halbjahren treten jedoch, aufgrund des unterschiedlichen Witterungsverlaufes größere Abweichungen auf.

Tabelle 9

Anteile der Befahrbarkeitstage am jeweiligen Zeitraum nach 3 Verfahren (1. Reale Experteneinschätzung, 2. Wetterdaten DWD für 2014, 3. Langjährige Wetterdaten des DWD (30-jährige Reihe)); BFT = Befahrbarkeitstage, TiJ = Tage im Jahr

	Zeitraum Jan. bis Dez.			Zeitraum Apr. bis Sept.			Zeitraum Okt. bis März		
	BFT	TiJ	%	BFT	TiJ	%	BFT	TiJ	%
Winterweizen									
Befahrbarkeitstage 2014 (real)	182	365	50	102	183	56	80	182	44
Befahrbarkeitstage 2014 (DWD - AMBAV)	147	365	40	100	183	55	47	182	26
Befahrbarkeitstage 1971 bis 2000 (DWD - AMBAV)	183	365	50	156	183	85	27	182	15

Der Vergleich der Ergebnisse des hier beschriebenen Verfahrens zur Bestimmung der Befahrbarkeit mit realen Beobachtungen am Standort zeigt, dass das System plausible Ergebnisse mit guten Übereinstimmungen liefert. Größere Unterschiede zu den langjährigen mittleren Verhältnissen treten durch unterschiedliche Witterungsverläufe in Einzeljahren (hier 2014) und Einzelmonaten und die unterschiedliche Berücksichtigung von Bodenfrost auf. Die Abweichungen sind bei Betrachtung der Niederschläge ebenfalls plausibel. Wird das beschriebene Verfahren auf den

Witterungsverlauf des Einzeljahres (hier 2014) angewendet, liefert es gute Übereinstimmungen zu den realen Beobachtungen.

Es zeigt sich an diesen ersten Überprüfungen des Verfahrens, dass es zu einer guten Übereinstimmung mit realen Beobachtungen geführt hat. Es besteht jedoch die Notwendigkeit einer breiteren und überregionalen Plausibilisierung des Verfahrens. Zukünftig sollte das Verfahren daher Anwendung auf weitere Regionen finden und auf unterschiedlichen Skalen eingesetzt werden, um es weiter auf seine Plausibilität zu testen. Weiterhin haben das verwendete Bodenwasserhaushaltsmodell und die zu Grunde liegenden Bodendaten einen großen Einfluss auf die Ergebnisse. Daher sollen in weiteren Schritten andere Bodenwasserhaushaltsmodelle und Bodendaten Anwendung finden.

7 Zusammenfassung, weiteres Vorgehen und Ausblick

Aus den zur Verfügung stehenden bodenkundlichen Grundlagendaten (z. B. BÜK 1000N), dem Einsatz des Bodenwassermodells AMBAV und Expertenwissen konnten für typische Standorte Deutschlands die **Verdichtungsempfindlichkeit von Böden** (Ober- und Unterböden) im langjährigen Jahresverlauf und **verfügbare Befahrbarkeitstage** abgeleitet werden. Zur Abschätzung der Verdichtungsgefährdung erfolgte eine **Verknüpfung der standortabhängigen Verdichtungsempfindlichkeit (Tragfähigkeit) der Böden mit der Bodenbelastung** bzw. der Belastung durch die jeweilige Maschine bzw. die Verfahrenskette. Die mechanische Belastung konnte aus einer Vielzahl von Prüfstand- und Feldmessungen (z. B. Kontaktflächen, Kontaktflächendruck, Bodendruck), Maschinenparametern (wie z. B. Reifengröße, Reifeninnendruck, Radlast) und verfahrensspezifischen Parametern (Überrollhäufigkeit, Spurfächenanteil etc.) abgeleitet und der standortabhängigen Verdichtungsempfindlichkeit gegenübergestellt werden.

Zur Verknüpfung der standortabhängigen Verdichtungsempfindlichkeit von Böden mit der mechanischen Belastung durch Landmaschinen wurde ein Schema von Brunotte et al., (2015, verändert nach Chamen et al., 2003) verwendet und angepasst. Hieraus lassen sich **mittlere regionale Einsatzzeiten der jeweiligen Mechanisierungsverfahren** angeben und **Handlungsempfehlungen für den Maschineneinsatz im Sinne eines bodenschonenden Befahrens von Ackerflächen** ableiten.

Neben der Silomaisenernte wurde dies für die Mähdruschernte, Zuckerrübenenernte, Kartoffelernte und die Ausbringung von Gülle und Gärresten umgesetzt.

Mit diesem **Ansatz zur Bewertung der Verdichtungsempfindlichkeit von ackerbaulich genutzten Böden** in Deutschland können regionale Befahrbarkeitstage abgeleitet werden. Die Kombination mit praxisüblicher Maschinenteknik und Verfahrensketten macht die **Ableitung von schlüssigen und praxistauglichen Empfehlungen für ein bodenschonendes Befahren von Ackerflächen** möglich und gibt so dem Landwirt konkrete Lösungsvorschläge an

die Hand. Dieses System wurde in Abstimmung mit einer Expertengruppe der Bodenspezialisten der Bundesländer und einer KTBL Arbeitsgruppe zu verfügbaren Feldarbeitstagen entwickelt und abgestimmt. Weiterhin wurde ein erweiterter Kreis mit Experten aus unterschiedlichen Bundesländern zur Plausibilitätsprüfung der Ergebnisse und des Konzeptes mit einbezogen. Der Vergleich mit realen Beobachtungen zur Befahrbarkeit auf einem Standort zeigt, dass das vorgestellte Verfahren plausible Werte liefert.

Die Ausarbeitung und Angabe von z. B. regionalen Befahrbarkeitstagen in den wichtigsten Zeitspannen auf Grundlage von Klimadaten sind für den Landwirt/Lohnunternehmer eine wertvolle Hilfe, Maschineninvestitionen, -auslastungen und Einsatzzeiten besser zu planen und somit eine situationsabhängige Anpassung der Mechanisierung (Maschine, Fahrwerk, Belastung) an die jeweiligen vorherrschenden Bodenverhältnisse umzusetzen. Somit existiert ein konkreter Lösungsvorschlag zur „Anpassung der mechanischen Belastung von Maschinen an die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden“. Dies ist für die Landmaschinenindustrie und die praktische Landwirtschaft eine wichtige Hilfestellung, nicht nur für die mittel- bis langfristige Investitionsplanung, sondern auch für die Umsetzung eines nachhaltigen Bodenschutzes bei der Befahrung von Ackerflächen.

Das hier entwickelte Konzept zur **Anpassung des Maschineneinsatzes an die Verdichtungsempfindlichkeit von Böden** stellt daher ein wichtiges Managementinstrument moderner Landbewirtschaftung dar. Die aus Verdichtungsempfindlichkeit und mechanischer Belastung abgeleiteten regionalen **Befahrbarkeitstage** dienen auf Betriebsebene der Planung von Investitionen und dem Einsatz in der Erntekampagne. Langfristig soll eine **Online-Anwendung** entwickelt werden, bei der sowohl Wettervorhersagedaten der regionalen Wetterstation als auch betriebsindividuelle Maschinendaten eingegeben werden, um somit eine standortspezifische Einsatzplanung zu ermöglichen.

Während auf der **Planungsebene** der potenzielle Einsatz vorbereitet wird, wird auf der **Schlagebene** über den tatsächlichen Einsatz entschieden. Dies geht nur vor Ort mit Instrumenten wie z. B. der „**Feldgefügeansprache**“. Mit dem Spaten wird ein kleines Profil ausgehoben, um Bodenstruktur und -feuchte zu kontrollieren. Sensorik aus der Forschung hilft während der Befahrung z. B. Bodensetzung punktuell und Spurtiefe online zu erfassen. So hat der Maschinenführer permanent eine **Anzeige zur Beobachtung der Bodenzustände** und kann ggf. Fahrzeugparameter bzw. ganze Arbeitsketten anpassen oder ändern.

Teure Spezialmaschinen fordern aus Rentabilitätsgründen hohe **Auslastungsgrade**. Zählt die Erhaltung der **Bodenfruchtbarkeit** mit zu den prioritären Zielen der Landbewirtschaftung, kann sich der Einsatz nicht ausschließlich nach der technischen Machbarkeit z. B. beim Ernten richten. Einerseits müssen Zeitfenster eingebaut werden, in denen die Maschinen nach hohen Niederschlagsmengen pausieren. Andererseits müssen Arbeitsketten umstrukturiert werden können, um das Maß der Bodenschonung zu erhöhen. Hier sind Forschung und Beratung stark gefordert, denn erst wenn der monetäre Nutzen z. B. aus einem Überladen der

Maissilage am Feldrand auf LKWs beziffert wird, kann mit einer Akzeptanzsteigerung in der Praxis gerechnet werden. Den **Nutzen** aus Maßnahmen zum Bodenschutz und zur Bodenschonung zu monetarisieren (z. B. KTBL, 2011; 2013), ist die Herausforderung der nächsten Jahre.

Das vorgestellte Verfahren soll zukünftig in dem vom BMBF im Rahmen des BonaRes-Forschungsprogramm geförderten Projektes SOILAssist (Nachhaltige Sicherung und Verbesserung von Bodenfunktionen durch intelligente Landbewirtschaftung) einer weiteren Plausibilitätsprüfung für unterschiedliche Regionen, unter Einbeziehung und Prüfung von Einzel- und Extremjahren (trocken/feucht) unterzogen werden. Um die Einflüsse modellimmanenter Voraussetzungen und Festlegungen zu prüfen, den Modellfehler in den Ausgabeparametern und skalenbedingte Unterschiede zu verifizieren, ist die Einbindung weiterer Bodenwasserhaushaltsmodelle und Bodendaten auf unterschiedlichen Maßstabsebenen geplant. Darüber hinaus werden zukünftig weitere Technik- und Befahrungsvarianten wie z. B. bei der Ausbringung von Dünger und Pflanzenschutzmitteln, in das System integriert. Um die Verknüpfung der Befahrbarkeit mit der Bearbeitbarkeit des Bodens bei unterschiedlicher Bodenfeuchte für eine Abschätzung des Zeitraums einer optimalen Bodenbearbeitung zu realisieren, ist ein ergänzendes Verfahren zur Bestimmung der Bearbeitbarkeit von Böden derzeit in Entwicklung.

Literatur

- AG Boden (1994) Bodenkundliche Kartieranleitung. Stuttgart : Schweizerbart, 392 p
- AG Boden (2005) Bodenkundliche Kartieranleitung. Stuttgart : Schweizerbart, 438 p
- aid (2015) Brunotte J, Schmidt W, Brandhuber R, Busch M, Honecker H, Bug J, Breitschuh T, Schrader S, Weyer T, Vorderbrügge T, von Chappuis A, Fröba N, Höppner F, Löber M, Mosimann T, Ortmeier B, List M (2015) Gute fachliche Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz. Bonn : AID, 118 p, AID 3614
- ATV-DVWK (2002) Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden : Teil 3: Methoden für eine nachhaltige Bodenbewirtschaftung. Hennef : GFA-Ges zur Förderung der Abwassertechnik, 27 p
- BAFU, BLW (2013) Bodenschutz in der Landwirtschaft : ein Modul der Vollzugshilfe Umweltschutz in der Landwirtschaft. Bern : BAFU, 59 p, Umwelt-Vollzug 1313
- Bakker DM, Davis RJ (1995) Soil deformation observations in a vertisol under field traffic. Austral. J. Soil Res. 33:817-832.
- BBodSchG – Bundes-Bodenschutzgesetz (1998) Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten. Bundesgesetzblatt: Teil 1 / Bundesministerium der Justiz (16):502
- BBodSchV – Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (1999) Verordnung zur Durchführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes. Bundesgesetzblatt: Teil 1 / Bundesministerium der Justiz (36):1554
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2013a) Nutzungs-differenzierte Bodenübersichtskarte 1:1.000.000 (BÜK 1000 N) [online]. Zu finden in <<http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Projekte/Informationsgrundlagen-abgeschlossen/BUK1000N/BUK1000N.html>> [zitiert am 25.11.2013]
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2013b) Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK 200) [online]. Zu finden in <<http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Projekte/Informationsgrundlagen-laufend/BUK200/BUK200.html>> [zitiert am 25.11.2013]

- Blume H-P (1968) Stauwasserböden : vergleichende Untersuchungen über Entstehung und Standorteigenschaften von Waldböden mit und ohne Wasserstau und zugleich ein Beitrag zur Kenntnis der Böden Baden-Württembergs, Ostholsteins sowie der Dänischen Inseln. Stuttgart : Ulmer, 242 p, Arb Univ Hohenheim (Landwirtsch Hochschule) 42
- BMVEL (2001) Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtung und Bodenerosion. Bonn : BMELV, 105 p
- Bolling I, Söhne W (1982) Der Bodendruck schwerer Ackerschlepper und Fahrzeuge. *Landtechnik* 37:54-57
- Botta GF, Jorajuria CD, Draghi TL (1999) Soil compaction during secondary tillage traffic. *Agro-Ciencia* 15:139-144
- Botta GF, Tolon Beccerra A, Bellora Tourn F (2009) Effect of the number of tractor passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes. *Soil Tillage Res* 103:381-386
- Boussinesq J (1885) Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques. Paris : Gauthier-Villais, 721 p
- Braden H (1995) The model AMBETI : a detailed description of a soil-plant-atmosphere model. Offenbach : DWD, 117 p, Ber Dtschen Wetterdienstes 195
- Brandhuber R (2005) Bodengefüge : Status und Veränderungen. *SchrR Bayer Landesanst Landwirtsch* 8:57-60
- Brandhuber R, Demmel M, Geischeder R (2010) Bodengefügeschutz mit optimierter Fahrwerkstechnik. *SchrR Landesamt Umwelt Landwirtsch Geol* 15:38-45
- Brunotte J, Nolting K, Lorenz M, Sommer C, Isensee E (2007) Befahrbarkeits-sensor : flexibles Einsatzmanagement und Bodenschonung während der Ernte. *Zuckerrübe* 56(5):246-249
- Brunotte J, Fröba N (2007) Schlaggestaltung : kostensenkend und bodenschonend. Darmstadt : KTBL, 178 p, KTBL-Schr 460
- Brunotte J, Lorenz M, Sommer C, Harrach T, Schäfer W (2008) Verbreitung von Bodenschadverdichtungen in Südniedersachsen. *Ber Landwirtsch* 86(2):262-284
- Brunotte J, Brandhuber R, Vorderbrügge T (2015) Vorsorge gegen Bodenverdichtung. In: Henke W (ed) Gute fachliche Praxis : Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz. Bonn AID, pp 21-69, AID 3614
- Chamen WCT, Alakukku L, Pires S, Sommer C, Spoor G, Tijink FGJ, Weisskopf P (2003) Prevention strategies for field-traffic-induced subsoil compaction : a review ; part 2: Equipment and field practices. *Soil Tillage Res* 73(1-2):161-174
- Cramer B, Botschek J, Weyer T (2006) Untersuchung zur Bodenverdichtung nordrhein-westfälischer Böden. *Bodenschutz* 3:78-85
- Czeratzki W (1972) Die Ansprüche der Pflanzen an den physikalischen Bodenzustand. *Landbauforsch Völknerode* 22(1):29-36
- Destain MF, Roisin C, Dalcq AS, Mercatoris BCN (2016) Effect of wheel traffic on the physical properties of a Luvisol. *Geoderma* 262:276-284
- Deutscher Bundestag (2009) Unterrichtung durch die Bundesregierung : zweiter Bundesratbericht der Bundesregierung. Bonn, 77 p, Drucksache / Deutscher Bundestag 16/12658
- Diez T, Weigelt H (1997) Bodenstruktur erkennen und beurteilen : Anleitung zur Bodenuntersuchung mit dem Spaten. DLZ-Agrarmag Sonderdr 1997
- DIN 19682-10 (1998) Bodenuntersuchungsverfahren im landwirtschaftlichen Wasserbau - Felduntersuchungen : Teil 10: Beschreibung und Beurteilung des Bodengefüges. Berlin : Beuth
- DIN-V-19688 (2001) Ermittlung der mechanischen Belastbarkeit und Verdichtungsempfindlichkeit von Böden. DIN-Vornorm 19688. Berlin : Beuth
- Diserens E (2009) Calculating the contact area of trailer tires in the field. *Soil Tillage Res* 103:302-309
- Diserens E, Battiato A (2013) TASC V3.0-Prognose Bodengefährdung und Treibstoffverbrauch : eine PC-Anwendung zur Beurteilung der Bodenbeanspruchung im Ober- und Unterboden in der Land- und Forstwirtschaft sowie zur Schätzung des Energie- und Treibstoffbedarfs im Ackerbau. Ettenhausen : ART, 8 p, ART-Ber 766
- Dumbeck G (1986) Bodenphysikalische und funktionelle Aspekte der Packungsdichte von Böden. Gießen : Univ, 236 p
- Duttmann R, Brunotte J, Bach M (2013) Spatial analyses of field traffic intensity and modeling of changes in wheel load and ground contact pressure in individual fields during a silage maize harvest. *Soil Tillage Res* 126:100-111
- Duttmann R, Schwanebeck M, Nolde M, Horn R (2014) Predicting soil compaction risks related to field traffic during silage maize harvest. *Soil Sci Soc Am J* 78(2):408-421
- DVWK (1995) Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden : Teil 1: Mechanische Belastbarkeit. Bonn : Wirtschafts Verl Gas Wasser, 12 p, DVWK-Merkbl Wasserwirtsch 234
- DVWK (1997) Bodenphysikalische Untersuchungen über Ursachen und Auswirkungen von Bodenverdichtungen. Bonn : Wirtschafts Verl Gas Wasser, DVWK-Materialien 1997,1
- DVWK (1999) Bodenkundliche Untersuchungen im Felde zur Ermittlung von Kennwerten zur Standortcharakterisierung : Teil II: Ableitungen zum Wasser- und Lufthaushalt von Böden. Bonn : Wirtschafts Verl Gas Wasser, 29 p, DVWK-Regeln Wasserwirtsch 136
- DWD - Deutscher Wetterdienst (2016) Wetterlexikon : Starkregen [online]. Zu finden in <<http://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102248&lv3=102572>> [zitiert am 23.08.2016]
- Eckert H, Paul R, Fettisov A (2006) Einschätzung des Beratungsbedarfs für den Schutz der ackerbaulich genutzten Böden Thüringens vor Schadverdichtung. Themenblatt-Nr.: 46.17.220 der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena : Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, p 4-12
- Ehlers W, Schmidtke K, Rauber R (2003) Änderung der Dichte und Gefügefunktion südniedersächsischer Lössböden unter Ackernutzung. *Landnutzung Landentwickl* 44:9-18
- Flühler H (1973) Sauerstoffdiffusion im Boden. *Schweiz Anst forstl Versuchswes Mitt* 49:125-250
- Fraters B (1996) Generalized soil map of Europe : aggregation of the FAO-UNESCO soil units based on the characteristics determining the vulnerability to degradation processes [online]. Zu finden in <<http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/481505006.pdf>> [zitiert am 23.08.2016]
- Fröhlich OK (1934) Druckverteilung im Baugrunde. Wien : Springer, 185 p
- Gasso V, Sørensen CAG, Oudshoorn FW, Green O (2013) Controlled traffic farming : a review of the environmental impacts. *Eur J Agron* 48:66-73
- Garrigues E, Corson M, Angers D, Werf HG, Walter C (2013) Development of a soil compaction indicator in life cycle assessment. *Int J LCA* 18:1316-1324
- Geischeder R (2011) Bodenbelastung und Bodenbeanspruchung unterschiedlicher Fahrwerkskonfigurationen. Freising : Geischeder, 196 p, Forschungsber Agrartechn Arbeitskr Forsch Lehre MEG 504
- Gieska M, van der Ploeg RR, Schweigert P, Pinter N (2003) Physikalische Bodendegradierung in der Hildesheimer Börde und das Bundes-Bodenschutzgesetz. *Ber Landwirtsch* 81(4):485-511
- Glante F, Marahrens S, Mathews J, Hillges F (2009) Einsatz von Länderdaten für Bundesaufgaben [online]. Zu finden in <https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/boden/Einsatz_von_Laenderdaten_fuer_Bundesaufgaben.pdf> [zitiert am 23.08.2016]
- Håkansson I (2005) Machinery-induced compaction of arable soils : incidence - consequences - counter measures [online]. Zu finden in <http://pub.epsilon.slu.se/5517/1/hakansson_i_101206.pdf> [zitiert am 23.08.2016]
- Hamza MA, Andersson WK (2005) Soil compaction in cropping systems : a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Tillage Res* 82:121-145
- Harrach T, Pfeiffer B, Heitzmann S, Sauer S (2003) Langfristige nutzungsbedingte Bodendegradierung ackerbaulich genutzter Lössböden in Sachsen : Abschlussbericht. Gießen : Univ, 144 p
- Horn R, Lebert M, Burger N (1989) Vorhersage der mechanischen Belastbarkeit von Böden als Pflanzenstandort auf der Grundlage von Labor- und in situ Messungen : Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben. München : Bayer StMUL, 178 p
- Horn R, Fleige H, Richter FH, Czyz EA, Dexter A, Diaz-Peraira E, Dumitru E, Enache R, Mayol F, Rajkai K, de la Rosa D, Simota C (2005) SIDASS project : part 5: Prediction of mechanical strength of arable soils and its effects on physical properties at various map scales. *Soil Tillage Res* 82:47-56
- Horn R, Rabbel W, Volk L (2008) Anwendbarkeit geophysikalischer, bodenphysikalischer und landtechnischer Methoden zur Bestimmung von flächenhaften Bodenverdichtungen auf landwirtschaftlich genutzten

- Flächen : Abschlussberichte zum BMELV-Verbundvorhaben, Teilvorhaben der Universität Kiel (FKZ 03HS003/1) und der Fachhochschule Südwestfalen (FKZ03HS003/2)
- Horn R, Fleige H, Peth S (2009) Gute fachliche Praxis aus Sicht der Bodenkunde : Vorsorge und Maßnahmenwerte als Grundlage für die Bewertung von Böden in der Landwirtschaft. *Bodenschutz* 3:80-85
- Horn R, Fleige H (2009) Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. *Soil Tillage Res* 102:201-208
- Horn R (2011) Management effects on soil properties and functions. In: Gliński J, Horabik J, Lipiec (eds) *Encyclopedia of Agrophysics*. Dordrecht : Springer, pp 447-455
- Houskova B, Montanarella L (2008a) The natural susceptibility of European soils to compaction. In: Toth G, Montanarella L, Rusco E (eds) *Threats to soil quality in Europe*. Luxembourg : Off Official Publ EC, pp 23-35
- Houskova B (2008b) The natural susceptibility of European soils to compaction [online]. Zu finden in <<http://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/natural-susceptibility-soil-compaction-europe>> [zitiert am 23.08.2016]
- Isensee E, Schwark A (2006) Langzeitwirkung von Bodenschonung und Bodenverdichtung auf Ackerböden. *Ber Landwirtschaft* 84(1):17-48
- Jones RJA, Verheijen FGA, Reuter HI, Jones AR (2008) Environmental assessment of soil for monitoring : vol V: Procedures and protocols [online]. Zu finden in <http://esdac.jrc.ec.europa.eu/Projects/Envasso/documents/ENV_Vol-V_Final2_web.pdf> [zitiert am 23.08.2016]
- Keller T, Defosse P, Weißkopf P, Arvidsson J, Richard G (2007) SoilFlex : a model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil Tillage Res* 93:391-411
- Keller T, Lamandé M (2010) Challenges in the development of analytical soil compaction models. *Soil Tillage Res* 111:54-64
- Keller T, da Silva CA, Tormena CA, Giarola NFB, Cavaleri KMV, Stettler M, Arvidsson J, Goss M (2015) SoilFlex-LLWR : linking a soil compaction model with the least limiting water range concept. *Soil Use Manag* 31(2):321-329
- Koch H-J, Brandhuber R, Stockfisch N, Schäfer-Landefeld L (2002) Bodenschutz bei Zuckerrübenanbau und Gülleausbringung. *Zuckerrübe* 1:34-37
- Koch H-J, Heuer H, Tomanova O, Märländer B (2008) Cumulative effect of annually repeated passes of heavy agricultural machinery on soil structural properties and sugar beet yield under two tillage systems. *Soil Tillage Res* 111:69-77
- Kroulík M, Kumlhála F, Hůla J, Honzík I (2009) The evaluation of agricultural machines field trafficking intensity for different soil tillage technologies. *Soil Tillage Res* 105:171-175
- KTBL (2011) Boden schonen und Kosten senken. Darmstadt : KTBL-Heft 89, 64 p
- KTBL (2013) Logistik rund um die Biogasanlage. Darmstadt : KTBL-Schr 498, 132 p
- KTBL (2014) Betriebsplanung Landwirtschaft 2014/15 : Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft. Darmstadt : KTBL, 832 p
- Le Bas C, Houskova B, Bialousz S, Bielek P (2006) Soil compaction : identifying risk areas for soil degradation in Europe by compaction. In: Eckelmann W, Baritz R, Bialousz S, Bielek P, Carre F, Houskova B, Jones RJA, Kibbalewhite M, Kozak J, Le Bas C, Toth G, Varallyay G, Hall MY, Zypan M (eds) *Common criteria for risk area identification according to soil threats*. Luxembourg : Off Official Publ EC, pp 20:35-42
- Lebert M, Brunotte J, Sommer C (2004) Ableitung von Kriterien zur Charakterisierung einer schädlichen Bodenveränderung entstanden durch nutzungsbedingte Verdichtung von Böden/Regelungen zur Gefahrenabwehr. Berlin : UBA, 122 p, Texte / Umweltbundesamt 04/46
- Lebert M, Marahrens S (2009) Risk area identification according to soil compaction of agricultural soils in Germany. In: *Proceedings of the ISTRO 18th triannual Conference*. Izmir, Turkey, June 15 -19.2009, T4-013 [online]. Zu finden in <http://www.istrox5.webextra.net/~istroorg/p_frame.htm> [zitiert am 11.11.2015]
- Lebert M (2010) Entwicklung eines Prüfkonzeptes zur Erfassung der tatsächlichen Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden [online]. Zu finden in <<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4027.pdf>> [zitiert am 23.08.2016]
- Lebert M, Marahrens S (2010) Ausweisung von Risikoflächen für Unterbodenverdichtungen. In: Schilling B (ed) *Bodenschutz in Europa : Ziele und Umsetzung ; 6. Marktredwitzer Bodenschutztag ; Tagungsband*. Marktredwitz : Stadt Marktredwitz, pp 218-224
- Löpmeier F-J (1994) Berechnung der Bodenfeuchte und Verdunstung mittels agrarmeteorologischer Modelle. *Z Bewässer-Wirtsch* 29:157-167
- Löpmeier F-J (2013) Agrarmeteorologisches Modell zur Berechnung der aktuellen Verdunstung [online]. Zu finden in <ftp://ftp.dwd.de/pub/CDC/grids_germany/daily/evapo_p/AMBAV.pdf> [zitiert am 24.08.2016]
- Lorenz M (2008) Status der Bodenverdichtung auf niedersächsischen Ackerböden und eine Übersicht der Verhältnisse in Deutschland. *Schriftenr Inst Landwirtsch Umwelt* 15:57-70
- Marahrens S, Lebert M (2009) Auswertungskarten zur Verdichtungsgefährdung in der Bundesrepublik Deutschland auf der Basis der BÜK 1000. *DBG-Mitt* 112
- Nevens F, Reheul D (2003) The consequences of wheel-induced soil compaction and subsoiling for silage maize on a sandy loam soil in Belgium. *Soil Tillage Res* 70:175-184
- NJF - Nordic Association of Agricultural Scientists (2012) NJF seminar 448 : Soil compaction - effects on soil functions and strategies for prevention, House of Science and Letters, Helsinki, Finland, 6-8 March 2012 ; proceedings. Helsinki : NJF; 116 p, NJF Report 8(1)
- O'Sullivan MF, Henshall JK, Dickson JW (1999) A simplified method for estimating soil compaction. *Soil Tillage Res* 49:325-335
- Petelkau H (1984) Auswirkungen von Schadverdichtungen auf Bodeneigenschaften und Pflanzenertrag sowie Maßnahmen zu ihrer Minderung. *Tag-Ber Akad Landwirtsch Wiss DDR* 227:25-34
- Petelkau H, Seidel K (1986) Bearbeitbarkeit und Befahrbarkeit von Ackerböden in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte. *Tag-Ber Akad Landwirtsch-Wiss DDR* 246:46-54
- Petelkau H, Seidel K, Frielinghaus M (1998) Ermittlung des Verdichtungs-widerstandes von Böden des Landes Brandenburg und Bewertung von Landmaschinen und landwirtschaftlichen Anbauverfahren hinsichtlich der Beeinträchtigung von Bodenfunktionen durch die Verursachung von schwer regenerierbaren Schadverdichtungen : Forschungsbericht. Münchenberg : ZALF, 144 p
- Renger M, Böhne K, Wessolek G (2014) Bestimmung und Aussagemöglichkeiten der effektiven Lagerungsdichte. *Bodenökol Bodengenese* 43:27-41
- Schjønnning P, Lamandé M, Tøgersen FA, Arvidsson J, Keller T (2008) Modeling effects of tire inflation pressure on the stress distribution near the soil-tire interface. *Biosyst Eng* 99:119-133
- Schjønnning P, Stettler M, Keller T, Lassen P, Lamandé M (2015) Predicted tyre-soil interface area and vertical stress distribution based on loading characteristics. *Soil Tillage Res* 152:52-66
- Schjønnning P, Lamandé M, Munkholm LJ, Lyngvig HS, Nielsen JA (2016) Soil precompression stress, penetration resistance and crop yields in relation to differently-trafficked, temperate-region sandy loam soils. *Soil Tillage Res* 163:298-308
- Seehusen T, Riley H, Riggert R, Fleige H, Børresen T, Horn R, Zink A (2014) Traffic-induced soil compaction during manure spreading in spring in South-East Norway. *Acta Agric Scand B* 3:220-234
- Söhne W (1953) Druckverteilung im Boden und Bodenverformung unter Schlepperreifen. *Grundl Landtechn* 5:49-63
- Sommer C (1998) Ein Konzept zur Vorbeugung von Bodenschadverdichtungen in der pflanzlichen Produktion. *Bodenschutz* 3(1):12-16
- Sommer C, Brandhuber R, Brunotte J, Buchner W (2001) Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen. In: *BMVEL (2001) Gute fachliche Praxis zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtung und Bodenerosion*. Bonn : BMELV, pp 14-41
- Stettler M, Keller T, Weisskopf P, Lamandé M, Lassen P, Schjønnning P (2014) TERRANIMO – ein webbasiertes Modell zur Abschätzung des Bodenverdichtungsrisikos. *Landtechnik* 69(3):132-138
- Tijink FGJ (2003) Technical guidelines for preventing subsoil compaction. *Landbauforsch SH* 256:39-47
- Tullberg J (2010) Tillage, traffic and sustainability : a challenge for ISTRO. *Soil Tillage Res* 111:26-32
- UBA - Umweltbundesamt (2015) Bodenstruktur : Erosion und Verdichtung. In: *Umweltbundesamt (2015) Bodenzustand in Deutschland : zum „Internationalen Jahr des Bodens“ 2015*. Dessau-Roßlau : UBA, pp 46-59

- Van den Akker JJH (1997) Construction of a wheel-load bearing capacity map of the Netherlands : proceedings of the ISTRO 14th Conference held in Pulawy, Poland, July 27 – August 1, 1997. Bibliotheca Fragmenta Agronomica 2A/97:15-18
- Van den Akker JJH, Arvidsson J, Horn R (2003) Experiences with the impact and prevention of subsoil compaction in the European Union. *Soil Tillage Res* 73:1-186
- Van den Akker JJH (2004) SOCOMOm : a soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity. *Soil Tillage Res* 79:113-127
- Van den Akker JJH, Simota C (2008) Risk assessment methods of compaction. RAM-SOIL project report 2.3, deliverable 2.3.2.5 [online]. Zu finden in <http://eu-soils.jrc.ec.europa.eu/projects/Ramsoil/Results/WP2/PR23_compaction.pdf> [zitiert am 24.08.2016]
- VDI - Verein Deutscher Ingenieure (2007) Maschineneinsatz unter Berücksichtigung der Befahrbarkeit landwirtschaftlich genutzter Böden. VDI-Richtl 6101. Berlin : Beuth, 67 p
- Vorderbrügge T, Brunotte J (2011) Mechanische Verdichtungsempfindlichkeit für Ackerböden (Unterboden) – Validierung von Pedotransferfunktionen zur Ableitung der Verdichtungsempfindlichkeit bzw. zur Ausweisung „sensibler Gebiete“ in Europa und ein praxisorientierter Lösungsansatz zur Guten fachlichen Praxis : Teil 1: Validierung von Pedotransferfunktionen. *Landbauforsch* 61(1):1-21
- Vorderbrügge T (2016) mündl. Mitteilung
- Werner D, Paul R (1999) Kennzeichnung der Verdichtungsgefährdung landwirtschaftlich genutzter Böden. *Wasser Boden* 51:10-14
- Wessolek G, Kaupenjohann M, Renger M (2009) Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis : Teil I: Ergebnisse und Vorschläge der DBG-Arbeitsgruppe 'Kennwerte des Bodengefüges' zur Schätzung bodenphysikalischer Kennwerte'. Berlin : Selbstverl, 80 p, Bodenökol Bodengenese 40
- Zakosek H (1960) Durchlässigkeitsuntersuchungen an Böden unter besonderer Berücksichtigung der Pseudogleye. Wiesbaden : Hess Landesamt Bodenforsch, 62 p, Abh hess LAMt Bodenforsch 32

Anhang

Tabelle 10

Mittlere langjährige Anzahl der Tage im jeweiligen Monat in der Klasse der Verdichtungsempfindlichkeit (1 bis 5) für den Oberboden beim Anbau von Silomais auf den betrachteten Standorten (1 bis 9)

		Silomais Oberboden											
	Klasse	Jan.	Feb.	Mrz.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.
Standort 1 SI2	1	0	0	0	0	0	0	24	31	30	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	3	7	0	0	9	0	0
	3	0	0	0	17	31	27	0	0	0	22	4	0
	4	14	12	31	13	0	0	0	0	0	0	21	0
	5	17	16	0	0	0	0	0	0	0	0	5	31
Standort 2 SI2	1	0	0	0	0	0	2	31	31	30	27	0	0
	2	0	0	0	0	16	28	0	0	0	4	13	0
	3	0	0	5	29	15	0	0	0	0	0	17	0
	4	30	28	26	1	0	0	0	0	0	0	0	23
	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
Standort 3 SI4	1	0	0	0	0	0	0	29	31	30	15	0	0
	2	0	0	0	0	0	13	2	0	0	15	0	0
	3	0	0	0	14	31	17	0	0	0	1	14	0
	4	3	0	5	14	0	0	0	0	0	0	10	0
	5	28	28	26	2	0	0	0	0	0	0	6	31
Standort 4 SI4	1	0	0	0	0	0	0	0	29	5	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	18	2	25	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	1	13	0	0	11	0	0
	4	2	0	0	10	26	20	0	0	0	18	0	0
	5	29	28	31	20	5	9	0	0	0	2	30	31
Standort 5 Ut3	1	0	0	0	0	0	0	26	31	30	19	0	0
	2	0	0	0	0	0	2	5	0	0	12	2	0
	3	0	0	0	10	31	28	0	0	0	0	15	0
	4	3	0	1	18	0	0	0	0	0	0	13	4
	5	28	28	30	2	0	0	0	0	0	0	0	27
Standort 6 Ut3	1	0	0	0	0	0	0	29	31	30	31	0	0
	2	0	0	0	0	0	5	2	0	0	0	17	0
	3	0	0	0	13	31	25	0	0	0	0	13	6
	4	4	0	15	17	0	0	0	0	0	0	0	12
	5	27	28	16	0	0	0	0	0	0	0	0	13
Standort 7 Lu	1	0	0	0	0	0	0	27	31	30	4	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	3	0	0	4	0	0
	3	0	0	0	0	28	30	1	0	0	10	0	0
	4	1	0	0	14	3	0	0	0	0	9	0	0
	5	30	28	31	16	0	0	0	0	0	4	30	31
Standort 8 Lu	1	0	0	0	0	0	0	30	31	30	13	0	0
	2	0	0	0	0	0	5	1	0	0	9	0	0
	3	0	0	0	3	18	25	0	0	0	9	0	0
	4	1	0	0	19	13	0	0	0	0	0	11	0
	5	30	28	31	8	0	0	0	0	0	0	19	31
Standort 9 Lu	1	0	0	0	0	0	0	12	31	29	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	15	0	1	9	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	4	0	0	10	0	0
	4	1	0	0	10	31	25	0	0	0	9	0	0
	5	30	28	31	20	0	5	0	0	0	3	30	31

Tabelle 11

Mittlere langjährige Anzahl der Tage im jeweiligen Monat in der Klasse der Verdichtungsempfindlichkeit (1 bis 5) für den Unterboden beim Anbau von Silomais auf den betrachteten Standorten (1 bis 9)

		Silomais Unterboden											
	Klasse	Jan.	Feb.	Mrz.	Apr.	Mai	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.
Standort 1 Sl2	1	0	0	0	0	0	0	0	23	30	9	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	15	8	0	17	0	0
	3	1	0	0	0	0	2	16	0	0	5	17	0
	4	6	0	0	20	31	28	0	0	0	0	13	6
	5	24	28	31	10	0	0	0	0	0	0	0	25
Standort 2 Sl2	1	0	0	0	0	0	0	11	31	30	31	18	0
	2	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	12	9
	3	1	0	0	0	17	30	6	0	0	0	0	15
	4	25	3	13	30	14	0	0	0	0	0	0	7
	5	5	25	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Standort 3 Sl4	1	0	0	0	0	0	0	0	29	30	31	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	18	2	0	0	21	0
	3	0	0	0	0	0	1	13	0	0	0	9	8
	4	9	0	0	6	31	29	0	0	0	0	0	9
	5	22	28	31	24	0	0	0	0	0	0	0	14
Standort 4 Sl4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	22	30	5	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	13	9	0	11	0	0
	4	2	0	0	0	0	0	16	0	0	11	0	0
	5	29	28	31	30	31	30	2	0	0	4	30	31
Standort 5 Ut3	1	0	0	0	0	0	0	0	10	30	25	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	2	21	0	6	22	0
	3	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	8	12
	4	9	0	0	0	0	6	9	0	0	0	0	11
	5	22	28	31	30	31	24	0	0	0	0	0	8
Standort 6 Ut3	1	0	0	0	0	0	0	0	16	30	28	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	5	15	0	3	30	5
	3	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	25
	4	13	0	0	0	0	8	6	0	0	0	0	1
	5	18	28	31	30	31	22	0	0	0	0	0	0
Standort 7 Lu	1	0	0	0	0	0	0	0	17	30	8	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	13	14	0	22	0	0
	3	3	0	0	0	20	30	18	0	0	1	30	2
	4	28	28	31	30	11	0	0	0	0	0	0	29
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Standort 8 Lu	1	0	0	0	0	0	0	0	29	30	21	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	19	2	0	10	13	0
	3	4	0	0	0	19	30	12	0	0	0	17	16
	4	27	28	31	30	12	0	0	0	0	0	0	15
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Standort 9 Lu	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0	0	18	30	8	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	12	13	0	19	0	0
	4	3	0	0	0	0	0	15	0	0	4	7	0
	5	28	28	31	30	31	30	4	0	0	0	23	31

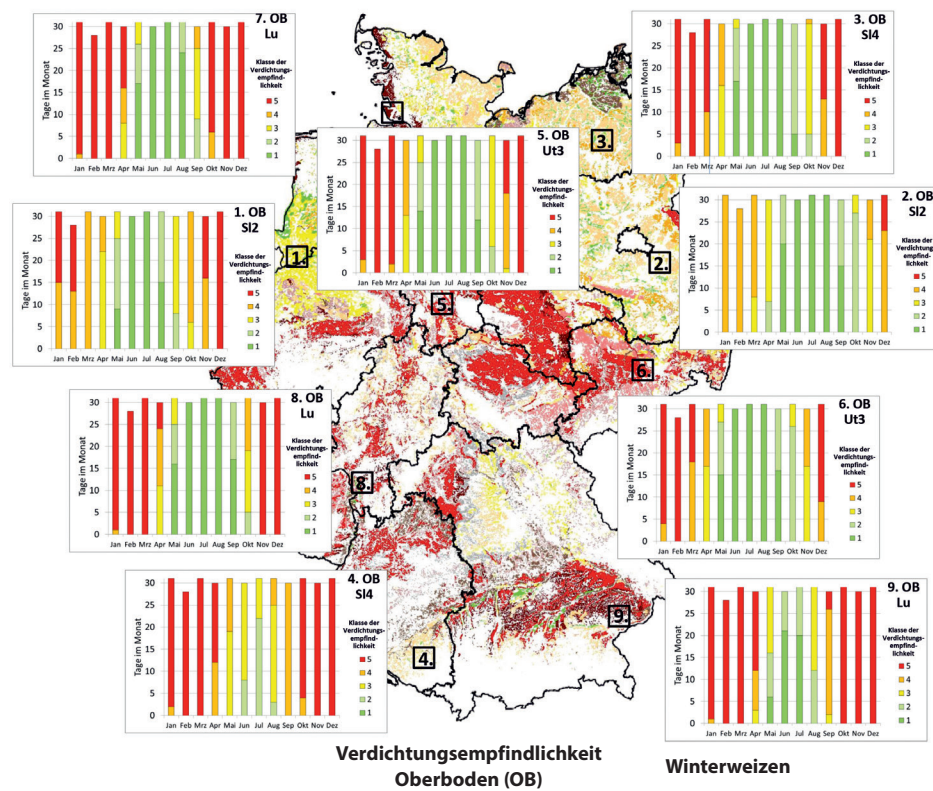


Abbildung 25

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5, sehr gering bis sehr hoch) des Oberbodens (OB) für Winterweizen an den Standorten 1 bis 9

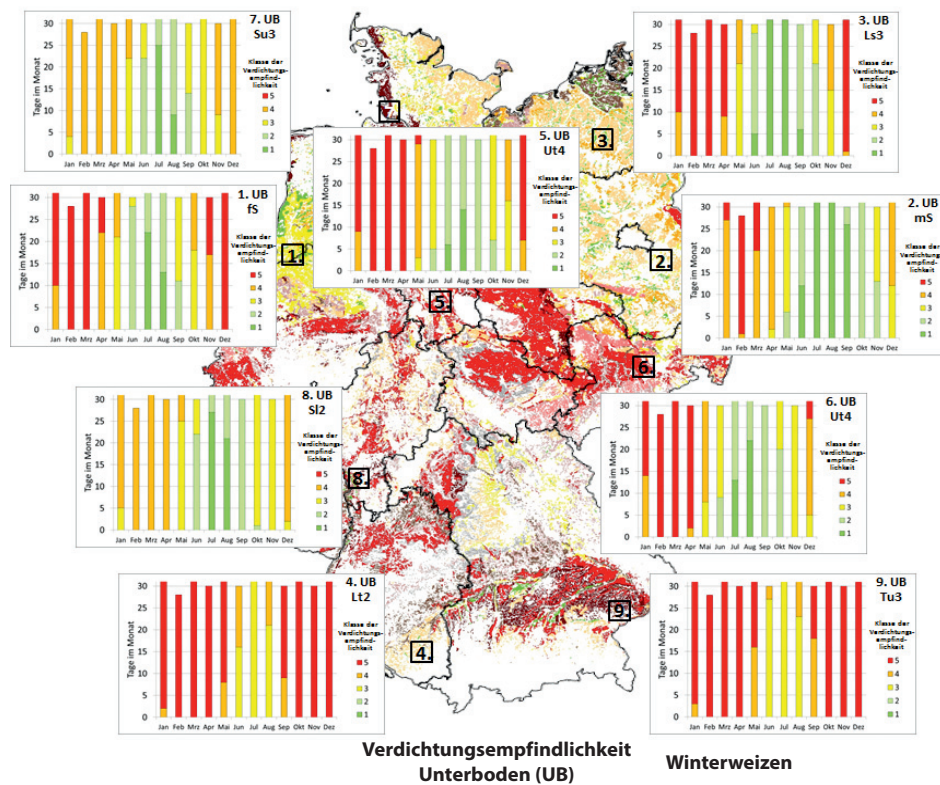


Abbildung 26

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5, sehr gering bis sehr hoch) des Unterbodens (UB) für Winterweizen an den Standorten 1 bis 9

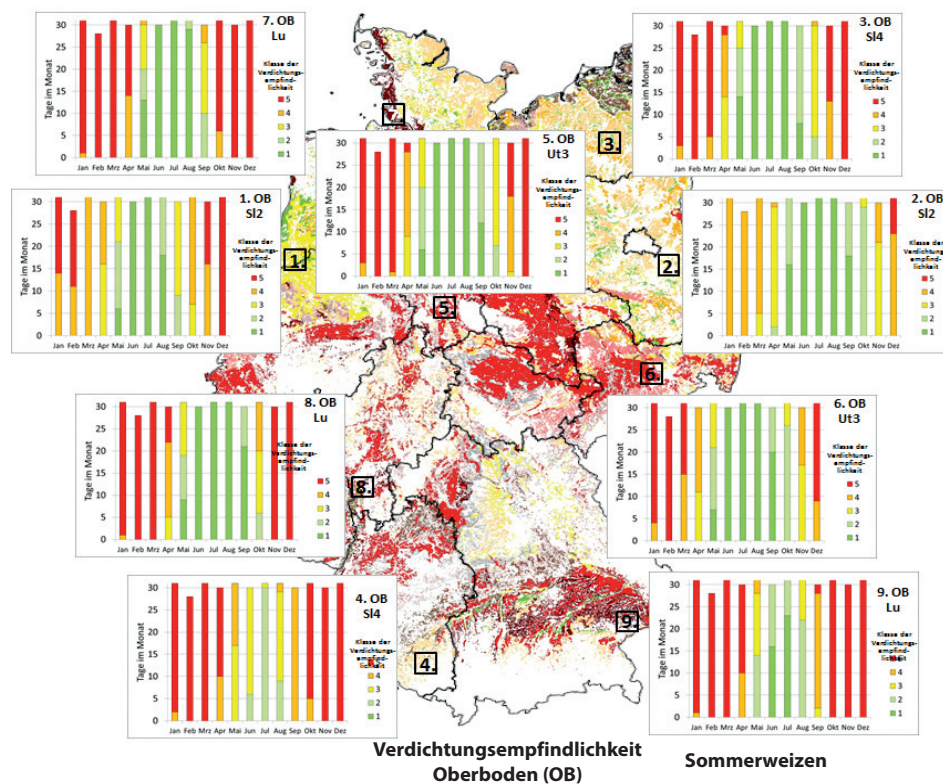


Abbildung 27

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5, sehr gering bis sehr hoch) des Oberbodens (OB) für Sommerweizen an den Standorten 1 bis 9

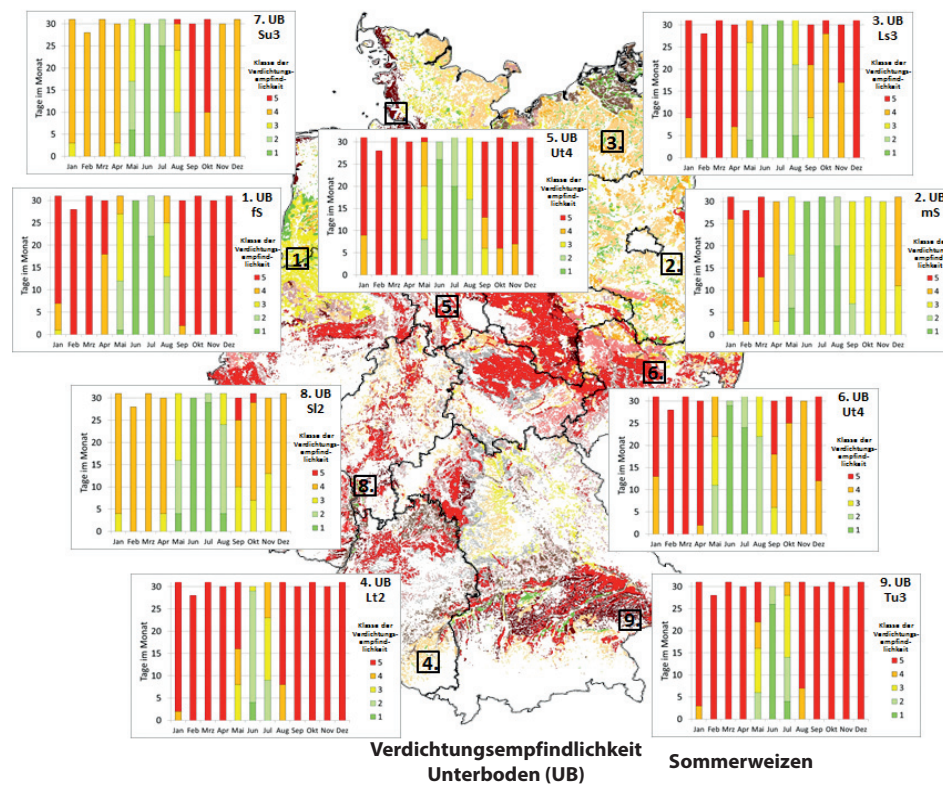


Abbildung 28

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5, sehr gering bis sehr hoch) des Unterbodens (UB) für Sommerweizen an den Standorten 1 bis 9

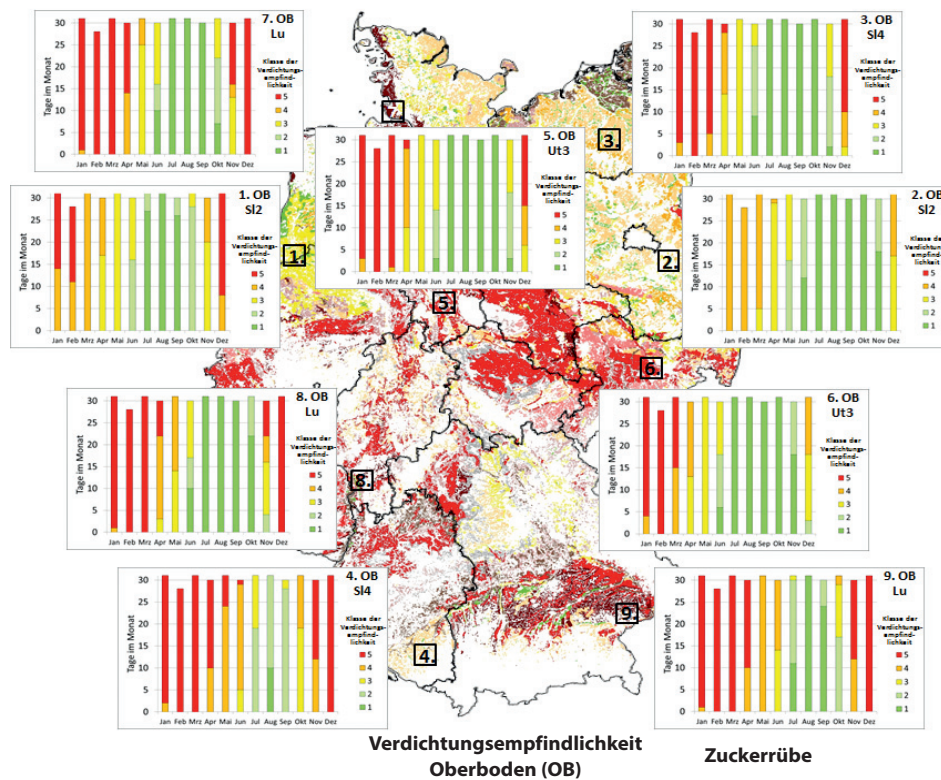


Abbildung 29

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5, sehr gering bis sehr hoch) des Oberbodens (OB) für Zuckerrübe an den Standorten 1 bis 9

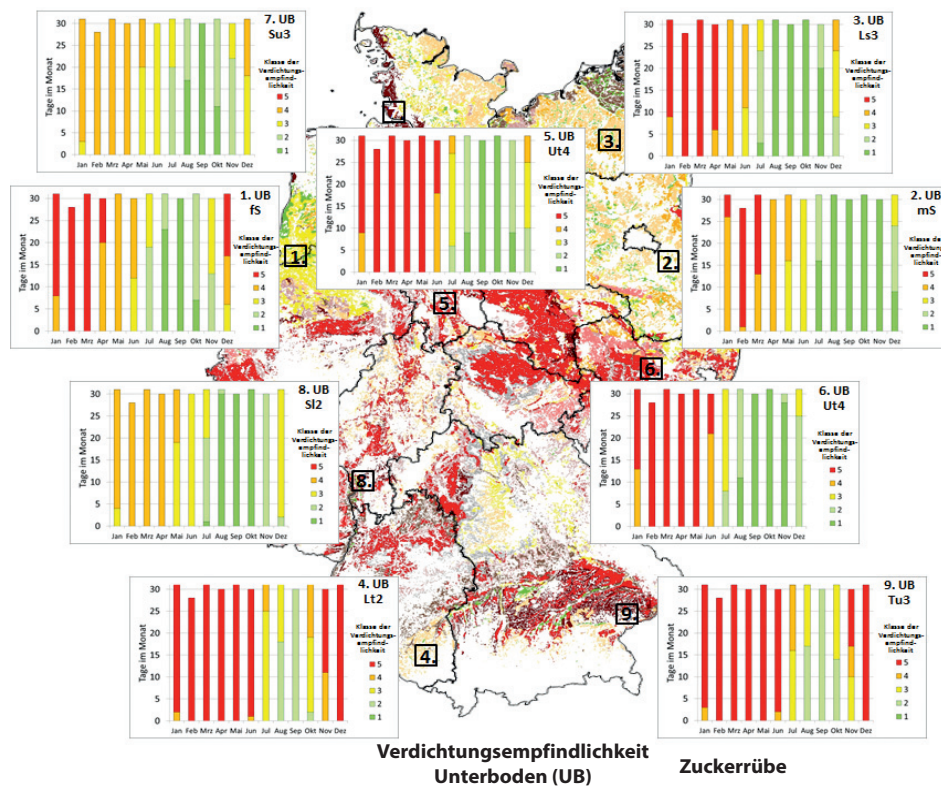


Abbildung 30

Mittlerer Jahresverlauf der Verdichtungsempfindlichkeit (Klassen 1 bis 5, sehr gering bis sehr hoch) des Unterbodens (UB) für Zuckerrübe an den Standorten 1 bis 9

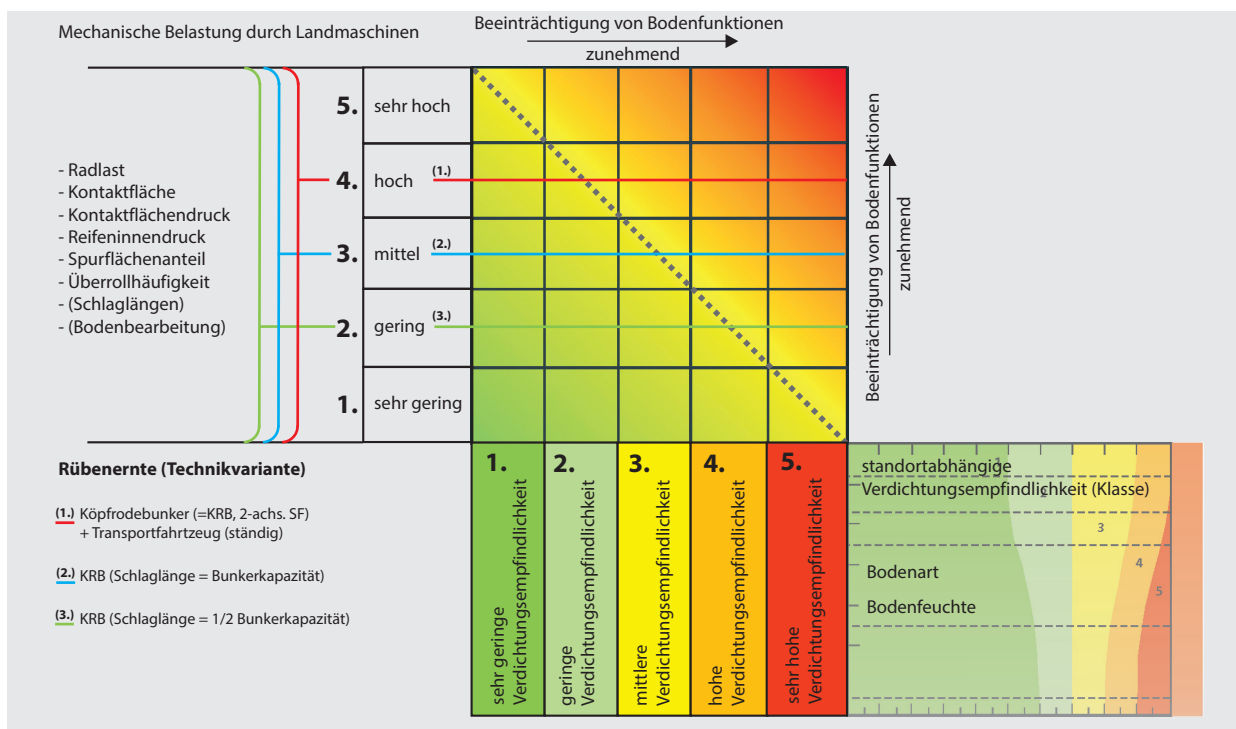


Abbildung 31

Schema der Verknüpfung von standortabhängiger Verdichtungsempfindlichkeit mit der mechanischen Belastung durch landwirtschaftliche Maschinen am Beispiel der Rübenerte

Tabelle 12

Befahrbarkeitstage für die Standorte 1 bis 9 und die Kulturart Zuckerrübe (01.09. bis 30.11.)

Oberboden				Unterboden			
insg. 91	Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.09. bis 30.11)			insg. 91	Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.09. bis 30.11)		
Beispiel-standorte	(1.) Roder plus Transportfahrzeug	(2.) Roder mit Auslastung der Bunkerkapazität	(3.) Roder mit 1/2 Bunker-auslastung	Beispiel-standorte	(1.) Roder plus Transportfahrzeug	(2.) Roder mit Auslastung der Bunkerkapazität	(3.) Roder mit 1/2 Bunker-auslastung
Sl2 1.	58 (±2)	81 (±2)	91	fs 1.	74 (±2)	91	91
Sl2 2.	91	91	91	mS 2.	91	91	91
Sl4 3.	79 (±2)	91	91	Ls3 3.	91	91	91
Sl4 4.	28 (±2)	49 (±2)	73 (±2)	Lt2 4.	32 (±2)	49 (±3)	72 (±3)
Ut3 5.	79 (±2)	91	91	Ut4 5.	91	91	91
Ut3 6.	91	91	91	Ut4 6.	91	91	91
Lu 7.	52 (±2)	74 (±3)	77 (±3)	Su3 7.	83 (±2)	91	91
Lu 8.	65 (±2)	77 (±3)	83 (±3)	Sl2 8.	91	91	91
Lu 9.	47 (±2)	59 (±3)	73 (±3)	Tu3 9.	44 (±2)	71 (±4)	78 (±3)

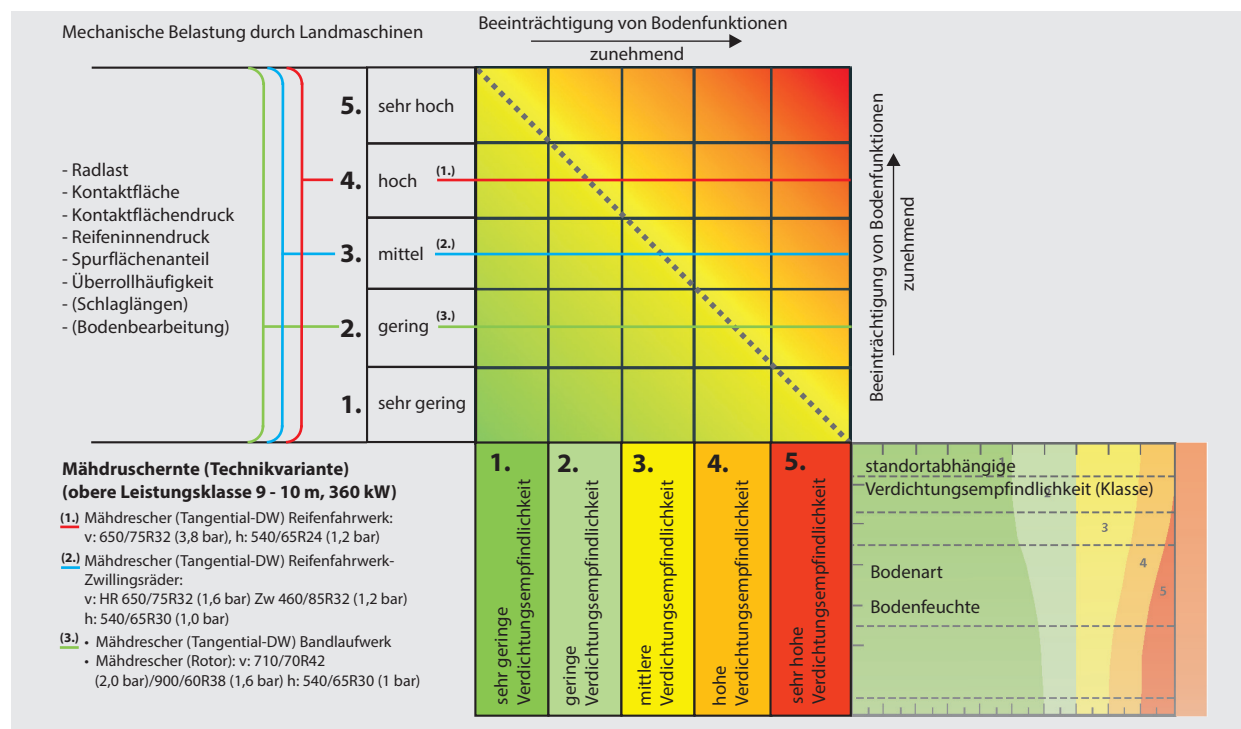


Abbildung 32

Schema der Verknüpfung von standortabhängiger Verdichtungsempfindlichkeit mit der mechanischen Belastung durch landwirtschaftliche Maschinen am Beispiel der Mähdruschernte

Tabelle 13

Befahrbarkeitstage für die Standorte 1 bis 9 und die Kulturart Winterweizen (01.07. bis 31.08.)

Oberboden				Unterboden			
insg. 62	Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.07. bis 31.08.)			insg. 62	Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.07. bis 31.08.)		
	(1.)	(2.)	(3.)		(1.)	(2.)	(3.)
Beispiel-standorte	Mähdrischer (Tangential-DW), Reifenfahrwerk: v: 650/75R32 (3,8 bar) h: 540/65R24 (1,2 bar)	Mähdrischer (Tangential-DW), Reifenfahrwerk: v: HR 650/75R32 (1,6 bar) Zw 460/85R32 (1,2 bar) h: 540/65R30 (1,0 bar)	1. Mähdrischer (Tangential-DW), Bandlaufwerk 2. Mähdrischer (Rotor) v: 710/70R42 (2,0 bar); 900/60R38 (1,6 bar) h: 540/65R30 (1,0 bar)	Beispiel-standorte	Mähdrischer (Tangential-DW), Reifenfahrwerk: v: 650/75R32 (3,8 bar) h: 540/65R24 (1,2 bar)	Mähdrischer (Tangential-DW), Reifenfahrwerk: v: HR 650/75R32 (1,6 bar) Zw 460/85R32 (1,2 bar) h: 540/65R30 (1,0 bar)	1. Mähdrischer (Tangential-DW), Bandlaufwerk 2. Mähdrischer (Rotor) v: 710/70R42 (2,0 bar); 900/60R38 (1,6 bar) h: 540/65R30 (1,0 bar)
SI2 1.	62	62	62	fS 1.	62	62	62
SI2 2.	62	62	62	mS 2.	62	62	62
SI4 3.	62	62	62	Ls3 3.	62	62	62
SI4 4.	25 (± 2)	56 (± 2)	62	Lt2 4.	0 (+2)	52 (± 3)	62
Ut3 5.	62	62	62	Ut4 5.	62	62	62
Ut3 6.	62	62	62	Ut4 6.	62	62	62
Lu 7.	62	62	62	Su3 7.	62	62	62
Lu 8.	62	62	62	SI2 8.	62	62	62
Lu 9.	43 (± 3)	62	62	Tu3 9.	0	54 (± 6)	62

Tabelle 14

Befahrbarkeitstage für die Standorte 1 bis 9 und die Kulturart Sommerweizen (01.07. bis 31.08.)

Oberboden				Unterboden			
insg. 62	Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.07. bis 31.08)			insg. 62	Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.07. bis 31.08)		
	(1.)	(2.)	(3.)		(1.)	(2.)	(3.)
	Mähdrescher (Tangential-DW), Reifenfahrwerk: v: 650/75R32 (3,8 bar)	Mähdrescher (Tangential-DW), Reifenfahrwerk: v: HR 650/75R32 (1,6 bar)	1. Mähdrescher (Tangential-DW), Bandlaufwerk 2. Mähdrescher (Rotor) v: 710/70R42 (2,0 bar); 900/60R38 (1,6 bar) h: 540/65R30 (1,0 bar)		Mähdrescher (Tangential-DW), Reifenfahrwerk: v: 650/75R32 (3,8 bar)	Mähdrescher (Tangential-DW), Reifenfahrwerk: v: HR 650/75R32 (1,6 bar)	1. Mähdrescher (Tangential-DW), Bandlaufwerk 2. Mähdrescher (Rotor) v: 710/70R42 (2,0 bar); 900/60R38 (1,6 bar) h: 540/65R30 (1,0 bar)
Beispiel-standorte	h: 540/65R24 (1,2 bar)	Zw 460/85R32 (1,2 bar) h: 540/65R30 (1,0 bar)		Beispiel-standorte	h: 540/65R24 (1,2 bar)	Zw 460/85R32 (1,2 bar) h: 540/65R30 (1,0 bar)	
Sl2 1.	62	62	62	fs 1.	44 (±2)	56 (±2)	62
Sl2 2.	62	62	62	mS 2.	62	62	62
Sl4 3.	62	62	62	Ls3 3.	52 (±2)	62	62
Sl4 4.	39 (± 2)	60 (± 2)	62	Lt2 4.	9 (±2)	23 (±2)	39 (±2)
Ut3 5.	62	62	62	Ut4 5.	48 (±2)	62	62
Ut3 6.	62	62	62	Ut4 6.	53 (±2)	62	62
Lu 7.	62	62	62	Su3 7.	41 (±2)	55 (±2)	61 (±1)
Lu 8.	62	62	62	Sl2 8.	55 (±2)	62	62
Lu 9.	53 (± 3)	62	62	Tu3 9.	14 (±2)	28 (±2)	38 (±2)

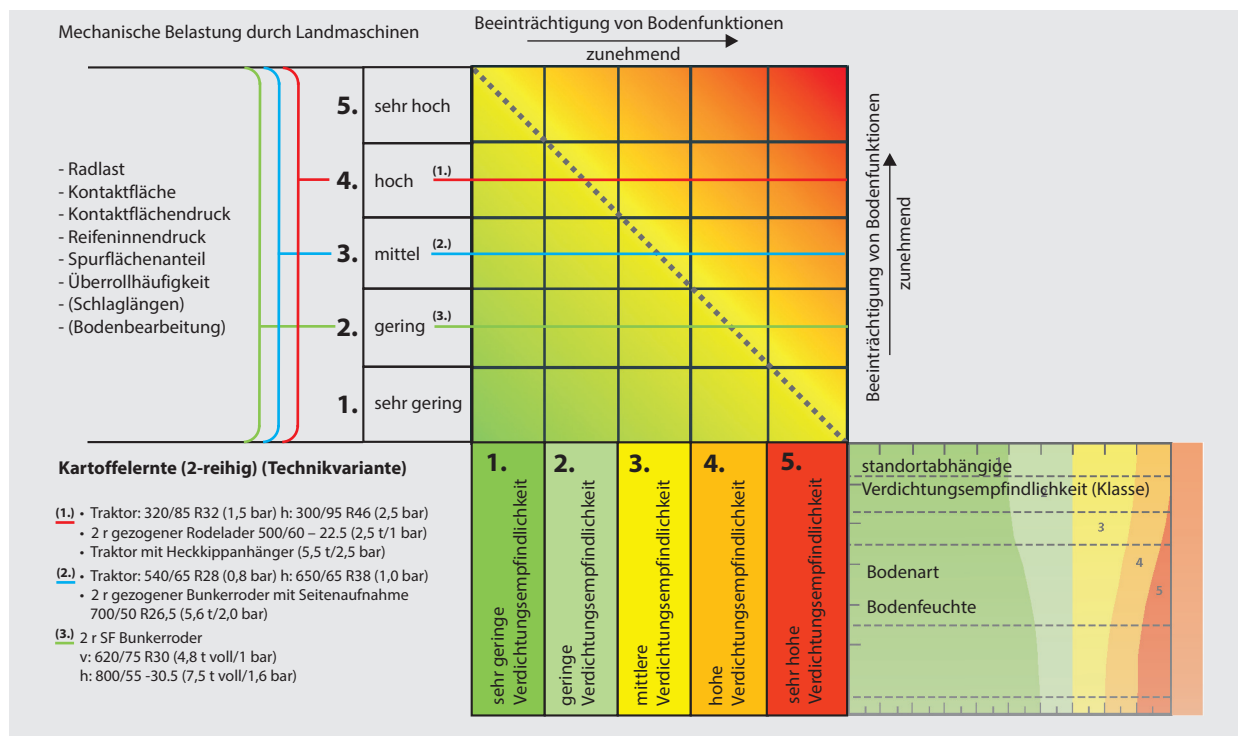


Abbildung 33

Schema der Verknüpfung von standortabhängiger Verdichtungsempfindlichkeit mit der mechanischen Belastung durch landwirtschaftliche Maschinen am Beispiel der Kartoffelernte (2-reihig)

Tabelle 15

Befahrbarkeitstage für die Standorte 1 bis 9 und die Kulturart Kartoffel (01.06. bis 31.10.)

Oberboden				Unterboden			
insg. 153	Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.06. bis 31.10)			insg. 153	Befahrbarkeitstage bei unterschiedlicher mechanischer Bodenbelastung (01.06. bis 31.10)		
Beispiel-standorte	(1.)	(2.)	(3.)	Beispiel-standorte	(1.)	(2.)	(3.)
	1. Traktor: v: 320/85R32 (1,5 bar) h: 300/95R46 (2,5 bar)	1. Traktor: v: 540/65R28 (0,8 bar) h: 650/65R38 (1,0 bar)	2-r SF Bunker- roder v: 620/75R30 (4,8 t voll / 1,0 bar)		1. Traktor: v: 320/85R32 (1,5 bar) h: 300/95R46 (2,5 bar)	1. Traktor: v: 540/65R28 (0,8 bar) h: 650/65R38 (1,0 bar)	2-r SF Bunker- roder v: 620/75R30 (4,8 t voll / 1,0 bar)
	2. 2-r gezogener Rodelader 500/60 - 22.5 (2,5 t / 1,0 bar)	2. 2-r gezogener Bunkerroder mit Seitenaufnahme 700/50R26.5 (5,6 t / 2,0 bar)	h: 800/55 - 30.5 (7,5 t voll / 1,6 bar)		2. 2-r gezogener Rodelader 500/60 - 22.5 (2,5 t / 1,0 bar)	2. 2-r gezogener Bunkerroder mit Seitenaufnahme 700/50R26.5 (5,6 t / 2,0 bar)	h: 800/55 - 30.5 (7,5 t voll / 1,6 bar)
	3. Traktor mit Heckkip- anhänger (5,5 t / 2,5 bar)				3. Traktor mit Heckkip- anhänger (5,5 t / 2,5 bar)		
SI2 1.	136 (±2)	153	153	fS 1.	111 (±2)	135 (±2)	153
SI2 2.	153	153	153	mS 2.	123 (±2)	153	153
SI4 3.	148 (±2)	153	153	Ls3 3.	116 (±2)	134 (±2)	153
SI4 4.	78 (±2)	116	152	Lt2 4.	50 (±2)	105 (±7)	124 (±2)
Ut3 5.	137 (±2)	153	153	Ut4 5.	98 (±2)	119 (±2)	141 (±5)
Ut3 6.	141 (±2)	153	153	Ut4 6.	100 (±2)	123 (±2)	144 (±3)
Lu 7.	130 (±2)	153	153	Su3 7.	112 (±2)	153	153
Lu 8.	140 (±2)	153	153	SI2 8.	112 (±2)	153	153
Lu 9.	108 (±2)	135 (±5)	153	Tu3 9.	61 (±2)	108 (±6)	125 (±2)

Detection of susceptibility of dairy cows to clinical mastitis by artificial neural networks based on selected genotypes and milk production records

Daniel Zaborski*, Katarzyna Wojdak-Maksymiec**, and Wilhelm Grzesiak*

Abstract

The aim of this study was to verify the applicability of artificial neural networks to the detection of dairy cows susceptible to clinical mastitis based on veterinary records, milk recording data and selected genotypes (lactoferrin, lysozyme, tumor necrosis factor alpha and combined defensin genotypes). Moreover, we wanted to determine the effects of complete and reduced sets of predictors (input variables) on the detection performance of the neural models. A total of 24712 test-day records from 990 Polish Holstein-Friesian Black-and-White cows were analyzed. Eight continuous and eight categorical predictors (including proportion of Holstein-Friesian genes, calving age, milk yield and composition, four genotypes, lactation number and stage, calving season) were used. Health state (mastitis vs. healthy) was an output variable. Multilayer perceptrons and radial basis function networks were trained and tested, yielding the percentages of correctly detected cows susceptible to clinical mastitis and resistant ones in the range of 57.8 to 63.3 % and 60.3 to 66.6 %, respectively. The most significant factors affecting mastitis occurrence were: lactation number and stage, calving age, the season of calving and mastitis diagnosis, tumor necrosis factor alpha and combined defensin genotypes. Also, Lactoferrin genotype was quite significant for two neural models, whereas lysozyme genotype had a much smaller effect on the health status of cows. After reducing the initial set of 16 predictors to only five, decreased performance of the networks was observed. It can be concluded that an indication of cows susceptible to clinical mastitis may facilitate the application of preventive measures and consequently reduce mastitis incidence.

Keywords: *inflammation, udder, diagnosis, prevention, sensitivity analysis, dairy cattle*

Zusammenfassung

Erkennen einer Mastitis-Anfälligkeit von Milchkühen mittels künstlicher neuraler Netze auf Basis ausgewählter Genotypen und Milchleistungsdaten

Ziel der Studie war, die Eignung künstlicher neuraler Netze zu prüfen, auf Basis tierärztlicher Diagnosen, Milchleistungsdaten und ausgewählter Genotypen (Lactoferrin, Lysozym, Tumornekrosefaktor- α und kombinierte Defensin-Genotypen) die Anfälligkeit von Milchkühen zur klinischen Mastitis zu erkennen. Zudem wurde der Einfluss der Prädikatorenzahlen auf die Detektionsfähigkeit der neuralen Modelle geprüft. Es wurden 24712 Versuchstagsdaten von 990 polnischen Kühen (Rasse: Holstein-Friesian schwarz weiß) analysiert. Verwendet wurden 8 stetige und 8 nominale Prädikatoren (u. a. Genanteil der Rasse Holstein-Friesian, Abkalbealter/-saison, Milchertrag/-zusammensetzung, vier Genotypen, Laktationsnummer/-phase). Der Gesundheitszustand (Mastitis/gesund) war Ausgangsvariable. Mehrschichtige Perzeptronen und Netze mit radialen Basisfunktionen wurden generiert und getestet. Die Werte bei den Mastitis-anfälligen Kühen lagen bei 57,8 bis 63,3 %, bei den resistenten Kühen bei 60,3 bis 66,6 %. Die signifikantesten Faktoren für das Auftreten von Mastitis waren: Laktationsnummer/-phase, Abkalbungsalter/-saison, Zeit der Mastitis-Diagnose, Tumornekrosefaktor α und die kombinierten Defensin-Genotypen. Für zwei neurale Netze war der Genotyp des Lactoferrin ebenfalls sehr signifikant, obwohl der Lysozym-Genotyp die Gesundheit nur wenig beeinflusste. Nach Reduzierung der Prädikatoren von 16 auf 5 wurde eine verminderte Aussagekraft der neuralen Netze beobachtet. Es kann festgehalten werden, dass eine Indikation von Mastitis-anfälligen Kühen Präventivmaßnahmen erleichtern und folglich die Mastitis-Häufigkeit in Herden reduzieren kann.

Schlüsselworte: *Entzündung, Euter, Diagnose, Vorbeugung, Analyse der Anfälligkeit, Milchvieh*

* West Pomeranian University of Technology, Laboratory of Biostatistics, Department of Ruminants Science, Doktora Judyma 10, 71-466 Szczecin, Poland

** West Pomeranian University of Technology, Department of Genetics and Animal Breeding, Piastow 45, 70-311 Szczecin, Poland

1 Introduction

Mastitis is defined as an inflammation of the mammary gland usually caused by bacterial infections (dos Reis et al., 2013; Hillerton and Berry, 2005). It results in a considerable reduction in milk yield (even up to approx. 375 kg for a single mastitis case) (Cavero et al., 2007) and the change in the content of its constituents (an increase in somatic cell count – SCC, concentration of whey proteins, albumins, immunoglobulins, lactoferrin, sodium and chlorine ions as well as a decrease in the content of lactose, lactalbumins, fat, casein, concentration of calcium and potassium ions) (Bruckmaier et al., 2004; Harmon, 1994), which consequently leads to large economic losses estimated at about USD 2 billion annually in the USA, about GBP 300 million annually in the UK, GBP 14 million annually in Northern Ireland, approx. EUR 693 per cow annually in Ireland and EUR 164 to 235, on average, per cow in the Netherlands (Viguier et al., 2009). These losses also result from the costs of diagnosis and treatment, increased labor intensity, too early culling of cows, diseases of calves, and susceptibility to other disorders post-partum (Wawron, 2007). The current European Union legal regulations require the determination of SCC in raw milk and antibiotic residues are prohibited. Therefore, milk that does not meet the above criteria cannot be sold and this generates additional costs for the farmer. Because antibiotic treatment of cows with mastitis is expensive and requires waiting period for the milk, mastitis prevention is rather preferred (Pyörälä, 2002). There are many risk factors for mastitis such as: genetic factors (e. g. genetic selection for a maximum milk yield), environmental factors (inappropriately carried out mechanical milking, confinement management system, inappropriate bedding and nutrition) and physiological factors (Harmon, 1994; Sordillo, 2005). They lead to the impairment of immunological mechanisms of the mammary gland and, consequently, increase its susceptibility to microbial infections such as: *Staphylococcus aureus*, coagulase-negative staphylococci, *Streptococcus uberis*, *Streptococcus dysgalactiae*, *Escherichia coli* and others (Hettinga et al., 2008), although sometimes an inflammatory condition may have a non-infectious etiology (Bradley, 2002). A frequently encountered problem in mastitis detection under field conditions is the impossibility of indicating explicitly disease-causing factors in a herd (Bradley, 2002).

Susceptibility to mastitis is also affected by gene polymorphisms such as: tumor necrosis factor alpha gene (*TNF-α*), lactoferrin gene (*LTF*), macrophage expressed lysozyme encoding-gene (*mLYZ*) or genes encoding defensins (*DEF*). *TNF* is responsible for the activation of the whole immune system, increasing the permeability of vascular endothelium and inducing chemotaxis, whereas *LTF* has broad antibacterial, antiviral, antifungal and antiparasitic properties (Wojdak-Maksymiec and Mikołajczyk, 2012). On the other hand, *LYZ* acts as an antibacterial agent against vegetative cells of many different microorganisms; however, Gram-positive bacteria differ considerably in their sensitivity to lysozyme depending on strain, species and specific conditions, while Gram-negative bacteria are, generally, less sensitive to lysozyme mainly due to the protection of their cell wall by an

external membrane, although it has been shown that, e. g., bovine milk lysozymes are effective against five Gram-negative bacteria species that are unaffected by the lysozyme from hen egg white, which proves that lysozyme activity differs depending on its source (Davidson et al., 2010). Finally, defensins constitute a wide and varied group of peptide antibiotics acting against bacteria, viruses and fungi (Bals, 2000; Tunzi et al., 2000), which can be divided into three groups (α , β and θ), from which the second one, among others, is largely represented in cattle and defensins from this group were identified, e. g. in the tracheal, intestinal and tongue mucosa (Diamond et al., 1991; Schonwetter et al., 1995; Tarver et al., 1998).

Considering a significant role of mastitis in cattle farming, an early indication of susceptible cows is of utmost importance. Such detection can be performed by artificial neural networks, among others, especially in a situation, when a larger number of variables are problematic in a traditional statistical analysis (Verleysen and François, 2005).

An artificial neural network is a specific information processing system simulating a biological nervous system. It is composed of basic processing units called artificial neurons connected with each other between network layers (each neuron of a preceding layer with each neuron of the next layer). Weights, corresponding to synaptic potentials in biological neurons, are associated with these connections. They constitute network's knowledge representation and are appropriately modified during the learning process, whose aim is to prepare the network for performing specific tasks, e. g. classification or regression ones. The artificial neural network (ANN) types most frequently applied to supervised classification (e. g. mastitis detection) are multilayer perceptrons with one (MLP1) and two (MLP2) hidden layers and radial basis function (RBF) networks. Recent applications of ANN in cattle farming include: prediction of 305-day milk yield for the first lactation (Njubi et al., 2010), prediction of 305-day lactation yield from test milking records (Abbassi Daloui et al., 2010; Tahmoorepur et al., 2012), prediction of lifetime milk yield in cows (Gandhi et al., 2009a, 2009b, 2010), analysis and classification of lactation curves for the first one hundred days of lactation (Cárdenas Mansilla, 2008), decision support for mating animals in a herd (Njubi et al., 2009), pre-slaughter evaluation of marbling based on ultrasound analysis (Fukuda et al., 2012) and the modeling of fermentation processes (concentration of acetate, propionate and butyrate) in the rumen (Craninx et al., 2008).

Much attention has also been paid to the application of ANN to mastitis detection based on parameters such as: milk electrical conductivity, lactation and daily milk yield, fat and protein content in milk, milk flow rate, lactation length, number and stage, cow body temperature, and somatic cell count (Ankinakatte et al., 2013; Cavero et al., 2008; Hassan et al., 2009; López-Benavides et al., 2003; Nielen et al., 1995a,b; Wang and Samarasinghe, 2005; Yang et al., 1999, 2000).

Therefore, the aim of the present study was to verify the applicability of different ANN types to the detection of dairy cows susceptible to mastitis based on veterinary records (clinical mastitis cases), milk recording data, the mean values

Table 1

Means and standard deviations (in parentheses) for continuous predictors in the training (L) and test (T) data sets

Set	n	HF (%)	AGE (months)	MILK (kg)	FT (%)	PR (%)	LAE (%)	UR (mg/l)	SIRE ln(cells/ml)
L	18539	85.70 (13.97)	50.26 (20.11)	34.10 (9.54)	4.02 (0.80)	3.55 (0.42)	4.82 (0.25)	242.21 (80.16)	5.28 (0.56)
T	6173	85.92 (13.78)	50.87 (20.43)	34.16 (9.62)	4.01 (0.79)	3.55 (0.42)	4.81 (0.26)	239.86 (79.65)	5.28 (0.58)
Total	24712	85.75 (13.93)	50.41 (20.19)	34.12 (9.56)	4.02 (0.80)	3.55 (0.42)	4.82 (0.25)	241.62 (80.03)	5.28 (0.56)

Variable abbreviations are as given in material and methods section

of natural logarithm of SCC for the sires of the studied cows and the above-mentioned genotypes. Moreover, we wanted to determine the effects of both complete and reduced sets of selected predictors (input variables) on the detection of predicted mastitis cases in cows.

2 Materials and methods

The study involved a total of 990 Polish Holstein-Friesian Black-and-White cows kept in one open barn throughout the year. They were not pastured in any season. The building in which the animals were housed consisted of two wings. The milking parlor and the room for cooling and storing milk were located between them. The building was a roof shelter with incomplete side walls (there was a clearance between the roof and the walls to enable the access of light and air circulation). The animals were not stall-tied, which facilitated their driving to the milking parlor. The stalls were bedded with straw. The cows were fed a normalized diet in the form of a total mixed ration (TMR) prepared from maize silage. The maize silage was mixed with seasonal ingredients (e. g. green forage, root crops). In addition, nutrition was supplemented with individually determined (from the current lactation yield records) portions of a concentrate and diet supplements. The feed was fed from a mixer-wagon directly to a trough. All cows were watered *ad libitum* from automatic drinkers. Milking was carried out twice daily in a herringbone milking parlor. The mean herd milk yield was 10,914 kg. Udders and teats were examined for clinical mastitis signs during each milking. The signs were easily visible without extra equipment or were confirmed using a thermometer or a strip cup (in order to provide high visibility of clots or flakes present in the milk). All alarming symptoms were reported to an experienced veterinarian employed on the farm, who ultimately diagnosed clinical mastitis cases. Cows were dried-off six weeks before an estimated calving date. Antibiotic protection was used if the symptoms of an inflammatory condition classified as mastitis were observed during the dry-off period. Otherwise, antibiotic therapy was avoided.

The present study included test milking records and data on mastitis occurrence collected between September 2003 and April 2008 from cows kept on the farm located in the northwestern region of our country. An initial set of 38794

information records was reduced to 24712 after editing for erroneous and incomplete data. The following predictors (input variables) were used: percentage of Holstein-Friesian genes (HF), calving age (AGE), daily milk yield (MILK), fat percentage in milk (FT), protein percentage in milk (PR), lactose percentage in milk (LAE), urea content in milk (UR), arithmetic mean of lnSCC for a cow's sire determined from the lnSCC of his daughters (SIRE), Lactoferrin genotype (LTF), tumor necrosis factor alpha genotype (TNF- α), lysozyme genotype (mLYZ), combined defensin genotypes (CDG), lactation number (LACT), test milking season (TESTS; autumn from September to November, winter from December to February, spring from March to May and summer from June to August), calving season (CALS; defined as previously described) and lactation stage (STAG; first stage from 0 to 30 days, second stage from 31 to 60 days, etc. until 315 days of lactation). Mean values of continuous predictors are given in Table 1 and the distributions of categorical predictors are presented in Table 2.

Genotypes were assayed with polymerase chain reaction – restriction fragment length polymorphism (PCR-RFLP) method based on the DNA isolated from peripheral blood. The details on genetic analyses are presented elsewhere (Wojdak-Maksymiec, 2009).

Mastitis class determined based on veterinarian's diagnosis (acute or chronic mastitis, drying-off with antibiotic protection) was an output variable with two categories: a cow with mastitis and a healthy cow. Acute mastitis was characterized by a sudden onset of local and systemic clinical symptoms. The diseased quarter was red, hot, edematous, painful, sensitive to the touch, and the milk quality was changed. It was more or less watery with the presence of serous or purulent secretion or blood. Systemic symptoms included an increase in internal body temperature, a higher pulse rate, weakness, a decrease in or a lack of appetite, reduced milk yield or no milk yield at all. Chronic mastitis, on the other hand, was characterized by mild, local clinical symptoms in the form of small changes in milk such as the presence of lumps, flakes, watery consistency and slight discoloration. The mastitic quarter was sometimes slightly swollen, red and sensitive to the touch. The whole data set (24712 records) was randomly divided into a training set (L; 18539 records) for network preparation and a test set (T; 6173 records) for the verification of mastitis detection performance (Table 1).

Table 2

Distributions of categorical predictors and output (dependent) variable in the training (L) and test (T) data sets

Set	L		T		Total	
Category	n	%	n	%	n	%
LTF						
AB	8403	45.33	2796	45.29	11199	45.32
AA	10136	54.67	3377	54.71	13513	54.68
TNF- α						
CC	6352	34.26	2138	34.63	8490	34.36
CT	8374	45.17	2829	45.83	11203	45.33
TT	3813	20.57	1206	19.54	5019	20.31
mLYZ						
CC	17628	95.09	5903	95.63	23531	95.22
CT	911	4.91	270	4.37	1181	4.78
CDG						
A1A2/B1B2/C1C2	13955	75.27	4616	74.78	18571	75.15
A1A2/B2/C1C2	428	2.31	157	2.54	585	2.37
A2/B1B2/C2	106	0.57	42	0.68	148	0.60
A1A2/B1B2/C1	763	4.12	253	4.10	1016	4.11
A2/B1B2/C1C2	518	2.79	178	2.88	696	2.82
A1A2/B1/C1C2	406	2.19	146	2.37	552	2.23
A1A2/B1B2/C2	464	2.50	151	2.45	615	2.49
A1/B1B2/C2	207	1.12	62	1.00	269	1.09
A1/B1B2/C1	169	0.91	60	0.97	229	0.93
A1/B1B2/C1C2	586	3.16	189	3.06	775	3.14
A1A2/B1B2/C2C2	82	0.44	25	0.40	107	0.43
A1A2/B2/C1	65	0.35	26	0.42	91	0.37
A2/B2/C1C2	131	0.71	40	0.65	171	0.69
A1/B1/C1C2	280	1.51	95	1.54	375	1.52
A1A2/B1/C1	123	0.66	49	0.79	172	0.70
A1/B1/C1	37	0.20	14	0.23	51	0.21
A1A2/B1B1/C1	21	0.11	8	0.13	29	0.12
A2/B2/C1	18	0.10	9	0.15	27	0.11
A2/B1B2/C1	62	0.33	23	0.37	85	0.34
A1A2/B1/C2	92	0.50	25	0.40	117	0.47
A1/B2/C1C2	16	0.09	2	0.03	18	0.07
A1A2/B2/C2	10	0.05	3	0.05	13	0.05
LACT						
I	4712	25.42	1516	24.56	6228	25.20
II	4947	26.68	1639	26.55	6586	26.65
III	3603	19.43	1224	19.83	4827	19.53
IV	2802	15.11	914	14.81	3716	15.04
V	1778	9.59	621	10.06	2399	9.71
VI	697	3.76	259	4.20	956	3.87
TESTS						
Autumn	5157	27.82	1723	27.91	6880	27.84
Winter	5315	28.67	1725	27.94	7040	28.49
Spring	5091	27.46	1728	27.99	6819	27.59
Summer	2976	16.05	997	16.15	3973	16.08
CAL5						
Autumn	4355	23.49	1458	23.62	5813	23.52
Winter	5066	27.33	1627	26.36	6693	27.08
Spring	4395	23.71	1488	24.10	5883	23.81
Summer	4723	25.48	1600	25.92	6323	25.59

Set Category	L		T		Total	
	n	%	n	%	n	%
STAG						
I	1773	9.56	584	9.46	2357	9.54
II	1981	10.69	678	10.98	2659	10.76
III	1938	10.45	665	10.77	2603	10.53
IV	1964	10.59	660	10.69	2624	10.62
V	1912	10.31	644	10.43	2556	10.34
VI	1913	10.32	626	10.14	2539	10.27
VII	1883	10.16	618	10.01	2501	10.12
VIII	1785	9.63	607	9.83	2392	9.68
IX	1683	9.08	545	8.83	2228	9.02
X	1246	6.72	383	6.20	1629	6.59
XI	461	2.49	163	2.64	624	2.53
MAST – output variable						
Mastitis	1404	7.57	455	7.37	1859	7.52
Healthy	17135	92.43	5718	92.63	22853	92.48
Variable abbreviations are as given in material and methods section						

The ratio of “mastitis” to “healthy” records in the training and test sets was approx. 1:10. A validation subset (6182 records) was also randomly created from part of the training records for the current monitoring of learning process and elimination of overtraining.

Training data were pre-processed before being fed to the network's input layer through the scaling of continuous predictors to an appropriate interval (using the mini-max method) and the conversion of categorical predictors to a numeric form (using the binary or one-of-N encoding). Network's output values were then converted to a class label during the post-processing stage (Bishop, 1995). A classical back-propagation algorithm proposed by Rumelhart et al. (1986) was used for the MLP network training. In this method, input signals were propagated forward through successive network layers to the output layer, where the network's response was compared against the real (desired) value of an output variable and thus an error of output neurons was calculated. Next, this error was back-propagated to preceding (hidden) layers and multiplied by the same weights that were used for passing the signal from input to output. This process was repeated iteratively until reaching the minimum of an error function. In the present study, the conjugate gradient algorithm was additionally used to fine-tune network's weights at the last stage of training. It consisted in an iterative determination of the search direction of an error function minimum, finding this minimum and then identification of a new search direction that was orthogonal to all previous directions (Haykin, 2009). The training of the RBF networks was performed in two stages: determination of the RBF centers (in the form of weights of the hidden layer neurons) and RBF radii (in the form of hidden neurons' bias values) and optimization of the output (linear) layer using pseudoinversion (StatSoft, 1998).

Network performance was assessed based on the root mean squared error (RMSE) on the validation set (Salehi et al., 1998). Statistica® Neural Networks software (v. 4.0F, StatSoft

Inc., Tulsa, OK, USA) was used for building and training the MLP and RBF networks. It enabled the choice of an optimal network architecture, learning algorithm and network parameters (error function, activation functions, acceptance and rejection thresholds, learning epochs, learning rate and momentum, as well as the appropriate methods of the RBF center and radius determination for the RBF networks). The exhaustive search mode of the program was selected in order to maintain the trade-off between network's performance and complexity. Calculations were performed using Pentium 2.40GHz IBM-PC compatible machine and lasted for approx. 40 hours. The MLP and RBF networks with the lowest RMSE on the validation set were used for the detection of cows susceptible to mastitis.

Akaike information criterion (AIC), Bayesian information criterion (BIC) and the G-square statistic were applied to the comparison of the MLP and RBF networks quality (performance on the training and validation sets). They were calculated according to the following formulae (Dayton, 2003; Liddle, 2007; StatSoft, 2011):

$$AIC = N \ln(MSE) + 2k \quad (1), \text{ or}$$

$$AIC_c = N \ln(MSE) + 2k + \frac{2k(k+1)}{(N-k-1)} \text{ if } N/k \leq 40 \quad (2),$$

$$BIC = N \ln(MSE) + k \ln(N) \quad (3),$$

$$G^2 = 2 \sum_{i=1}^2 O_i \ln \left(\frac{O_i}{E_i} \right) \quad (4),$$

where

MSE mean squared error,
k number of model parameters,
N number of training records,
O_i observed number of records,
E_i number of records predicted by the model.

The minimum values of these criteria were considered when choosing the best model. The detection performance of the MLP and RBF networks was assessed using sensitivity (Se), specificity (Sp) and accuracy (Acc). In addition, false positive P(FP) and false negative P(FN) rates, as well as the *a posteriori* probabilities of true positives P(PSTP) and true negatives P(P-STN) were calculated (Yang et al., 1999). Statistical significance of the differences between the probabilities was determined with the test for proportions. Moreover, the receiver operating characteristic (ROC) curves were plotted and the area under the curves (AUC) was estimated. The ROC curve shows the relationship between sensitivity and the false positive rate (1-specificity), summarizing, at the same time, the sensitivity and specificity values for different cut-off points. The standard error of AUC [SE(AUC)] was also computed according to the following formula (Greiner et al., 2000):

$$SE(AUC) = \sqrt{\frac{AUC(1-AUC) + (N_1-1)(Q_1-AUC)^2 + (N_0-1)(Q_2-AUC)^2}{N_0N_1}} \quad (5),$$

$$Q_1 = \frac{AUC}{2-AUC}; Q_2 = \frac{2AUC^2}{1+AUC} \quad (6),$$

where

N_0 number of records without mastitis,
 N_1 number of records with mastitis ($N_0 + N_1 = N$).

Apart from assessing the detection performance of the neural models based on the test set, the sequence of predictors (input variables) was also established according to their contribution to the determination of mastitis/health class (mastitis vs. no mastitis). The following criteria were used for this purpose:

1. Ratio of the network's error after removing a given predictor to the error for the full model (the greater the ratio, the more important the predictor);
2. RMSE after variable's removal;
3. Rank, ordering predictors according to their decreasing error (rank of 1 denotes the most significant variable, rank of 2 indicates slightly less significant variable, etc.).

Network's sensitivity analysis was performed on the training and validation sets.

Bearing in mind that smaller networks learn easier, better generalize acquired knowledge and are less costly in exploitation (require fewer input variables whose values need to be determined), we also aimed in the present study at checking (based on the error ratio) how the reduction of a predictor set affected the quality of the models and their detection performance. In order to do so, a two-stage procedure was applied, in which the number of predictors was reduced twice (first to the eight most significant variables out of 16 in the initial model and then to only five most important ones out of the eight previously used). After each stage, the networks were re-trained and re-evaluated. The same statistical tests as previously described were applied to difference significance testing.

3 Results

3.1 Model quality

Of the analyzed ANNs, three- and four-layer MLP networks were characterized by the RMSE values on the validation set equal to 0.2626 and 0.2627, respectively. They had the following architectures: 60-2-1 and 60-31-31-1 (the number of neurons in the input layer, hidden layer(s) and the output layer, respectively). The first one was trained for 50 epochs with the back-propagation algorithm and, additionally, for 14 epochs with the conjugate gradient method, whereas the second one was trained for 46 epochs with the back-propagation algorithm only. On the other hand, the RBF network (with a 60-51-1 architecture) was characterized by the RMSE value of 0.2656. The values of the quality measures for the MLPs with one and two hidden layers and the RBF networks calculated from the training set are shown in Table 3. As can be seen, significant differences in Se were recorded between MLPs and the RBF networks ($P \leq 0.05$). Moreover, significant differences in Sp and Acc were observed for each pair of the neural models ($P \leq 0.05$).

Table 3

Values of G^2 , AIC, BIC, sensitivity (Se), specificity (Sp) and accuracy (Acc) for the training set ($n = 18539$)

Parameter	MLP1	MLP2	RBF
G^2	16013.80	15252.06	18238.64
AIC	-50247.52	-44107.54	-45395.82
BIC	-49269.07	-22378.15	-30092.92
Se (%)	65.53 ^a	67.59 ^a	61.89 ^b
Sp (%)	64.88 ^a	66.17 ^b	61.09 ^c
Acc (%)	64.93 ^a	66.28 ^b	61.15 ^c
MLP1 – MLP2 – RBF – AIC – BIC – a, b, c –	multilayer perceptron with one hidden layer, multilayer perceptron with two hidden layers, radial basis function network, Akaike information criterion, Bayesian information criterion, values within rows with different superscript letters are significantly different ($P \leq 0.05$)		

3.2. The most significant variables

The results of network sensitivity analysis (indicating input variables most significant to the model) are presented in Table 4. The most important predictors for the neural models included: STAG and LACT (for all models), AGE (especially for MLP1), CALS (for MLP2 and the RBF network), CDG (for MLPs) and TESTS (especially in the case of the RBF networks). Of the remaining genotypes investigated in the present study, also TNF- α and LTF had a relatively large effect on the output variable category (the former was ranked fifth by all network types and the latter was ranked sixth by MLP2 and the RBF network). Only the influence of mLYZ was much smaller. In general, it can be stated (based on the error ratio) that none of the analyzed input variables had a dominant influence on mastitis class in relation to other variables.

Table 4

Sensitivity analysis results for artificial neural networks

Item	Variable	MLP1			MLP2			RBF		
		Rank	Error	Ratio	Rank	Error	Ratio	Rank	Error	Ratio
1.	LTF	16	0.2529	1.00024	6	0.2495	1.00873	6	0.2575	1.00037
2.	TNF- α	5	0.2545	1.00649	5	0.2496	1.00927	5	0.2577	1.00114
3.	mLYZ	11	0.2531	1.00080	12	0.2479	1.00234	8	0.2575	1.00020
4.	CDG	4	0.2551	1.00896	4	0.2512	1.01580	12	0.2574	1.00001
5.	LACT	2	0.2559	1.01215	2	0.2517	1.01769	2	0.2580	1.00224
6.	TESTS	13	0.2531	1.00076	7	0.2491	1.00703	4	0.2577	1.00124
7.	CALS	7	0.2539	1.00418	3	0.2515	1.01695	3	0.2578	1.00167
8.	STAG	1	0.2566	1.01492	1	0.2547	1.02983	1	0.2598	1.00936
9.	MILK	8	0.2537	1.00350	14	0.2477	1.00170	9	0.2574	1.00011
10.	FT	9	0.2537	1.00348	11	0.2479	1.00251	14	0.2574	0.99997
11.	PR	12	0.2531	1.00077	16	0.2473	1.00000	15	0.2574	0.99994
12.	LAE	6	0.2543	1.00553	8	0.2487	1.00537	7	0.2575	1.00027
13.	UR	10	0.2536	1.00288	10	0.2480	1.00292	10	0.2574	1.00011
14.	HF	14	0.2530	1.00062	13	0.2478	1.00181	11	0.2574	1.00006
15.	AGE	3	0.2552	1.00925	9	0.2482	1.00343	16	0.2574	0.99990
16.	SIRE	15	0.2530	1.00055	15	0.2477	1.00155	13	0.2574	1.00000

MLP1 – multilayer perceptron with one hidden layer,
MLP2 – multilayer perceptron with two hidden layers,
RBF – radial basis function network, variable abbreviations are as given in material and methods section

3.3 Mastitis detection performance

Mastitis detection results for individual ANN types obtained from the test set (which was not used during the network training and shows its effectiveness during exploitation on new data) are presented in Table 5. Statistically significant differences in Sp, Acc and P(FP) were found for each pair of the analyzed networks ($P \leq 0.05$).

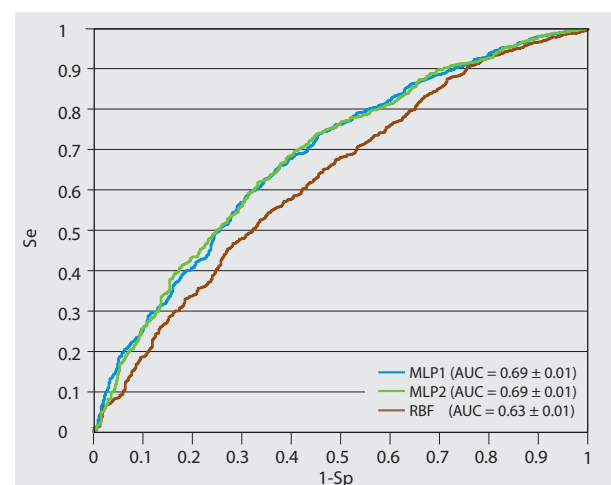
The ROC curves and their corresponding AUC and SE(AUC) values calculated from the test set for the MLP networks with one and two hidden layers and the RBF networks are presented in Figure 1. The AUC values were higher for MLPs compared with those for the RBF networks [AUC \pm SE(AUC) was 0.6863 ± 0.0142 , 0.6857 ± 0.0142 and 0.6295 ± 0.0145 for the MLP1, MLP2 and RBF networks, respectively].

Table 5

Results of mastitis detection in cows based on the test set (n = 6173)

Parameter (%)	MLP1	MLP2	RBF
Se	63.30	62.20	57.80
Sp	65.04 ^a	66.58 ^b	60.30 ^c
Acc	64.91 ^a	66.26 ^b	60.12 ^c
P(FP)	34.96 ^a	33.42 ^b	39.70 ^c
P(FN)	36.70	37.80	42.20
P(PSTP)	12.59 ^a	12.90	10.38 ^b
P(PSTN)	95.70	95.68	94.73

MLP1 – multilayer perceptron with one hidden layer,
MLP2 – multilayer perceptron with two hidden layers,
RBF – radial basis function network,
a, b, c – values within rows with different superscript letters are significantly different ($P \leq 0.05$), parameter abbreviations are as given in material and methods section

**Figure 1**

The ROC curves plotted for different ANN types based on the test set

3.4 Effect of reducing the number of input variables on the quality and detection performance of the models

Input variables included in individual ANN models after the first and the second stage of reduction are given in Table 6. In general, all networks selected the same set of predictors at both reduction stages, although their sequence of importance varied depending on the network type. The main differences in the first phase of reduction concerned AGE and MILK, which were retained only by MLP1 as well as mLYZ, which was selected only by the RBF network. At the second stage, AGE was still retained only by MLP1, LAE by MLP2 and CALS and TESTS by the RBF network (Table 6).

Table 6

Input variables included in individual neural models after the first and the second stage of reduction

Rank	MLP1	MLP2	RBF
First stage of reduction			
1.	STAG	STAG	STAG
2.	LACT	LAE	LACT
3.	AGE	CDG	TESTS
4.	CDG	LACT	CALS
5.	TNF- α	TNF- α	TNF- α
6.	LAE	TESTS	mLYZ
7.	MILK	CALS	LTF
8.	CALS	LTF	LAE
Second stage of reduction			
1.	LACT	STAG	LACT
2.	STAG	CDG	STAG
3.	CDG	LACT	TNF- α
4.	AGE	TNF- α	CALS
5.	TNF- α	LAE	TESTS

MLP1 – multilayer perceptron with one hidden layer,
MLP2 – multilayer perceptron with two hidden layers,
RBF – radial basis function network, variable abbreviations are as given in material and methods section

The values of individual probabilities calculated from the training set for the ANNs with reduced numbers of input variables are presented in Table 7. The G^2 values increased with a decreasing number of input variables (which shows the quality deterioration of the neural models since smaller G^2 values indicate better models), except for MLP2, for which an initial increase (for the model with eight inputs) was followed by a decrease in G^2 (for the model with only five variables). In the case of AIC for MLP1, a reduction in the number of inputs resulted in its constant increase, whereas AIC for MLP2 and RBF initially decreased (for the model with eight inputs) and then increased (for the model with only five predictors). A similar trend in BIC was observed for all ANNs, for which the BIC value first fell (after the first stage of reduction) and then rose (after the second stage of reduction) (Table 7). A statistically significant difference in Se ($P \leq 0.05$) was present for the RBF network between the full model or the model with eight variables and the model with only five variables (Table 7). Also statistically significant differences in Sp and Acc ($P \leq 0.05$) were found for each pair of the MLP1 and RBF models, whereas significant differences in Sp and Acc ($P \leq 0.05$) for MLP2 existed between the full model and the model with eight variables or that with only five inputs (Table 7).

The next stage of the present study was the evaluation of the modified models in terms of their detection performance. The probability values (expressed as a percentage) for the ANNs with a reduced set of predictors calculated from the test set ($n = 6173$) are shown in Table 8. Specificity, accuracy and P(FP) differed significantly ($P \leq 0.05$) for all model types. Significant differences in Sp and P(FP) were found for MLP1 for each pair of compared models, whereas the respective differences for MLP2 were observed only between the full model and both reduced models. Finally, in the case of the RBF networks, differences in Sp and P(FP) existed between the full model or that with eight variables and the model with five inputs. The significant differences in Acc, on the other hand, were found between the full model or the one with eight variables and that with five predictors in the case of MLP1 and the RBF network, and between the full model and both reduced models for MLP2 (Table 8).

Table 7

Values of G^2 , AIC, BIC, sensitivity (Se), specificity (Sp) and accuracy (Acc) for the training set ($n = 18539$) after the reduction of an initial set of input variables

Variables	Type	G^2	AIC	BIC	Se (%)	Sp (%)	Acc (%)
All	MLP1	16013.80	-50247.52	-49269.07	65.53	64.88 ^a	64.93 ^a
8	MLP1	16627.82	-50215.25	-49409.00	66.38	63.66 ^b	63.87 ^b
5	MLP1	17802.48	-49691.91	-47922.86	64.67	61.65 ^c	61.87 ^c
All	MLP2	15252.06	-44107.54	-22378.15	67.59	66.17 ^a	66.28 ^a
8	MLP2	15970.67	-49972.72	-48642.02	65.53	64.96 ^b	65.00 ^b
5	MLP2	15857.59	-43870.90	-22696.54	66.60	65.09 ^b	65.20 ^b
All	RBF	18238.64	-45395.82	-30092.92	61.89 ^a	61.09 ^a	61.15 ^a
8	RBF	19172.99	-49409.98	-47954.04	60.75 ^a	59.53 ^b	59.63 ^b
5	RBF	20923.86	-49041.05	-47483.35	56.70 ^b	56.89 ^c	56.87 ^c

MLP1 – multilayer perceptron with one hidden layer,
MLP2 – multilayer perceptron with two hidden layers,
RBF – radial basis function network,
AIC – Akaike information criterion,
BIC – Bayesian information criterion,
a, b, c – values within columns with different superscript letters are significantly different ($P \leq 0.05$)

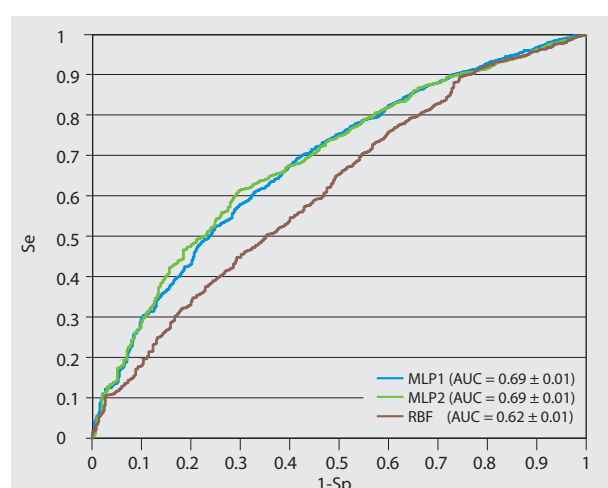
Table 8

Results of mastitis detection in cows obtained on the test set (n = 6173) for the ANNs with a reduced set of predictors

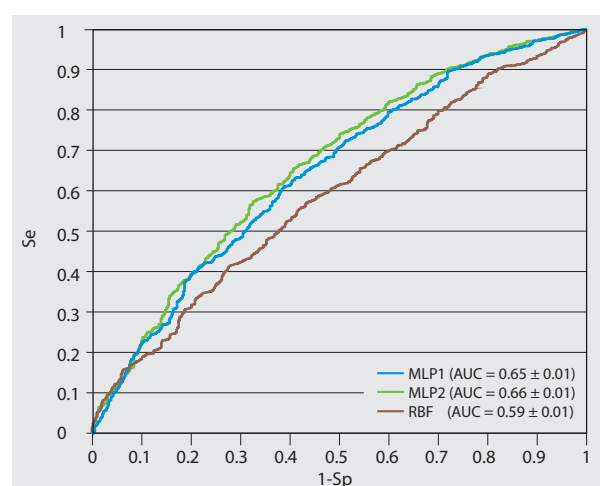
Variables	Type	Se (%)	Sp (%)	Acc (%)	P(FP) (%)	P(FN) (%)	P(PSTP) (%)	P(PSTN) (%)
All	MLP1	63.30	65.04 ^a	64.91 ^a	34.96 ^a	36.70	12.59	95.70
8	MLP1	63.74	63.64 ^b	63.65 ^a	36.36 ^b	36.26	12.24	95.66
5	MLP1	61.10	61.09 ^c	61.09 ^b	38.91 ^c	38.90	11.11	95.18
All	MLP2	62.20	66.58 ^a	66.26 ^a	33.42 ^a	37.80	12.90	95.68
8	MLP2	64.40	64.39 ^b	64.39 ^b	35.61 ^b	35.60	12.58	95.79
5	MLP2	59.78	64.43 ^b	64.09 ^b	35.57 ^b	40.22	11.80	95.27
All	RBF	57.80	60.30 ^a	60.12 ^a	39.70 ^a	42.20	10.38	94.73
8	RBF	55.16	58.94 ^a	58.66 ^a	41.06 ^a	44.84	9.66	94.29
5	RBF	56.70	56.10 ^b	56.15 ^b	43.90 ^b	43.30	9.32	94.21

MLP1 – multilayer perceptron with one hidden layer,
 MLP2 – multilayer perceptron with two hidden layers,
 RBF – radial basis function network,
 a, b, c – values within columns with different superscript letters are significantly different ($P \leq 0.05$), parameter abbreviations are as given in material and methods section

The ROC curves plotted based on the test set for individual ANN types after reducing the number of input variables and their corresponding AUC and SE(AUC) values are given in Figures 2 and 3. Similarly as in the case when all predictors were considered, the AUC values for multilayer perceptrons after retaining only the eight most significant input variables were higher than those for the RBF networks [AUC \pm SE(AUC) values were 0.6861 ± 0.0142 , 0.6908 ± 0.0142 and 0.6174 ± 0.0145 for the MLP1, MLP2 and RBF networks, respectively). Also, after retaining only the five most significant predictors, the same trend in the AUC values for individual ANN types was present (MLP2 had the highest AUC value of 0.6639 ± 0.0143 , MLP1 had a slightly smaller AUC of 0.6472 ± 0.0144 , whereas the RBF network had the smallest AUC of 0.5862 ± 0.0145).

**Figure 2**

The ROC curves for individual ANN types plotted based on the test set for models including only the eight most significant input variables (Se – sensitivity, Sp – specificity, MLP1 – multilayer perceptron with one hidden layer, MLP2 – multilayer perceptron with two hidden layers, RBF – radial basis function network)

**Figure 3**

The ROC curves for individual ANN types plotted based on the test set for models including only the five most significant input variables (Se – sensitivity, Sp – specificity, MLP1 – multilayer perceptron with one hidden layer, MLP2 – multilayer perceptron with two hidden layers, RBF – radial basis function network)

4 Discussion

4.1 Model quality

Considering the values of probabilities such as sensitivity (percentage of correctly diagnosed cows with mastitis), specificity (percentage of correctly identified healthy cows) and accuracy (percentage of correctly identified cows from both classes), calculated from the training set (Table 3), it can be stated that, in general, classification quality was good, which was also reflected in the low RMSE values (0.2626 to 0.2656) for individual ANNs. The RBF network was characterized by a worse quality compared with MLPs, which was further confirmed by the statistically significant differences in the calculated probabilities.

Montgomery et al. (1987), using discriminant function analysis for mastitis detection in cows based on predictors such as: previous mastitis occurrence, decreased body condition, changed milk organoleptic properties, udder swelling and raised body temperature, obtained a correct classification rate of 0.78, sensitivity ranging from 0.32 to 0.45 and specificity ranging between 0.91 and 0.97, whereas in the study by Nielen et al. (1995a), on mastitis detection using ANN (based on electrical conductivity, milk yield and its temperature during milking), sensitivity on a training set was approx. 0.75 and specificity was approx. 0.90. In a later study on mastitis detection (based only on milk electrical conductivity and quarter milk yield) Nielen et al. (1995b) obtained sensitivity of 0.92 and specificity of 1.0. The research on mastitis detection in cows (using ANNs and data on milk electrical conductivity, milk flow rate and the number of days in milk) was also carried out by Cavero et al. (2008), who recorded sensitivity in the range of 0.75 to 0.81 and 0.80 to 0.82 and specificity in the range of 0.60 to 0.66 and 0.77 to 0.79 depending on mastitis definition (SCC above 100,000 cells/ml or above 400,000 cells/ml). Finally, Krieter et al. (2007) assuming a minimum block sensitivity of 0.80, noted the specificity of 0.61 and 0.78 depending on mastitis definition, using the aforementioned input variables. As can be seen from the above review, sensitivity, specificity and accuracy in the present study were similar to or lower than those obtained by other authors, which resulted mainly from the use of weaker predictors in our work.

The values of G^2 , AIC and BIC (Table 3) showing the goodness-of-fit and the trade-off between goodness-of-fit and model complexity, indicated that the best model was MLP2 according to G^2 and MLP1 according to AIC and BIC.

4.2 The most significant variables

As can be seen from Table 4, the most important mastitis predictors for ANNs were STAG, LACT, AGE, CALS, TESTS and the variables referring to genotypes, i. e. CDG, TNF- α and LTF.

Many studies have shown a significant effect of lactation stage (the STAG variable) on mastitis incidence, although results reported by different authors vary. In the study by Bunch et al. (1984) on cows in their first or second lactation, it was found that, on average, approx. two-fifths of clinical mastitis cases occurred before 30 days of lactation. Similar results were reported by Hammer et al. (2012), who observed the greatest risk of mastitis at a quarter level between 10 and 29 days in milk. On the other hand, an investigation carried out in the Scandinavian countries (Valde et al., 2004) showed that the highest risk of mastitis occurred from two days antepartum to 14 days post-partum. In Polish Holstein-Friesian Black-and-White cattle, Bogucki et al. (2014), who studied an effect of lactation stage on SCC in milk, found that the natural logarithm of SCC increased steadily with successive lactation stages, whereas Nałęcz-Tarwacka and Dembińska (2013) did not observe any significant effect of lactation stage on SCC.

As for primipara, most clinical mastitis cases occur at an early stage of lactation, until about 30 days in milk (Myllys and Rautala, 1995; Nyman et al., 2007; Svensson et al., 2006). Persson Waller et al. (2009) showed that two-thirds of all

mastitis cases in primipara occurred directly before calving or in the first month of lactation – most frequently during the first week post-calving. Moreover, these authors also found significant differences in mastitis incidence depending on lactation stage between primi- and multipara. For the former, 65 % cases occurred in the period from seven days antepartum to 30 days postpartum, while 15 % and 20 % in the period from 31 to 120 days in milk and beyond 120 days in milk, respectively. Respective percentages for older cows were 36 %, 35 % and 28 %. In Polish Holstein-Friesian Black-and-White primipara, Gierdziewicz et al. (2009) stated that SCC was highest at the beginning and end of lactation, while its level at peak lactation (third and second month) was lowest. This result was further confirmed by Guliński et al. (2016), who found that SCC was lowest during the three middle months of lactation (sixth to eighth) and the natural logarithm of SCC was significantly higher in the ninth and tenth month of lactation compared with all the preceding ones. The authors explained this phenomenon by the “dilution” effect associated with a higher milk yield at peak lactation.

The next significant variables, i. e. lactation number or parity (LACT) and calving age (AGE) are usually discussed together. The general trend is towards an increased mastitis incidence with older age/higher parity (Olde Riekerink et al., 2007; Persson Waller et al., 2009; Wolf et al., 2010). Also Rupp and Boichard (2000) reported the highest mastitis incidence in the second and sixth lactation, respectively, whereas Valde et al. (2004) estimated the risk of mastitis during a 305-day lactation at 0.127 to 0.215 in primiparous cows and 0.204 to 0.358 in cows of second or higher parity. In addition, Hammer et al. (2012), who studied 2- to 9-year-old cows grazed on pasture, found the more frequent occurrence of mastitis with an increasing parity. According to Pantoja et al. (2009), the likelihood of mastitis in an udder quarter of a cow in her fifth or later lactation is 4.2 times higher than that in the udder quarters of cows in their second lactation. An effect of lactation number on the risk of clinical mastitis may also be attributed to the pathogen species responsible for this condition (Green et al., 2004). In the study on Polish Holstein-Friesian Black-and-White cows, it was found that the lowest SCC was characteristic of the cows in their first lactation compared with subsequent ones and that SCC rose with increasing parity/calving age (Gierdziewicz et al., 2009; Król et al., 2009; Nałęcz-Tarwacka and Dembińska, 2013; Otwinowska-Mindur et al., 2008). Similar observations in the same breed were made by Bogucki et al. (2014), who recoded the lowest natural logarithm of SCC in the second lactation, slightly higher one in the first lactation and the highest one in the third and subsequent lactations.

Important input variables indicated by the network sensitivity analysis (especially for the RBF network) included also calving season (CALS; third position) and mastitis occurrence season (TESTS; fourth position). In a study on 242 Polish Holstein-Friesian cows kept on a single farm, a higher incidence of mastitis was observed during summer months (June, July and August) compared with winter ones (Miciński et al., 2010), whereas in US Holsteins the highest mastitis

occurrence was typical of the cooler months of the year (Abdel Azim et al., 2005). In the work by Olde Riekerink et al. (2007), a highly significant effect of season on mastitis incidence was found in Dutch Holstein-Friesian and Friesian cows. The authors observed a generally higher risk of clinical mastitis in late autumn (December) than in summer and a slightly increased frequency of mastitis cases was noticed in the second half of July in the herds with a high bulk tank SCC, which resulted from a wider spread of *E. coli* and *Staphylococcus aureus* pathogens in this period. The changes of mastitis frequency in different seasons were also reported for other microbial species. Finally, an interaction between season and management system was additionally recorded. Similar seasonal trends caused by a different spread of mastitis-causing pathogens were shown by Østerås et al. (2006), whereas Hristov et al. (2007) did not find any significant effect of season on mastitis incidence. Also, in the study on the effect of calving season on the content of SCC in the milk from Polish Holstein-Friesian Black-and-White cows, it was found that this effect was statistically insignificant (Nałęcz-Tarwacka and Dembińska, 2013). However, other works on the same breed showed that the differences in the SCC between seasons were statistically significant. For instance, Otwinowska-Mindur et al. (2008) reported that the somatic cell score was highest between April and June and lowest between October and December, whereas Guliński and Salamończyk (2007) found that SCC was highest from June to August and lowest from September to November.

Of the variables referring to the genotypes of lactoferrin (LTF), tumor necrosis factor alpha (TNF- α), lysozyme (mLYZ) and defensins (CDG), three predictors, i. e. TNF- α , CDG, and LTF were ranked relatively high by all ANN types. As described earlier, TNF- α is a pro-inflammatory cytokine, which activates the whole immune system and increases the vascular endothelial permeability, facilitating diapedesis and, as a chemoattractant, inducing chemotaxis, that is, the migration of leucocytes towards the focus of inflammation (Wojdak-Maksymiec and Mikołajczyk, 2012). Moreover, this cytokine raises the secretion of many other cytokines, being itself secreted at higher amounts by phagocytic cells as a result of bacterial lipopolysaccharide action (Wojdak-Maksymiec et al., 2013). These authors also found a significant effect of an interaction between a TNF- α genotype and lactation number on mastitis incidence and the *T* allele was associated with a lower number of mastitis cases in earlier lactations. On the other hand, the action of defensins consists in damaging the cell membrane of microorganisms and its perforation, which results in the loss of intracellular content and the penetration of the molecules that could not enter the cell initially. At the same time, the synthesis of nucleic acids and proteins as well as the respiration process are inhibited (Mak, 1994; Risso, 2000). Due to their broad antibiotic spectrum, defensins are also involved in combating pathogens that most often cause mastitis in dairy cows (Roosen et al., 2004; Ryniewicz et al., 2003).

Finally, LTF acts against many microbial species including Gram-negative and Gram-positive bacteria, enveloped and non-enveloped viruses, fungi and other parasites. It is

capable of binding iron ions as well as phosphorus and zinc, which are necessary for growth promotion. Therefore, the action of LTF limits the availability of these agents to potential pathogens (Wojdak-Maksymiec et al., 2013). LTF is present in many secretory fluids of mammals and secondary granules of neutrophils being an important mediator in host defense against different environmental factors (Zimecki et al., 2004). In cattle, bovine LTF present in milk is involved in the innate response of the mammary gland against bacterial infections. It was shown that its concentration depended on the SCC level in Polish Holstein-Friesian cows, along with the concentrations of interleukin-1 β and tumor necrosis factor alpha, which makes these inflammatory mediators potentially useful indicators of mastitis occurrence (Sobczuk-Szul et al., 2014). At the molecular level, it was also found that the polymorphism within intron 6 of the *LTF* gene identified with PCR-RFLP in the same breed using the *EcoRI* restriction enzyme was associated with the level of SCC (the *BB* genotype was related to a significantly higher SCC level compared with *AA* and *AB*) (Sender et al., 2006).

The last investigated genotype (lysozyme) had a less significant effect on mastitis status, similarly to other input variables included in the neural models (variables referring to milk yield and composition, proportion of Holstein-Friesian genes and the mean lnSCC for a sire).

4.3 Detection performance

After training the MLP and RBF networks, the best one from each category was selected and used on the test set in order to verify its effectiveness of diagnosing cows susceptible to mastitis. These records were not used for the network training or its monitoring. Considering calculated probabilities and sensitivity in particular (percentage of correctly detected cows with mastitis), it can be stated the ability of the models to detect this condition was good (approx. 62 %) (StatSoft, 1998). Statistically significant differences in Sp, Acc and P(FP) were present between all neural model types, however, the lowest values were observed for the RBF networks, which proves their somewhat worse detection properties (Table 5). In the study by Montgomery et al. (1987) on mastitis detection using discriminant function analysis, sensitivity, specificity and accuracy on a test set were 0.39, 0.91 and 0.75, respectively, whereas in the aforementioned work by Nielsen et al. (1995b) the respective values were 0.33 to 0.77; 0.69 to 1.00 and 0.67 to 0.77, depending on the manner of test records selection. Also, Yang et al. (1999) and Yang et al. (2000) obtained quite different values of discussed probabilities depending on the way, in which test records were selected and the proportion of mastitis and non-mastitis cases (sensitivity, specificity and accuracy in the range of 0.24 to 0.75, 0.67 to 1.0 and 0.55 to 0.99, respectively). On the other hand, sensitivity and specificity in the study by Cavero et al. (2008) were 0.63 to 0.93 and 0.38 to 0.87 depending on mastitis definition, whereas Krieter et al. (2007) obtained specificity of 0.51 to 0.75, assuming the minimum sensitivity of 0.80. These data show that the values reported by different authors are similar to those in the present study, although

Sun et al. (2010), using ANNs for the same purpose, reported Se, Sp and Acc in the range of 0.79 to 0.87, 0.91 to 0.92 and 0.87 to 0.91, respectively, which were relatively high and higher than those in the present work. Finally, it should be mentioned that ANNs were also applied to mastitis detection, in which more than two categories of an output variable were distinguished (Hassan et al., 2009).

It is also important for mastitis detection to avoid false positive results (i. e. healthy cows diagnosed as ill) and, especially, false negative ones (cows suffering from mastitis recognized as healthy by the model), which in the latter case result in much more serious consequences. The rate of the so-called false alarms was similar for both MLP types (approx. 35 %) and only the RBF network was characterized by their higher percentage (Table 5). Also P(FN) values were at a similar level for all ANN types and comparable with the false positive rate. In the available literature on mastitis detection using ANN, these values vary considerably in the range of 0.0 to 0.76 (Cavero et al., 2008; Nielen et al., 1995b; Wang and Samarasinghe, 2005; Yang et al., 1999).

Additional probabilities calculated from the classification (confusion) matrix included P(PSTP) and P(PSTN), which indicate the proportions of cows assigned to the “healthy” or “mastitis” class by the model that really belonged to these categories. The P(PSTP) values obtained in the present study (Table 5) were definitely too low for all ANN types. An opposite situation occurred in the case of P(PSTN), which proves high reliability of predicting healthy cases by ANNs. The P(PSTP) and P(PSTN) values reported in the available literature are in a relatively broad range from 0.02 to 1.00 (Nielen et al., 1995b; Yang et al., 1999).

The last stage of the detection performance assessment was the plotting of the ROC curves (Figure 1) for the test set records and the calculation of AUC. AUC assumes the values in the range of 0.5 (no discrimination) to 1.0 (perfect discrimination), constituting, at the same time, the probability that a measure or predicted risk is higher for a case belonging to a given class than for a case that does not belong to this class (Cook, 2007). In the present study, the optimum cut-off value minimizing the number of misclassifications to both distinguished classes, was 0.93 (assuming equal misclassification costs), while the highest AUC value (indicating the best discrimination power of the neural model) was found for MLP1 (Figure 1). For comparison, Yang et al. (1999) reported the AUC values in the range of 0.77 to 0.87 depending on the proportion of mastitis to non-mastitis records and the optimal cut-off value.

4.4 An effect of a reduced number of input variables on the quality and detection performance of the models

A reduction in the number of input variables for ANN may lead to obtaining a model of higher quality, learning more easily, having better generalization abilities and being less costly during its exploitation. The final set of five variables was almost the same for all ANN types, except for AGE, LAE and the season of calving and test day, which were selected

only by MLP1, MLP2 and the RBF network, respectively. Unfortunately, this final set for MLPs included also CDG, whose practical use can be problematic due to the necessity of determining polymorphic variants of defensins, which is rather costly and requires laboratory tests. A similar study on an effect of different combinations of input variables on the quality of the neural models used for mastitis detection was performed by Yang et al. (2000), who analyzed models trained only on the basis of milk recording data, conformation traits data or both data sets combined. The most significant production variables were lactation stage, milk yield and SCC, which were similar to those in the present study (except for SCC), whereas the influence of conformation traits was much smaller. The same authors in their previous study (Yang et al., 1999) investigated MLPs trained on a data set of only traditional mastitis predictors (such as cow age, lactation stage and SCC) and on a combined data set of traditional and additional predictors (e. g. calving season, milk composition, conformation class) showing that the effect of additional variables was negligible. In other studies on the use of ANN for mastitis detection, different possible sets of predictors were also analyzed, although on a much smaller scale. For instance, Heald et al. (2000) reduced an initial set of 23 predictors to only 13, retaining in the model variables such as: mean SCC for lactation, test-day SCC, 305-day milk yield, lactation number, days in milk, the ratio of monthly milk yields for two subsequent months of lactation, the number of test days with somatic cell score (SCS) above 4.9 and the contribution of cow's individual SCC to bulk tank SCC. As can be seen, the final set of selected predictors determined from the sensitivity analysis was similar to the set of five input variables in the present study. Also, Sun et al. (2010) investigated four different sets of predictors such as: running mean of the normalized quarter milk yield and the normalized electrical conductivity, deviation from the minimum of the second aforementioned variable, as well as the first three principal components, concluding that the best prediction properties (sensitivity, specificity and accuracy) were characteristic of MLPs trained on principal components. On the other hand, Ankinakatte et al. (2013) considered five different sets of input variables such as: days in milk, SCS, concentration of lactate dehydrogenase, electrical conductivity and daily milk yield, finding that the exclusion of the second and the last above-mentioned variables significantly deteriorated ANN detection performance.

As for the quality criteria calculated from the training set for ANNs with reduced sets of predictors (Table 7), a general upward trend for G^2 was visible, which indicates a lower ANN quality (except for MLP2, for which a decrease in G^2 was observed for the model with five variables relative to the one with eight predictors). A different situation was, however, observed for AIC and BIC, whose values changed differently depending on the network type. In the case of MLP1, AIC constantly increased, whereas for MLP2 and RBF, the values first decreased and then increased. The same trend was observed in BIC for all classifiers and consisted in an initial fall of the criterion value and then its rise. This result shows that the initial reduction in the number of input variables led to

less complex models that still fit the training data sufficiently well. However, further reduction in the number of predictors (and a model complexity) resulted in their poorer goodness-of-fit, which was reflected in the higher values of the information criteria applied. Also, the significantly lower Se, Sp and Acc values were observed for some ANN types after removing some input variables. The elimination of predictors had a similar effect on mastitis detection on the test set (Table 8). Sp, Acc, and P(FP) differed significantly for all network types, while the remaining probabilities remained at a similar level irrespective of the number of predictors. An additional verification of the effect of input variables reduction on the network detection performance was performed by plotting the ROC curves and calculating the AUC values (on the test set). The downward trend was present for MLP1 and the RBF network, while MLP2 was characterized by the different values of this area depending on the number of predictors included.

To sum up, it should be stated that the reduction in the number of input variables may be advantageous in their application to mastitis detection on a farm (especially with regard to genotype determination) but an effect of this procedure on the quality of ANNs can be observed. In the case of MLPs, a combined defensin genotype was also included in the final set of five variables, and the necessity of its determination may be quite costly.

5 Conclusions

The results of mastitis detection in dairy cows obtained in the present study from the relatively easily available data on milk recording and the four selected genotypes, using three types of ANNs, showed satisfactory effectiveness. MLPs were slightly better in this respect, although sensitivity, specificity and accuracy were similar for all ANNs. The role of mastitis risk factors described in the literature (lactation stage, parity, calving age, season) was confirmed in our study, whereas all remaining factors (daily milk yield, its composition, proportion of Holstein-Friesian genes or the mean InSCC for a sire) had a small influence on the udder health status. Of the genotypes included in the neural models, tumor necrosis factor alpha, lactoferrin and combined defensin genotypes were relatively important, whereas the last considered genotype, i. e. lysozyme did not significantly improve the networks' detection performance.

It is possible to reduce the original set of 16 input variables to five, but a lower detection performance of the RBF network and the necessity of combined defensin genotype assay should be taken into account. An indication of cows more susceptible to mastitis facilitates the proper application of preventive measures, which may ultimately limit the number of cows suffering from mastitis in a herd.

References

- Abbassi Daloii T, Tahmoorspur M, Nassiri MR (2010) Prediction of 305 days milk production using artificial neural network in Iranian dairy cattle. In: Book of abstracts of the 61st Annual Meeting of the European Association for Animal Production, Heraklion - Crete Island, Greece, 23-27 August 2010. Wageningen : Wageningen Acad Publ, p 177
- Abdel-Azim GA, Freeman AE, Kehrli ME, Kelm SC, Burton JL, Kuck AL, Schnell S (2005) Genetic basis and risk factors for infectious and noninfectious diseases in US Holsteins : I. Estimation of genetic parameters for single diseases and general health. *J Dairy Sci* 88(3):1199–1207
- Ankinakatte S, Norberg E, Løvendahl P, Edwards D, Højsgaard S (2013) Predicting mastitis in dairy cows using neural networks and generalized additive models : a comparison. *Comput Electron Agric* 99(11):1–6
- Bals R (2000) Antimikrobielle Peptide und Peptidantibiotika. *Med Klin* 95(9):496–502
- Bishop CM (1995) *Neural networks for pattern recognition*. Oxford : Clarendon Pr, 482 p
- Bogucki M, Sawa A, Neja W (2014) Effect of changing the cow's milking system on daily yield and cytological quality of milk. *Acta Sci Pol Zootech* 13(4):17–26
- Bradley AJ (2002) Bovine mastitis : an evolving disease. *Vet J* 164(2):116–128
- Bruckmaier RM, Ontsouka CE, Blum JW (2004) Fractionized milk composition in dairy cows with subclinical mastitis. *Vet Med (Praha)* 49(8):283–290
- Bunch KJ, Heneghan DJS, Hibbitt KG, Rowlands GJ (1984) Genetic influences on clinical mastitis and its relationship with milk yield, season and stage of lactation. *Livest Prod Sci* 11(1):91–104
- Cárdenas Mansilla CS (2008) Recognition of lactation pattern curves through neural networks and discriminate analysis, during the first third of lactation in dairy cows from the IX Region. *Agro Sur* 36(1):43–48
- Cavero D, Tölle K-H, Rave G, Buxadé C, Krieter J (2007) Analysing serial data for mastitis detection by means of local regression. *Livest Sci* 110(1):101–110
- Cavero D, Tölle K-H, Henze C, Buxadé C, Krieter J (2008) Mastitis detection in dairy cows by application of neural networks. *Livest Sci* 114(2):280–286
- Cook NR (2007) Use and misuse of the receiver operating characteristic curve in risk prediction. *Circulation* 115(7):928–935
- Craninx M, Fievez V, Vlaeminck B, De Baets B (2008) Artificial neural network models of the rumen fermentation pattern in dairy cattle. *Comput Electron Agric* 60(2):226–238
- Davidson PM, Sofos JN, Branan AL (2010) *Antimicrobials in food*. Boca Raton : CRC Pr, 720 p
- Dayton CM (2003) Model comparisons using information measures. *J Mod Appl Stat Meth* 2(2):2
- Diamond G, Zasloff M, Eck H, Brasseur M, Maloy WL, Bevins CL (1991) Tracheal antimicrobial peptide, a cysteine-rich peptide from mammalian tracheal mucosa : peptide isolation and cloning of a cDNA. *Proc Nat Acad Sci USA* 88(9):3952–3956
- dos Reis CBM, Barreiro JR, Mestieri L, de Felício Porcionato MA, dos Santos MV (2013) Effect of somatic cell count and mastitis pathogens on milk composition in Gyr cows. *BMC Vet Res* 9(1):67
- Fukuda O, Nabeoka N, Miyajima T (2012) Estimation of marbling score in live cattle based on dynamic ultrasound image using a neural network. In: Proceedings of the 19th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), 2012 held in Vienna, Austria, 11-13 April 2012. Piscataway : IEEE, pp 276-279
- Gandhi RS, Raja TV, Ruhil AP, Kumar A (2009a) Evolving prediction equations for lifetime milk production using artificial neural network methodology in Sahiwal cattle. In: Dairying for livelihood and growth! : 37th Dairy Industry Conference, Goa, India, 7-9 February 2009. New Delhi : Indian Dairy Ass, p 7
- Gandhi RS, Raja TV, Ruhil AP, Kumar A (2009b) Prediction of lifetime milk production using artificial neural network in Sahiwal cattle. *Indian J Anim Sci* 79(10):1038–1040
- Gandhi RS, Raja TV, Ruhil AP, Kumar A (2010) Artificial neural network versus multiple regression analysis for prediction of lifetime milk production in Sahiwal cattle. *J Appl Anim Res* 38(2):233–237
- Gierdziewicz M, Otwinowska-Mindur A, Ptak E (2009) Effect of herd size and daily milk yield on somatic cell score in Polish Holstein-Friesian cows Black-and- White variety. *Sci Ann Pol Soc Anim Prod* 5(2):65-72

- Green MJ, Green LE, Schukken YH, Bradley AJ, Peeler EJ, Barkema HW, de Haas Y, Collis VJ, Medley GF (2004) Somatic cell count distributions during lactation predict clinical mastitis. *J Dairy Sci* 87(5):1256–1264
- Greiner M, Pfeiffer D, Smith R (2000) Principles and practical application of the receiver-operating characteristic analysis for diagnostic tests. *Prev Vet Med* 45(1–2):23–41
- Guliński P, Salamończyk E (2007) Estimation of chosen milk performance traits, length of lactation and udder health in high-yielding Polish Holstein-Friesian cows of Black-and-White variety. *Sci Ann Pol Soc Anim Prod* 3(1):29–36
- Guliński P, Wyszomierski K, Salamończyk E (2016) Relationship between somatic cell count and milk performance of Polish Holstein-Friesian cows. *Sci Ann Pol Soc Anim Prod* 12(1):17–23
- Hammer JF, Morton JM, Kerrisk KL (2012) Quarter-milking-, quarter-, udder-and lactation-level risk factors and indicators for clinical mastitis during lactation in pasture-fed dairy cows managed in an automatic milking system. *Aust Vet J* 90(5):167–174
- Harmon RJ (1994) Physiology of mastitis and factors affecting somatic cell counts. *J Dairy Sci* 77(7):2103–2112
- Hassan KJ, Samarasinghe S, Lopez-Benavides MG (2009) Use of neural networks to detect minor and major pathogens that cause bovine mastitis. *J Dairy Sci* 92(4):1493–1499
- Haykin SS (2009) Neural networks and learning machines. New York : Pearson, 906 p
- Heald CW, Kim T, Sisco WM, Cooper JB, Wolfgang DR (2000) A computerized mastitis decision aid using farm-based records: An artificial neural network approach. *J Dairy Sci* 83(4):711–720
- Hettinga KA, Van Valenberg HJF, Lam T, Van Hooijdonk ACM (2008) Detection of mastitis pathogens by analysis of volatile bacterial metabolites. *J Dairy Sci* 91(10):3834–3839
- Hillerton JE, Berry EA (2005) Treating mastitis in the cow : a tradition or an archaism. *J Appl Microbiol* 98(6):1250–1255
- Hristov S, Joksimović-Todorović M, Relić R, Stojanović B, Stanković B, Vuković D, Davidović V (2007) The influence of udder disinfections, period of lactation and season on cow mastitis occurrence. *Savrem poljopr* 56(1–2):138–143
- Krieter J, Caverio D, Henze C (2007) Mastitis detection in dairy cows using neural networks. In: Böttinger S, Theuvsen L, Rank S, Morgenstern M (eds) *Agrar informatik im Spannungsfeld zwischen Regionalisierung und globalen Wertschöpfungsketten* : Referate der 27. GIL Jahrestagung, 05.-07. März 2007, Stuttgart, Germany, pp 123–126
- Król J, Litwinczuk A, Brodziak A, Topyla B (2009) Milk quality of three cow breeds during the successive years of performance. *Sci Ann Pol Soc Anim Prod* 5(4):181–188
- Liddle AR (2007) Information criteria for astrophysical model selection. *MNRAS Letters* 377(1):L74–L78
- López-Benavides MG, Samarasinghe S, Hickford JG (2003) The use of artificial neural networks to diagnose mastitis in dairy cattle. In: *Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks 2003*, Portland, Oregon 20–24 July 2003 : vol 1. Piscataway : IEEE, pp 582–585
- Mak P (1994) Antibacterial proteins and peptides of human neutrophils : the search for new antibiotics. *Adv Cell Biol Suppl* 3:157–173
- Miciński J, Zwierzchowski G, Ropelewska K (2010) Milking process management and the quantity and quality of milk produced in two milking systems. *Sbornik Naucznych Trudow* 1(1):289–299
- Montgomery ME, White ME, Martin SW (1987) A comparison of discriminant analysis and logistic regression for the prediction of coliform mastitis in dairy cows. *Can J Vet Res* 51(4):495
- Myllys V, Rautala H (1995) Characterization of clinical mastitis in primiparous heifers. *J Dairy Sci* 78(3):538–545
- Nałęcz-Tarwacka T, Dembińska B (2013) The influence of some factors on somatic cell count in milk of high yielding cows. *Prz Hod* 81(4):3–5
- Nielen M, Schukken YH, Brand A, Haring S, Ferwerda-van Zonneveld RT (1995a) Comparison of analysis techniques for on-line detection of clinical mastitis. *J Dairy Sci* 78(5):1050–1061
- Nielen M, Spigt MH, Schukken YH, Deluyker HA, Maatje K, Brand A (1995b) Application of a neural network to analyse on-line milking parlour data for the detection of clinical mastitis in dairy cows. *Prev Vet Med* 22(1):15–28
- Njubi DM, Wakhungu J, Badamana MS (2009) Mating decision support system using computer neural network model in Kenyan Holstein-Friesian dairy cattle [online]. To be found at <<http://www.lrrd.org/lrrd21/4/njub21045.htm>> [quoted 21.08.2016]
- Njubi DM, Wakhungu JW, Badamana MS (2010) Use of test-day records to predict first lactation 305-day milk yield using artificial neural network in Kenyan Holstein-Friesian dairy cows. *Trop Anim Health Prod* 42(4):639–644
- Nyman A-K, Ekman T, Emanuelson U, Gustafsson AH, Holtenius K, Waller KP, Sandgren CH (2007) Risk factors associated with the incidence of veterinary-treated clinical mastitis in Swedish dairy herds with a high milk yield and a low prevalence of subclinical mastitis. *Prev Vet Med* 78(2):142–160
- Olde Riekerink RGM, Barkema HW, Stryhn H (2007) The effect of season on somatic cell count and the incidence of clinical mastitis. *J Dairy Sci* 90(4):1704–1715
- Østerås O, Sølvørød L, Reksen O (2006) Milk culture results in a large Norwegian survey : effects of season, parity, days in milk, resistance, and clustering. *J Dairy Sci* 89(3):1010–1023
- Otwinowska-Mindur A, Gierdziewicz M, Ptak E (2008) Effect of year, season and age of calving on somatic cell score in Polish Holstein-Friesian cows of Black-and-White variety. *Sci Ann Pol Soc Anim Prod* 4(2):29–36
- Pantoja JCF, Hulland C, Ruegg PL (2009) Somatic cell count status across the dry period as a risk factor for the development of clinical mastitis in the subsequent lactation. *J Dairy Sci* 92(1):139–148
- Persson Waller K, Bengtsson B, Lindberg A, Nyman A, Ericsson Unnerstad H (2009) Incidence of mastitis and bacterial findings at clinical mastitis in Swedish primiparous cows : influence of breed and stage of lactation. *Vet Microbiol* 134(1):89–94
- Pyörälä S (2002) New strategies to prevent mastitis. *Reprod Dom Anim* 37(4):211–216
- Risso A (2000) Leukocyte antimicrobial peptides : multifunctional effector molecules of innate immunity. *J Leukocyte Biol* 68(6):785–792
- Roosen S, Exner K, Paul S (2004) Bovine beta-defensins : identification and characterization of novel bovine beta-defensin genes and their expression in mammary gland tissue. *Mamm Genome* 15:834–842
- Rumelhart DE, Hintont GE, Williams RJ (1986) Learning representations by back-propagating errors. *Nature* 323(6088):533–536
- Rupp R, Boichard D (2000) Relationship of early first lactation somatic cell count with risk of subsequent first clinical mastitis. *Livest Prod Sci* 62(2):169–180
- Ryniewicz Z, Zwierzchowski L, Bagnicka E, Flisikowski K, Maj A, Krzyżewski J, Strzałkowska N (2003) Association of the polymorphism at defensin gene loci with dairy production traits and milk somatic cell count in Black-and-White cows. *Anim Sci Pap Rep* 21:209–222
- Salehi F, Lacroix R, Wade KM (1998) Improving dairy yield predictions through combined record classifiers and specialized artificial neural networks. *Comput Electron Agric* 20(3):199–213
- Schonwetter BS, Stolzenberg ED, Zasloff MA (1995) Epithelial antibiotics induced at sites of inflammation. *Science* 267(5204):1645–1648
- Sender G, Korwin-Kossakowska A, Hameid KGA, Prusak B (2006) Association of the polymorphism of some genes with the occurrence of mastitis in cattle. *Med Weter* 62(5):563–565
- Sobczuk-Szul M, Wielgosz-Groth Z, Nogalski Z, Pogorzelska-Przybyłek P (2014) Changes in the content of whey proteins during lactation in cow's milk with a different somatic cells count. *Vet Zootech* 45(87):79–84
- Sordillo LM (2005) Factors affecting mammary gland immunity and mastitis susceptibility. *Livest Prod Sci* 98(1):89–99
- StatSoft (1998) Statistica neural networks user guide. Tulsa OK : Statsoft, 315 p
- StatSoft (2011) Statistica 10 user guide. Tulsa OK : Statsoft
- Sun Z, Samarasinghe S, Jago J (2010) Detection of mastitis and its stage of progression by automatic milking systems using artificial neural networks. *J Dairy Res* 77(02):168–175
- Svensson C, Nyman A-K, Waller KP, Emanuelson U (2006) Effects of housing, management, and health of dairy heifers on first-lactation udder health in southwest Sweden. *J Dairy Sci* 89(6):1990–1999
- Tahmoorepur M, Hosseinnia P, Teimurian M, Aslaminejad AA (2012) Predictions of 305-day milk yield in Iranian dairy cattle using test-day records by artificial neural network. *Indian J Anim Sci* 82(5):63–68

- Tarver AP, Clark DP, Diamond G, Russell JP, Erdjument-Bromage H, Tempst P, Cohen KS, Jones DE, Sweeney RW, Wines M, Hwang S, Bevins CL (1998) Enteric beta-defensin : molecular cloning and characterization of a gene with inducible intestinal epithelial cell expression associated with *Cryptosporidium parvum* infection. *Infect Immun* 66(3):1045–1056
- Tunzi CR, Harper PA, Bar-Oz B, Valore EV, Semple JL, Watson-MacDonell J, Ganz T, Ito S (2000) Beta-defensin expression in human mammary gland epithelia. *Pediatr Res* 48(1):30–35
- Valde JP, Lawson LG, Lindberg A, Agger JF, Saloniemi H, Osteras O (2004) Cumulative risk of bovine mastitis treatments in Denmark, Finland, Norway and Sweden. *Acta Vet Scand* 45(3-4):201–210
- Verleysen M, François D (2005) The curse of dimensionality in data mining and time series prediction. In: Cabestany J, Prieto A, Sandoval F (eds) *Computational intelligence and bioinspired systems : 8th International Work-Conference on Artificial Neural Networks, IWANN 2005, Vilanova i la Geltru, Barcelona, Spain, June 8-10, 2005 ; proceedings*. Berlin : Springer, pp 758-770
- Viguier C, Arora S, Gilmartin N, Welbeck K, O'Kennedy R (2009) Mastitis detection : current trends and future perspectives. *Trends Biotechnol* 27(8):486–493
- Wang E, Samarasinghe S (2005) On-line detection of mastitis in dairy herds using artificial neural networks [online]. To be found at <http://www.ms-sanz.org.au/modsim05/papers/wang_e.pdf> [quoted 22.08.2016]
- Wawron W (2007) Drying-off with non-antibiotic preparation protection. *Biul Lub Izby Lek-Weter* 2007(3):11–17
- Wojdak-Maksymiec K (2009) Poszukiwanie związków pomiędzy wybranymi genami nieswoistej odpowiedzi immunologicznej a liczbą komórek somatycznych i zawartością niektórych składników w mleku krów. *Szczecin : ZUT*, 126 p
- Wojdak-Maksymiec K, Mikolajczyk K (2012) Interactions between *TNF-α*, *LTF* and *mLYZ* gene variants in determining somatic cell count in Jersey cows. *Pak Vet J* 32(4):477–482
- Wojdak-Maksymiec K, Szyda J, Strabel T (2013) Parity-dependent association between *TNF-α* and *LTF* gene polymorphisms and clinical mastitis in dairy cattle. *BMC Vet Res* 9(1):114
- Wolf J, Wolfová M, Štípková M (2010) A model for the genetic evaluation of number of clinical mastitis cases per lactation in Czech Holstein cows. *J Dairy Sci* 93(3):1193–1204
- Yang XZ, Lacroix R, Wade KM (1999) Neural detection of mastitis from dairy herd improvement records. *Trans ASAE* 42(4):1063–1071
- Yang XZ, Lacroix R, Wade KM (2000) Investigation into the production and conformation traits associated with clinical mastitis using artificial neural networks. *Can J Anim Sci* 80(3):415–426
- Zimecki M, Artym J, Chodaczek G, Kocieba M, Kruzel ML (2004). Protective effects of lactoferrin in *Escherichia coli*-induced bacteremia in mice : relationship to reduced serum TNF alpha level and increased turnover of neutrophils. *Inflamm Res* 53(7):292-296

Inhalt Content

- Markus Dög, Björn Seintsch, Lydia Rosenkranz und Matthias Dieter
Belastungen der deutschen Forstwirtschaft aus der Schutz- und Erholungsfunktion des Waldes
71 Economic burdens for German forestry due to protection and recreation functions of forests
- Gunnar Mann, Mathias Schlegel, Norbert Kanswohl, and Rhena Schumann
Experimental system for the prevention of O₂ – and air contamination during biogas upgrading with phototrophic microalgae
93 Versuchsaufbau zur Vermeidung von Sauerstoff- und Lufteinträgen während der Biogasaufbereitung mit phototrophen Mikroalgen
- Marco Lorenz, Joachim Brunotte, Thomas Vorderbrügge, Robert Brandhuber, Heinz-Josef Koch, Marion Senger, Norbert Fröba und Franz-Josef Löpmeier
Anpassung der Lasteinträge landwirtschaftlicher Maschinen an die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens – Grundlagen für ein bodenschonendes Befahren von Ackerland
101 Adaption of load input by agricultural machines to the susceptibility of soil to compaction – Principles of soil conserving traffic on arable land
- Daniel Zaborski, Katarzyna Wojdak-Maksymiec, and Wilhelm Grzesiak
Detection of susceptibility of dairy cows to clinical mastitis by artificial neural networks based on selected genotypes and milk production records
145 Erkennen einer Mastitis-Anfälligkeit von Milchkühen mittels künstlicher neuronaler Netze auf Basis ausgewählter Genotypen und Milchleistungsdaten

Landbauforschung
*Applied Agricultural
and Forestry Research*

Herausgeber · Editor
Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
Germany

Vol. 66

No. 2- 06.2016

Preis · Price 8 €

ISSN 0458-6859