

Vol.59 No. 2 06.2009

# Landbauforschung *vTI Agriculture and Forestry Research*



Bundesministerium für  
Ernährung, Landwirtschaft  
und Verbraucherschutz

## Landbauforschung

Landbauforschung (vTI Agriculture and Forestry Research) ist ein wissenschaftliches Publikationsorgan des Johann Heinrich von Thünen-Instituts (vTI), Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei. Die Zeitschrift wird vom vTI herausgegeben und erscheint vierteljährlich. Sonderhefte erscheinen nach Bedarf.

In der Zeitschrift werden Forschungsergebnisse aus der Ressortforschung des BMELV mit Bezug zur Land- und Forstwirtschaft und den Ländlichen Räumen veröffentlicht, einschließlich Forschungsergebnissen aus Kooperationsprojekten, an denen das vTI beteiligt ist.

Die Landbauforschung ist eine multidisziplinär ausgerichtete Zeitschrift, die die verschiedenen Facetten der Agrar- und Forstwissenschaft einschließt und besonderes Augenmerk auf deren interdisziplinäre Verknüpfung legt.

Englischsprachige Beiträge sind erwünscht, damit die Forschungsergebnisse einem möglichst breiten wissenschaftlichen Diskurs zugeführt werden können.

Für den Inhalt der Beiträge sind die Autoren verantwortlich. Eine Haftungsübernahme durch die Redaktion erfolgt nicht.

Mit der Einsendung von Manuskripten geben die Verfasser ihre Einwilligung zur Veröffentlichung. Die von den Autoren zu beachtenden Richtlinien zur Einreichung der Beiträge sind unter [www.vti.bund.de](http://www.vti.bund.de) oder bei der Geschäftsführung erhältlich. Das exklusive Urheber- und Verwertungsrecht für angenommene Manuskripte liegt beim vTI. Es darf kein Teil des Inhalts ohne schriftliche Genehmigung der Geschäftsführung in irgendeiner Form vervielfältigt oder verbreitet werden.

### *Herausgeber*

Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI)

### *Gutachtergremium*

Siehe 3. Umschlagseite

### *Schriftleitung*

Prof. Dr. Folkhard Isermeyer

### *Geschäftsführung*

Dr. Matthias Rütze  
Tel. 040 · 739 62 - 247  
Leuschnerstraße 91  
21031 Hamburg, Germany  
[landbauforschung@vti.bund.de](mailto:landbauforschung@vti.bund.de)  
[www.vti.bund.de](http://www.vti.bund.de)

ISSN 0458-6859

Alle Rechte vorbehalten.

## vTI Agriculture and Forestry Research

*Landbauforschung (vTI Agriculture and Forestry Research) is the scientific journal of the Johann Heinrich von Thünen Institute (vTI), Federal Research Institute for Rural Areas, Forestry and Fisheries. The journal is published quarterly by the vTI. Special issues are published additionally.*

*The journal publishes research results under the auspices of the German Ministry of Food, Agriculture and Consumer Protection (BMELV). Articles bear relevance to agriculture and forestry, as well as to rural areas, and include reports on cooperative projects involving the vTI.*

*vTI Agriculture and Forestry Research is a multidisciplinary journal, encompassing the various facets of this field of research and placing a particular emphasis on interdisciplinary linkages.*

*English language contributions are desired so that the research results can achieve as broad a scientific discourse as possible.*

*The authors are responsible for the content of their papers. The publishers cannot assume responsibility for the accuracy of articles published.*

*With the submission of a manuscript, the author grants his or her permission for publication. Authors are requested to follow the guidelines for submission found at [www.vti.bund.de](http://www.vti.bund.de) or available from the management.*

*The vTI retains exclusive copy and usage rights for accepted manuscripts. No portion of the content may be duplicated or distributed in any form without the written permission of the publisher.*

### *Publisher*

Johann Heinrich von Thünen Institute (vTI)

### *Editorial Board*

Directors of vTI-Institutes

### *Editor in Chief*

Prof. Dr. Folkhard Isermeyer

### *Managing Editor*

Dr. Matthias Rütze  
Phone + 49 - 40 · 739 62 - 247  
Leuschnerstraße 91  
21031 Hamburg, Germany  
[landbauforschung@vti.bund.de](mailto:landbauforschung@vti.bund.de)  
[www.vti.bund.de](http://www.vti.bund.de)

ISSN 0458 – 6859

All rights reserved.

Tomasz Czajkowski, Bernd Ahrends and Andreas Bolte

**Critical limits of soil water availability (CL-SWA) for forest trees – an approach based on plant water status**

87 Kritische Grenzen der Bodenwasserverfügbarkeit (CL-SWA) für Waldbäume – ein Ansatz auf Grundlage des Pflanzenwasserstatus

Angela Bergschmidt and Lars Schrader

**Application of an animal welfare assessment system for policy evaluation: Does the Farm Investment Scheme improve animal welfare in subsidised new stables?**

95 Anwendung des Nationalen Bewertungsrahmens für die Politikevaluation: Wird mit der Investitionsförderung eine Verbesserung der Tiergerechtigkeit erreicht?

Gundula Hoffmann, Franz-Josef Bockisch and Peter Kreimeier

**Einfluss des Haltungssystems auf die Bewegungsaktivität und Stressbelastung bei Pferden in Auslaufhaltungssystemen**

105 Influence of the husbandry system on the movement activity and stress exposure of horses in discharge husbandry systems

Hans-Dieter Haenel and Ulrich Dämmgen

**Consistent time series of data to model volatile solids and nitrogen excretions of poultry 3b. Broilers. Modelling using official statistical data**

113 Konsistente Zeitreihen von Daten zur Modellierung der Ausscheidungen von „volatile solids“ und Stickstoff bei Geflügel 3b. Masthähnchen und -hühnchen, Modellierung mit Daten der amtlichen Statistik

Kirsten Stöven and Ewald Schnug

**Long term effects of heavy metal enriched sewage sludge disposal in agriculture on soil biota**

131 Biotische Nachwirkungen der Befruchtung landwirtschaftlicher Böden mit schwermetallreichem Klärschlamm

Klaus Walter

**Fütterung und Haltung von Hochleistungskühen 4. Methanproduktion, Wasserverbrauch und Anfall von Exkrementen**

139 The feeding and husbandry of high performance cows Part 4. Methane production, water consumption and excretion of waste

Yi-Chao Shi, Zheng-Yi Hu; Silvia Haneklaus, Wei-Guo Long, Xu Xia, Yan-Wen Zhao, Tian Lin and Ewald Schnug

**Suitability of soil electrical conductivity as an indicator of soil nitrate status in relation to vegetable cultivation practices in the Yangtze River Delta of China**

151 Eignung der elektrischen Leitfähigkeit als Indikator für den Nitratgehalt im Boden in Gemüseanbaugebieten des Yangtze Flussdeltas in China

## Critical limits of soil water availability (CL-SWA) for forest trees – an approach based on plant water status

Tomasz Czajkowski \*, Bernd Ahrends\*\* and Andreas Bolte\*

### Abstract

Due to climate change, heat waves and drought are expected to increase in frequency and intensity in Central Europe. Thus, assessments of critical constraints of water supply in forest trees are needed to develop adequate forest adaptation measures. We present a novel 'critical limit' approach to soil water availability (SWA) for the major central European forest tree species based on the physiological plant water status. In regards to the conductivity of trees' xylem, three thresholds of pre-dawn water potential ( $\psi_{wp}$ ) were chosen, referring to (i) slight conductivity loss (10 %), (ii) critical conductivity loss (50 %) and (iii) complete conductivity loss (> 90 %). In times of drought, pre-dawn water potential relates to the soil water potential at the lowest soil depth in which plant's root system is able to deplete water resources; the 'effective rooting depth' (ERD). The critical limit of soil water availability (CL-SWA) represents the proportion of plant-available water within the variable effective rooting depth (ERD) that meets both the critical soil water potential at the lower limit of the ERD and the critical plant water status. The CL-SWA-approach can be implemented in water budget models like BROOK90.

*Keywords: Climate change, drought, adaptation, critical limit, xylem conductivity, pre-dawn potential, soil water potential, effective rooting depth*

### Zusammenfassung

#### Kritische Grenzen der Bodenwasserverfügbarkeit (CL-SWA) für Waldbäume – ein Ansatz auf Grundlage des Pflanzenwasserstatus

Aufgrund des Klimawandels werden sich sowohl Häufigkeit als auch Intensität von Hitze- und Trockenperioden in Mitteleuropa erhöhen. Die Beurteilung einer kritischen Wasserversorgung von Waldbäumen ist daher eine wichtige Grundlageninformation zur Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen. Wir stellen einen neuartigen Ansatz zur Bestimmung von kritischen Grenzen der Bodenwasserverfügbarkeit (SWA) für wichtige Baumarten vor, der auf dem physiologischen Pflanzen-Wasserhaushalt basiert. Unter Betrachtung der Xylemleitfähigkeit wurden drei Schwellenwerte des Dunkelwasserpotenzials (Pre-dawn-Potenzial,  $\psi_{wp}$ ) gewählt, die (i) zu geringem Leitfähigkeitsverlust (10 %), (ii) zu kritischem Leitfähigkeitsverlust (50 %) und (iii) zu komplettem Leitfähigkeitsverlust (> 90 %) führen. In Trockenzeiten steht das Dunkelwasserpotenzial in Beziehung zum Bodenmatrixpotenzial in jener Bodentiefe, in der die Wurzelsysteme gerade noch Wasserressourcen nutzen können; dies entspricht der 'effektiven Wurzeltiefe' (ERD). Die kritische Bodenwasserverfügbarkeit (CL-SWA) stellt den Anteil an nutzbarem Bodenwasser dar, das sowohl zu einem kritischen Bodenmatrixpotenzial als auch zu einem kritischen Dunkelwasserpotenzial führt. Die kritischen Grenzen der Bodenwasserverfügbarkeit (CL-SWA) können in Wasserhaushaltsmodelle, wie z. B. Brook90 implementiert werden.

*Schlüsselworte: Klimawandel, Trockenheit, Anpassung, Kritische Grenze, Xylemleitfähigkeit, Pre-dawn-Potenzial, Bodenwasserpotenzial, Effektive Durchwurzelungstiefe*

\* Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI), Institut für Waldökologie und Waldinventuren, Alfred-Möller-Str.1, D-16225 Eberswalde, tomasz.czajkowski@vti.bund.de; andreas.bolte@vti.bund.de

\*\* Georg-August-Universität, Abteilung für Ökopedologie der gemäßigten Zonen, Büsgenweg 2, D-37077 Göttingen, bahrends@forst.uni-goettingen.de

## Introduction

Climate modeling projections for the next 100 years suggest that global annual temperatures will increase between 2 °C and 3 °C, when using medium severity scenarios (SRES B1 and A1B, IPCC 2007). Heat waves and drought will increase in frequency, intensity and duration (Schär et al., 2004; Tebaldi et al., 2006; Beniston et al., 2007). Together with projected higher probabilities of extreme storm events (Christensen et al., 2002; Leckebusch and Ulbrich, 2004; Leckebusch et al., 2006), these climatic changes will expose German forest ecosystems to environmental conditions that differ from those experienced in the past (Jansen et al., 2008). The forestry sector wants to respond to climate change by developing adaptive forest management measures in order to maintain forest resistance and resilience ability (Bolte et al., in press).

The ongoing project 'Adaptation Strategies for Sustainable Forest Management under Changing Climatic Conditions – Decision Support System 'Forest and Climate' (DSS-WuK)' develops models and methods to assist stakeholders within the forestry and environment sectors to find adequate forest adaptation measures to climate change. This work aims to compile and utilize existing knowledge about climate change impacts and their effects on the economic and ecological services of forests within a user-friendly decision support system (DSS). The DSS reflects site variation at a regional scale due to wind climate, drought and climate-induced biotic agents based on regionalized projections (CLM – Climate Local Model, REMO – Regional Model) for the above-mentioned IPCC SRES A1B and B1 scenarios. High-resolution maps showing projected climate variation as well as model outputs (including abiotic and biotic risk level, site-growth development and economic indicators) for major tree species (European beech, Pedunculate/Sessile oak, Norway spruce,

Scots pine and Douglas fir) provide decision support to the individual stakeholder (Jansen et al., 2008).

This paper presents and discusses a method to adequately assess the drought risk for the major tree species in Germany based on a 'critical limit' approach (UN-ECE 2004) for soil water availability (SWA) that is derived from plant water status. We focus on the sapling growth stage, due to the high susceptibility of trees to water stress in this regeneration phase (Czajkowski et al., 2005).

## Methods

### 'Critical limit' definition

In vegetation ecology, critical loads and limits were first used to assess effects of air pollution on vegetation and forest ecosystems within the UN-ECE "Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution" (UN-ECE, 1979). A critical load is defined as the maximum exposure "below which significant harmful effects on specified sensitive elements of the environment do not occur" (UN-ECE, 2004). A critical limit is a chemical criterion (e. g. the threshold of base cation to aluminium ion ratio  $[Bc/Al]$  in the soil solution) that is reached when the critical load is exceeded.

We adopt this concept for assessments of drought impact on young trees. A critical limit of plant water status occurs when cavitations in trees' xylem lowers the (stem) xylem conductivity considerably; we have chosen three thresholds referring to (a) slight conductivity loss (10 %), (b) critical conductivity loss (50 %, Bréda, 2006; Brodribb and Cochard, 2009) and (c) complete conductivity loss (> 90 %). We suggest to predominantly use the 50 % threshold (b) as the critical limit, since this limit is related to the maximum recoverable drought stress in conifers (Brodribb and Cochard, 2009), which meets quite well the criterion of a "harmful effect". Relationships between xy-

Table 1:

Xylem water potential (MPa) for three thresholds of xylem conductivity loss compiled from different literature sources. A loss of 50 % of xylem conductance is regarded as the critical limit for desiccation response (Brodribb and Cochard, 2009)

| Tree species                                 | Xylem conductivity loss |            |        | Source                                                                                                                                                                                                                                       |
|----------------------------------------------|-------------------------|------------|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                              | 10 %                    | 50 %       | > 90 % |                                                                                                                                                                                                                                              |
| European beech ( <i>Fagus sylvatica</i> )    | 2.0                     | <b>2.6</b> | 4.0    | Cochard et al., 1999; Hacke and Sauter, 1995; Lemonie et al., 2002a; Lemonie et al., 2002b; Lösch, 2001.                                                                                                                                     |
| Pedunculate oak ( <i>Quercus robur</i> )     | 2.0                     | <b>3.0</b> | 4.0    | Bréda et al., 1993; Bréda et al., 1995; Cochard et al., 1992; Cochard et al., 1996; Higgs and Wood, 1995; Lösch, 2001; Nardini and Pitt, 1999; Nardini and Tyree, 1999; Simonin et al., 1994; Tognetti et al., 1998; Tyree and Cochard, 1996 |
| Sessile oak ( <i>Quercus petraea</i> )       | 2.5                     | <b>3.3</b> | 4.4    |                                                                                                                                                                                                                                              |
| Red oak ( <i>Quercus rubra</i> )             | 1.5                     | <b>2.3</b> | 3.5    |                                                                                                                                                                                                                                              |
| Norway spruce ( <i>Picea abies</i> )         | 2.0                     | <b>3.5</b> | 4.5    | Cochard, 1992; Lösch, 2001; Lu et al., 1996; Martínez-Vilalta et al., 2004; Mayr et al., 2002; Mayr and Cochard, 2003; Rosner et al. 2006; Bond and Kavanagh, 1999; Cochard, 1992; Martínez-Vilalta and Piñol, 2002;                         |
| Scots pine ( <i>Pinus sylvestris</i> )       | 2.5                     | <b>3.2</b> | 5.3    |                                                                                                                                                                                                                                              |
| Douglas fir ( <i>Pseudotsuga menziesii</i> ) | 2.5                     | <b>3.6</b> | 5.0    | Cochard, 1992; Domec and Gartner, 2001; Kavanagh et al., 1999; Piñol and Sala, 2000; Sperry and Ikeda, 1997; Stout and Sala, 2003.                                                                                                           |



lem conductivity and xylem water potential, derived for example from 'vulnerability curves' (Sperry et al., 1988; Tyree and Sperry, 1989; Kolb et al., 1996; Cochard et al., 2002; Cruiziat et al., 2002; Cochard et al., 2005), can be used for referring thresholds of conductivity loss to plant water status (Table 1). In this way, drought effects can be quantified using physiological criteria.

#### *Critical limits of soil water availability*

The pre-dawn water potential ( $\psi_{wp}$ ), measured just before sunrise, determines the plant water status in equilibrium with the soil water potential ( $\psi_m$ ) within the plant rooting zone (Ehlers, 1996). According to this concept, plant water status relates to the soil water potential at the lowest soil depth in which plant's root system is able to deplete water resources, e. g. 140 cm depth (Bréda et al., 1995). This rooting depth meets the definitions of the 'effective rooting depth' (ERD) according to AK Standortskartierung (1996).

The critical limit of soil water availability (CL-SWA) describes the proportion of plant-available water within the effective rooting depth that meets both the critical soil water potential at the lower limit of the ERD and the critical plant water status. For the assessment of CL-SWA, specifications of effective rooting depth are very important. The architecture of root systems is mainly influenced by the parent material, the soil type, bulk density, the chemical soil conditions, the depth of ground water and species and age of trees. Due to this complexity, the root depth and the distribution in the soil profile are critical model parameters. For the estimation of the effective rooting depth we used the linking rule from Müller (2004) and Raissi et al., (2009). This rule was modified for shallow-rooting spruce on soils with unconsolidated rock by decreasing its root-

ing depth from 80 % of those of deeper-rooting species like Scots pine and oak to only 70 % (Table 2). This is in line with numerous publications (Rastin and Ulrich, 1990; Heinze et al., 2001; Lehnardt and Brechtel, 1980; Kreutzer, 1961; Bolkenius, 2001; Osenberg, 1998). For water-saturated sites (with G, A, M layers, AK Standortskartierung, 1996) we kept to the rule that the depth of the groundwater table restricts the rooting depth.

## **Results and discussion**

### *Root depth estimates*

Use of the root depth estimation model is illustrated using input data for precipitation from the very high resolution interpolated climate data for Germany (Hijmans et al., 2005). For the spatially distributed simulation we used the digital soil map of Germany at a scale of 1:1 000 000 (Richter et al., 2007) and the digital metadata corresponding to the above soil map. Figure 1 shows the deeper rooting activity of Scotch pine in contrast to spruce. For both trees, the rooting depth in the mountainous regions is in general 100 to 120 cm. On sandy soils derived from unconsolidated rocks, where the soil depth is much greater than in the mountain regions, under poor precipitation conditions the effective root depth reaches a depth of about 2 m, this also being the lower limit of our soil profiles.

CL-SWA is modeled using water budget models (BROOK 90 model, Federer et al., 2003) using the variables (1) tree species, (2) effective rooting depth, and (3) the hydraulic properties of the soil (e. g. Clapp and Hornberger, 1978). The parameters of the water retention curve were deduced from soil texture (Clapp and Hornberger, 1978). More details on the CL-SWA modeling will be presented in a forthcoming paper.

Table 2:  
Effective rooting depth on forest sites (ERD [dm]) according to Müller (2004, modified)

| Soil substrate | Age (a)<br>Yearly prec. (mm) | < 15  |      |      |       | 15 - 45 |      |      |       | 45 - 80 (100) |      |      |       |
|----------------|------------------------------|-------|------|------|-------|---------|------|------|-------|---------------|------|------|-------|
|                |                              | > 750 | 725  | 700  | < 625 | > 750   | 725  | 700  | < 625 | > 750         | 725  | 700  | < 625 |
| Sand           | Others                       | 7.0   | 8.0  | 9.0  | 10.0  | 11.0    | 12.0 | 13.0 | 14.0  | 15.0          | 16.0 | 18.0 | 20.0  |
|                | Norway spruce                | 4.9   | 5.6  | 6.3  | 7.0   | 7.7     | 8.4  | 9.1  | 9.8   | 10.5          | 11.2 | 12.6 | 14.0  |
| Loam           | Others                       | 8.0   | 9.0  | 10.0 | 11.0  | 12.0    | 13.0 | 14.0 | 15.0  | 16.0          | 17.0 | 19.0 | 21.0  |
|                | Norway spruce                | 5.6   | 6.3  | 7.0  | 7.7   | 8.4     | 9.1  | 9.8  | 10.5  | 11.2          | 11.9 | 13.3 | 14.7  |
| Silt           | Others                       | 12.0  | 13.0 | 14.0 | 15.0  | 16.0    | 17.0 | 18.0 | 19.0  | 20.0          | 21.0 | 23.0 | 25.0  |
|                | Norway spruce                | 8.4   | 9.1  | 9.8  | 10.5  | 11.2    | 11.9 | 12.6 | 13.3  | 14.0          | 14.7 | 16.1 | 17.5  |
| Clay           | Others                       | 8.0   | 8.5  | 9.0  | 9.5   | 10.0    | 10.5 | 11.0 | 11.5  | 12.0          | 13.0 | 14.0 | 15.0  |
|                | Norway spruce                | 5.6   | 6.0  | 6.3  | 6.7   | 7.0     | 7.4  | 7.7  | 8.1   | 8.4           | 9.1  | 9.8  | 10.5  |
| Bedrock        | Others                       |       | 7.0  |      |       |         | 9.5  |      |       |               | 12.0 |      |       |
|                | Norway spruce                |       | 6.0  |      |       |         | 8.0  |      |       |               | 10.0 |      |       |

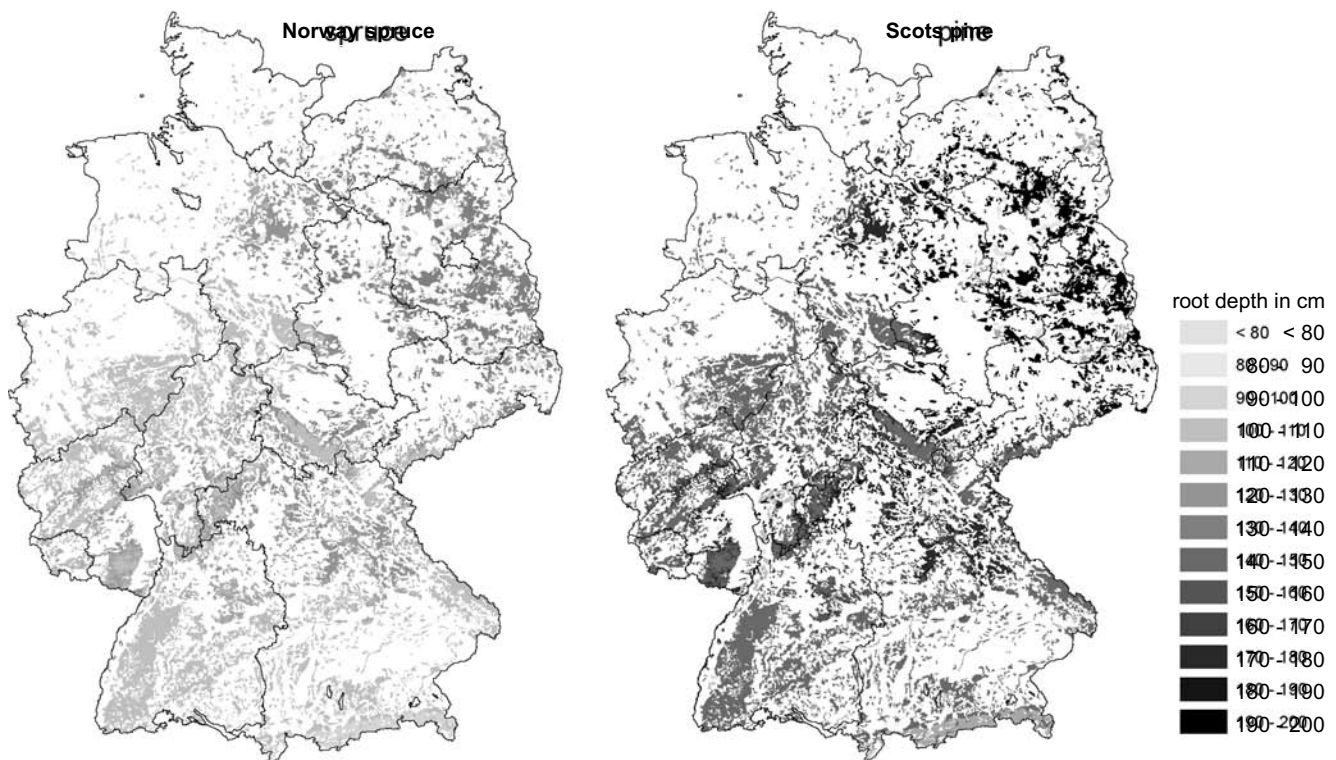


Figure 1:  
Estimated effective rooting depth as a function of precipitation, soil texture and tree species

#### *Options and constraints of the CL-SWA approach*

To our knowledge, the present approach is among the first to combine the critical limit concept with plant water status and the related parameter of soil water availability. In our approach, plant water physiology is directly included in the indicator 'critical limit of soil water availability' (CL-SWA). Evident soil-plant interactions are reflected in CL-SWA indicator which determines the soil water potential that triggers a 50 % loss of xylem conductance and 95 % loss of leaf conductance. The latter indicates the maximum recoverable drought stress (Brodribb and Cochard, 2009).

Since plant water potential is commonly used for plant drought stress in terms of xylem conductivity loss (e. g. Kolb et al., 1996; Cochard et al., 2002; Cruiziat et al., 2002; Cochard et al., 2005), the inclusion of the CL-SWA indicator in large scale water budget modelling puts physiologically based drought stress estimates on a higher spatial scale and offers novel options for forest landscape assessments.

In contrast, Novák and Havrila (2006) based their ostensibly similar estimates of critical soil water content on the decrease of water extraction ability and yield of plants; criteria which differ considerably to our criteria for CL-SWA. Moreover, they used the 'relative transpiration index' (RTI) as an indicator of the (critical) state of soil water resource

availability. RTI describes the ratio of actual transpiration to potential transpiration ( $RTI = ET_a/ET_p$ , Budagovskij and Grigorieva, 1991), and it is a commonly used indicator (e. g. Klap et al., 2002; Eccel et al., 2005), which may describe the stomatal control and thus adaptive behaviour of plants to water shortage rather than direct drought impact on plant water status.

There are also, however, constraints with our CL-SWA approach. One constraint is the use of pre-dawn water potential for characterizing the (critical) plant water status in order to interlink plant water and soil water status (Ehlers, 1996). Midday plant water potential, measured in times of highest evaporation pressure, often falls far below pre-dawn water potential. A correlation between the two traits is not always visible due to individual adaptation abilities to drought (e. g. Czajkowski et al. 2006). Thus, the probability of critical midday embolism is only in general reflected in the approach presented.

Another constraint is the relationship between plant water status and soil water status at the 'effective rooting depth' (ERD). The depletion depth of the plant rooting system varies due to the water-potential gradient between soil matrix potential and plant water potential (Hetsch and Heilig, 1981; Aussenac et al., 1984; Bréda et al., 1995; Tognetti et al., 1995; Laio et al., 2001; Porporato et al.,

2001; Sperry et al., 2002; Sperry and Hacke, 2002; Bhaskar, 2006). In times of extreme drought, plants seem to be able to lower the depletion depth temporarily below the ERD (Joslin and Wolfe, 2003), but this cannot be included in our approach.

The main uncertainty of our approach relates to the determination of the 'effective rooting depth' (EDR) itself, since this is highly dependent on tree species, stand structure and soil characteristics (Bibelriether, 1966; Köstner et al., 1968; Lehnardt and Brechtel, 1980; Schmid and Kazda, 2002; Dannowski and Wurbs, 2003; Claus and George, 2005; Meier and Leuschner, 2008; Raissi et al., 2009). We lack data covering the whole variety of combinations of tree species, competition situations and soil characteristics. Thus, any general rule on ERD, like we have used for this approach and the following modeling, may consider average ERD, but not all specific situations.

## Acknowledgement

The studies were supported by the German Federal Ministry of Education and Science (BMBF) with the framework program "Klimazwei" (Co-operative project: 'Adaptation Strategies for Sustainable Forest Management under Changing Climatic Conditions – Decision Support System 'Forest and Climate / DSS-WuK'). We thank Dr. Martin Janssen (Göttingen University, Bünsen-Institute, Dept. Soil Science of Temperate and Boreal Ecosystems) and Dr. Jürgen Müller (vTI, Institute of Forest Ecology and Forest Inventory) for remarks and fruitful discussions, and Ian Rayner (vTI) for correcting the wording of the paper.

## References

- AK Standortskartierung (1996) Forstliche Standortsaufnahme : Begriffe, Definitionen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. Eching : IHW-Verl, 352 p
- Aussenac G, Granier A, Ibrahim M (1984) Influence du dessèchement du sol sur le fonctionnement hydrique à la croissance du douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco). *Oecol Plant* 5:241-253
- Beniston M, Stephenson DB, Christensen OB, Ferro CAT, Frei C, Goyette S, Halsnaes K, Holt T, Juhlä K, Koffi B, Palutikof J, Schöll R, Semmler T, Woth K (2007) Future extreme events in European climate : an exploration of regional climate model projections. *Clim Change* 81:71-95
- Bolkenius D (2001) Zur Wurzelbildung von Fichte (*Picea abies* L. [Karst]) und Weißtanne (*Abies alba* Mill.) in gleich- und ungleichaltrigen Beständen. Freiburg : FVA, 155 p, Freib Forstl Forsch 35
- Bolte A, Ammer C, Löf M, Nabuurs GJ, Schall P, Spathelf P Adaptive forest management : a prerequisite for sustainable forestry in the face of climate change. In: Spathelf P (ed) Sustainable forest management in a changing world : European perspective. Heidelberg : Springer (in press)
- Bhaskar R, Ackerley DD (2006) Ecological relevance of minimum seasonal water potentials. *Physiol Plant* 127:353-359
- Bibelriether H (1966) Die Bewurzelung einiger Baumarten in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften. *Allg Forst Z* 21:808-815
- Bond BJ, Kavanagh KL (1999) Stomatal behavior of four woody species in relation to leaf-specific hydraulic conductance and threshold water potential. *Tree Physiol* 19:503-510
- Bréda N, Cochard H, Dreyer E, Granier A (1993) Field comparison of transpiration, stomatal conductance and vulnerability to cavitation of *Quercus petraea* and *Quercus robur* under water stress. *Ann Sci For* 50:571-582
- Bréda N, Granier A, Barataud F, Moyne C (1995) Soil water dynamics in an oak stand : I. Soil moisture, water potentials and water uptake by roots. *Plant Soil* 172:17-27
- Bréda N, Huc R, Granier A, Dreyer E (2006) Temperate forest trees and stands under severe drought : a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Ann For Sci* 63:625-644
- Brodrigg TJ, Cochard H (2009) Hydraulic failure defines the recovery and point of death in water-stressed conifers. *Plant Physiol* 149:575-584
- Budagovskij AI, Grigorjeva NI (1991) The way to improve effectiveness of soil water resources utilization. *Vodn resur* 1:131-142
- Christensen JH, Carter T, Giorgi F (2002) PRUDENCE employs new methods to assess European climate change. *EOS* 83:147
- Claus A, Gorge E (2005) Effect of stand age on fine-root biomass and biomass distribution in three European forest chronosequences. *Can J For Res* 35:1617-1625
- Clapp RB, Hornberger GM (1978) Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resour Res* 14(4):601-603
- Cochard H (1992) Vulnerability of several conifers to air embolism. *Tree Physiol* 11:73- 83
- Cochard H, Bréda N, Granier A, Aussenac G (1992) Vulnerability to air embolism of three European oak species (*Quercus petraea* (Matt) Liebl, *Quercus pubescens* Willd, *Quercus robur* L). *Ann Sci For* 49:225-233
- Cochard H, Lemoine D, Dreyer E (1999) The effects of acclimation to sunlight on the xylem vulnerability to embolism in *Fagus sylvatica* L. *Plant Cell Environ* 22:101-108
- Cochard H, Bréda N, Granier A (1996) Whole tree hydraulic conductance and water loss regulation in *Quercus* during drought: evidence for stomatal control of embolism? *Ann For Sci* 53:197-206
- Cochard H, Coll L, Le Roux X, Ameglio T (2002) Unraveling the effects of plant hydraulics on stomatal closure during water stress in walnut. *Plant Physiol* 128:282-290
- Cochard H, Damour G, Bodet Ch, Tharwat I, Poirier M, Ameglio T (2005) Evaluation of new centrifuge technique for rapid generation of xylem vulnerability curves. *Physiol Plant* 124:410-418
- Cruziat P, Cochard H, Ameglio T (2002) Hydraulic architecture of trees : main concepts and results. *Ann For Sci* 59:723-752
- Czajkowski T, Kühling M, Bolte A (2005) Einfluss der Sommertrockenheit im Jahre 2003 auf das Wachstum von Naturverjüngungen der Buche (*Fagus sylvatica* L.) im nordöstlichen Mitteleuropa. *Allg Forst- Jagdztg* 176:133-143
- Czajkowski T, Bolte A (2006) Unterschiedliche Reaktion deutscher und polnischer Herkunft der Buche (*Fagus sylvatica* L.) auf Trockenheit. *Allg Forst- Jagdztg* 177:30-40
- Dannowski M, Wurbs A (2003) Räumlich differenzierte Darstellung maximaler Durchwurzelungstiefen unterschiedlicher Pflanzengesellschaften auf einer Feldgehölzfläche des nordostdeutschen Tieflandes. *Bodenkultur* 54(2):93-108
- Domec JC, Gartner B (2001) Cavitation water storage capacity in bole xylem segments of mature and young Douglas-fir trees. *Trees* 15:204-214
- Eccel E, Toller G, Ghielmi L (2004) The soil water balance of a mixed oak stand in the southern Alps. *Studi Trent Sci Nat Acta Biol* 81(Suppl 1):137-149
- European Environmental Agency (2004) Impacts of Europe's changing climate : an indicator-based assessment. Luxembourg : Office for Official Publications of the EC, 107 p, EEA-Report 2004,2
- Ehlers W (1996) Wasser in Boden und Pflanze : Dynamik des Wasserhaushalts als Grundlage von Pflanzenwachstum und Ertrag. Stuttgart-Hohenheim : Ulmer, 272 p
- Federer CA, Vörösmarty C, Feketa B (2003) Sensitivity of annual evaporation to soil and root properties in two models of contrasting complexity. *J Hydro-met* 4:1276-1290
- Hacke U, Sauter JJ (1995) Vulnerability of xylem to embolism in relation to leaf water potential and stomatal conductance in *Fagus sylvatica* f. *purpurea* and *Populus balsamifera*. *J Exp Bot* 46(299):1177-1183



- Heinze M, Tomczyk S, Nicke A (2001) Vergleich von Rot-Buche (*Fagus sylvatica* L.) in sogenannten Grünen Augen mit benachbarten standortsgleichen Fichtenbeständen (*Picea abies* [L.] KARST.) des Thüringer Vogtlandes bezüglich Eigenschaften und Durchwurzelung des Bodens sowie Baumwachstum. Forstwiss Centralbl 120:139-153
- Hetsch W, Heilig KH (1981) Der Wasserhaushalt von Fichte in Abhängigkeit von Boden und Atmosphäre. Z Pflanz Bodenkd 144:317-330
- Higgs KH, Wood V (1995) Drought susceptibility and xylem dysfunction in seedlings of 4 European oak species. Ann For Sci 52:507-513
- Hijmans RJ, Cameron SE, Para JL, Jones PG, Jarvis A (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. Int J Climatol 25:1965-1978
- IPCC (2007) Climate change 2007 : the physical science basis ; contribution of Working Group I to the Fourth Assessment. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York : UNEP, 996 p
- Jansen M, Döring C, Ahrends B, Bolte A, Czajkowski T, Panferov O, Albert M, Spellmann H, Nagel J, Lemme H, Habermann M, Staupendahl K, Möhring B, Böcher M, Storch S, Krott M, Nuske R, Thiele JC, Nieschulze J, Sabrowski J, Beese F (2008) Anpassungsstrategien für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung unter sich wandelnden Klimabedingungen : Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems "Wald und Klimawandel" (DSS-WuK). Forstarchiv 79:131-142
- Joslin JD, Wolfe MH (2003) Fine-root growth response. Ecol Stud 166:274-302
- Laio F, Porporato A, Ridolfi L, Rodriguez-Iturbe I (2001) Plants in water-controlled ecosystems : active role in hydrologic processes and response to water stress ; II. Probabilistic soil moisture dynamics. Adv Water Res 24:707-723
- Leckebusch GC, Ulbrich U (2004) On the relationship between cyclones and extreme windstorm events over Europe under climate change. Global Plan Change 44(1-4):181-193
- Leckebusch GC, Koffi B, Ulbrich U, Pinto .G, Spangehl T, Zacharias S (2006) Analysis of frequency and intensity of European winter storm events from a multi-model perspective, at synoptic and regional scales. Clim Res 31:59-74
- Lemoine D, Cochard H, Granier A (2002a) Within crown variation in hydraulic architecture in beech (*Fagus sylvatica* L.) : evidence for a stomatal control of xylem embolism. Ann For Sci 59:19-27
- Lemoine D, Jacquemin S, Granier A (2002b) Beech (*Fagus sylvatica* L.) branches show acclimation of xylem anatomy and hydraulic properties to increased light after thinning. Ann For Sci 59:761-766
- Lehnardt F, Brechtel HM (1980) Durchwurzelungs- und Schopftiefen von Waldbeständen verschiedener Baumarten und Altersklassen bei unterschiedlichen Standortverhältnissen : Teil I. Erfahrungen aus Geländearbeiten und Ergebnisse veröffentlichter Untersuchungen. Allg Forst- Jagdztg 151(6/7):120-127
- Lösch R (2001) Wasserhaushalt der Pflanzen. Wiebelsheim : Quelle and Meyer, 595 p, UTB für Wissenschaft : grosse Reihe 8141
- Lu P, Biron P, Granier A, Cochard H (1996) Water relations of adult Norway spruce (*Picea abies* (L) Karst) under soil drought in the Vosges mountains : whole-tree hydraulic conductance, xylem embolism and water loss regulation. Ann Sci For 53:113-121
- Kavanagh KL, Bond BJ, Aitken SN, Gartner BL, Knowe S (1999) Shoot and root vulnerability to xylem cavitation in four populations of Douglas-fir seedlings. Tree Physiol 19:31-37
- Klap JM, Reinds GJ, Bleeker A, de Vries W (2002) Environmental stress in German forests : assessment of critical deposition levels and their exceedances and meteorological stress for crown condition monitoring sites in Germany. Wageningen : Alterra, 73 p, Alterra-rapport 134
- Kolb KJ, Sperry JS, Lamont BB (1996) A method for measuring xylem hydraulic conductance and embolism in entire root and shoot system. J Exp Bot 47:1805-1820
- Köstler JN, Brückner E, Bibelriether H (1968) Die Wurzeln der Waldbäume : Untersuchungen zur Morphologie der Waldbäume in Mitteleuropa. Hamburg : Parey, 284 p
- Kreutzer K (1961) Wurzelbildung junger Waldbäume auf Pseudogleyböden. Forstwiss Centralbl 80:356-392
- Martínez-Vilalta J, Piñol J (2002) Drought-induced mortality and hydraulic architecture in pine populations of the NE Iberian Peninsula. For Ecol Manage 161:247-256
- Martínez-Vilalta J, Sala A, Piñol J (2004) The hydraulic architecture of Pinaceae : a review. Plant Ecol 171:3-13
- Mayr S, Wolfschwenger M, Bauer H (2002) Winter-drought induced embolism in Norway spruce (*Picea abies*) at the Alpine timberline. Physiol Plant 115:74-80
- Mayr S, Cochard H (2003) A new method for vulnerability analysis of small xylem areas reveals that compression wood of Norway spruce has lower hydraulic safety than opposite wood. Plant Cell Environ 26:1365-1371
- Meier I, Leuschner Ch (2008) Genotypic variation and phenotypic plasticity in the drought response of fine roots of European beech. Tree Physiol 28:297-309
- Müller U (2004) Auswertungsmethoden im Bodenschutz : Dokumentation zur Methodenbank des Niedersächsischen Bodeninformationssystems (NIBIS). Stuttgart : Schweizerbart, 409 p, Arbeitshefte Boden / Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung 2
- Nardini A, Pitt F (1999) Drought resistance of *Quercus pubescens* as a function of root hydraulic conductance, xylem embolism and hydraulic architecture. New Phytol 143:485-493
- Nardini A, Tyree MT (1999) Root and shoot hydraulic conductance of seven *Quercus* species. Ann For Sci 56:371-377
- Novák V, Havrila J (2006) Method to estimate the critical soil water content of limited availability for plants. Biologia (Bratislava) 61(Suppl 19):S298-S293
- Osenberg M (1998) Wurzelbiomasse in zwei Beständen unterschiedlicher Baumart in der Montanstufe der Niederen Tauern. Wien : Universität für Bodenkultur (BOKU), 96 p, Diplomarbeit / Institut für Waldökologie
- Piñol J, Sala A (2000) Ecological implications of xylem cavitation for several Pinaceae in the Pacific Northern USA. Funct Ecol 14:538-545
- Porporato A, Laio F, Ridolfi L, Rodriguez-Iturbe I (2001) Plants in water-controlled ecosystems : active role in hydrologic processes and response to water stress. III. Vegetation water stress. Adv Water Resour 24:707-723
- Raissi F, Müller U, Meesenburg H (2009) Ermittlung der effektiven Durchwurzelungstiefe von Forststandorten. Hannover : Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, 6 p, Geofakten 9
- Rastin N, Ulrich B (1990) Durchwurzelungstiefe und Wurzelverteilung der Fichte auf drei unterschiedlichen Standorten. Forst Holz 45(22):665-668
- Richter A, Adler GH, Fahrak M, Eckelmann W (2007) Erläuterungen zur nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1:1 000 000 (BÜK 1000 N, Version 2.3). Hannover : BGR, 53 p
- Rosner S, Klein A, Wimmer R, Karlsson B (2006) Extraction of features from ultrasound acoustic emissions : a tool to assess the hydraulic vulnerability of Norway spruce trunkwood? New Phytol 171:105-116
- Schär Ch, Vidale PL, Lüthi D, Frei Ch, Häberli Ch, Liniger A, Appenzeller Ch (2004) The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. Nature 427:332-336
- Schmid I, Kazda M (2002) Root distribution of Norway spruce in monospecific and mixed stands on different soils. For Ecol Manage 159:37-47
- Simonin G, Cochard H, Delatour C, Granier A, Dreyer E (1994) Vulnerability of young oak seedlings (*Quercus robur* L) to embolism : responses to drought and to an inoculation with *Ophiostoma quercus* (Georgievitch) Nannf. Ann For Sci 51:493-504
- Sperry JS, Ikeda T (1997) Xylem cavitation in roots and stems of Douglas-fir and white fir. Tree Physiol 17:275-280
- Sperry JS, Donnelly JR, Tyree MT (1988) A method of measuring hydraulic conductivity and embolism in xylem. Plant Cell Environ 11:35-40
- Sperry JS, Hacke UG (2002) Desert shrub water relations with respect to soil characteristics and plant functional type. Funct Ecol 16:367-378
- Sperry JS, Hacke UG, Oren R, Comstock JP (2002) Water deficits and hydraulic limits of water supply. Plant Cell Environ 25:251-263
- Stout DL, Sala A (2003) Xylem vulnerability to cavitation in *Pseudotsuga menziesii* and *Pinus ponderosa* from contrasting habitats. Tree Physiol 23:43-50
- Tebaldi C, Hayhoe K, Arblaster JM, Meehl GA (2006) Going to the extremes : an intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events. Clim Change 79:185-211
- Tognetti R, Johnson JD, Michelozzi M (1995) The response of European beech (*Fagus sylvatica* L.) seedlings from two Italian populations to drought and recovery. Trees 9:348-354

- Tognetti R, Longobuco A, Raschi A (1998) Vulnerability of xylem to embolism in relation to plant hydraulic resistance in *Quercus pubescens* and *Quercus ilex* co-occurring in a Mediterranean coppice stand in central Italy. *New Phytol* 139:437-447
- Tyree MT, Sperry JS (1989) Vulnerability of xylem to cavitation and embolisms. *Annu Rev Plant Physiol* 40:19-38
- Tyree MT, Ewers FW (1991) The hydraulic architecture of trees and other woody plants. *New Phytol* 119:345-360
- Tyree MT, Cochard H (1996) Summer and winter embolism in oak : impact of water relations. *Ann For Sci* 53:173-180
- UN-ECE (1979) Convention on long range transboundary air pollution [online]. Zu finden in <<http://www.unece.org/env/lrtap>> [zitiert am 28.04.2009]
- UN-ECE (2004) Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risks and trends [online]. Zu finden in <[http://icpmapping.org/cms/zeigeBereich/11/manual\\_english.html](http://icpmapping.org/cms/zeigeBereich/11/manual_english.html)> [zitiert am 28.04.2009]



## Application of an animal welfare assessment system for policy evaluation: Does the Farm Investment Scheme improve animal welfare in subsidised new stables?

Angela Bergschmidt\* and Lars Schrader\*\*

### Abstract

The German National Assessment Catalogue for Animal Husbandry (NACAH) is a resource-based approach for a combined assessment of the effects of housing systems on the environment and on animal welfare. The effects on animal behaviour, as one aspect of animal welfare, are evaluated on the basis of indicators. They are classified according to the restriction of normal behaviour in each of the selected housing systems and then aggregated into three categories (A to C).

In Germany, many housings are constructed with subsidies from the Farm Investment Scheme (FIS), a measure of the EU Rural Development Programme. The FIS contains numerous goals including the improvement of animal welfare. We applied and adapted the NACAH to evaluate the effect of the FIS on animal behaviour for dairy cows and fattening pigs. Information on animal housing conditions before and after the investment was gathered in a representative telephone survey carried out in 2007.

Before the investment, dairy housing received a much better rating in the behavioural aspect of animal welfare than that for fattening pigs. In the new stables, the behavioural aspect did not change for 23 % of the dairy and 48 % of the pig farms, deteriorated on 3 % of dairy and 40 % of pig farms, and improved on 74 % of dairy and 12 % of pig farms.

Major efforts are thus necessary to improve animal welfare, especially for fattening pigs. These can not be limited to improved investment support but need to involve a variety of policy measures including consumer information and labelling.

*Keywords: animal welfare, dairy cattle, farm investment support, fattening pigs, policy evaluation, resource-based welfare assessment*

### Zusammenfassung

#### **Anwendung des Nationalen Bewertungsrahmens für die Politikevaluation: Wird mit der Investitionsförderung eine Verbesserung der Tiergerechtigkeit erreicht?**

Mit dem Nationalen Bewertungsrahmen Tierhaltungsverfahren können die Auswirkungen unterschiedlicher Haltungsverfahren auf Umwelt und Tiergerechtigkeit bewertet werden. Die Wirkung auf einen Aspekt der Tiergerechtigkeit, das Tierverhalten, wird auf der Basis von Indikatoren bewertet. Die Klassifizierung der Indikatoren ist davon abhängig, in wieweit das Normalverhalten der Tiere durch ein Haltungsverfahren eingeschränkt wird.

In Deutschland werden viele Stallbauten über das Agrarinvestitionsförderungsprogramm (AFP) bezuschusst. Das AFP enthält eine Vielzahl von Zielen, wovon eines die „Verbesserung des Tierschutzes“ ist. Im Rahmen der Evaluierung des AFP wurde der Bewertungsrahmen angewandt und angepasst, um zu untersuchen, ob die geförderten Milchvieh- und Mastschweineeställe zu Verbesserungen im Bereich des Tierverhaltens führen.

Vor der Investition in den Stall wurde bei den Mastschweinen eine im Hinblick auf das Tierverhalten problematische Ausgangslage festgestellt, während die Milchviehbetriebe eine deutlich bessere Bewertung erhielten. In den neuen Ställen blieb der Aspekt des Tierverhaltens in 23 % der Milchvieh- und 48 % der Schweinemastbetriebe unverändert, verschlechterten sich in 3 % der Milchvieh- und 40 % der Schweinemastbetriebe und verbesserten sich in 74 % der Milchvieh- und 12 % der Schweinemastbetriebe.

Deutliche Anstrengungen sind daher notwendig, um insbesondere in der Schweinemast die Tiergerechtigkeit zu verbessern. Für eine erfolgreiche Strategie ist nicht nur eine Anpassung des AFP notwendig, zusätzlich sollte eine Kombination mit anderen Maßnahmen wie etwa Konsumenteninformation, Produktkennzeichnung und Prämien geprüft werden.

*Schlüsselworte: Agrarinvestitionsförderungsprogramm, Evaluation, Haltungsverfahren, Mastschweine, Milchvieh, Tiergerechtigkeit, Tierverhalten*

\* Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI), Federal Research Institute for Rural Areas, Forestry and Fisheries, Institute of Farm Economics, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, Germany, E-Mail: angela.bergschmidt@vti.bund.de

\*\* Friedrich-Loeffler-Institut (FLI), Federal Research Centre for Animal Health, Institute of Animal Welfare and Animal Husbandry, Dörnbergstraße 25 / 27, 29223 Celle, Germany, E-Mail: lars.schrader@fli.bund.de

## Introduction

While consumers in Germany believe that farm animal welfare is one of the most important tasks of modern agriculture (TNS Emnid, 2007), the issue appears to be, at best, a secondary goal in agricultural policies. One particular measure that includes animal welfare in its set of objectives is the Farm Investment Support (FIS) scheme, which attempts primarily to improve the competitiveness of the agricultural sector. Farmers participating in the scheme receive a contribution ranging from 20 % to 35 % of their investment costs. Most dairy and an important number of pig housings are constructed with subsidies from the FIS, a measure of the EU Rural Development Programme.

Due to European Commission requirements, FIS is subject to regular evaluations. The ex-post evaluation of FIS covers farm income aspects, productivity, diversification, structural and environmental effects, and animal welfare. To analyse the impact of the FIS on the behavioural aspect of animal welfare we:

- assess the state of animal behaviour in the dairy and fattening pig housing before and after the investments,
- draw conclusions on the effectiveness of FIS, and
- develop recommendations for a targeted policy approach for the improvement of animal welfare.

### *The Farm Investment Support measure*

The Farm Investment Support measure has existed in Germany since the early 1970s and has undergone a number of modifications in recent decades. Although it is now a measure of the EU Rural Development Programme, its core activity has remained unchanged over the years: to provide subsidies for the construction and modernisation of animal housing. The FIS budget (public funds) amounted to € 1.34 billion during the period 2000 to 2006. The largest share of these funds was disbursed for the construction of dairy housings followed by pig fattening stables. In Germany, 11 000 dairy and 2 400 pig housings were subsidised by the FIS in the years 2000 to 2006.

Animal welfare is considered in the regulation in two different ways. First, housing systems such as tethered stalls and battery cages for laying hens are exempt from support. Secondly, increased subsidy (+10 %) is attributed to those farms which fulfil particular 'construction requirements for animal-friendly housing' as defined in an Annex of the regulation. For large investments, the subsidy can amount to 30 %, while up to 35 % is available for small investments (Deutscher Bundestag, 2001). For dairy stables, the criteria defined in the Annex are 'state of the art', for example, requiring one feeding place and one cubicle per cow, a minimum space allotment of 5 m<sup>2</sup> per cow,

sufficiently wide passages, and the potential to install a comfortable surface in the cubicles. The requirements for fattening pigs, however, exceed standard systems with respect to space allowance and system requirements. Here, for example, an animal-feeding space ratio of 6:1, a minimum size group of 20 pigs, separate lying areas with litter or a soft mattress, a minimum space allotment of 1 m<sup>2</sup> for pigs of more than 60 kg, and access to manipulable material are required. As a consequence, nearly all subsidised dairy housings but hardly any fattening pig stables have received the increased support.

### *Concepts for the assessment of animal welfare*

Animal welfare is multidimensional and cannot be measured directly, rather it is inferred from external parameters (Blokhuys et al., 2003). Different approaches are available for the assessment of farm animal welfare. In animal-based methods, welfare is observed at the level of the individual animal for which a multitude of behavioural and health indicators are examined. In environment- or resource-based methods, information gathered from the properties of housing conditions (e.g., space allowance) is used to assess whether the prerequisites for animal welfare are met (Bartussek, 1996, Sundrum et al., 1994). Although it is generally accepted that the most valid assessment of animal welfare is obtained when animal and environment based parameters are combined, the decision about the most suitable methodology depends on what the method is intended to measure (Johnsen, Johannesson, Sandee, 2001). Animal-based methods have the advantage of registering the state of the animal itself, but the recording of animal based parameters demands considerable resources, the interpretation of results may be difficult and reliability can be a problem (Knierim, Winckler, 2008; Napolitano et al., 2005; Sundrum, 1998). As animal based methods are time consuming, they can only provide results for a very limited number of farms/animals (Knierim, Winckler, 2008; Pflanz, 2007). Environment-based methods can provide evidence for larger samples and, thus, are more appropriate for the purpose of policy evaluation.

Animal welfare does not only depend on the housing system but also on management: for example, on the qualifications and individual attitude of the farmer. In particular, the health of animals is considered to be mainly influenced by management, while animal behaviour is related more strongly to housing systems because the construction properties (e.g., space allowance, floor quality) are prerequisites for the performance or non-performance of certain behaviours.

In the evaluation of investment support for new housing, therefore, we focused on the effects of housing conditions on animal behaviour as one important aspect of

animal welfare. We used the criteria of the National Assessment Catalogue for Animal Husbandry (KTBL, 2006) to evaluate the effect of the FIS on animal behaviour in stables for dairy cows and fattening pigs, the two most important areas of investment support.

## Materials and methods

### *The National Assessment Catalogue for Animal Husbandry*

The National Assessment Catalogue for Animal Husbandry (NACAH) is a resource-based method developed for a combined assessment of the effects of housing systems on the environment and animal welfare (KTBL, 2006). The assessment of animal welfare is based on the research findings as well as judgements of a group of 37 scientists and representatives from different interest groups (agricultural and animal welfare lobbies, administering organisations and Ministries). Behavioural indicators, structured according to functional systems, are applied to evaluate the effects of the different housing systems on animal behaviour. In total, standardised values (i.e., space allowance, floor quality) are defined for 139 housing systems for different types of animals; of these, 18 are defined for dairy cows and nine for fattening pigs.

Each functional system contains a number of indicators which can vary depending on species of animal, specialisation of production and housing system (Table 1). For example, reproductive behaviour is not an issue for fattening pigs which, on the other hand, receive two additional indicators in the functional system 'feeding'.

The underlying assumption of the NACAH is that different housing systems restrict animal behaviour to different extents. The indicators are classified into three grades with regard to the restriction of normal behaviour. Accordingly, behaviour is:

- unrestricted,
- restricted, or
- strongly restricted/not executable.

This assessment relies heavily on existing animal-based research studies carried out for different species. Normal behaviour for the indicator 'running', for example, is assessed to be 'unrestricted' for dairy cows, if they are kept on permanent pasture or in loose housing with more than 5 m<sup>2</sup> per livestock unit (LU). For temporary pasture and loose housing with less than 5 m<sup>2</sup> per LU, normal behaviour is assessed to be 'restricted' and, in tethered stalls, it is 'strongly restricted/not executable'. Literature exploited for this indicator encompasses Bogner and Grauvogl (1984), Fiedler (2003), Irps (1985), Jensen and Kyhn (2000), Krohn, Munksgaard and Jonasen (1992), Madsen and Nielsen (1985), Raasch, Huhn and Tuchscherer (2000), Schrader et al. (2001), Sundrum and Rubelowski (2001), Tuytens (2005), Wilson et al. (1999).

Table 1:

Indicators for the assessment of animal behaviour in housing systems for dairy cows and fattening pigs

| Functional system         | Indicator                        | dairy cows | fattening pigs |
|---------------------------|----------------------------------|------------|----------------|
| 1. social behaviour       | group                            | ✓          | ✓              |
|                           | social structure                 | ✓          | ✓              |
|                           | social contact                   | ✓          | ✓              |
|                           | possibility to withdraw          | ✓*         | ✓              |
| 2. locomotion             | walking                          | ✓          | ✓              |
|                           | running                          | ✓          | ✓              |
|                           | running fast                     | ✓          | ✓              |
|                           | turning around                   | ✓          | ✓              |
| 3. rest and sleep         | lay down/get up                  | ✓          | ✓              |
|                           | choice of resting place          | ✓          | ✓              |
|                           | resting in a stretched position  | ✓          | ✓              |
|                           | undisturbed resting and sleeping | ✓          | ✓              |
| 4. feeding                | feed selection/rooting           | ✓          | ✓              |
|                           | feed intake                      | ✓          | ✓              |
|                           | water intake                     | ✓          | ✓              |
|                           | undisturbed feed intake          | ✓          | ✓              |
|                           | manipulation of feed             | -          | ✓              |
|                           | manipulation of other objects    | -          | ✓              |
| 5. elimination            | defecation, urination            | ✓          | ✓              |
| 6. reproductive behaviour | jumping behaviour                | ✓          | -              |
|                           | separation for birth             | ✓          | -              |
|                           | behaviour during birth           | ✓          | -              |
| 7. comfort behaviour      | auto-grooming                    | ✓          | ✓              |
|                           | grooming on objects              | ✓          | ✓              |
|                           | thermoregulation (cooling)       | ✓          | ✓              |
|                           | thermoregulation (heat supply)   | ✓          | ✓              |
| 8. exploration            | orientation/exploration          | ✓          | ✓              |

\*except tethered stalls

The indicator grades are aggregated into three categories (A to C) which allow for a simple assessment of different housing systems. The aggregation procedure was agreed upon by the scientists and representatives from interest groups involved in the conception of NACAH and follows the principles:

- A: No indicator has received the grade 'strongly restricted/not executable' and less than three indicators received the grade 'restricted', with a maximum of two in one functional system,
- B: Housing systems fall into neither categories A nor C,
- C: In more than 50 % of the functional systems, the indicators received the grade 'strongly restricted/not executable'.



These rules for aggregation were chosen in order not to weight the different indicators or functional systems, and to avoid deficits in one functional system being compensated for by the advantages in another functional system.

#### *Adaption of the aggregation and parameterisation of the indicators of NACAH*

The original NACAH-classification is limited to three categories and it additionally has the disadvantage of ranking the most common housing systems in just one of these categories. For dairy, all loose houses (with or without pasture) are classified "B" while for fattening pigs all pens with fully slatted floor fall into category C. In order to enable a better differentiation between housing systems, we developed new aggregation criteria. The adapted assessment counts the number of functional systems in which no indicator is judged 'strongly restricted/not executable' and  $\geq 50$  % of the indicators are rated 'unconfined'. This aggregation results in a range of 0 to 8 categories.

As the NACAH was not developed as an ex-post evaluation instrument, it contains a limited number of housing systems with fixed attributes. In practice, however, there is a much larger variation in such systems, not only with respect to space allowance but also regarding equipment, for instance, with different devices for feeding, drinking and enrichment objects. To incorporate this diversity into the assessment, it was necessary to parameterise the NACAH at the level of the indicators. To this aim, existing criteria catalogues (accessible on <http://daten.ktbl.de/nbr/> with a code received by purchasing the book) were complemented, where necessary, by threshold values and delimitations (for a description of parameters for all indicators see Margarian et al., 2008).

#### *Data sampling and analysis*

For the application of the NACAH, information on animal housing conditions (housing system, space allowance, feeding technology, etc) before and after the investment was necessary. As these data were not available from statistics or FIS monitoring, a survey was carried out. To exclude minor amendments to stables, only farms with large investments of more than € 100,000 in housing systems were selected for the survey. The survey was limited to dairy and pig fattening housings.

The survey was originally planned as a national undertaking but, for data reasons (quality, availability), the city states (Berlin, Bremen, Hamburg) and some Federal States (Saarland, Saxony, Thuringia) had to be excluded. Data collection was carried out by telephone interviews in 2007. Dairy farms which had carried out an investment in a stable between 2003 and 2006 were selected in a ran-

dom disproportional sample, stratified according farm size (animal numbers) and Federal States. This was important, as the largest part of FIS funding goes to the southern Federal States which would have dominated the results in a proportionate sampling procedure. As the number of subsidised pig fattening stables was limited, a complete survey was carried out of all farms which had undertaken investment in a pig fattening housing between 2000 and 2006. Additionally a small sample of pig fattening farms which had constructed a new housing without investment support was included in the survey.

The questionnaires were developed in cooperation with the Centre for Survey Design and Methodology (GESIS – the Leibniz Institute for the Social Sciences, Mannheim, Germany) and husbandry experts. Pre-tests were carried out with dairy and pig farmers. In addition to the detailed questions on housing conditions, a question was included in order to get some idea of the deadweight involved in the subsidy (Would you have carried out the investment in the housing without the subsidy?). Furthermore the farmers were asked about their evaluation of changes in animal health.

With a drop-out rate of about 60 % of the interviewees, the number of analysable questionnaires amounted to 320 for the dairy farms, representing a share of 18 % of the population of assisted dairy farms. For the pig farms, 209 complete questionnaires were available, accounting for 32 % of the assisted pig fattening farms. Additionally data for 25 pig fattening farms which have invested into a new housing without subsidy is available.

We used the Wilcoxon signed-rank test for paired samples to test for differences between the assessments before and after investment (subsidised and non-subsidised housing).

## **Results and discussion**

### *Changes in housing systems for dairy cows*

Before investment, 40 % of the farms kept their dairy cows in tethered stalls. If the number of dairy cows per farm is taken into account, however, it becomes evident that the tethered stall is the dominant housing system only on farms with less than 50 cows while it is of very limited importance in the other farm size categories. In terms of animal numbers, 19 % of the dairy cows were kept in this system. As expected, tethered stalls do not exist after investment, as this housing system is excluded from the subsidy (Figure 1).

With respect to the prevalence of systems with pasture, the survey revealed that the share of farms with permanent indoor housing increased from 53 % to 57 %. Those farms which had tethered stalls without pasture before

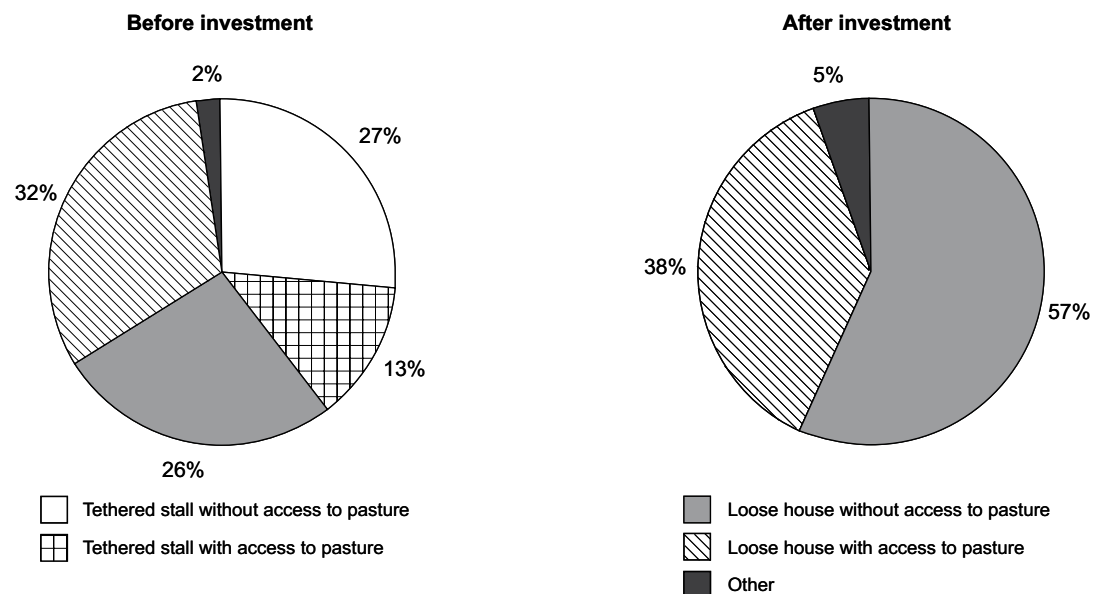


Figure 1:

Housing systems for dairy cows before and after investment

investment usually had loose stalls without pasture after investment. The housing system, therefore, does not seem to be the determining factor in this regard. Most likely, it is the extent to which pasture on the farm is close to the stable that is of high importance.

#### *Changes in housing systems for fattening pigs*

For fattening pigs, the most common housing system, the pen with fully slatted floor, increased from 50 % to 73 % of farms (Figure 2).

There was also an increase in open stables which were present on 10 % of the farms after investment. In contrast, the proportion of housings with pens with slatted floor and solid lying area – which were the second in importance before investment – decreased after investment. This housing system was particularly common on small (<400 fattening pigs) and medium (400 to 800 fattening pigs) farms. On the larger farms with more than 800 pigs, which predominantly had pens with fully slatted floors, there was only little change with respect to the housing system.

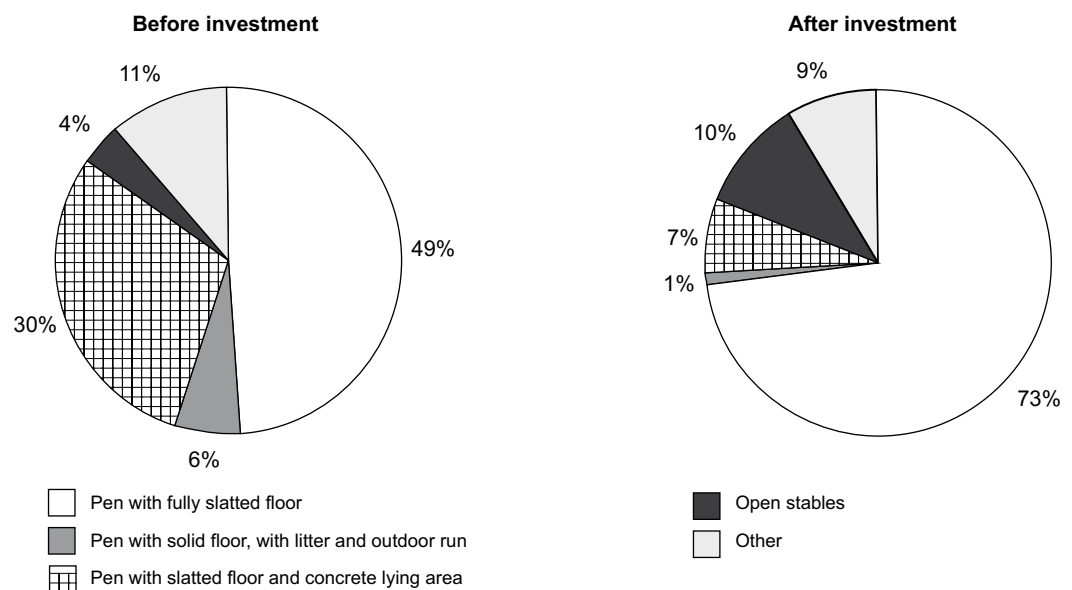


Figure 2:

Housing systems for fattening pigs before and after investment

Results of the NACAHA assessment

The examination of survey data before and after investment already provides some indication of assessment in terms of animal behaviour. For instance, for dairy cows, the abandonment of tethered stalls will in most cases be linked to an improvement in animal behaviour. Aside from the stable itself, however, other components of the housing system are also important, such as, in the case of cows, the availability of comfortable bedding (straw or soft mats) or ventilation. For fattening pigs, the availability of adequate enrichment objects and the feeding technology are of importance. Space allowance is an issue for all species.

The application of NACAHA reveals fundamental differences with regard to the aspect behaviour of dairy cows and fattening pigs. While more than 72 % of the dairy housings were rated 'B' before investment, 87 % of the pig stables were rated in category 'C', the lowest possible grade. After investment, the behavioural aspect remained unchanged on pig farms, but was improved on dairy farms which were all classified in category 'B'. This result reveals a major weakness of the methodology: only very substantial changes, such as the abandonment of tethered stalls, can be indicated, while numerous alterations in the housing system with respect to pasture, space allowance, etc, do not become apparent.

Table 2:

Assessment of animal behaviour before and after investment according to the NACAHA (percentage share of farms in categories A, B and C)

|   | Dairy cows |            | Fattening pigs |            |
|---|------------|------------|----------------|------------|
|   | old stable | new stable | old stable     | new stable |
| A | 0          | 0          | 0              | 0          |
| B | 72         | 100        | 13             | 13         |
| C | 28         | 0          | 87             | 87         |

Using the adapted aggregation, which counts the number of positively evaluated functional systems, a more accurate picture of the situation before and after the investment into the new stable can be drawn (Figure 3). In pig production, the behaviour of the animals was highly constrained in the initial situation. In more than 50 % of the housings, normal behaviour was severely restricted in all functional systems. After investment, the situation deteriorates even further with over 70 % of the stables in this category<sup>1</sup>.

In dairy production, the situation was different. Less than 30 % of the housings were classified in the 'poor' categories (0 to 2 positively-rated functional systems) before investment, and, due to the abandonment of tethered-stalls, there were no cases in these categories after investment. When farm sizes were included in the analysis, it became

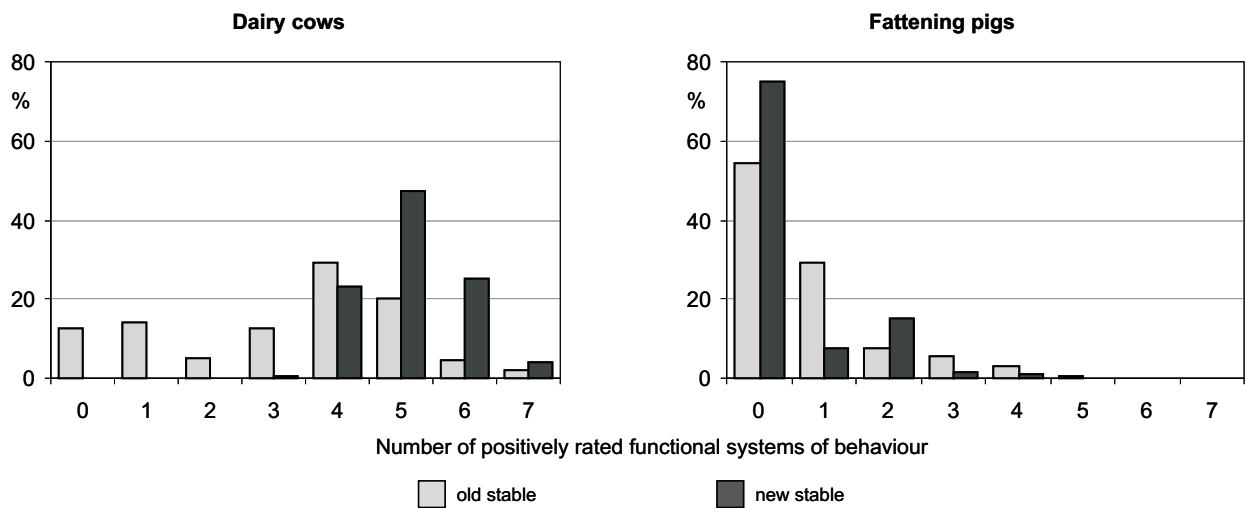


Figure 3: Assessment of animal behaviour before and after the investment based on the new aggregation method (percentage of stables with 0 - 7 positively evaluated functional systems)

<sup>1</sup> The difference between the results of the original NACAHA-aggregation ('no change') and the adapted aggregation ('deterioration') is due to the fact that the new aggregation is more apt in depicting smaller changes. After investment, pens with slatted floors and a concrete lying area have been replaced by pens with fully slatted floors (see Figure 2), which results in further restrictions in animal behaviour.

evident that the important improvements mainly occurred on the smaller farms of less than 40 dairy cows.

Within certain housing systems, we can observe small improvements for dairy cows and fattening pigs. In loose stalls for dairy cows, this arises from the increased number and size of cubicles, as well as wider passages. In pens with fully slatted floor for fattening pigs, the improvements can be attributed to the increased supply of objects and showers, and larger space allowance. It has to be taken into account that environment-based methods may have difficulties in capturing differences in animal welfare within housing systems (Mollenhorst et al., 2005). While minor improvements have been shown due to changes within a housing system, the general observed effects mainly relate to the change from one housing system to another. Although the situation improved in 74 % of the dairy stables, this was the case for only 12 % of pig housings. Deteriorations were measured in 40 % of pig stables (3 % of dairy housings) and the situation remained constant in 48 % of pig stables (23 % of dairy housings).

The difference between the assessed grades before and after investment was significant in the case of both dairy and pigs (Wilcoxon: dairy  $n = 320$ ,  $W = 25\,680$ ,  $P < 0.0001$ ; pig fattening  $n = 210$ ,  $W = 19\,530$ ,  $P < 0.0001$ ).

#### *The net effect of FIS*

Up to now we have only investigated the effects of the subsidised investment. To estimate the effect of the subsidy itself (the net effect), we need to know what the farmers would have done without the subsidy and if a housing built without subsidy would differ to one constructed with FIS:

- The decision to build may have been influenced by the subsidy but it is also possible that the farmer would have made his investment without it. To identify the deadweight, the farmers were asked about their strategies. The results indicate that about 50 % of the pig farmers and 45 % of the dairy farmers would have constructed the stables even without investment support.
- When comparing the assessment of animal behaviour of FIS subsidised stables with that of a control group of investments without subsidy, no significant difference between the two groups can be determined (Wilcoxon:  $n_{\text{FIS}} = 72$ ,  $n_{\text{no-FIS}} = 25$ ,  $S = 0.21$ ,  $P < 0.001$ ). Due to the fact that nearly all dairy stables in Germany are built with FIS, this experimental control was only possible for fattening pigs.

As a result, a positive or negative effect of FIS can be assumed especially on those farms which would not have invested without the subsidy and which would have continued production in the old stable.

#### *Discussion*

While the assessment of animal behaviour is in general plausible and traceable (from the literature sources) at the level of the indicators, the original aggregation of NACAHA is not suitable for the evaluation of the effects of FIS on animal welfare. The small number of grades and the aggregation mechanism which does not even exploit those three categories might also prove inappropriate for other purposes. The altered assessment method of the NACAHA provides a clearer picture of the situation regarding animal behaviour before and after the investment than the "original" NACAHA aggregation. Some limitations to the approach are:

- The general criticism of environment-based methods is that they are not able to assess the animal welfare situation but, basically, only delineate the prerequisites of certain behavioural performance. The validity of the results of environment-based methods for assessing differences between housing systems has so far only been demonstrated exemplarily (Mollenhorst et al., 2005). Further comparisons of the results achieved using environment-based and animal-based methodology on the same sample of farms would help to lessen this problem.
- The suitable reference value for an assessment of animal behaviour before and after investment would be the 'number of animals' for which housing conditions have been improved. This is not feasible because most farms increase the number of animals in the course of an investment, and a reference housing system for the restocked animals is not available. Therefore, all statements have to be related to the number of farms or new stables and not to the number of animals.
- In our survey, the proportion of animals kept in the new housings after investment was 85 % for dairy and 73 % for fattening pigs. The remaining 15 % of dairy cows and 27 % of fattening pigs continued to be kept in the old stables after investment. The assessment is therefore relevant for a large share of, but not all, animals.
- The defined criteria and threshold values for assessment of animal welfare at the level of some indicators are not yet scientifically well-grounded. In relation to a number of issues (eg, group size in pig fattening housings), there is still little information as to their effect on animal behaviour.
- The altered NACAHA aggregation of indicators is just one in a wide variety of aggregation options and underlying concepts (Botreau et al., 2007). While some aggregations use a weighting mechanism which allows for compensation between welfare aspects, others attribute the same importance to all aspects. Although full compensation is regarded critically, the proposition

that all welfare aspects are equally important for all species is not only implausible from an anthropocentric perspective, but it has been disproved in experiments, such as those with demand tests (Mason, 2001).

- As changes in animal health can occur as a consequence of new housing, a more complete picture of animal welfare would be achieved if animal health was included in the analysis. Although this aspect has not been measured in on-farm epidemiological studies, the assessment of the farmers of changes in animal health after the investment into a new housing can give a first indication. The survey results suggest that in both dairy and pig fattening farms, animal health improved in about half and remained constant in about 40 % of the farms. In less than 10 % of the farms the farmers reported a deterioration (the remainder had no opinion).

## Conclusions

### *Animal welfare implications*

While small improvements in animal behaviour are related to changes within a given housing system, the general observed effects were mainly due to the change from one housing system to another. This led to improvement in a large proportion of dairy housings and a deterioration in 40 % of pig stables.

In its actual design, the FIS does not achieve substantial improvements in the behavioural aspect of animal welfare at the farm level. Important ameliorations on the dairy farms are due to the abandonment of tethered stalls – a form of husbandry which is set to diminish even without policy intervention in the mid-term. On the pig fattening farms, restrictions in animal behaviour are a much more severe problem and the FIS cannot account for any improvement. On the contrary, the situation deteriorates further.

The two most important determinants of the limited impact of FIS with respect to improvements in animal welfare are:

- The ‘construction requirements for animal-friendly housing’ defined in the Annex of the FIS regulation do not reflect the level of knowledge with respect to welfare-friendly housing systems. For dairy housing they are ‘state of the art technology’.
- For fattening pigs, the criteria in the Annex lead to higher current costs of production, so that only farms that are able to sell their meat in special (high-price) distribution channels are able and willing to implement this measure.

### *Methodological implications*

A wide range of policies is applied with the aim of improving animal welfare in the EU member states. Neverthe-

less a ‘ready for use’ methodology to measure the effects of these policies on animal health and animal behaviour, which is generally accepted by the scientific community, is not available. The application of NACAH has demonstrated that an assessment of animal behaviour is possible even under the financial constraints and the time pressure of policy evaluation. More research is needed to validate this kind of approach and to test the inclusion of health aspects into the assessment while remaining within the scope of policy evaluation.

### *Policy implications*

A considerable effort will be necessary to achieve noteworthy achievements in the field of animal welfare. A successful policy for the promotion of welfare-friendly housing systems cannot be limited to FIS but will require a strategic approach involving a set of different instruments. Schemes need to be developed for the different species and specialisations of production:

- Existing legislation has to be scrutinised and tightened where necessary (EFSA, 2005).
- Guidelines for welfare-friendly housing systems should be further developed by scientists and experts.
- Consumers need to obtain information about animal production and the implications of different housing systems. To translate this information into a willingness to pay for the more expensive products from welfare-friendly systems, this measure should be linked to an easily understandable and transparent labelling campaign (see also Isermeyer and Schrader, 2005).
- A precise definition of investments which lead to improvements in animal welfare is a precondition for a targeted FIS (the guidelines should be used here).
- If a rise in production costs is the result of welfare-friendly housing systems and consumers are not prepared to pay higher prices, payments to compensate for the additional costs could be envisaged (Aragrande et al., 2006, European Commission, 2003).

## Acknowledgments

This study was carried out in the context of the ex-post evaluation of the Farm Investment Support Scheme funded by the European Commission, the Federal Ministry for Food, Agriculture and Consumer Protection and the respective Ministries of the Federal States. The authors wish to thank Rolf Porst from the Centre for Survey Design and Methodology for his support with questionnaire development and Anne-Marie Sherwood for editing.

## References

- Aragrande M, Bruni M, Loi A, Costa L (2006) Study on the socio-economic implications of different aspects of farming weaners and pigs kept for fattening [online]. Zu finden in <[http://ec.europa.eu/food/animal/welfare/farm/farming\\_pigs\\_finalreport\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/food/animal/welfare/farm/farming_pigs_finalreport_en.pdf)> [zitiert am 01.04.2009]
- Bartussek H (1996) Tiergerechtheitsindex für Rinder : TGI 35 L/1996-Rinder. Gumpenstein : BAL, 18 p, Veröffentlichungen / Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft 26
- Blokhuys HJ, Jones RB, Geers R, Miele M, Veissier I (2003) Measuring and monitoring animal welfare : transparency in the food product quality chain. *Animal Welfare* 12:445-455
- Bogner H, Grauvogl A (1984) Die Beurteilung von Rinderstallungen aus ethologischer Sicht. *KTBL-Schrift* 307:62-71
- Botreau R, Bracke MBM, Perny P, Butterworth A, Capdeville J, Van Reenen CG, Veissier I (2007) Aggregation of measures to produce an overall assessment of animal welfare : part 2: analysis of constraints. *Animal* 1(8):1188-1197
- Deutschland / Bundestag (2001) Rahmenplan der Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes“ für den Zeitraum 2001 bis 2004. Bonn, Drucksache / Deutscher Bundestag 14/5900
- EFSA - European Food Safety Authority (2005) The welfare of weaners and rearing pigs : effects of different space allowances and floor types. *EFSA J* 286
- European Commission, Directorate General for Agriculture and Rural Development (2003) Fact sheet : rural development in the European Union. Luxembourg : EU
- Fiedler A (2003) Dem Stallboden mehr Aufmerksamkeit schenken : der Einfluss der Laufflächen auf die Klauengesundheit. *Grosstierpraxis* 3:35-41
- Irps H (1985) Die haltungstechnische Ausführung von Rinderstallungen unter Berücksichtigung ethologischer Erkenntnisse. Braunschweig : FAL, 64 p, ILB-Institutsbericht / Institut für landwirtschaftliche Bauforschung 41
- Isermeyer F, Schrader L (2003) Politik : wer bezahlt den Tierschutz? *Landbau-forsch Völkenrode SH* 262:151-174
- Jensen MB, Kyhn R (2000) Play behaviour in group-housed dairy calves, the effect of space allowance. *Appl Anim Behav Sci* 67(1-2):35-46
- Johnsen PF, Johannesson T, Sandee P (2001) Assessment of farm animal welfare at herd level : many goals, many methods. *Acta Agric scand 1 : Suppl* 30:26-33
- Knierim U, Winckler C (2008) On farm welfare assessment in cattle - quo vadis. In: 4th International Workshop on the Assessment of Animal Welfare at Farm and Group Level : book of abstracts, pp 54-54
- Krohn C, Munksgaard L, Jonassen B (1992) Behaviour of dairy cows kept in extensive (loose housing/pasture) or intensive (tie stall) environments : 1. Experimental procedure, facilities, time budgets - diurnal and seasonal conditions. *Appl Anim Behav Sci* 34:37-47
- KTBL - Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft eV (2006) Nationaler Bewertungsrahmen Tierhaltungsverfahren : Methode zur Bewertung von Tierhaltungsanlagen hinsichtlich Umweltwirkungen und Tiergerechtigkeit. Darmstadt : KTBL, 778 p, *KTBL-Schrift* 446
- Margarian A, Bergschmidt A, Dirksmeyer W, Ebers H, Fitschen-Lischewski A, Forstner B (2008) Ex-Post-Bewertung des Agrarinvestitionsförderungsprogramms (AFP) für den Förderzeitraum 2000 bis 2006 : Schleswig-Holstein. Braunschweig : vTI
- Mollenhorst H, Rodenburg TB, Bokkers EAM, Koene P, de Boer IJM (2005) On-farm assessment of laying hen welfare : a comparison of one environment-based and two animal-based methods. *Appl Anim Behav Sci* 90:277-291
- Madsen EB, Nielsen K (1985) A study of tail tip necrosis in young fattening bulls on slatted floors. *Nord Vet Med* 37 (6):349-357
- Mollenhorst H, Rodenburg TB, Bokkers EAM, Koene P, de Boer IJM (2005) On-farm assessment of laying hen welfare : a comparison of one environment-based and two animal-based methods. *Appl Anim Behav Sci* 90:277-291
- Napolitano F, Grasso F, Bordini A, Tripaldi C, Saltalamacchia F, Pacelli C, De Rosa G (2005) On-farm welfare assessment in dairy cattle and buffaloes : evaluation of some animal-based parameters. *Ital J Anim Sci* 4:223-231
- Pflanz W (2007) Gesamtheitliche Bewertung innovativer Schweinemastverfahren für Baden-Württemberg : tier- und umweltgerechte Haltungsverfahren in der Schweinehaltung [online]. Zu finden in <[http://www.landwirtschaft-mrl.baden-wuerttemberg.de/servlet/PB/menu/1206797\\_1/index.html](http://www.landwirtschaft-mrl.baden-wuerttemberg.de/servlet/PB/menu/1206797_1/index.html)> [zitiert am 31.03.2009]
- Raasch ML, Huhn R, Tuchscherer A (2000) Evaluation of a loose housing system for suckler cows with regard to the behavioural needs of resting behaviour. *Arch Tierzucht* 43:211-217
- Schrader L, Roth HR, Winterling C, Brodmann N, Langhans W, Geyer H, Graf B (2001) The occurrence of tail tip alterations in fattening bulls kept under different husbandry conditions. *Animal Welfare* 10(2):119-130
- Sundrum A, Andersson R, Postler G (1994) Tiergerechtheitsindex 200 : ein Leitfaden zur Beurteilung von Haltungssystemen. Bonn : Inst Organischen Landbau, 211 p
- Sundrum A (1998) Appropriateness of housing conditions for livestock concerning animal welfare. *Dtsch tierärztl Wschr* 105:65-72
- Sundrum A, Rubelowski I (2001) Beurteilung der Tiergerechtigkeit von Haltungsbedingungen für Mastbullen auf Praxisbetrieben. In: Schäffer D (ed) 15. IGN Tagung Tierschutz und Tierhaltung, Halle-Kröllwitz, 4. bis 6. Oktober 2001. Halle (Saale) : Martin-Luther-Univ, pp 8-13
- TNS Emnid (2007) Das Image der deutschen Landwirtschaft : Ergebnisse einer Repräsentativbefragung in Deutschland [online]. Zu finden in <<http://www.ima-agrar.de/fileadmin/redaktion/download/pdf/DasImageDerDeutschenLandwirtschaft-2007.pdf>> [zitiert am 31.03.2009]
- Tuytens FAM (2005) The importance of straw for pig and cattle welfare : a review. *Appl Anim Behav Sci* 92(3):261-282
- Wilson LL, Terosky TL, Stull CL, Stricklin WR (1999) Effects of individual housing design and size on behaviour and stress indicators of special-fed Holstein veal calves. *J Anim Sci* 77(6):1341-1347



## Einfluss des Haltungssystems auf die Bewegungsaktivität und Stressbelastung bei Pferden in Auslaufhaltungssystemen

Gundula Hoffmann\*, Franz-Josef Bockisch\*\* and Peter Kreimeier\*\*\*

### Zusammenfassung

Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass die tägliche Bewegung für die Gesunderhaltung der Pferde notwendig ist. Inwieweit sich jedoch unterschiedliche Bewegungsangebote auf das Stress- und Bewegungsverhalten von Pferden in einer Gruppen-Auslaufhaltung auswirken und ob der Bewegungsbedarf der Pferde durch eine Auslaufhaltung ohne zusätzliche Bewegung gedeckt werden kann, ist der Literatur bisher nicht zu entnehmen. Daher sollte in der nachfolgend beschriebenen Untersuchung der Frage nachgegangen werden, welche Auswirkungen verschiedene Bewegungsangebote auf die Bewegungsaktivität von Pferden in Gruppen-Auslaufhaltungen haben und ob diese das Wohlbefinden der Tiere beeinflussen. Letzteres wurde durch Messung der Herzfrequenzvariabilität und Bestimmung von Cortisolmetaboliten im Pferdekot erfasst und die Bewegungsaktivität der Pferde wurde mit ALT-Pedometern bestimmt.

Verglichen wurden eine Einzel- und Gruppenhaltung mit jeweils angrenzendem Auslauf, aber ohne eine zusätzliche Bewegung der Pferde außerhalb des Stalls. In drei weiteren Varianten der Gruppenhaltung bekamen die Pferde täglichen Auslauf auf einer unbegrünten Koppel, auf einer Weide oder durch gezielte Bewegung in einer Führanlage. Die Bewegungsaktivität konnte durch die zusätzliche Bewegung in Form von Weide oder Führanlage signifikant gesteigert werden.

Ein zusätzliches Bewegungsangebot führte bei den Pferden zu einer Abnahme der Stressbelastung und sollte auch den Pferden ermöglicht werden, die in einer Gruppenhaltung gehalten werden, um ihre physische und psychische Gesundheit zu erhalten.

**Schlüsselworte:** Bewegung, Cortisol, Herzfrequenzvariabilität (HFV), Pferd, Verhalten

### Abstract

#### **Influence of the husbandry system on the movement activity and stress exposure of horses in discharge husbandry systems**

Former studies confirm the necessity of daily movement for the health of a horse. But so far no description could be found in the literature how different movement offerings impact the stress and movement behaviour of horses in group husbandries with close-by discharge. The same holds true for the question whether a discharge husbandry system can meet the movement requirements of horses if there isn't any additional movement possibility. The aim of the present study was to examine different movement offerings, their effects on the movement activities of horses in a group horse husbandry with close-by discharge and the impact of the movement on the wellbeing of the animals.

The heart rate variability and the concentration of the cortisol metabolites in the horse excrement were analyzed for detecting the wellbeing of the horses. Additionally ALT-Pedometers were used for determining the movement activity.

A single and a group husbandry system, each with close-by discharge, were compared when horses had no additional movement outside the stable. In three further variants the group husbandry was supplemented with daily time on a non-grassy pasture land, a pasture or in a horse walker. Pasture or horse walker increased movement activity significantly. Nevertheless an additional movement offering resulted in a lower stress load of the horses and should also be allowed to horses in group husbandry systems to ensure the horse's physical and mental health.

**Keywords:** movement, cortisol, heart rate variability (HRV), horse, behaviour

\* Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB), Technik in der Tierhaltung, Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam; ehemalige wiss. Mitarbeiterin am Institut für Betriebstechnik und Bauforschung der FAL Braunschweig

\*\* Julius Kühn-Institut (JKI), Institutsleiter am Institut für Anwendungstechnik des JKIs, Messeweg 11/12, 38104 Braunschweig; ehemaliger Institutsleiter des Instituts für Betriebstechnik und Bauforschung der FAL Braunschweig

\*\*\* Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI), Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig; ehemaliger Mitarbeiter am Institut für Betriebstechnik und Bauforschung der FAL Braunschweig



## Einleitung

Eine ausreichende Bewegung der Pferde ist zu gewährleisten, da sie von großer Bedeutung für die physische und psychische Gesundheit der Tiere ist. Indem sich die Pferde bei der Futteraufnahme in langsamen Schritten fortbewegen, ist eine gute Durchblutung des Bewegungsapparates und der Organe gewährleistet. Muskeln, Sehnen und Bänder bleiben elastisch und die Atemorgane werden auf diese Weise trainiert und gesund erhalten (Bachmann, 1998). Bewegungsarmut kann daher zu erheblichen Störungen des Bewegungsapparates führen. Sie ist aber ebenso wie die Haltungsumwelt auch verantwortlich für Störungen des Stoffwechsels und des Hufmechanismus als Folge zu geringer Durchblutung sowie für psychische Schäden, Übersprungshandlungen und Bewegungsstereotypien (Mills et al., 2005; Piotrowski und Kreimeier, 1998).

Verschiedene Datenerhebungen haben gezeigt, dass Erkrankungen des Bewegungsapparates mit 31,9 bis 48 % den größten Anteil der Nutzungsausfälle ausmachen, gefolgt von Erkrankungen des Atmungs- und Verdauungsapparates (Butler und Armbruster, 1984; Rodewald, 1989; Sommer et al., 1988).

Bachmann (1998) und Zeitler-Feicht (2008) sehen insbesondere die Futteraufnahme als einen entscheidenden Faktor, um das Bewegungs- und Beschäftigungsbedürfnis der Pferde zu befriedigen. Bei Weidehaltung bestimmt sie mit 12 bis 16 Stunden ca. 60 % des Tagesgeschehens und stellt neben dem Stehen die dominierende Verhaltensweise dar. Die Bedeutung der Futterverteilung über den Tag konnte durch Untersuchungen am ehemaligen Institut für Betriebstechnik und Bauforschung (FAL Braunschweig) nachgewiesen werden. Bei Pferden, die in Einzelboxen gehalten wurden, konnte durch eine mehrmalige (10 Mal pro Tag), zeitgleiche Fütterung des Kraftfutters die Stressbelastung reduziert werden (Bockisch et al., 2007). Untersuchungen an wildlebenden Przewalskipferden im Südwesten der Mongolei (Souris et al., 2007) haben gezeigt, dass sich ihr Zeit-Budget nur wenig von freilebenden Hauspferden unterscheidet. Die beobachteten Przewalskipferde verbrachten 46 % des Tages mit der Futteraufnahme und 35 % im Ruhen und nur ein geringer Anteil des Tages (11 %) fiel auf die zweckfreie Fortbewegung.

Die meisten Freizeitpferde verbringen jedoch heutzutage einen Großteil des Tages im Stall. Ihre tägliche Bewegung ist oft nur noch auf eine Stunde reduziert und findet vielfach nicht mehr im Freien statt (Piotrowski, 1989). Vergleichende Untersuchungen von freilebenden und im Stall gehaltenen Pferden (Kiley-Worthington, 1990) haben verdeutlicht, dass sich ihr natürliches Verhalten in Abhängigkeit von ihrer Haltungsform unterscheidet. Starke Verhaltensabweichungen zeigten sich vor allem beim Fortbewegungs- und Nahrungsaufnahmeverhalten der Pferde,

die in Einzelboxen gehalten wurden. Hingegen nähert sich bei einer Gruppen-Auslaufhaltung die durchschnittliche Zeitverteilung mit 57 % Fresszeit und 23 % Stehzeit schon recht gut an die Verhältnisse der frei lebenden Tiere an. Insgesamt ist jedoch zu bedenken, dass die Aufnahme von vorgelegtem Futter hinsichtlich der Bewegung nicht mit dem Grasens auf einer Weide gleichzusetzen ist.

Untersuchungen am ehemaligen Institut für landwirtschaftliche Bauforschung (FAL Braunschweig) mit Haflingern in einer Gruppen-Auslaufhaltung konnten bereits aufzeigen, dass die Fütterungsfrequenz einen höheren Einfluss auf die zurückgelegten Wegstrecken innerhalb des Haltungssystems hat, als die Verlängerung der Wegstrecken zu den Fressplätzen und die Möglichkeit der freien Bewegung im Haltungssystem (Frentzen, 1994). Zudem wurden bei intensiver Beobachtung dieser Haflinger-Pferdegruppe keinerlei soziale Auseinandersetzungen großer Intensität (Kampf) oder Verletzungen infolgedessen festgestellt. Hieraus wurde der Schluss gezogen, dass für Pferde in Gruppenauslaufhaltung bei vernünftiger, fachkundiger Betreuung und sinnvoller Gestaltung des Haltungssystems das Restrisiko einer Verletzung um vieles geringer ist als das Risiko haltungsbedingter Schäden, Krankheiten und Verhaltensstörungen bei herkömmlicher Einzelboxen-Aufstallung von Pferden.

## Zielstellung

Die Auslaufhaltung von Pferden erfreut sich immer größerer Beliebtheit unter den Pferdehaltern. Dabei findet man die angrenzenden Ausläufe nicht nur vor Gruppen-Laufställen sondern auch zunehmend vor den Einzelboxen, die in der Pferdehaltung zu den häufigsten Stallunterkünften gehören. Durch den ständigen Zugang zu den Ausläufen haben die Pferde stets die Möglichkeit, sich im Freien aufzuhalten und sich dort zu bewegen. Fraglich ist jedoch, ob die Pferde sich dort tatsächlich ausreichend bewegen und ihren Bewegungsbedarf selbstständig decken können.

Ziel dieses Projektes war es deshalb zu untersuchen, ob eine Auslaufhaltung mit großer frei zugänglicher Lauffläche den Pferden genügend Bewegungsanreize bietet und das Bewegungsbedürfnis der Pferde deckt, auch wenn sie nicht jeden Tag zusätzlich bewegt werden. Zudem sollte geklärt werden, welchen Einfluss die Auslaufgröße auf die Bewegungsaktivität der Pferde hat und wie sich verschiedene zusätzliche Bewegungsangebote auf das Wohlbefinden der Pferde und ihr Bewegungsverhalten auswirken.

Inwiefern das Haltungssystem und die tägliche Bewegung das Wohlbefinden der Pferde beeinflussen oder Stressfaktoren darstellen, lässt sich nur schwer erfassen, da man es nicht einfach messen kann, wie beispielsweise den Herzschlag oder die Körpertemperatur eines Pferdes.

Die Einschätzung des Befindens eines Tieres setzt damit eine möglichst genaue Kenntnis seiner spezifischen Physi-

ologie und ihrer Auswirkung auf das Verhalten voraus. Die alleinige Betrachtung des Verhaltens lässt zwar Hinweise auf das Vorhandensein, nicht aber zwangsläufig auf Art und Umfang tierischer Befindlichkeit zu. Die subjektive Befindlichkeit hängt sowohl von der Wechselwirkung mit der Umwelt ab wie von einer Reihe endokrinologischer, neuronaler, psychischer und kognitiver Vorgänge, deren kompliziertes Zusammenspiel sowohl Ursache als auch Ergebnis interner Vorgänge sein kann. Insofern müssen Messungen, die mit dem Zweck durchgeführt werden, Aussagen über das Befinden eines Tieres zu treffen, immer komplexer Natur sein. Daher sollte das artspezifische, individuelle Wohlbefinden durch die Kombination ethologischer und physiologischer Messdaten quantifiziert werden, um dieses Referenzgerüst auf übliche Haltungsbedingungen für Nutztiere anwenden zu können (Broom, 1991; Hoffmann et al., 2007; Manteuffel und Puppe, 1997).

### Tiere, Material und Methoden

Zur Erfassung der Bewegungsaktivität und Stressbelastung wurden Versuche in der Versuchsanlage des ehemaligen Instituts für Betriebstechnik und Bauforschung der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (heutiges Johann Heinrich von Thünen-Institut) in Braunschweig durchgeführt. Die Versuche wurden in der Zeit von September 2004 bis Oktober 2005 durchgeführt. Insgesamt standen für die Untersuchung 24 Stuten zur Verfügung, die jeweils Hannoverscher Abstammung waren und ein Alter zwischen 1½ und 3½ Jahren hatten.

Parallel befanden sich sechs Pferde in einer Mehrraum-Gruppen-Auslaufhaltung und sechs Pferde in einer Einzel-Auslaufhaltung, sodass insgesamt 12 Pferde im gesamten Stall untergebracht waren. Die Ausläufe grenzten direkt an den Liegebereich der Gruppenhaltung bzw. an die Einzelboxen und waren für die Pferde während des gesamten Versuchszeitraums stets frei zugänglich (Abbildung 1).

Dabei hielt sich jedes Pferd ca. drei Monate in der Einzelhaltung (EH) und drei Monate in der Gruppenhaltung (GH) auf. Anschließend fand ein Wechsel des Haltungssystems (zwischen EH und GH) statt, um den Einfluss des Haltungssystem auf die Pferde vergleichend untersuchen zu können. Nach sechs Monaten fand eine Wiederholung der Versuche mit 12 weiteren Pferden statt, die ebenfalls nach Einzel- und Gruppenhaltung getrennt betrachtet wurden. Den Schwerpunkt der Untersuchungen bildete die Gruppenhaltung mit angrenzendem Auslauf. In diesem Haltungssystem wurden vier Varianten realisiert. Diese Varianten unterschieden sich jeweils in einem zusätzlichen Bewegungsangebot (außerhalb des Stallgebäudes), das die Pferde täglich erhielten. Sie kamen dabei in ihrer Gruppe (sechs Pferde) für zwei Stunden des Vormittags auf eine benachbarte Weide (Koppel mit Grasbewuchs) oder

auf eine unbegrünte Koppel (ohne jeglichen Bewuchs). In der dritten Variante wurden die Tiere eine Stunde pro Tag durch eine Führanlage mit einem definierten Bewegungs-Programm bewegt und in der vierten Variante konnten die Pferde das Haltungssystem der Mehrraum-Gruppen-Auslaufhaltung gar nicht verlassen. In der Führanlage konnten sechs Pferde gleichzeitig bewegt werden. Sie wurden in der Führanlage nicht angebunden, sondern allein durch schwenkbare Abtrenngitter vorwärts bewegt. Jedem Pferd stand somit ein eigenes Abteil zur Verfügung, in dem es sich nach der vorgegebenen Geschwindigkeit frei bewegen und beim Richtungswechsel problemlos umdrehen konnte.

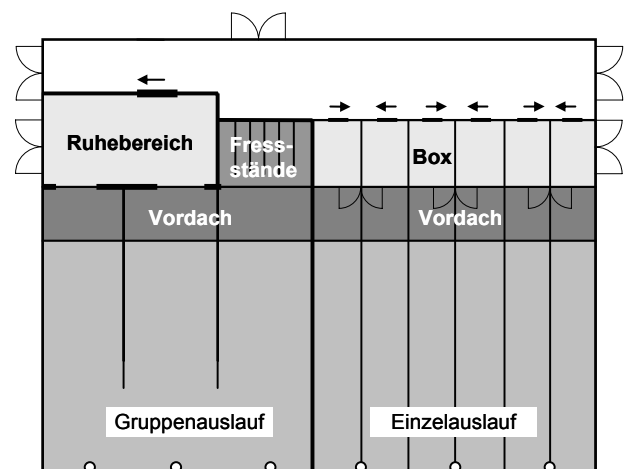


Abbildung 1:

Grundriss der Versuchsanlage (Gruppenhaltung links und Einzelhaltung rechts im Bild)

Eine Variante dauerte jeweils drei Wochen, in denen die erste Woche zur Adaptation an die jeweilige Variante diente und die zwei folgenden Wochen zur Erfassung der Messparameter. Als Referenzvariante wurden die Stuten drei Wochen in einer Einzelbox mit angrenzendem Auslauf untersucht und bekamen keine zusätzliche Bewegung außerhalb des Stalles angeboten.

Die gemessenen Parameter waren zum einen die Bewegungsaktivität und zum anderen die Stressbelastung der Tiere (Hoffmann, 2008). Die Bewegungsaktivität der Pferde wurde mit Pedometern ermittelt, welche rund um die Uhr an jeweils einem Hinterbein der Pferde befestigt waren. Es handelte sich um ALT-Pedometer, wobei ALT die Abkürzung für Aktivität, Liegezeit und Temperatur ist. Anhand der Pedometerdaten lässt sich ablesen, wie viel Zeit das jeweilige Pferd in Bewegung und im Liegen verbringt. Die Messgröße besteht aus Bewegungsimpulsen am Hinterbein eines Pferdes, wobei pro Sekunde maximal zwei Impulse registriert werden. Ob ein Pferd liegt, wird alle 15 Sekunden durch die Lagesensoren ermittelt. Anhand die-

ser Voreinstellungen ist eine Umrechnung der Bewegungsaktivitäten und der Gesamtliegezeit in Minuten pro Tag möglich. Die Umgebungstemperatur am Pferdebein wird alle 15 Minuten gemessen; diese Messgröße fand aber in der vorliegenden Arbeit keine weitere Berücksichtigung. Die ALT-Pedometer wurden automatisch im Vier-Stunden-Zyklus angesprochen und gaben gespeicherte Datensätze per Funkübertragung an einen zentralen Computer weiter. Zur weiteren Bearbeitung wurden die Daten in das Tabellenkalkulationsprogramm Excel eingefügt.

Zusätzlich fand eine durchgehende Überwachung der Tiere durch eine Videoaufzeichnung statt. Die Videos wurden anschließend digitalisiert und mit der Software Interact (Version 7.2.2, Firma Mangold, Arnstorf) ausgewertet. Anhand der Videodaten konnte ebenfalls die Bewegungs- und Liegezeit analysiert werden. Zudem konnten wichtige Hinweise zum Verhalten der Pferde gewonnen und eine Rangordnung in der Gruppe bestimmt und fortlaufend kontrolliert werden.

Um zusätzlich eine Aussage über das Wohlbefinden der Tiere machen zu können, wurde die Herzfrequenzvariabilität gemessen und die Konzentration der Cortisolmetaboliten im Kot der Pferde bestimmt. Die Messung der Herzfrequenzvariabilität (HRV, engl.: heart rate variability) ist eine etablierte Methode, die in wissenschaftlichen Untersuchungen sowohl bei Menschen als auch bei Tieren sehr häufig Verwendung findet. Die Grundlagen der HRV wurden dabei weitestgehend in der Humanmedizin und im Bereich der Sportwissenschaften (Hottenrott, 2001) erforscht. Die Bestimmung der Cortisolmetaboliten im Kot hat den Vorteil, dass die Proben direkt nach dem Kotabsatz ohne Beunruhigung der Tiere gesammelt werden können. Cortisol ist ein Hormon, das bei Stress durch die Nebennierenrinde gebildet wird, sodass zunächst ein Anstieg im Blut messbar ist. Da jedoch die Blutentnahme selbst einen Stressor darstellt, fanden Untersuchungen (Möstl et al., 1999) statt, ob Cortisol auch im Kot von Tieren nachweisbar ist. Dazu wurden Versuche bei Haustieren mit radioaktiv markiertem Cortisol durchgeführt, die gezeigt haben, dass Cortisolmetaboliten (Stoffwechselprodukte des Cortisols) mit dem Kot ausgeschieden werden und durch ein Enzymimmunoassay messbar sind.

Die Messung der Herzfrequenzvariabilität erfolgte in den späten Abendstunden während der Liegephasen der Pferde. Pro Pferd und Variante wurden insgesamt zehn Messungen über jeweils zwei bis drei Stunden mit Herzfrequenzmessgeräten der Firma Polar (Typ Polar Equine S810) durchgeführt. Anhand der Videoaufzeichnungen wurden die Zeiten herausgefiltert, in denen sich ein Pferd jeweils in Bauchlage befand, um den Einfluss von Störfaktoren weitestgehend gering zu halten und einheitliche Versuchsbedingungen zu realisieren. Anschließend wurde pro Messung ein 5-Minuten-Intervall der Liegezeit zur genaueren

Analyse bestimmt und mit der Software HRV Analysis, Version 1.1 hinsichtlich der stressrelevanten Frequenzbereiche untersucht und die Herzfrequenzvariabilität bestimmt.

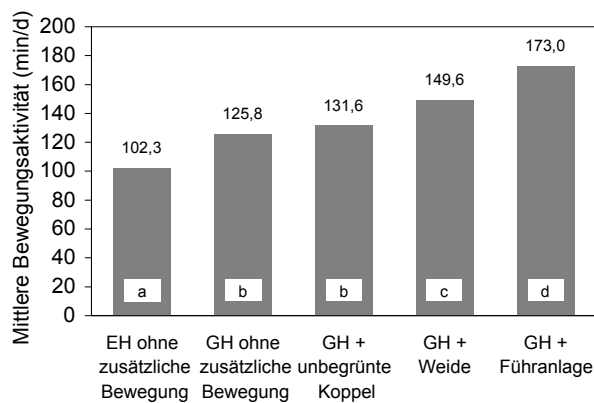
Zur Beurteilung der Haltungssysteme wurde der Parameter SD2 (Poincaré Plot) der HRV gewählt, da es sich um einen Parameter handelt, der auf Veränderungen von längerfristigen Belastungssituationen reagiert und bei zunehmender Stressbelastung ansteigt (Hottenrott, 2001).

Zur Bestimmung der Cortisolmetaboliten wurden pro Pferd und Variante vier Kotproben gesammelt und im Labor analysiert. Zur quantitativen Bestimmung dieser Ausscheidungsprodukte wurde ein Enzymimmunoassay (11-Oxoätiöcholanolon-EIA) verwendet, mit dem 11,17-Dioxoandrostane nachgewiesen werden können. 11,17-Dioxoandrostane sind eine Gruppe von Metaboliten, die während der Stoffwechselvorgänge im Körper nach Abspaltung der Seitenkette aus Cortisol entstehen.

Die Auswertung der Messdaten erfolgte mit dem Statistik-Programm SPSS für Windows, Version 15.0.1 (Firma SPSS Inc., Chicago, USA). Die Daten wurden mit dem Lilliefors-Test hinsichtlich ihrer Normalverteilung geprüft. Die SD2-Werte der Herzfrequenzvariabilität wurden ebenso wie die Daten zur Bewegungsaktivität mithilfe einer einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) mit dem Faktor „Versuchsvariante“ ausgewertet und mittels Scheffé-Test auf signifikante Unterschiede zwischen den Varianten getestet.

## Ergebnisse

Die gewonnenen Daten der Bewegungsaktivität und der Parameter SD2 (HRV) zeigten eine Normalverteilung. Die Auswertung der Bewegungsaktivität (Abbildung 2) ergab, dass die Bewegung pro Pferd und Tag über alle Versuchsvarianten hinweg in einem Bereich zwischen 62 und 248 Minuten lag. In der Einzel-Auslaufhaltung (ohne zusätzliche Bewegung) lag die Aktivität mit durchschnittlich 102 Minuten Bewegung pro Tag am niedrigsten. Eine signifikante Steigerung der Bewegungsdauer wurde bereits durch die Gruppenhaltungsvariante ohne zusätzliches Bewegungsangebot (126 min/d) erzielt. Die zusätzliche Bewegung auf einer unbegrünten Koppel führte nur zu einem leichten Anstieg der Bewegungszeit auf 132 Minuten pro Tag. Ein zusätzliches Bewegungsangebot in Form von zweistündigem Weideaufenthalt ergab hingegen eine durchschnittliche Bewegungsaktivität von 150 Minuten pro Tag und durch die einstündige Bewegung in einer Fütteranlage konnte die durchschnittliche Bewegungszeit pro Pferd und Tag auf 173 Minuten gesteigert werden. Im Vergleich zur Gruppenhaltung ohne zusätzliche Bewegung brachte der Auslauf auf der Weide oder die Bewegung durch eine Fütteranlage einen signifikanten Anstieg der Bewegungsaktivität.



Ungleiche Indices kennzeichnen signifikante Unterschiede,  $p < 0,05$

Abbildung 2:

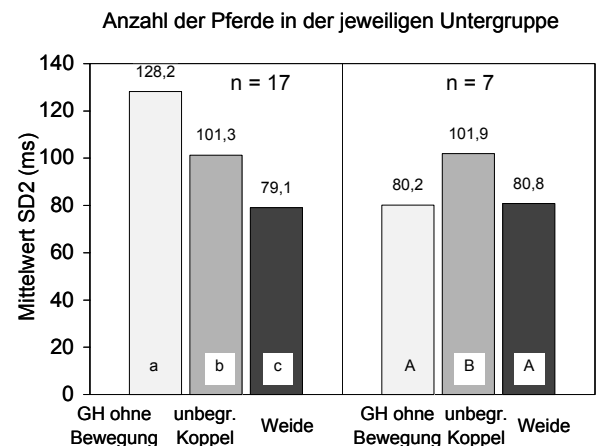
Durchschnittliche Bewegungsaktivität der Pferde in der Einzel- (EH) und der Gruppen-Auslaufhaltung (GH) bei unterschiedlichen Bewegungsangeboten

Im Anschluss an die Versuche zu dem Einfluss der Bewegungsangebote fand noch ein zusätzlicher Versuch in der Gruppenhaltung statt, um den Einfluss der angrenzenden Auslaufläche auf die Bewegungsaktivität zu ermitteln. Dazu wurde die Auslaufläche, die den Pferden stets zur freien Verfügung stand, auf eine Größe von 540 m<sup>2</sup> verdoppelt. Dieser Versuch fand über drei Wochen mit sechs Pferden statt, die keine zusätzliche Bewegung außerhalb des Stalles erhielten. Diese Pferde wurden auch bei den vorhergehenden Versuchen bereits gemeinsam in einer Gruppe gehalten, so dass man als Vergleichswerte die Ergebnisse der früheren Untersuchungen verwenden konnte.

Die mit den Pedometern ermittelte Dauer der Bewegung betrug bei doppelter Auslaufläche durchschnittlich 116 Minuten pro Tag. Diese Zeit lag nur drei Minuten über der durchschnittlichen Bewegungszeit dieser sechs Pferde in der Gruppen-Auslaufhaltung ohne zusätzliche Bewegung und der 270 m<sup>2</sup> großen Auslaufläche.

Hinsichtlich der Stressbelastung der Pferde hat die Auswertung der Herzfrequenzvariabilität (HRV) gezeigt, dass sich die 24 Versuchspferde zwei verschiedenen Ergebnismustern zuordnen lassen (Abbildung 3). Bei 71 % der Pferde ( $n = 17$ ) war die Stressbelastung in der Gruppenhaltung ohne Bewegungsangebot größer als in der Variante mit unbegrünter Koppel und am geringsten bei der Variante mit Bewegung auf einer Weide. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten sind in dieser Untergruppe jeweils signifikant ( $p < 0,05$ ).

Bei den übrigen Pferden (29 %,  $n = 7$ ) war die Stressbelastung in der Variante der Gruppenhaltung mit Bewegung auf unbegrünter Koppel signifikant ( $p < 0,05$ ) größer als in den Varianten ohne Bewegungsangebot und mit Bewegung auf der Weide, die sich beide nicht voneinander unterschieden (vgl. Abbildung 3).



Ungleiche Indices kennzeichnen signifikante Unterschiede in der jeweiligen Untergruppe,  $p < 0,05$

Abbildung 3:

SD2-Mittelwertvergleich zweier Untergruppen in den Varianten der Gruppenhaltung ohne Zusatzbewegung und mit Bewegung auf einer unbegrünten Koppel oder einer Weide

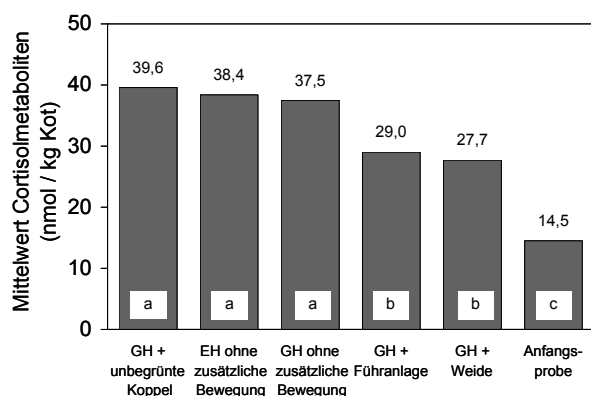
Beim Vergleich der Varianten Einzel- und Gruppen-Auslaufhaltung jeweils ohne zusätzliches Bewegungsangebot zeigte der Großteil der Pferde (70 %) eine höhere Stressbelastung in der Einzelhaltung als in der Gruppenhaltung, bei 30 % der Pferde war es genau umgekehrt. Innerhalb dieser 30 %, die in der Gruppenhaltung gestresster reagierten, befanden sich fünf Tiere, die zu den rangniederen zählen, aber auch zwei der ranghohen Pferde.

Ähnlich verhielt es sich bei der Betrachtung der beiden zusätzlichen Bewegungsangebote Weide und Führlanlage. Im Vergleich zu den übrigen Versuchsvarianten hatten die Pferde bei diesen beiden Möglichkeiten der Zusatzbewegung die geringste Stressbelastung. 79 % der Pferde zeigten bei der Auswertung der Herzfrequenzvariabilität (SD2-Parameter) eine größere Abnahme der Stressbelastung während der Weide-Variante im Vergleich zur Führlanlage.

Mit 78,5 ms (Weide-Variante) und 109,4 ms (Führlanlage) unterschieden sich die SD2-Werte dieser Varianten signifikant ( $p < 0,001$ ) voneinander. Im Gegensatz dazu zeigten die anderen 21 % der Pferde (fünf Tiere) eine signifikant ( $p = 0,031$ ) geringere psychische Belastung bei der Variante mit Bewegung in der Führlanlage ( $SD2 = 80,7$  ms) als bei der Weide-Variante ( $SD2 = 103,0$  ms).

Zur Auswertung der Cortisolmetaboliten-Konzentration wurde bei jedem Pferd schon eine Kotprobe am Ankunfts-tag der Pferde im Versuchsstall genommen. Die gemessene Konzentration dieser Proben spiegelt jeweils die Cortisolproduktion des Vortages wider, da zwischen der Sekretion der Cortisolmetaboliten von der Nebennierenrinde über die Galle in den Darm bis zum entsprechenden Kotabsatz beim Pferd ungefähr ein Tag vergeht. Die Werte entspre-

chen somit der Stressbelastung im Herkunftsbetrieb. Die Pferde wurden dort gemeinsam auf einer Weide oder in einem Einraum-Laufstall mit mehrstündigem Koppelgang gehalten, wobei sie nur sehr eingeschränkten Kontakt zu Menschen hatten und weitgehend sich selbst überlassen waren. Die bei allen 24 Stuten festgestellte geringe Konzentration an Cortisolmetaboliten in den Anfangsproben (Ankunftstag) ist Ausdruck einer vergleichsweise geringen Stressbelastung im Herkunftsbetrieb (Abbildung 4).



Ungleiche Indices kennzeichnen signifikante Unterschiede,  $p < 0,05$

Abbildung 4:

Mittelwertvergleich der Cortisolmetaboliten in der Anfangsprobe und während der Einzel- (EH) und der Gruppen-Auslaufhaltung (GH) bei unterschiedlichen Bewegungsangeboten

Die größte durchschnittliche Stressbelastung hatten die Pferde demnach in der Variante der Gruppenhaltung mit Bewegung auf einer unbegrünten Koppel, sowie während der Einzel- und Gruppen-Auslaufhaltung ohne zusätzliches Bewegungsangebot. Die zusätzliche Bewegung in einer Führanlage oder auf einer Weide war hingegen durch eine signifikant geringere Stressbelastung ( $p < 0,03$ ) im Vergleich zu den drei übrigen Versuchsvarianten gekennzeichnet. Zudem bestand ein signifikanter Unterschied zwischen dem geringeren Mittelwert der Anfangsprobe und allen übrigen Versuchsvarianten ( $p < 0,001$ ).

Die Ergebnisse zur Cortisolmetaboliten-Konzentration befinden sich in relativ guter Übereinstimmung zu den Ergebnissen der Herzfrequenzvariabilität (HRV). Sie bestätigen, dass sich die untersuchten Haltungsvarianten unterschiedlich auf die Stressbelastung einzelner Tiere auswirkt haben.

## Schlussfolgerungen

Insgesamt haben sich die Pferde in der Gruppen-Auslaufhaltung mehr bewegt als in der Einzel-Auslaufhaltung, aber mit einer maximalen Bewegungsdauer von 248 Minuten pro Tag war der tägliche Anteil an Bewegung sehr viel geringer als beispielsweise bei Pferden, die sich unter

naturnahen Bedingungen bis zu 16 Stunden täglich bewegen (Piotrowski und Kreimeier, 1998). Um eine Steigerung der Bewegungsaktivität zu erlangen, ist es notwendig, den Pferden einen weiteren Anreiz zur Bewegung zu bieten. Die Haltung von Pferden in Mehrraum-Gruppenauslaufhaltungen bietet zwar eine gewisse Anregung zur Bewegung, ist aber mit dem natürlichen Bewegungsverhalten von Pferden nicht vergleichbar und deckt nicht ihren täglichen Bewegungsbedarf, wenn keine zusätzliche Bewegung angeboten wird.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung haben gezeigt, dass zusätzliche Bewegungsangebote in Form von unbegrünter Koppel, Weide und Führanlage die tägliche Bewegungsdauer in einer Mehrraum-Gruppen-Auslaufhaltung im Vergleich zu derselben Haltung ohne zusätzliches Bewegungsangebot um 5 bis 38 % steigern können. Hingegen hatte eine Vergrößerung des an den Stall angrenzenden Sandauslaufs keinen Effekt auf das Bewegungsverhalten der Pferde.

Hinsichtlich der Stressbelastung gab es unterschiedliche Einflüsse der zusätzlichen Bewegung, da auch die Rangordnung einen Einfluss auf das Wohlbefinden der Pferde hat. So hat bei den meisten Pferden die Haltung in einer Mehrraum-Auslaufhaltung im Vergleich zu einer Einzel-Auslaufhaltung die Stressbelastung verringert, jedoch haben 30 % der Pferde in der Gruppenhaltung mit einer zunehmenden Stressbelastung reagiert. Insgesamt hat aber während der Versuche in der Gruppenhaltung eine zusätzliche Bewegung in Form von Weideauslauf oder Führanlage bei allen Pferden zu einer Abnahme der Stressbelastung geführt.

Die Untersuchung hat außerdem gezeigt, dass die Stressbelastung der Pferde während der einzelnen Versuchphasen höher war als zuvor in ihrem Herkunftsbetrieb. Die Pferde hielten sich dort viel im Freien auf mit relativ wenig Kontakt zu Menschen. Somit scheint eine möglichst naturnahe Haltung von Pferden in einer Gruppe einen positiven Einfluss auf ihr Wohlbefinden zu haben.

## Danksagung

Ein besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Werner Berg (Leiter der Abteilung Technik in der Tierhaltung, Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim) für die kritische Durchsicht des Manuskriptes.

## Literatur

- Bachmann I (1998) Das natürliche Verhalten der Pferde. In: Pferde in der Steppe und im Stall. Zürich : Zool. Museum der Univ, pp 41-49
- Bockisch F-J, Kreimeier P, Hoffmann G, Hohmann T, Bohnet W, Brehme U (2007) Building and process technology requirements in horse husbandry systems : current investigations and developments furthering animal welfare and environmental protection. EAAP publication 122:139-152

- Broom DM (1991) Assessing welfare and suffering. *Behav Processes* 25(2-3):117-123
- Butler I, Armbruster B (1984) Struktur und Abgangsursachen bei Schlachtpferden. *Dtsch tierärztl Wochenschr* 91:330-331
- Frentzen F (1994) Bewegungsaktivitäten und -verhalten von Pferden in Abhängigkeit von Aufstallungsform und Fütterungsrhythmus unter besonderer Berücksichtigung unterschiedlich gestalteter Auslaufsysteme. 183 p, Hannover, Tierärztliche Hochschule, Diss, 1994
- Hoffmann G (2008) Bewegungsaktivität und Stressbelastung bei Pferden in Auslaufhaltungssystemen mit verschiedenen Bewegungsangeboten. Gießen : DVG, 208 p [Dissertation]
- Hoffmann G, Bockisch F-J, Kreimeier P (2007) Messmethoden zur Beurteilung der Haltungsqualität : ist Wohlbefinden und Stress bei Pferden messbar? *Landtechnik* 62(6):406-407
- Hottenrott K (2001) Grundlagen zur Herzfrequenzvariabilität und Anwendungsmöglichkeiten im Sport. In: Hottenrott K (ed) *Herzfrequenzvariabilität im Sport : Prävention-Rehabilitation-Training*. Marburg : Czwalina Verl, pp 9-25
- Kiley-Worthington M (1990) The behavior of horses in relation to management and training - towards ethologically sound environments. *J Equine Vet Sci* 10(1):62-71
- Manteuffel G, Puppe B (1997) Ist die Beurteilung der subjektiven Befindlichkeit von Tieren möglich? : Eine kritische Analyse aus naturwissenschaftlicher Sicht. *Arch Tierzucht* 40(2):109-121
- Mills DS, Taylor KD, Cooper JJ (2005) Weaving, headshaking, cribbing and other stereotypies. In: Brokken TD (ed) *Proceedings of the 51st Annual Convention of the American Association of Equine Practitioners*, Seattle, Washington, USA. 3-7 December, 2005
- Möstl E, Messmann S, Bagu E, Robia C, Palme R (1999) Measurement of glucocorticoid metabolite concentrations in faeces of domestic livestock. *J Vet Med A* 46:621-631
- Piotrowski J (1989) Tiergerechte Pferdehaltung : Mehrraum-Pferdeauslaufhaltung mit individueller Vorratsfütterung ; aktuelle Arbeiten zur artgemässen Tierhaltung 1988. *KTBL-Schrift* 336:150-162
- Piotrowski J, Kreimeier P (1998) Pferde-Auslaufhaltung. *Bauen Landwirtsch* 35(1):8-12
- Rodewald A (1989) Fehler bei der Haltung und Nutzung als Schadensursache bei Pferden in Reitbetrieben. München, Univ, Diss, 1989, 106 p
- Sommer H, Veltjens C, Felbinger U (1988) Die häufigsten Erkrankungen bei deutschen Warmblutpferden. *Tierärztl Umsch* 43:546-550
- Souris AC, Kaczensky P, Julliard R, Walzer C (2007) Time budget-, behavioral synchrony- and body score development of a newly released Przewalski's horse group *Equus ferus przewalskii*, in the great Gobi B strictly protected area in SW Mongolia. *Appl Anim Behav Sci* 107(3-4):307-321
- Zeitler-Feicht MH (2008) Pferdeverhalten, In: Pirkelmann H, Ahlswede L, Zeitler-Feicht MH (eds) *Pferdehaltung*. Stuttgart (Hohenheim) : Eugen Ulmer KG, pp 9-54



## Consistent time series of data to model volatile solids and nitrogen excretions of poultry

### 3b. Broilers. Modelling using official statistical data

Hans-Dieter Haenel\* and Ulrich Dämmgen\*\*

#### Summary

Calculation and reporting of emissions of greenhouse gasses and air pollutants from broiler breeding require the knowledge of the nitrogen and carbon excretions.

Emission reporting for ammonia requires an assessment of excretions with an adequate resolution in space and time. In principle, this is possible. However, in Germany, the data needed for this purpose are neither available on a regular basis nor complete.

The paper presented here provides an alternative method to derive the data required to construct time series of excretions using animal place numbers and the cumulative weight of slaughtered broilers as provided by official statistics, as well as feed properties (i.e. their contents of metabolizable energy and crude protein). The latter have to be estimated on the basis of feed and breeding line contests.

The calculation procedure developed allows for an assessment of national means of performance parameters and excretions. It takes into account the progress in animal breeding, i.e. a steady increase of slaughter weights even at constant fattening times.

The calculated excretions per place and year decreased in the middle of the 1990s; they have increased since 2001. This correlates with the time series of final animal weights.

*Keywords: broiler, VS excretion, N excretion*

#### Zusammenfassung

**Konsistente Zeitreihen von Daten zur Modellierung der Ausscheidungen von „volatile solids“ und Stickstoff bei Geflügel**

**3b. Masthähnchen und -hühnchen, Modellierung mit Daten der amtlichen Statistik**

Berechnung und Berichterstattung von Treibhausgas- und Schadstoffemissionen aus der Haltung von Masthähnchen und -hühnchen erfordern die Kenntnis der Stickstoff- und Kohlenstoff-Ausscheidungen.

Die für die Ammoniak-Emissionsberechnung wünschenswerte räumlich und zeitlich differenzierte Ausscheidungsrechnung ist im Prinzip zwar möglich; die benötigten Daten stehen in Deutschland jedoch weder regelmäßig noch vollständig zur Verfügung.

Die vorliegende Arbeit beschreibt einen alternativen Ansatz zur Berechnung von Zeitreihen der Ausscheidungen. Als Eingangsdaten werden lediglich die Tierplatzzahl und die jährliche Masthähnchen-Schlachtfleischmenge (beides aus der amtlichen Statistik) sowie effektive Futtereigenschaften (Gehalt an umsetzbarer Energie und Rohprotein) benötigt. Letztere werden auf Grundlage von Daten aus Futtermittel- und Herkunftsprüfungen geschätzt.

Das Verfahren erlaubt unter Verzicht auf räumliche und mastverfahrenbezogene Differenzierung die Ableitung nationaler Mittelwerte von Leistungsparametern und Ausscheidungen. Der züchterische Fortschritt, d. h. von Jahr zu Jahr steigendes Tierendgewicht bei gleicher Mastdauer, wird berücksichtigt.

Die berechneten Ausscheidungen pro Platz und Jahr nahmen Mitte der 1990er Jahre zeitweise ab, steigen seit 2001 aber wieder deutlich an. Dies korreliert mit dem zeitlichen Verlauf der Tierendgewichte.

*Schlüsselwörter: Masthähnchen, Masthühnchen, Broiler, VS-Ausscheidung, N-Ausscheidung*

\* Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI), Federal Research Institute for Rural Areas, Forestry and Fisheries, Institute of Agricultural Climate Research, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, Germany

\*\* University of Veterinary Medicine Hannover, Institute for Animal Breeding and Genetics, Buenteweg 17p, 30559 Hannover, Germany



## 1 Introduction

Agricultural animal production remarkably contributes to the emissions of greenhouse gasses (Steinfeld et al., 2006). In addition, the contribution to the emission of gaseous and particulate air pollutants is so important that this sector has to be included in any measures to reduce emissions (BMU, 2006; Dämmgen and Haenel, 2008). The development of reduction measures requires adequate knowledge and description of the emitting processes as well as an assessment of the frequency with which they occur. National emission inventories are to serve these objectives. They comply with the reporting obligations within the Framework Convention on Climate Change (UNFCCC, 1997) and the Geneva Protocol on Long Range Transport of Atmospheric Pollutants (UNECE, 2006). The annual reports describe not only the emissions themselves and the respective process models, but also the emission explaining variables, if possible, as a continuous time series from 1990 onwards.

For so-called key sources, emissions should be assessed with an adequate resolution in time and space. Poultry as a whole is considered a key source with respect to the amount of ammonia emitted. Ammonia has a comparatively short atmospheric lifetime. This again should be reflected by a high resolution of the emission calculations in time and space. In addition, broiler production in Germany has been increasing over time and therefore has to be regarded as a key source with respect to its trend.

The adequate assessment of the excretions of carbon and nitrogen compounds is a major prerequisite for the calculation of emissions from animal production (Webb et al., 2005). In the past, the emissions from German broiler production were reported using a comparatively simple method and national means reported in the literature (Dämmgen et al., 2007). This was due to lack of suitable data and calculation procedures.

The present paper, which is in line with earlier publications on pullets and laying hens (Haenel and Dämmgen, 2007a, 2007b), describes an improved method to assess excretions for the German broiler production including derivation procedures to obtain the time series of the relevant parameters, reflecting the information provided by both husbandry and animal nutrition.

In order to simplify notation, equations quoted from Haenel and Dämmgen (2009) are denoted by the abbreviation HD put in front of the original equation number.

## 1 Einleitung

Die landwirtschaftliche Tierproduktion ist zu einem nennenswerten Anteil an der Emission von Treibhausgasen beteiligt (Steinfeld et al., 2006), und trägt darüber hinaus in erheblichem Maße zur Emission von Luft verschmutzenden Stoffen bei. Der Einbezug der Landwirtschaft in Minderungsmaßnahmen ist daher unumgänglich (BMU, 2006; Dämmgen und Haenel, 2008). Voraussetzung für Minderungsmaßnahmen ist eine hinreichend gute Kenntnis und Beschreibung der emittierenden Prozesse und ihrer Häufigkeit. Diesen Zielen dient die Erstellung von nationalen Emissionsinventaren, die gleichzeitig die Erfüllung der internationalen Berichtspflichten im Rahmen der Klimarahmen-Konvention (UNFCCC, 1997) und des Genfer Luftreinhalteabkommens (UNECE, 2006) ermöglichen. Die jährlich zu erstellenden Berichte beschreiben neben den Emissionen auch die die Emissionen bestimmenden Variablen als möglichst lückenlose Zeitreihen ab 1990.

Für sogenannte Hauptquellgruppen sind die Emissionen mit einer angemessenen zeitlichen und räumlichen Auflösung zu bestimmen. Hinsichtlich der Höhe der Emissionen von Ammoniak ist Geflügel insgesamt eine Hauptquellgruppe. Bei Ammoniak spricht insbesondere die geringe atmosphärische Verweildauer für die feine Auflösung von Emissionsberechnungen. In der Geflügelhaltung in Deutschland stellt die Produktion von Masthähnchen und -hühnchen (Broiler) eine Emissionsquelle mit zunehmender Tendenz dar.

Die adäquate Quantifizierung der Ausscheidungen von Kohlenstoff- und Stickstoff-Verbindungen ist eine wichtige Voraussetzung für die Berechnung von Emissionen aus der Nutztierhaltung (Webb et al., 2005). Bisher wurden mangels geeigneter Datensätze und Rechenverfahren die Emissionen aus der Masthähnchen-Produktion nur mit nationalen Mittelwerten (Literaturdaten) nach einem vergleichsweise einfachen Verfahren gerechnet (Dämmgen et al., 2007).

Die vorliegende Arbeit, der entsprechende Publikationen zu Junghennen und Legehennen vorausgingen (Haenel und Dämmgen, 2007a, 2007b), beschreibt ein verbessertes Verfahren zur Berechnung der Ausscheidungen bei Masthähnchen und -hühnchen in Deutschland einschließlich der Zeitreihen der relevanten Parameter. Die Grundlagen für dieses Verfahren wurden in einer vorausgegangenen Arbeit (Haenel und Dämmgen, 2009) erstellt.

Zur Vereinfachung der Schreibweise werden Gleichungen aus Haenel und Dämmgen (2009) zitiert, indem der Gleichungsnummer das Kürzel HD vorangestellt wird.

## 2 Calculation of a mean fattening duration based on data from official statistics

The application of the set of equations derived in Haenel and Dämmgen (2009) presupposes an extensive and detailed data base. The following sections give an survey of data available from the German official statistics and discuss how to proceed in case of lacking data in order to permit the construction of time series of the excretion data relevant for emission calculations as well as of other emission explaining variables (such as energy requirements and feed intake).

### 2.1 Data availability

German official statistics do not report animal numbers for broilers. Instead they provide cumulative animal numbers for "male and female chicken for slaughtering including the chicks in this production process" (destatis, FS3 R4.2.1). The error originating from the use of these data to describe the broiler population cannot be quantified. However, it is considered small in comparison with the overall number, as the number of broilers outweighs all other relevant subcategories. Another potential problem is the fact that animal numbers from 2005 onwards are not based on a total census but on sample surveys. ZMP (2006, pg. 57) states that these are only partly comparable to the previous total census data. The differences originating from this change in methods cannot be quantified; at present they cannot be taken into account.

The relative fractions of hens and cocks are not reported. It is common practice to assume a one to one ratio of cocks and hens in any production process apart from the long term fattening procedure. Here, cocks and hens are separated (Table 1). This is relevant for the assessment of the ME requirements. However, N excretion rates as calculated using Equation (HD29) are independent of gender distributions.

The frequency distributions of the various fattening procedures and their variation with time and space have not been reported. This applies also to the number of animal rounds per year or the duration of the respective fattening periods and to the service times. The share of the various breeds and lines in the number of animals produced is unknown (or not reported). Thus, a differentiated treatment of fattening procedures or single races is impossible.

These problems can be resolved by using the fact that the final weights obtained are an almost linear function of the duration of the fattening process, cf. Equation (HD11). In addition, Equation (HD3) allows the expression of the duration of the service period as a function of the duration of the fattening period. As a consequence, a procedure to deduce the duration of the fattening period is given in

## 2 Berechnung einer mittleren Mastdauer mit Hilfe amtlicher Statistikdaten

Der in Haenel and Dämmgen (2009) abgeleitete Gleichungssatz erfordert eine umfangreiche und detaillierte Datenbasis. Im Folgenden wird beschrieben, welche Daten durch die deutsche amtliche Statistik bereitgestellt werden, und wie im Falle von fehlenden Daten zu verfahren sein wird, um dennoch die Erstellung von Zeitreihen der emissionsrelevanten Ausscheidungen einschließlich der damit verbundenen emissionserklärenden Größen wie z. B. Energiebedarf und Futteraufnahme zu ermöglichen.

### 2.1 Datenverfügbarkeit

Offizielle Tierplatzzahlen für Broiler sind nicht erhältlich. Es sind nur zusammengefasste Tierplatzzahlen für die Kategorie „Schlacht- und Masthähne und -hühner sowie sonstige Hähne einschließlich der hierfür bestimmten Küken“ verfügbar (destatis, FS3 R4.2.1). Der Fehler, der mit der Verwendung dieser Tierplatzzahlen anstelle von Broiler-mastplätzen verbunden ist, ist nicht quantifizierbar, dürfte aber sehr gering sein, da der Anteil der Masthähnchen und -hühnchen bei weitem überwiegt. Ein mögliches weiteres Problem entsteht dadurch, dass ab 2005 nur noch eine repräsentative Geflügelzahlen-Erhebung erfolgt, die nach ZMP (2006, S. 57) nur bedingt vergleichbar mit vorherigen Vollerhebungen ist. Die Unterschiede zwischen beiden Erhebungsverfahren können derzeit nicht geschätzt werden und müssen daher vorläufig unberücksichtigt bleiben.

Angaben über die relativen Tierplatzanteile von Hähnen und Hennen werden nicht erhoben. In der Praxis wird aber offenbar mit Ausnahme der nach Geschlechtern getrennt erfolgenden Langzeitmast (Tabelle 1) immer von einem 1:1-Verhältnis ausgegangen. Dies berührt die geschlechtsabhängig erforderliche Berechnung des ME-Bedarfes (während der N-Haushalt mit Hilfe von Gleichung (HD29) geschlechtsunabhängig berechnet wird).

Es gibt keine zeitlich und räumlich aufgelösten Angaben zu relativen Anteilen der einzelnen Mastverfahren an der Gesamtproduktion. Auch Durchgangszahlen bzw. Mastdauern und Reinigungszeiten werden statistisch nicht erhoben. Des Weiteren ist nicht bekannt (oder wird nicht berichtet), welche Broilerrassen wo zu welchen relativen Anteilen eingesetzt werden. Damit ist keine Differenzierung nach Mastverfahren und Broilerrassen möglich.

Eine Lösung dieses Problems kann darauf aufbauen, dass das erreichte Endgewicht eine hinreichend lineare Funktion der Mastdauer ist, vgl. Gleichung (HD11). Die Reinigungsdauer kann ebenfalls als Funktion der Mastdauer formuliert werden, s. Gleichung (HD3). Hieraus wird in Abschnitt 2.2 ein Ansatz zur Berechnung der Mastdauer aus Schlachtmengen-Daten entwickelt. Die Gesamtschlacht-

Section 2.2. In this case, the cumulative carcass weights for the animals slaughtered in Germany are needed, which are obtained from the carcass weight total and the respective imports and exports reported. These data are derived from ZMP (1990 to 2006), as destatis reports net cumulative slaughter weights only. The slaughter yield used is parameterized using Equation (HD30).

Official statistics do not report any data on feed amounts and feed properties (such as ME and XP contents). For these data, one has to rely on the data provided in breeding line and feed contests. Here, the data are not based on analyses but on the contents declared by the producers. These contents may deviate to some extent from the true contents. In the context of our investigation we use the feed compositions declared. The resulting error cannot be quantified. Again, no differentiation can be made with respect to time and space. Due to the lack of matching data this would not be useful anyhow. In addition, detailed data on the frequency distribution of fattening procedures are not available. Thus, a detailed description of N excretion rates cannot be derived, and we have to restrict ourselves to the use of the gender-independent N excretion assessment as provided in Equation (HD29), using the composition of the fattening feed as the effective feed composition.

## 2.2 Mean duration of the fattening period

Starting point for the calculation of N excretion rates using official statistical data is the relation between the mean final weights achieved per place and year, the total live weight production per year and the number of animal rounds per year (see Section 2 in Haenel and Dämmgen, 2009).

$$w_{br, kfin} - w_{start} + \Delta w_{br, kfin} = \frac{TWP}{n_{round}} \quad (1)$$

where

|                       |                                                                                                                                      |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $w_{br, kfin}$        | average final live weight of broilers (in kg animal <sup>-1</sup> )                                                                  |
| $w_{start}$           | animal start weight (in kg animal <sup>-1</sup> )                                                                                    |
| $\Delta w_{br, kfin}$ | average animal weight gain per place and fattening period (in kg animal <sup>-1</sup> = kg place <sup>-1</sup> round <sup>-1</sup> ) |
| $TWP$                 | total weight production per place and year (in kg place <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )                                              |
| $n_{round}$           | number of rounds per year (in animal place <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> )                                                           |

The overall weight gain  $\Delta w_{br, kfin}$  is given by Equations (HD8) and (HD10) or (HD11) as a function of the share of cocks in the total population. Here again, a cock to hen ratio of 1 to 1 is used. In order to enable us to find a mathematically closed derivation of the duration of the fattening period, the linearized growth function (HD11) is used.

fleischmenge wird dabei als Brutto-Menge benötigt, d. h. heimische Produktion vor Abzug (Zuschlag) von Exporten (Importen). Diese Schlachtdaten werden aus den ZMP-Berichten (ZMP, 1990 bis 2006) bezogen, da das Statistische Bundesamt nur Netto-Mengen berichtet. Der Schlachtausbeutefaktor wird nach Gleichung (HD30) parameterisiert.

Amtliche Statistiken enthalten keine Angaben zu Fütterung und Futtereigenschaften. ME- und XP-Gehalte müssen daher Herkunfts- und Futtermittelprüfungen entnommen werden. Dies sind oftmals nicht analysierte, sondern durch die Hersteller deklarierte Futtereigenschaften, die von den tatsächlichen Futtereigenschaften in gewissem Rahmen abweichen können. Der damit verbundene Fehler ist nicht quantifizierbar. Eine räumliche Differenzierung der Futtereigenschaften ist nicht möglich. Sie wäre in Anbetracht der übrigen Datenlage auch nicht nutzbar. Da mangels Informationen über die relativen Anteile von Mastverfahren an der Gesamtproduktion sowie über die Mastverfahren-Details keine detaillierte Berechnung der N-Ausscheidungen möglich ist, muss die geschlechtsübergreifende N-Ausscheidungsgleichung (HD29) genutzt werden. Voraussetzung ist der Ersatz der dafür erforderlichen effektiven Futtereigenschaften durch Mastfuttereigenschaften.

## 2.2 Mittlere Mastdauer

Ausgangspunkt für die Berechnung der N-Ausscheidung auf Basis amtlicher statistischer Daten ist die Relation zwischen dem im Mittel pro Platz und Durchgang erzielten Lebendendgewicht, der Gesamtgewichtproduktion pro Platz und Jahr und der Anzahl der Mastdurchgänge pro Jahr (s. Abschnitt 2 in Haenel und Dämmgen, 2009):

Der Gesamtzuwachs  $\Delta w_{br, kfin}$  ist über die Gleichungen (HD8) sowie (HD10) oder (HD11) als Funktion des Anteils der Hähne an der Population gegeben. Es wird von einem Hähne-Anteil von 50 % ausgegangen. Zur Ableitung einer mathematisch geschlossenen Mastdauer-Formel wird von der linearisierten Wachstumsfunktion (HD11) Gebrauch gemacht.

$TWP$  is deduced from the annual cumulative carcass weight (i.e. the German broiler production before correction due to imports and exports) using the number of animal places reported and slaughter weights as described with Equation (HD30).

$$TWP = \frac{\Sigma w_{\text{carcass}}}{c_{w, br} \cdot n_{br}} \cdot \beta \quad (2)$$

where

|                             |                                                                                       |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| $TWP$                       | total weight produced per place and year (in kg place <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> ) |
| $\Sigma w_{\text{carcass}}$ | overall mass of broilers slaughtered (carcass weight) (in Mg a <sup>-1</sup> )        |
| $c_{w, br}$                 | ratio of carcass weight to final live weight (in kg kg <sup>-1</sup> )                |
| $n_{br}$                    | number of broiler breeding places                                                     |
| $\beta$                     | mass conversion factor ( $\beta = 10^3$ kg Mg <sup>-1</sup> )                         |

Equation (2) is used to replace  $TWP$  in (1).  $c_w$  is expressed using (HD30), and the number of rounds,  $n_{\text{round}}$ , by a combination of (HD1), (HD2) and (HD3) described as a function of the number of days of the fattening period,  $k_{\text{fin}}$ . Finally, in the modified Equation (1)  $w_{br, k_{\text{fin}}}$  has to be replaced by  $k_{\text{fin}}$  using Equations (HD8) and (HD11). Thus, for a cock to hen ratio of 1, a third order equation for  $k_{\text{fin}}$  can be derived which only requires the knowledge of the cumulative carcass weight per place and year ( $\Sigma w_{\text{carcass}} \cdot n_{br}^{-1}$ ) and the weight gain factor  $r_g$  as input variables:

$$k_{\text{fin}}^3 + \Theta \cdot k_{\text{fin}}^2 + \Omega \cdot k_{\text{fin}} + \Psi = 0 \quad (3)$$

where

$k_{\text{fin}}$  dimension-less duration of fattening period, cf. Equation (HD1)

and

$$\Theta = d_s^{-1} \cdot \left[ c_s - \frac{\alpha \cdot r_g^2 \cdot b_c \cdot (b_{g, \text{male}} + b_{g, \text{female}})^2}{4 \cdot (\Sigma w_{\text{carcass}} \cdot n_{br}^{-1})} \right] \quad (3a)$$

$$\Omega = d_s^{-1} \cdot \left[ \frac{\alpha \cdot r_g \cdot (a_c + 2 \cdot b_c \cdot u) \cdot (b_{g, \text{male}} + b_{g, \text{female}})}{2 \cdot (\Sigma w_{\text{carcass}} \cdot n_{br}^{-1})} \right] \quad (3b)$$

$$\Psi = d_s^{-1} \cdot \left[ \frac{\alpha \cdot (a_c \cdot u + b_c \cdot u^2)}{\Sigma w_{\text{carcass}} \cdot n_{br}^{-1}} \right] \quad (3c)$$

$$u = w_{\text{start}} + 0.5 \cdot r_g \cdot (a_{g, \text{male}} + a_{g, \text{female}}) \quad (3d)$$

$TWP$  wird mit Hilfe von Tierplatzzahl und Schlachtausbeutefaktor (s. Gleichung (HD30)) aus der jährlichen Brutto-Gesamtschlachtfleischmenge, d. h. der deutschen Hähnchenfleischproduktion vor Anrechnung von Im- und Exporten, abgeleitet:

Mit Hilfe von (2) wird  $TWP$  in (1) ersetzt, wobei  $c_w$  mit Hilfe von (HD30) auszudrücken und die Durchgangszahl  $n_{\text{round}}$  durch Kombination von (HD1), (HD2) und (HD3) als Funktion der Mastdauer-Maßzahl  $k_{\text{fin}}$  darzustellen ist. In der so modifizierten Gleichung (1) ist schließlich noch  $w_{br, k_{\text{fin}}}$  mit Hilfe von (HD8) und (HD11) durch  $k_{\text{fin}}$  zu ersetzen. Bei gleichen Anteilen von Hähnen und Hennen ergibt sich eine kubische Gleichung für  $k_{\text{fin}}$ , die nur die Schlachtfleischmenge pro Platz und Jahr ( $\Sigma w_{\text{carcass}} \cdot n_{br}^{-1}$ ) und den Zuwachsfaktor  $r_g$  als Eingabegrößen benötigt:

with

|                             |                                                                                   |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| $r_g$                       | growth relative to reference (in kg kg <sup>-1</sup> )                            |
| $\Sigma w_{\text{carcass}}$ | overall mass of broilers slaughtered (carcass weights) (in Mg a <sup>-1</sup> )   |
| $n_{\text{br}}$             | number of broiler breeding places                                                 |
| $w_{\text{start}}$          | animal start weight (in kg animal <sup>-1</sup> )                                 |
| $\alpha$                    | time unit conversion factor ( $\alpha = 365 \text{ d a}^{-1}$ )                   |
| $a_c$                       | constant ( $a_c = 0.617494 \text{ kg animal}^{-1}$ )                              |
| $b_c$                       | constant ( $b_c = 0.039585 \text{ kg kg}^{-1}$ )                                  |
| $a_{g, \text{male}}$        | constant ( $a_{g, \text{male}} = -1010.7 \cdot 10^{-3} \text{ kg animal}^{-1}$ )  |
| $a_{g, \text{female}}$      | constant ( $a_{g, \text{female}} = -645.3 \cdot 10^{-3} \text{ kg animal}^{-1}$ ) |
| $b_{g, \text{male}}$        | constant ( $b_{g, \text{male}} = 78.343 \cdot 10^{-3} \text{ kg animal}^{-1}$ )   |
| $b_{g, \text{female}}$      | constant ( $b_{g, \text{female}} = 61.586 \cdot 10^{-3} \text{ kg animal}^{-1}$ ) |
| $a_s$                       | constant ( $a_s = -60.914475 \text{ d round}^{-1}$ )                              |
| $b_s$                       | constant ( $b_s = 4.2491700 \text{ d round}^{-1}$ )                               |
| $c_s$                       | constant ( $c_s = -0.0764686 \text{ d round}^{-1}$ )                              |
| $d_s$                       | constant ( $d_s = 0.000458 \text{ d round}^{-1}$ )                                |

Equation (3) can be solved analytically (see e.g. Bartsch, 1974):

Die mathematisch geschlossene Lösung von Gleichung (3) lautet (siehe z. B. Bartsch, 1974):

$$k_{\text{fin}} = \left[ \cos\left(\frac{\varphi + \pi}{3}\right) \right] \cdot \left(\frac{|p|}{3}\right)^{1/2} - \frac{\theta}{3} \quad (4)$$

where

|                  |                                                                 |
|------------------|-----------------------------------------------------------------|
| $k_{\text{fin}}$ | dimension-less duration of fattening period, cf. Equation (HD1) |
| $\pi$            | 3.14159265358979...                                             |

and

$$\varphi = \arccos\left[\left(\frac{q}{2}\right) \cdot \left(\frac{|p|}{3}\right)^{-3/2}\right] \quad (4a)$$

$$p = \Omega - \frac{\theta^2}{3} \quad (4b)$$

$$q = \frac{2}{27} \theta^3 - \frac{1}{3} \theta \cdot \Omega + \psi \quad (4c)$$

In contrast to Equation (HD1),  $k_{\text{fin}}$  in Equation (4) is no longer an integer as these equation describes a mean duration of the fattening period. Figure 1 illustrates the life-spans  $\tau_{\text{lifespan}} = k_{\text{fin}} \cdot \tau_{\text{day}}$  (see Equation (HD1)).

The duration of the fattening period can then be used to calculate the mean ME requirements for cocks and hens as well as the mean N excretion according to Haenel and Dämmgen (2009). The emission explaining variables to be calculated in addition are the duration of the service period and the slaughter yield.

Da mit Gleichung (4) eine mittlere Mastdauer ermittelt wird, ist  $k_{\text{fin}}$  im Gegensatz zu Gleichung (HD1) im Allgemeinen keine ganze Zahl. Abbildung 1 zeigt die mit Hilfe von (4) berechnete Mastdauer  $\tau_{\text{lifespan}} = k_{\text{fin}} \cdot \tau_{\text{day}}$  (vgl. Gleichung (HD1)).

Mit Hilfe der so berechneten Mastdauer kann der über Hähne und Hennen gemittelte ME-Bedarf sowie die mittlere N-Ausscheidung nach Haenel und Dämmgen (2009) berechnet werden. Als Emissionen erklärende Größen sind die mittlere Service-Dauer und Schlachtausbeute zu berechnen.

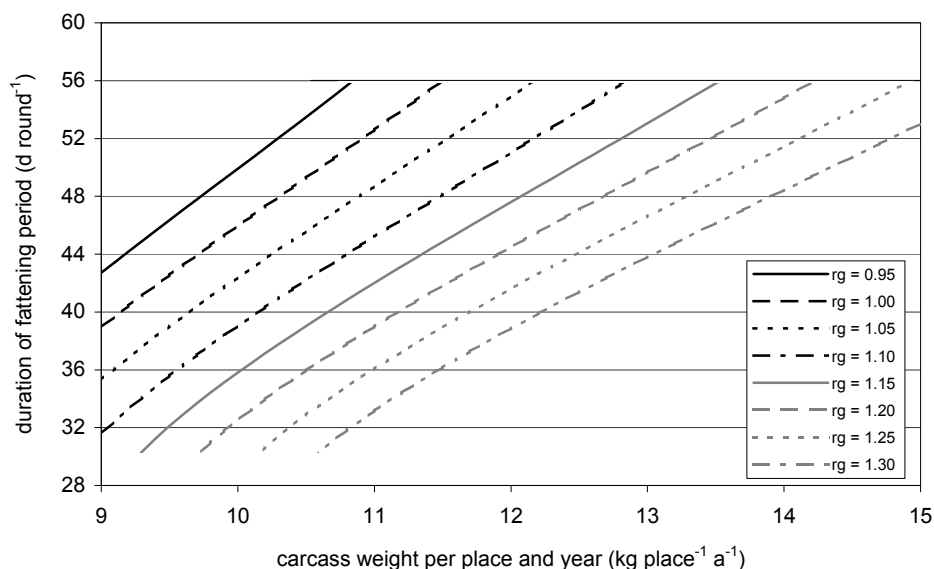


Figure 1:

Duration of fattening period  $\tau_{\text{lifespan}} = k_{\text{fin}} \cdot \tau_{\text{day}}$  with  $k_{\text{fin}}$  according to equation (4) as a function of the cumulative carcass weight per place per year ( $\sum W_{\text{carcass}} \cdot n_{\text{br}}^{-1}$ ) and the growth relative to reference  $r_g$  (curve family parameter, in  $\text{kg kg}^{-1}$ ).

Abbildung 1:

Mastdauer  $\tau_{\text{lifespan}} = k_{\text{fin}} \cdot \tau_{\text{day}}$  mit  $k_{\text{fin}}$  nach Gleichung (4) als Funktion von Schlachtfleischmenge pro Platz und Jahr ( $\sum W_{\text{carcass}} \cdot n_{\text{br}}^{-1}$ ) und Zuwachsfaktor  $r_g$  (Scharparameter, in  $\text{kg kg}^{-1}$ ).

### 2.3 Discussion of the model results

The calculation procedure described above is based on slaughter data and does not reflect the variety of fattening procedures potentially involved. Its correctness is therefore checked using calculations that take these types of fattening procedures into account, in particular the ME requirements and the N excretion rate according to Haenel and Dämmgen (2009). Criteria for this comparison are the duration of the fattening period, the number of animal rounds and N excretion rates. A number of fattening procedure type mixes were generated with animal weights that may well have described the situation in 2005, see Table 1. For each of these mixes an average number of animal rounds was calculated. Additionally, *TWP* was derived and converted into carcass weight per place and year as required as input to Equation (4), see Table 1. This conversion was done by using the slaughter factor according to Equation (HD30).

The calculation of a mean fattening period duration by Equation (4) does not account for different subsequent feeding phases. Therefore all calculations were done using constant feeding properties, i. e. the properties of the fattening-phase feeding, see Table 4. This simplification is of minor influence on N excretion results (cf. Haenel and Dämmgen, 2009, Section 4.2) and of no concern for the following comparison of results.

### 2.3 Diskussion der Modellergebnisse

Der oben beschriebene Berechnungsansatz auf Basis von Schlachtdaten beinhaltet keine Differenzierung nach Mastverfahren. Er wurde deshalb anhand von Berechnungen überprüft, die unter Berücksichtigung von Mast-Kennwerten mit Hilfe des in Haenel und Dämmgen (2009) entwickelten Gleichungssatzes durchgeführt wurden (ME-Bedarf, mittlere N-Ausscheidung). Als Vergleichskriterien wurden Mastdauer, Durchgangszahl und N-Ausscheidung gewählt. Die Berechnungen erfolgten für eine Auswahl an Mastverfahren-Kombinationen mit Tiergewichtsdaten, die als typisch für das Jahr 2005 angesehen werden können, siehe Tabelle 1. Die sich daraus ergebende Durchgangszahl sowie die Größe *TWP* führten mit Hilfe von Gleichung (HD30) zur Schlachtmenge pro Platz und Jahr, die wiederum als Eingangsgröße für die Modellrechnung mit Gleichung (4) diente, siehe Tabelle 1.

Die Mastdauer-Berechnung mit Gleichung (4) kennt mangels Berücksichtigung von Mastverfahrendetails auch keine phasengestaffelten Futtereigenschaften, weshalb alle Berechnungen mit konstanten Futtereigenschaften durchgeführt wurden (Mastfutterkennwerte für 2005 nach Tabelle 4). Der Einfluss dieser Vereinfachung auf die N-Ausscheidung ist gering (vgl. Haenel und Dämmgen, 2009, Abschnitt 4.2) und für den hier anstehenden Ergebnisvergleich unerheblich.

The parameterisation of the slaughter yield according to Equation (HD30) is common to both calculation approaches. Thus the comparison given in Table 1 does not allow judgement of the validity of (HD30). However, this will be possible in Section 4.1 in the context of the calculation of time series.

The calculations, the results of which are displayed in Table 1, are based on the following conditions:

- relation of animal places of cocks and hens always 1 to 1;
- rapid fattening: fattening period 33 d round<sup>-1</sup>, service period 12.5 d round<sup>-1</sup>;
- split fattening: mean fattening period 38.3 d round<sup>-1</sup>, effective service period 15.4 d round<sup>-1</sup> (see context to Equation (HD30));
- extended fattening: fattening period 56 d round<sup>-1</sup> for cocks, 42 d round<sup>-1</sup> for hens, service period 17.6 d round<sup>-1</sup> for cocks and hens;
- growth relative to reference  $r_g = 1.244$ ;
- feed: ME content 13.0 MJ kg<sup>-1</sup> ME, XP content 0.21 kg kg<sup>-1</sup> XP.

Die Schlachtausbeute-Parametrisierung (HD30) ist beiden Berechnungsansätzen gemeinsam, weshalb der hier beschriebene Vergleich keine Aussage über die Güte dieser Parametrisierung zulässt. Dies ist erst in Abschnitt 3.1 im Rahmen der Zeitreihenerstellung möglich.

Zusammengefasst lauten die Rahmenbedingungen für die Vergleichsberechnungen, deren Ergebnisse in Tabelle 1 gezeigt werden:

- Tierplatzverhältnis von Hähnen zu Hennen generell 1:1;
- Kurzmast: Mastdauer 33 d Durchgang<sup>-1</sup>, Reinigungsdauer 12,5 d Durchgang<sup>-1</sup>;
- Splittingmast: mittlere Mastdauer 38,3 d Durchgang<sup>-1</sup>, effektive Reinigungsdauer 15,4 d Durchgang<sup>-1</sup> (siehe dazu Kontext zu Gleichung (HD30));
- Langmast: Mastdauer 56 d Durchgang<sup>-1</sup> für Hähne, 42 d Durchgang<sup>-1</sup> für Hennen, Reinigungsdauer einheitlich 17,6 d Durchgang<sup>-1</sup>;
- Zuwachsfaktor  $r_g = 1,244$ ;
- Futter: ME-Gehalt 13,0 MJ kg<sup>-1</sup> ME, XP-Gehalt 0,21 kg kg<sup>-1</sup> XP.

Table 1:

Comparison of mean duration of fattening period, mean number of animal rounds and mean N excretion obtained with two different calculation procedures. All data are based on the animal weight level of 2005. For details see text.

Tabelle 1:

Vergleich der Mittelwerte von Mastdauer, Durchgangszahl und N-Ausscheidung für zwei verschiedene Berechnungsansätze. Alle Daten beruhen auf dem Tiergewichtsniveau von 2005. Details siehe Text.

| share of animal places<br>% |                    |                       | total live weight<br>produced <i>TWP</i><br><br>kg place <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> | total carcass<br>weight<br>$\sum w_{\text{carcass}}$<br><br>kg place <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> | mean duration of<br>fattening period<br>d round <sup>-1</sup> |                         | mean number of animal<br>rounds per year<br>a <sup>-1</sup> |                         | mean N excretion per<br>place per year<br>g place <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> |                         |
|-----------------------------|--------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| rapid<br>fattening          | split<br>fattening | extended<br>fattening |                                                                                        |                                                                                                    | combined<br>results                                           | derived with<br>eq. (4) | combined<br>results                                         | derived with<br>eq. (4) | combined<br>results                                                             | derived with<br>eq. (4) |
| 100.0                       | 0.0                | 0.0                   | 15.078                                                                                 | 10.432                                                                                             | 33.00                                                         | 32.80                   | 8.02                                                        | 8.08                    | 419                                                                             | 419                     |
| 75.0                        | 25.0               | 0.0                   | 15.297                                                                                 | 10.667                                                                                             | 34.33                                                         | 34.37                   | 7.68                                                        | 7.64                    | 436                                                                             | 436                     |
| 50.0                        | 50.0               | 0.0                   | 15.516                                                                                 | 10.901                                                                                             | 35.65                                                         | 35.83                   | 7.36                                                        | 7.29                    | 452                                                                             | 452                     |
| 25.0                        | 75.0               | 0.0                   | 15.736                                                                                 | 11.136                                                                                             | 36.98                                                         | 37.22                   | 7.07                                                        | 7.00                    | 468                                                                             | 469                     |
| 0.0                         | 100.0              | 0.0                   | 15.955                                                                                 | 11.370                                                                                             | 38.30                                                         | 38.55                   | 6.80                                                        | 6.75                    | 484                                                                             | 485                     |
| 50.0                        | 0.0                | 50.0                  | 16.489                                                                                 | 11.964                                                                                             | 41.00                                                         | 41.74                   | 6.51                                                        | 6.26                    | 516                                                                             | 524                     |
| 0.0                         | 50.0               | 50.0                  | 16.927                                                                                 | 12.433                                                                                             | 43.65                                                         | 44.14                   | 6.07                                                        | 5.96                    | 548                                                                             | 555                     |
| 0.0                         | 0.0                | 100.0                 | 17.900                                                                                 | 13.496                                                                                             | 49.00                                                         | 49.37                   | 5.48                                                        | 5.45                    | 613                                                                             | 623                     |

Table 1 illustrates that Equation (4) slightly overestimates the duration of the fattening period, except for the short fattening. As a consequence, the number of animal rounds is marginally underestimated. The first five lines in Table 1 describe fattening procedure combinations realistic for Germany. For these scenarios, the calculation based on equation (4) provides a very good tool to estimate N excretion rates. If the share of extended fattening increases, an overestimation of the N excretion rate of up to 2 % is observed. This just reflects that Equation (4) has been

Tabelle 1 zeigt, dass, außer für die Kurzmast, Gleichung (4) die Mastdauer leicht über- und die Durchgangszahl entsprechend unterschätzt. Die ersten fünf Zeilen in Tabelle 1 sind wegen der in Deutschland vorherrschenden Kurz- und Splittingmast von besonderer Bedeutung. Für diese Szenarios liefert die Berechnung unter Verwendung von (4) sehr gute Ergebnisse bei den N-Ausscheidungen. Bei größeren Langmast-Anteilen wird die N-Ausscheidung bis zu 2 % überschätzt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Gleichung (4) auf der linearisierten Wachstumsfor-

derived using the linear growth function (HD11) which, strictly, is not valid for extended fattening. However, keeping in mind the other uncertainties mentioned above, the deviations seem tolerable.

Similar results can be found for all years since 1990. The parameterisation of the ratio of carcass weight to final live weight, Equation (HD30), will be checked in Section 3.1.

### 3 Time series

#### 3.1 Fattening period, animal weight and ratio of carcass weight to final live weight

Final live weight and therefore also the cumulative metabolic weight are functions of the fattening-period duration, cf. Haenel and Dämmgen (2009). The duration of the fattening period is not reported by official statistics. Hence, as described in section 2.2, it has to be derived from the carcass weight total per place and year. For this purpose, the ratio of cocks to hens is assumed to be 1.

Table 2 displays the calculated data for the time series of input data as well as calculated duration of fattening period, final live weight and cumulative metabolic weight. In addition, Table 2 shows results obtained from Equation (HD30) for the ratio of carcass weight to final live weight.

For the years where input data required are not available, the time series have been completed as follows (set in italics in Table 2):

- Data for 1990 and 1991 as for 1992,
- in all other years with data gaps the respective value of the previous year is used.

The remarkably heavy final weights in 2005 and 2006 are not due to the use of the linearised weight gain Equation (HD11) in the derivation of the fattening period Equation (4). The fattening period duration calculated for 2005/2006 is 46.1 days and therefore still in the range of the validity of the linearised weight gain Equation (HD11). However, 46.1 days per round is very long, bearing in mind that short and split fattening predominate in Germany. A potential explanation for the unexpectedly long fattening period and the resulting high animal weights could be that the number of animal places used for 2005 were obtained from a sample survey and thus potentially underestimated in relation to animal numbers in former years (ZMP 2006, pg. 57). Such an error cannot be quantified and cannot be corrected.

Table 2 illustrates the marked decrease in both the duration of the fattening period and the mean final weights between the mid-nineties and about 2000. This trend is also observed for the calculated slaughter yields.

Figure 2 displays those calculated yields, which are not based on data gap closure (1992, 1994, 1996, 1999, 2001

mel (HD11) aufbaut, die für die Langmast im strengen Sinne nicht gültig ist. In Anbetracht der übrigen Unsicherheiten im Datengefüge erscheinen die Abweichung aber tolerierbar.

Vergleichbare Ergebnisse findet man für alle Jahre seit 1990. Zur Überprüfung der Schlachtausbeute-Parameterisierung, Gleichung (HD30), siehe Abschnitt 3.1.

### 3 Zeitreihen

#### 3.1 Mastdauer, Tiergewicht und Schlachtausbeute

Lebendendgewicht und damit auch kumuliertes metabolisches Gewicht sind eine Funktion der Mastdauer, siehe Haenel und Dämmgen (2009). Die Mastdauer wird durch die amtliche Statistik nicht erhoben, und muss daher wie in Abschnitt 2.2 beschrieben aus der Schlachtmenge pro Platz und Jahr abgeleitet werden. Das Geschlechterverhältnis wird dabei praxiskonform mit 1:1 angenommen.

Tabelle 2 zeigt die Zeitreihen von Eingangsdaten sowie Berechnungsergebnissen zu Mastdauer, Lebendendgewicht und kumulativem metabolischem Gewicht. Ergänzend finden sich in Tabelle 2 Ergebnisse für den Schlachtausbeutefaktor, wie er sich über Gleichung (HD30) aus dem Lebendendgewicht ergibt.

Für die Jahre, in denen die erforderlichen Inputdaten nicht vorlagen, wurden die Ergebnisdaten wie folgt ergänzt (in Tabelle 2 kursiv gesetzt):

- Werte von 1990 und 1991 wie Wert für 1992,
- Werte in allen übrigen Lückenjahren wie der Wert des jeweiligen Vorjahres.

Das bemerkenswert hohe Tierendgewicht für 2005/2006 ist nicht auf die Verwendung der linearisierten Wachstums-Gleichung (HD11) bei der Ableitung der Mastdauer-Gleichung (4) zurückzuführen, da die für 2005/2006 errechnete Mastdauer mit 46,1 Tagen noch im Gültigkeitsbereich der linearisierten Wachstums-Gleichung (HD11) liegt. Gemessen daran, dass in Deutschland Kurz- und Splittingmast vorherrschen, stellen 46,1 Tage eine sehr lange Mastdauer dar. Eine mögliche Erklärung für die unerwartet hohen Werte von Mastdauer und Endgewicht könnte darin liegen, dass 2005 die Zahl der Tierplätze 2005 abweichend von den Jahren zuvor lediglich in einer repräsentativen Umfrage erhoben und dabei unterschätzt wurde (ZMP 2006, S. 57). Ein solcher Fehler ist nicht quantifizierbar und kann daher nicht korrigiert werden.

Tabelle 2 zeigt einen starken Rückgang in Mastdauer und Endgewicht ab etwa Mitte der 1990er Jahre bis ca. 2000. Dieser Trend findet sich auch bei den berechneten Schlachtausbeute-Faktoren wieder.

Abbildung 2 zeigt alle nicht durch Datenlückenschließung entstandene Faktoren (1992, 1994, 1996, 1999,



Table 2:

Calculated values of the duration of the fattening period, live weight und ratio of carcass weight to final live weight. For details see text. Data obtained from gap closing procedures are set in italics.

Tabelle 2:

Berechnete Werte von Mastdauer, Lebendendgewicht, kumulativem metabolischem Gewicht sowie Schlachtausbeute (Details s. Text). Auf Lückenschluss zurückgehende Daten sind kursiv gesetzt.

|      | cumulative<br>carcass<br>weight <sup>a</sup> | animal<br>places <sup>a</sup> | lifespan              | number of<br>rounds per<br>year     | $w_{kfin}$<br>(average<br>cocks and<br>hens) | $w_{kfin}$ (cocks)      | $w_{kfin}$ (hens)       | cumulative<br>metabolic<br>weight (cocks) | cumulative<br>metabolic<br>weight (hens) | ratio of car-<br>cass weight<br>to $w_{kfin}$ |
|------|----------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Year | Gg a <sup>-1</sup>                           | 1000 places                   | d round <sup>-1</sup> | place <sup>-1</sup> a <sup>-1</sup> | kg animal <sup>-1</sup>                      | kg animal <sup>-1</sup> | kg animal <sup>-1</sup> | kg d animal <sup>-1</sup>                 | kg d animal <sup>-1</sup>                | kg kg <sup>-1</sup>                           |
| 1990 |                                              | 35393                         | <i>41.7</i>           | 6.27                                | <i>2.134</i>                                 | <i>2.301</i>            | <i>1.967</i>            | <i>36.53</i>                              | <i>33.41</i>                             | <i>0.702</i>                                  |
| 1991 | 322.7                                        |                               | <i>41.7</i>           | 6.27                                | <i>2.134</i>                                 | <i>2.301</i>            | <i>1.967</i>            | <i>36.53</i>                              | <i>33.41</i>                             | <i>0.702</i>                                  |
| 1992 | 344.3                                        | 36666                         | 41.7                  | 6.27                                | 2.134                                        | 2.301                   | 1.967                   | 36.53                                     | 33.41                                    | 0.702                                         |
| 1993 | 348.7                                        |                               | <i>41.7</i>           | 6.27                                | <i>2.134</i>                                 | <i>2.301</i>            | <i>1.967</i>            | <i>36.53</i>                              | <i>33.41</i>                             | <i>0.702</i>                                  |
| 1994 | 364.5                                        | 40686                         | 35.8                  | 7.29                                | 1.787                                        | 1.909                   | 1.664                   | 27.09                                     | 24.94                                    | 0.688                                         |
| 1995 | 360.8                                        |                               | <i>35.8</i>           | 7.29                                | <i>1.787</i>                                 | <i>1.909</i>            | <i>1.664</i>            | <i>27.09</i>                              | <i>24.94</i>                             | <i>0.688</i>                                  |
| 1996 | 387.9                                        | 43366                         | 33.0                  | 8.03                                | 1.633                                        | 1.733                   | 1.532                   | 23.15                                     | 21.43                                    | 0.682                                         |
| 1997 | 402.8                                        |                               | <i>33.0</i>           | 8.03                                | <i>1.633</i>                                 | <i>1.733</i>            | <i>1.532</i>            | <i>23.15</i>                              | <i>21.43</i>                             | <i>0.682</i>                                  |
| 1998 | 444.4                                        |                               | <i>33.0</i>           | 8.03                                | <i>1.633</i>                                 | <i>1.733</i>            | <i>1.532</i>            | <i>23.15</i>                              | <i>21.43</i>                             | <i>0.682</i>                                  |
| 1999 | 460.2                                        | 49334                         | 32.0                  | 8.34                                | 1.640                                        | 1.737                   | 1.543                   | 22.47                                     | 20.85                                    | 0.682                                         |
| 2000 | 533.9                                        |                               | <i>32.0</i>           | 8.34                                | <i>1.640</i>                                 | <i>1.737</i>            | <i>1.543</i>            | <i>22.47</i>                              | <i>20.85</i>                             | <i>0.682</i>                                  |
| 2001 | 560.6                                        | 51386                         | 40.3                  | 6.47                                | 2.371                                        | 2.552                   | 2.190                   | 37.82                                     | 34.60                                    | 0.711                                         |
| 2002 | 571.4                                        |                               | <i>40.3</i>           | 6.47                                | <i>2.371</i>                                 | <i>2.552</i>            | <i>2.190</i>            | <i>37.82</i>                              | <i>34.60</i>                             | <i>0.711</i>                                  |
| 2003 | 618.5                                        | 54611                         | 40.4                  | 6.45                                | 2.458                                        | 2.646                   | 2.269                   | 38.96                                     | 35.64                                    | 0.715                                         |
| 2004 | 705.7                                        |                               | <i>40.4</i>           | 6.45                                | <i>2.458</i>                                 | <i>2.646</i>            | <i>2.269</i>            | <i>38.96</i>                              | <i>35.64</i>                             | <i>0.715</i>                                  |
| 2005 | 728.4                                        | 56763                         | 46.1                  | 5.75                                | 3.027                                        | 3.281                   | 2.773                   | 52.72                                     | 48.09                                    | 0.737                                         |
| 2006 |                                              |                               | <i>46.1</i>           | 5.75                                | <i>3.027</i>                                 | <i>3.281</i>            | <i>2.773</i>            | <i>52.72</i>                              | <i>48.09</i>                             | <i>0.737</i>                                  |

<sup>a</sup> Source: ZMP (1990 – 2006)

and 2003), along with reported data (Culioli et al., 1990, see Grashorn, 2000; Damme, 2001; Damme et al., 2005; Grashorn und Brose, 1997, see Grashorn, 2000; Hadorn und Wiedmer, 1998; Soliman et al., 1990; Tiller, 1990; Tüller et al., 1990; Tüller und Velten, 1991). Note that some of the reported slaughter yields were used to derive the yield parameterisation used above (Equation (HD30)). However, as the parameterisation has been derived without relation to time, the time series presentation in Figure 2 may serve as a test for the quality of the parameterisation. Obviously the calculated yield results fit reasonably well with the data reported from practice. This means that the slaughter yield parameterisation can be judged a useful contribution to the calculation method for broiler excretions.

2001, 2003 und 2005) sowie Faktoren aus einer Auswahl von Schlachtuntersuchungen (Culioli et al., 1990, zitiert in Grashorn, 2000; Damme, 2001; Damme et al., 2005; Grashorn und Brose, 1997, zitiert in Grashorn, 2000; Hadorn und Wiedmer, 1998; Soliman et al., 1990; Tiller, 1990; Tüller et al., 1990; Tüller und Velten, 1991). Einige dieser Faktoren aus Schlachtuntersuchungen wurden in Haenel und Dämmgen (2009) zwar zur Parameterisierung des Schlachtausbeutefaktors herangezogen (Gleichung (HD30)), allerdings ohne Zeitbezug, so dass die Zeitreihen-Darstellung in Abbildung 2 als ein Test für die Güte der Parameterisierung gelten kann. Die berechneten Werte fügen sich hinreichend gut in das Gesamtbild der aus der Praxis stammenden Daten ein, womit die Parameterisierung als sinnvoller Bestandteil der Ausscheidungsberechnung gelten kann.

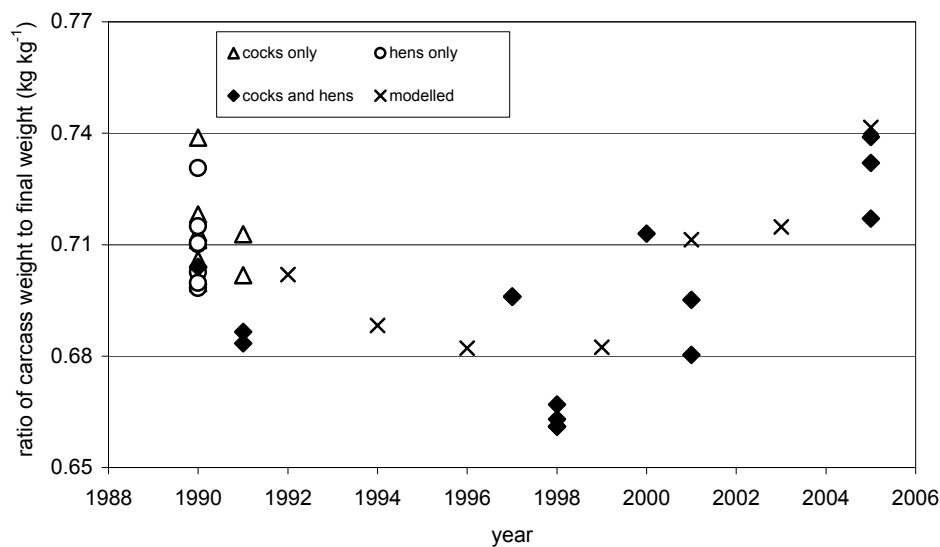


Figure 2:

Time series of the ratios of carcass weight to final live weight combined with calculated data (no data from gap filling procedures). For details see text.

Abbildung 2:

Zeitreihendarstellung der berechneten Schlachtausbeute-Faktoren (ohne Daten aus Lückenschluss-verfahren) im Vergleich mit Faktoren aus einer Auswahl von Schlachtuntersuchungen. Zu Details siehe Text.

### 3.2 Feed contents of ME and XP

To establish times series on base of carcass weight data there is a need to determine effective feed properties, cf. Section 2.2. These can be approximated according to Haenel and Dämmgen (2009). In practice, the estimation of effective feed properties has to rely on data declared by the feed producers. Analysed feed properties are not readily available in general. Figure 3 shows the fattening feed properties reported from breeding line and feed contests, see Anonymus (1997), Anonymus (2001), Damme (1994, 1995, 1997), Damme and Rychlik (2001), Klein (1991a, 1991b), Lüke et al., (2004), Poteracki (1991, 1994, 1995, 1996), Poteracki and Adam (1993a, 1993b), Poteracki et al. (1994), Simon (2001), and Simon and Stegemann (2005).

The dashed regression lines in Figure 3 roughly indicate the respective trend over the years. However, the lean data base does not permit the use of this trend for the N excretion rate calculations. This is confirmed by low coefficients of determination. In order not to underestimate N excretions, subsequent calculations are based on the minimum feed contents of ME and the maximum feed content of XP. These data are displayed in Table 3 in Section 3.3. It is assumed that the data missing for 2006 can be approximated by the 2005 data.

### 3.2 ME- und XP-Gehalte im Futter

Für die Erstellung von Zeitreihen auf Basis von Schlachtdaten bedarf es der Ermittlung von effektiven Futtereigenschaften, vgl. Abschnitt 2.2. Nach Haenel and Dämmgen (2009) können diese durch die Eigenschaften des Mastfutters approximiert werden. Dafür stehen in der Praxis statt analysierter Futtereigenschaften nur die Herstellerdeklarationen zur Verfügung. Abbildung 3 zeigt die von Herkunfts- und Futtermittelprüfungen berichteten deklarierten Futtereigenschaften, siehe Anonymus (1997), Anonymus (2001), Damme (1994, 1995, 1997), Damme und Rychlik (2001), Klein (1991a, 1991b), Lüke et al., (2004), Poteracki (1991, 1994, 1995, 1996), Poteracki und Adam (1993a, 1993b), Poteracki et al. (1994), Simon (2001) und Simon und Stegemann (2005).

Die gestrichelten Regressionsgeraden deuten den zeitlichen Trend an. Allerdings erlaubt die Datenbasis nicht, den Trend zur Berechnung der N-Ausscheidungen zu verwenden. Auch die (nicht dargestellten) niedrigen Bestimmtheitsmaße sprechen dagegen. Zur Vermeidung einer Unterschätzung der N-Ausscheidungen wird daher im Folgenden mit dem minimal angegebenen ME- und dem maximal angegebenen XP-Gehalt gerechnet. Diese Werte zeigt Tabelle 3 in Abschnitt 3.3. Die fehlenden Angaben für 2006 können vermutlich durch die Daten von 2005 approximiert werden.

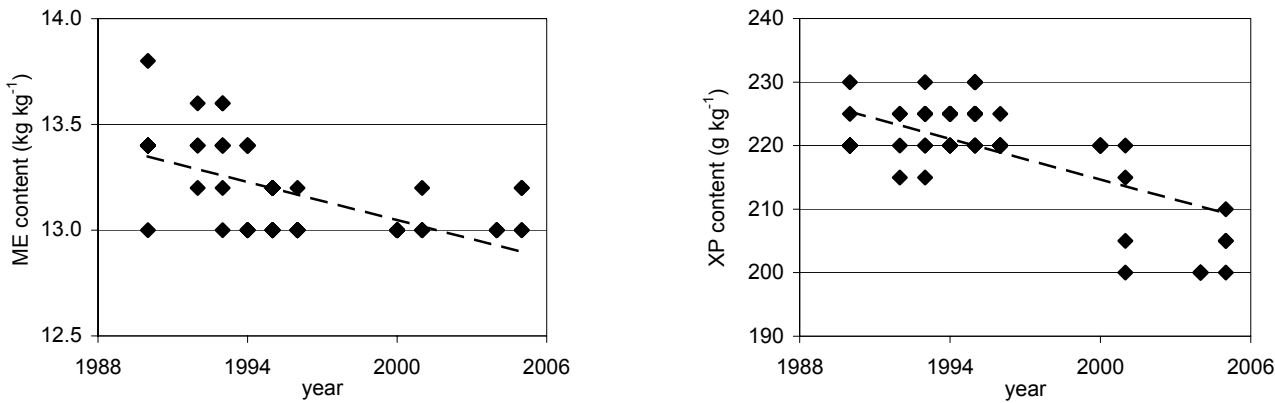


Figure 3:  
ME (left) and XP (right) contents of feeds (fattening period) as declared by producers according to breeding line and feed performance contests. Trends are tentatively indicated by dashed lines.

Abbildung 3:  
ME-Gehalte (links) und XP-Gehalte (rechts) (Herstellerangaben) im Mastfutter der Herkunfts- und Futterwertleistungsprüfungen. Andeutung der Trends durch gestrichelte Regressionsgeraden.

3.3 ME requirements and feed intake

The calculation method based on carcass weight data requires phase-independent constant feed property data as well as a gender-independent N retention data. Hence, the total requirement of ME as averaged over one round for both cocks and hens can be used as input data. The daily feed intake per place averaged over one round is then given by the following equation (see also Table 3):

3.3 ME-Bedarf und Futteraufnahme

Im Berechnungsverfahren auf Basis von Schlachtdaten werden phasenunabhängige konstante Futterkennwerte und eine geschlechtsunabhängige N-Retention vorausgesetzt. Daher kann der über einen Durchgang und beide Geschlechter gemittelte Gesamt-ME-Bedarf  $ME_{br}$  als Eingangsgröße verwendet werden. Daraus folgt für die über einen Durchgang gemittelte tägliche Futteraufnahme pro Platz, siehe auch Tabelle 3:

$$m_{F, \text{ day}} = \frac{ME_{br}}{\eta_{ME, \text{ feed}}} \tag{5}$$

where

- $m_{F, \text{ day}}$  daily feed intake per place (in kg d<sup>-1</sup> place<sup>-1</sup>)
- $ME_{br}$  daily metabolizable energy averaged over one round (in MJ place<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> ME)
- $\eta_{ME, \text{ feed}}$  phase-independent content of metabolizable energy in feed (in MJ kg<sup>-1</sup> ME)

Table 3:

Feed contents of ME and XP as used for the calculation of the time series. In addition, data of daily ME requirements and feed intake are given (averaged over one round). Data generated by data gap closure are set in italics. For details see text.

Tabelle 3:

Für die Zeitreihenberechnung verwendete XP- und ME-Gehalte. Zusätzlich angegeben ist das auf die Durchgangsdauer bezogene Tagesmittel des Bedarfs an umsetzbarer Energie und Futteraufnahme. Durch Lückenschluss in den Inputdaten entstandene Ergebnisse sind kursiv gesetzt. Details siehe Text.

| Year | XP content<br>kg kg <sup>-1</sup> | ME content<br>MJ kg <sup>-1</sup> | ME requirements<br>MJ place <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> | feed intake<br>g place <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> |
|------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 1990 | 0.23                              | 13.0                              | <i>0.893</i>                                              | <i>68.7</i>                                          |
| 1991 | 0.23                              | 13.0                              | <i>0.893</i>                                              | <i>68.7</i>                                          |
| 1992 | 0.23                              | 13.0                              | <i>0.893</i>                                              | <i>68.7</i>                                          |
| 1993 | 0.23                              | 13.0                              | <i>0.893</i>                                              | <i>68.7</i>                                          |
| 1994 | 0.23                              | 13.0                              | <i>0.821</i>                                              | <i>63.2</i>                                          |
| 1995 | 0.23                              | 13.0                              | <i>0.821</i>                                              | <i>63.2</i>                                          |
| 1996 | 0.23                              | 13.0                              | <i>0.802</i>                                              | <i>61.7</i>                                          |
| 1997 | 0.23                              | 13.0                              | <i>0.802</i>                                              | <i>61.7</i>                                          |
| 1998 | 0.23                              | 13.0                              | <i>0.802</i>                                              | <i>61.7</i>                                          |
| 1999 | 0.22                              | 13.0                              | <i>0.825</i>                                              | <i>63.5</i>                                          |
| 2000 | 0.22                              | 13.0                              | <i>0.825</i>                                              | <i>63.5</i>                                          |
| 2001 | 0.22                              | 13.0                              | <i>0.999</i>                                              | <i>76.8</i>                                          |
| 2002 | 0.22                              | 13.0                              | <i>0.999</i>                                              | <i>76.8</i>                                          |
| 2003 | 0.21                              | 13.0                              | <i>1.031</i>                                              | <i>79.3</i>                                          |
| 2004 | 0.21                              | 13.0                              | <i>1.031</i>                                              | <i>79.3</i>                                          |
| 2005 | 0.21                              | 13.0                              | <i>1.183</i>                                              | <i>91.0</i>                                          |
| 2006 | <i>0.21</i>                       | <i>13.0</i>                       | <i>1.183</i>                                              | <i>91.0</i>                                          |

### 3.4 VS and N excretions

Excretions of volatile solids (VS) are considered a measure for the excretion of carbon compounds. VS is determined from the total mass of dried excretions (as loss due to incineration at 800 °C).

VS excretions are determined according to the following IPCC (1996) equation which is gender-independent:

$$VS_{br} = GE_{br} \cdot \frac{1}{\eta_{E, br}} \cdot (1 - X_{DE, br}) - x_{ash, br} \quad (6)$$

where

|                |                                                                                                    |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $VS_{br}$      | volatile solids (readily digestible carbon) (in kg d <sup>-1</sup> DM)                             |
| $GE_{br}$      | gross energy intake of broilers (in MJ place <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )                       |
| $\eta_{E, br}$ | energy content of dry matter ( $\eta_{E, br} = 16.18 \text{ MJ kg}^{-1}$ , see Wecke et al., 2006) |
| $X_{DE, br}$   | digestibility of feed ( $X_{DE, br} = 0.78 \text{ MJ MJ}^{-1}$ , see below)                        |
| $x_{ash, br}$  | ash content of the manure ( $x_{ash, br} = 0.18 \text{ kg kg}^{-1}$ , see below)                   |

Based on a literature study by Hennig and Poppe (1975), the ash content in broiler excreta is assumed to be  $x_{ash, br} = 0.18 \text{ kg kg}^{-1}$ . For the digestibility  $X_{DE, br}$  no information was

### 3.4 VS- und N-Ausscheidungen

Als Maß für die Ausscheidung von Kohlenstoff-Verbindungen werden die Ausscheidungen an „volatile solids (VS)“ betrachtet. Sie werden aus der Gesamtmasse der getrockneten Ausscheidungen als Glühverlust bei 800 °C bestimmt.

Die VS-Ausscheidungen werden geschlechtsübergreifend nach der folgenden Gleichung berechnet (IPCC, 1996):

Basierend auf einer Literatursauswertung in Hennig und Poppe (1975) wird der Aschegehalt im Broiler-Kot mit  $x_{ash, br} = 0,18 \text{ kg kg}^{-1}$  angesetzt. Für die Verdaulichkeit  $X_{DE, br}$  konnten

available. Hence the value used for pullets is adopted (0.78 MJ MJ<sup>-1</sup>, see Haenel and Dämmgen, 2007a). As there is no information to account for variations with time of ash content and digestibility, these data given are taken for constant.

In case the content of gross energy  $GE$  is unknown, it can be derived from the metabolizable energy  $ME$  according to Equation (7).

$$GE_{br} = \frac{ME_{br}}{X_{ME, br}} \quad (7)$$

with

|              |                                                                                                 |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $GE_{br}$    | gross energy intake of broilers (in MJ place <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> )                    |
| $ME_{br}$    | daily metabolizable energy averaged over one round (in MJ place <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ) |
| $X_{ME, br}$ | metabolizability (in MJ MJ <sup>-1</sup> )                                                      |

The daily mean of the metabolizable energy as averaged for one round,  $ME_{br}$ , can be calculated by Equation (HD22).

According to Wecke et al. (2006)  $X_{ME, br}$  is assumed to be 0.72 MJ MJ<sup>-1</sup>. It is regarded constant with time and space.

Table 3 displays the time series of  $ME_{br}$ , based on animal weight data given in Table 2. Data gap closure was performed analogously to the procedure described in Section 3.1. Data generated for gap closure are set in italics.

The time series of the VS excretions calculated is given in Table 4.

The N excretion averaged over one round for both cocks and hens is given by:

keine Daten ermittelt werden, weshalb der für Junghennen angesetzte Wert 0,78 MJ MJ<sup>-1</sup> (Haenel und Dämmgen, 2007a) verwendet wird. Mangels besserer Informationen werden  $x_{ash, br}$  und  $X_{DE, br}$  als zeitlich konstant angesehen.

Ist der Bruttoenergie-Gehalt  $GE$  nicht bekannt, kann er mit Hilfe der folgenden Beziehung zwischen  $GE$  und umsetzbarer Energie  $ME$  geschätzt werden:

Das auf den gesamten Durchgang bezogene Tagesmittel der metabolisierbaren Energie,  $ME_{br}$ , ist mit Gleichung (HD22) zu berechnen.

Nach Wecke et al. (2006) wird  $X_{ME, br}$  mit 0,72 MJ MJ<sup>-1</sup> angesetzt. Mangels besserer Informationen wird  $X_{ME, br}$  als zeitlich und räumlich konstant angesehen.

Tabelle 3 zeigt die Zeitreihe für  $ME_{br}$ , die auf den Tiergewichtsdaten in Tabelle 2 beruht. Der Lückenschluss erfolgte analog zur Vorgehensweise in Abschnitt 3.1. Durch Lückenschluss in den Inputdaten entstandene Ergebnisse sind kursiv gesetzt.

Die Zeitreihe der berechneten VS-Ausscheidungen wird in Tabelle 4 wiedergegeben.

Für die über einen Durchgang und beide Geschlechter gemittelte N-Ausscheidung gilt:

$$m_{excreted, day} = \frac{\tau_{ref}}{\tau_{round}} \cdot \sum_{j=1}^{k_{fin}} m_{excreted, j} \quad (8)$$

where

|                     |                                                                                            |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| $m_{excreted, day}$ | amount of nitrogen excreted (in kg place <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> N)                  |
| $\tau_{day}$        | time period of one day ( $\tau_{day} = 1$ d round <sup>-1</sup> )                          |
| $\tau_{round}$      | duration of production cycle (in d round <sup>-1</sup> )                                   |
| $j$                 | index of day of life                                                                       |
| $k_{fin}$           | number of final day of fattening period                                                    |
| $m_{excreted, j}$   | gender -averaged amount of nitrogen excreted (in kg place <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> N) |

Equation (HD29) is used to calculate  $m_{excreted, j}$ . The input data on metabolizable energy and daily feed intake can be taken from Table 3. Table 4 shows the resulting time series of daily N intake, N retention, and N excretion, the latter being given per day as well as per year. In addition, Table 4 shows the uric acid N (UAN) content calculated with an

Für  $m_{excreted, j}$  wird auf Gleichung (HD29) verwiesen. Der dazu benötigte Bedarf an metabolisierbarer Energie sowie die Futteraufnahme sind Tabelle 3 zu entnehmen. Tabelle 4 zeigt die Zeitreihen täglicher Werte von N-Aufnahme, N-Retention und N-Ausscheidung, letztere auf den Tag und aufs Jahr bezogen. Ergänzt wird Tabelle 4 durch die An-

assumed crude protein digestibility of  $0.78 \text{ kg kg}^{-1}$ . Data gap closure was performed according to the procedure described in Section 3.1. Data generated for gap closure are set in italics.

The time course of N excretions is not uniform. In the second half of the 1990ies, fattening periods were relatively short leading to lower final live animal weights and lower N excretions. A contrary trend could be found in the years after 2000 where increasing fattening period durations are observed as well as final live weights increasing due to progresses in broiler breeding.

gabe des Harnsäure-N-(UAN)-Gehaltes, der unter der Annahme einer Rohprotein-Verdaulichkeit von  $0,78 \text{ kg kg}^{-1}$  berechnet wurde. Der Zeitreihen-Lückenschluss (kursiv gesetzt) erfolgte analog zu Abschnitt 3.1.

Der zeitliche Verlauf der N-Ausscheidungen ist uneinheitlich. Kürzere Mastdauern in der zweiten Hälfte der 1990er Jahre (und die damit verbundenen geringeren Tierendgewichte) führen zu vergleichsweise niedrigen Ausscheidungswerten. Ein gegenläufiger Trend ergibt sich nach 2000, hervorgerufen durch eine wieder länger werdende Mastdauer und höhere Tiergewichte aufgrund des züchterischen Fortschritts.

Table 4:

Resulting VS excretion (dry matter), N intake, N retention and N excretions per animal place per day. Data relate to one round rather than the fattening period. In addition, the N excretion per place and year is reported, as are the percentages of UAN excreted. For details see text. Results based on input data obtained from gap closing procedures are set in italics.

Tabelle 4:

Über beide Geschlechter gemittelte Berechnungsergebnisse zu VS-Ausscheidung (Trockenmasse), N-Aufnahme, N-Retention und N-Ausscheidung pro Platz und Tag. Die Angaben beziehen sich auf einen Durchgang und nicht nur auf die reine Mastzeit. Ergänzt wird die Tabelle durch die Angabe der N-Ausscheidung pro Platz und Jahr sowie des prozentualen UAN-Anteils an der N-Ausscheidung. Details siehe Text. Durch Lückenschluss in den Inputdaten entstandene Ergebnisse sind kursiv gesetzt.

| Year | VS excretion                         | N intake                             | N retention                          | N excretion                          |                                      | UAN content |
|------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------|
|      | $\text{g place}^{-1} \text{ d}^{-1}$ | $\text{g place}^{-1} \text{ d}^{-1}$ | $\text{g place}^{-1} \text{ d}^{-1}$ | $\text{g place}^{-1} \text{ d}^{-1}$ | $\text{g place}^{-1} \text{ a}^{-1}$ |             |
| 1990 | 13.8                                 | 2.53                                 | 1.11                                 | 1.42                                 | 518                                  | 0.608       |
| 1991 | 13.8                                 | 2.53                                 | 1.11                                 | 1.42                                 | 518                                  | 0.608       |
| 1992 | 13.8                                 | 2.53                                 | 1.11                                 | 1.42                                 | 518                                  | 0.608       |
| 1993 | 13.8                                 | 2.53                                 | 1.11                                 | 1.42                                 | 518                                  | 0.608       |
| 1994 | 12.7                                 | 2.33                                 | 1.05                                 | 1.27                                 | 464                                  | 0.597       |
| 1995 | 12.7                                 | 2.33                                 | 1.05                                 | 1.27                                 | 464                                  | 0.597       |
| 1996 | 12.4                                 | 2.27                                 | 1.05                                 | 1.22                                 | 446                                  | 0.591       |
| 1997 | 12.4                                 | 2.27                                 | 1.05                                 | 1.22                                 | 446                                  | 0.591       |
| 1998 | 12.4                                 | 2.27                                 | 1.05                                 | 1.22                                 | 446                                  | 0.591       |
| 1999 | 12.8                                 | 2.23                                 | 1.09                                 | 1.14                                 | 418                                  | 0.571       |
| 2000 | 12.8                                 | 2.23                                 | 1.09                                 | 1.14                                 | 418                                  | 0.571       |
| 2001 | 15.5                                 | 2.70                                 | 1.27                                 | 1.44                                 | 524                                  | 0.586       |
| 2002 | 15.5                                 | 2.70                                 | 1.27                                 | 1.44                                 | 524                                  | 0.586       |
| 2003 | 16.0                                 | 2.66                                 | 1.31                                 | 1.35                                 | 494                                  | 0.567       |
| 2004 | 16.0                                 | 2.66                                 | 1.31                                 | 1.35                                 | 494                                  | 0.567       |
| 2005 | 18.7                                 | 3.13                                 | 1.49                                 | 1.64                                 | 597                                  | 0.579       |
| 2006 | 18.7                                 | 3.13                                 | 1.49                                 | 1.64                                 | 597                                  | 0.579       |

#### 4. Discussion and outlook

The calculation procedures developed in the present paper were used to establish continuous time series of VS and N excretions of broilers for the years 1990 to 2006. The results are national means, because the data base available does not allow for a finer spatial resolution.

The underlying mathematical relations provide the means to relate excretions per place and year to the progress in broiler breeding (i. e. increasing daily growth rates)

#### 4. Diskussion und Ausblick

Mit dem in der vorliegenden Arbeit entwickelten Berechnungsverfahren wurden geschlossene Zeitreihen der nationalen Mittelwerte für VS- und N-Ausscheidungen von Masthähnchen und -hühnchen für 1990 bis 2006 erstellt. Die gegebene Datenlage ließ eine feinere räumliche Differenzierung nicht zu.

Die zugrunde liegenden mathematischen Zusammenhänge erlauben es, den Einfluss züchterischen Fortschritts

as well as to the modifications in broiler rearing (in particular increased fattening periods) and feeding.

In case of a limited data base for the derivation of process descriptions, solutions were selected which make sure that excretions are overestimated rather than underestimated.

The resulting N excretions are between  $446 \text{ g place}^{-1} \text{ a}^{-1}$  N and  $580 \text{ g place}^{-1} \text{ a}^{-1}$  N. They are lower than the EMEP/CORINAIR default value of  $0.6 \text{ kg place}^{-1} \text{ a}^{-1}$  N (EMEP/CORINAIR, 2006, B1090, Table 4A). There is no temporal trend in the calculation results. The N excretions during the second half of the 1990ies were lower than those in the first half of the 1990ies and in the years from 2000 on. Maximum N excretion rates of  $580 \text{ g place}^{-1} \text{ a}^{-1}$  were calculated for the years 2005/2006. Increasing excretion rates after 2000 are due to rearing increasingly heavier animals for broiler meat production.

The comparison of calculated N excretions with data in DLG (2005) is preferably based on the data set calculated for 2001. DLG (2005) states a N excretion of  $469 \text{ g place}^{-1} \text{ a}^{-1}$  N for a fattening period duration of 40 days,  $2.2 \text{ kg growth per place and round}$  and total growth of  $14.7 \text{ kg place}^{-1} \text{ a}^{-1}$  which implies approximately 6.7 rounds per year. Our calculations for 2001 performed for a fattening period duration of 40.3 days, about 6.5 rounds per year, and a growth of  $2.15 \text{ kg per place and round}$  yielded  $524 \text{ g place}^{-1} \text{ a}^{-1}$  N, which is about 12 % more than the value reported by DLG (2005). However, the N intake calculated for 2001 is  $987 \text{ g per place and year}$  and therefore in practice identical to the value given in DLG (2005) which is  $987 \text{ g per place and year}$ . Thus, the 12 % difference in N excreted is a direct consequence of the N retention formula applied in the calculations, which yields a retention lower than the standard retention value used in DLG (2005) according to LfL (2006).

Calculated VS excretion rates are about  $13.8 \text{ g place}^{-1} \text{ d}^{-1}$  for the early 1990ies. They decrease to  $12.4 \text{ g place}^{-1} \text{ d}^{-1}$  in the second half of the 1990ies, and remarkably rise again from 2001 on. For 2005/2006 the calculated VS excretion amounts to  $18.3 \text{ g place}^{-1} \text{ d}^{-1}$ , which is due to an increased feed intake resulting from increased animal weight gain rates.

The present paper is a contribution to the scientifically based analysis of potentials of emission mitigation. The process-based calculation procedure developed permits the separate effects of animal properties and parameters of rearing and feeding on the amount of excretions to be estimated. Using these calculations, excretion data can be normalized with respect to the production of broiler meat to be marketed, see Figure 4.

(d. h. steigender täglicher Gewichtszuwächse) und Veränderungen in der Haltung (insbesondere bei der Mastdauer) und der Fütterung auf die Ausscheidungen pro Platz und Jahr nachzuvollziehen.

In Fällen eingeschränkter Datenverfügbarkeit bei der Ableitung von Prozessbeschreibungen wurden Lösungen gewählt, die eher zu einer Über- als einer Unterschätzung der Ausscheidungen führen.

Die berechneten N-Ausscheidungen liegen zwischen  $446 \text{ g Platz}^{-1} \text{ a}^{-1}$  N und  $580 \text{ g Platz}^{-1} \text{ a}^{-1}$  N und damit unter dem EMEP/CORINAIR-Defaultwert von  $0,6 \text{ kg Platz}^{-1} \text{ a}^{-1}$  N (EMEP/CORINAIR, 2006, B1090, Table 4A). Ein zeitlicher Trend ist nicht festzustellen. Die N-Ausscheidungen waren in der zweiten Hälfte der 1990er Jahre geringer als in der ersten Hälfte und in den Jahren ab 2000. Die maximale N-Ausscheidung von  $580 \text{ g Platz}^{-1} \text{ a}^{-1}$  ergab sich für 2005/2006. Hierin kommt zum Ausdruck, dass neuerdings erheblich schwerere Tiere in der Hähnchenfleischproduktion eingesetzt werden.

Der Vergleich der berechneten N-Ausscheidungen mit den Angaben in DLG (2005) ist am ehesten anhand des für 2001 berechneten Datensatzes möglich. DLG (2005) gibt für eine Mastdauer von 40 Tagen bei  $2,2 \text{ kg Zuwachs pro Platz und Durchgang}$  und einem Gesamtzuwachs von  $14,7 \text{ kg Platz}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (d. h. rund 6,7 Durchgängen pro Jahr) eine N-Ausscheidung von  $469 \text{ g Platz}^{-1} \text{ a}^{-1}$  N an. Unsere Berechnungen für 2001 ergaben mit einer Mastdauer von 40,3 Tagen sowie einem Zuwachs von  $2,15 \text{ kg pro Platz und Durchgang}$  bei rund 6,5 Durchgängen pro Jahr eine Ausscheidung von  $524 \text{ g Platz}^{-1} \text{ a}^{-1}$  N, d. h. ca. 12 % mehr als von DLG (2005) angegeben. Dieser Unterschied ist, da die berechnete N-Aufnahme von  $987 \text{ g pro Platz und Jahr}$  nahezu identisch mit  $984 \text{ g pro Platz und Jahr}$  nach DLG (2005) ist, direkt auf die in der vorliegenden Arbeit ange-setzte Formulierung für die N-Retention zurückzuführen, die niedriger als der von DLG (2005) verwendete Standardwert nach LfL (2006) ist.

Die berechneten VS-Ausscheidungen lagen Anfang der 1990er Jahre bei  $13,8 \text{ g Platz}^{-1} \text{ d}^{-1}$ , sanken anschließend bis auf  $12,4 \text{ g Platz}^{-1} \text{ d}^{-1}$ , um ab 2001 wieder merklich anzusteigen. 2005/2006 liegt die berechnete VS-Ausscheidungsrate bei  $18,3 \text{ g Platz}^{-1} \text{ d}^{-1}$ , was auf eine erhöhte Fut-teraufnahme infolge von größeren Tiergewichtszunahmen zurückgeht.

Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag zur wissenschaftlich fundierten Analyse von Potenzialen zur Emissionsminderung. Mit dem vorgestellten prozessorientierten Berechnungsverfahren ist direkt nachzuvollziehen, wie Tier-eigenschaften, Mastkennwerte und Fütterungsparameter den Umfang der Ausscheidungen beeinflussen. Aus den Ergebnissen lassen sich produktbezogene, d. h. auf das Kilo an vermarktbarem Fleisch bezogene Ausscheidungs-werte ableiten, wie Abbildung 4 zeigt.

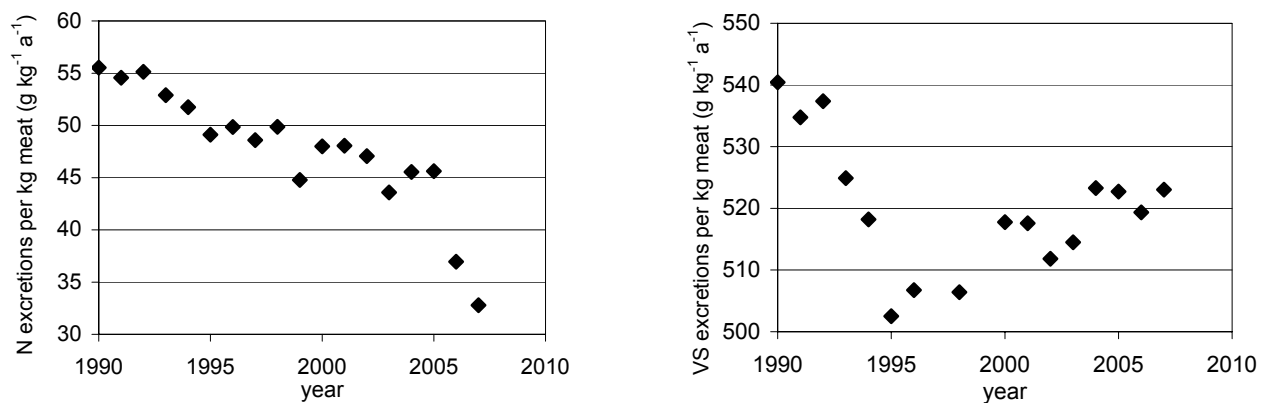


Figure 4:

Time series of calculated N (left) and VS (right) excretions per kg meat produced annually.

Abbildung 4:

Berechnete Zeitreihen der N-Ausscheidungen (links) und VS-Ausscheidungen pro kg jährliche Schlachtausbeute.

As a general rule, increased animal performance (i. e. increased daily growth rates and hence increased meat production per animal) leads to an increased amount of N excretions per place and year, while, however, the amount of N excretions relative to the mass of meat produced decreases. For the VS excretions the decreasing trend is compensated by the effect of strongly increasing animal weight gain rates during the last years.

Results like those obtained by the calculation methods presented in this paper are of great importance for the development of emission mitigation measures.

For the future it would be preferable to obtain the calculation procedure input data in finer spatial resolution. More information on feed properties would also be worthwhile. Experience in establishing emission inventories has shown that an improved data base is likely to lead to "emission mitigation by means of calculation" only.

## 5. Acknowledgements

Barbara Amon and Nicholas Hutchings, co-chairs of the Agriculture and Nature Panel, UNECE Task Force on Emission Inventories and Projections, critically reviewed this text for which the authors wish to express their thanks.

In aller Regel führt die Steigerung der tierischen Leistung, d. h. der täglichen Gewichtszunahme und damit der Fleischproduktion pro Tier, zwar zu einer Zunahme der N-Ausscheidungen pro Platz und Jahr, die N-Ausscheidungen pro Kilogramm Fleisch nehmen dagegen ab. Bei den VS-Ausscheidungen wird deutlich, dass der Abnahmetrend in den letzten Jahren infolge stark zunehmender Zuwachsraten kompensiert wird.

Ergebnisse dieser Art, wie sie mit den in dieser Arbeit vorgestellten Berechnungsmethoden zu erzielen sind, sind von großer Bedeutung für die Entwicklung von Maßnahmen zur Emissionsminderung.

Für die Zukunft wäre eine feinere räumliche Auflösung der in die Berechnungen eingehenden Daten wünschenswert, ebenso wie eine Verdichtung der Futtereigenschaftsdaten. Analog zu anderen Bereichen der Emissionsberechnung könnte eine verbesserte Datenbasis bereits rein rechnerisch zu einer Emissionsminderung führen.

## 5. Danksagungen

Barbara Amon und Nicholas Hutchings, die Vorsitzenden des Agriculture and Nature Panel, UNECE Task Force on Emission Inventories and Projections, haben den Text kritisch durchgelesen, wofür Ihnen herzlich gedankt sei.



## References

- Anonymus (1997) Futterwertleistungsprüfung : Masthühnerküken-Alleinfutter im Test. DGS Intern 14:10-11
- Anonymus (2001) Masthühnerküken-Alleinfutter I: Futterwertleistungsprüfung 2001. DGS-Magazin 40:28-32
- Bartsch H-J (1974) Mathematische Formeln. Köln : Buch- und Zeit-Verlagses, 508 p
- BMU – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2006) Abschätzung der Folgen der thematischen Strategie zur Verbesserung der Luftqualität für Deutschland : Art der Maßnahmen, deren Wirkung und Kosten ; Hintergrundpapier des BMU, Referat IG I 3 – Gebietsbezogene Luftreinhaltung ; Stand: März 2006 [online]. <[http://www.bmu.de/files/luftreinhaltung/downloads/application/pdf/strategien\\_luftqualitaet.pdf](http://www.bmu.de/files/luftreinhaltung/downloads/application/pdf/strategien_luftqualitaet.pdf)> [date of quotation 2008-10-30]
- Damme K (1994) LVA Kitzingen : Broiler-Herkunftsprüfung 1994. DGS-Magazin 39:8-9
- Damme K (1995) Gemischt oder getrenntgeschlechtlich? DGS Intern 51/52:7-10
- Damme K (1997) Lehr- und Versuchsstation für Kleintierzucht Kitzingen : 12. Mastherkunftsprüfung für Jungmasthühner. DGS Intern 13:3-5
- Damme K (2001) Mastgeflügel in der Ökoproduktion : welche Hybriden eignen sich für die Ökomast. DGS-Magazin 48:25-28
- Damme K, Lemme A, Petri A (2005) Mast von Biohähnchen : über kristalline Aminosäuren sollte diskutiert werden. DGS-Magazin 9:24-29
- Damme K, Rychlik I (2001) 13. Bayerische Herkunftsprüfung für Masthybriden : Rasche Gewichtsentwicklung bei bester Futterverwertung. DGS-Magazin 5:24-29
- Dämmgen U, Haenel H-D (2008) Emissions of greenhouse gases and gaseous air pollutants : a challenge for animal nutrition. Proc Soc Nutr Physiol 17:163-167
- Dämmgen U, Lüttich M, Haenel H-D, Döhler H, Eurich-Menden B, Osterburg B (2007) Calculations of emissions from German agriculture - National Emission Inventory Report (NIR 2007 for 2005 : methods and data (GAS-EM). Landbauforsch Völkenrode SH 304:9-243
- destatis, FS3 R4.2.1 – Statistisches Bundesamt Fachserie 03, Land- und Forstwirtschaft, Fischerei : Reihe 4.2.1: Schlachtungen und Fleischgewinnung. Wiesbaden : Statistisches Bundesamt
- DLG - Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (2005) Bilanzierung der Nährstoffausscheidungen landwirtschaftlicher Nutztiere. Frankfurt a M : DLG-Verl, 69p, Arbeiten der DLG 199
- EMEP/CORINAIR (2006) Joint EMEP/CORINAIR atmospheric emission inventory guidebook : manure management regarding nitrogen compounds [online]. <<http://reports.eea.europa.eu/EMEP-CORINAIR4/en/B1090vs2.pdf>> [date of quotation 2008-10-30]
- Grashorn M (2000) Bessere Fleischqualität, aber Mehrkosten bei extensiver Haltung. DGS-Magazin 22:27-32
- Hadorn R, Wiedmer H (1998) Welchen Einfluß hat die Besatzdichte auf die Leistung? DGS-Magazin 49:22-26
- Haenel H-D, Dämmgen U (2007a) Consistent time series of data to model volatile solids and nitrogen excretions of poultry : 1. General considerations and pullets. Landbauforsch Völkenrode 57(4):349-362
- Haenel H-D, Dämmgen U (2007b) Consistent time series of data to model volatile solids and nitrogen excretions of poultry : 2. Laying hens. Landbauforsch Völkenrode 57(4):363-390
- Haenel H-D, Dämmgen U (2009) Consistent time series of data to model volatile solids and nitrogen excretions of poultry : 3a. Broilers, fattening procedures and animal properties. Landbauforsch Völkenrode 59(1):61-85
- Hennig A, Poppe S (eds) (1976) Abprodukte tierischer Herkunft als Futtermittel. Berlin : VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, 232 p
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (1996) Greenhouse gas inventory reference manual : Vol. 3: Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Paris : OECD
- Klein FW (1991a) Jungmasthühner im Test : Ergebnisse aus der LVA Kitzingen. DGS-Magazin 16:452-454
- Klein FW (1991b) 24. Bayerische Futterwertleistungsprüfung für Broilermastfutter. DGS-Magazin 18:510-512
- Lüke M, Simon I, Poteracki P (2004) Hähnchenherkünfte im Vergleich [online]. <[http://www.duesse.de/tierhaltung/gefluegel/versuche/masthaehnchen/2004\\_haehnchen\\_iii.pdf](http://www.duesse.de/tierhaltung/gefluegel/versuche/masthaehnchen/2004_haehnchen_iii.pdf)> [date of quotation 2007-01-17]
- Poteracki P (1991) Jungmasthühner im Test : Ergebnisse aus der LVA Haus Düsse. DGS-Magazin 13:365-367
- Poteracki P (1994) LVA Haus Düsse : Broiler-Herkunftsprüfung 1994. DGS-Magazin 39:6-7
- Poteracki P (1995) 60. Futterwertleistungsprüfung für Masthühnerküken-Alleinfutter : Große Unterschiede in Bezug auf Wirtschaftlichkeit. DGS Intern 27:6-8
- Poteracki P (1996) Haus Düsse : Broiler-Herkunftsprüfung 1995. DGS Intern 16: 4-5
- Poteracki P, Adam F (1993a) LVA Haus Düsse : 56. Futterwertleistungsprüfung für Broilermastfutter. DGS-Magazin 1:7-9
- Poteracki P, Adam F (1993b) LVA Haus Düsse : 57. Futterwertleistungsprüfung für Broilermastfutter. DGS-Magazin 5:10-12
- Poteracki P, Sommer W, Stalljohann G (1994) LVA Haus Düsse : 59. Futterwertleistungsprüfung für Broilermastfutter. DGS-Magazin 21:6-8
- Simon I (2001) Herkunftsprüfung 2000 für Masthühner auf Haus Düsse : Sehr gute Mastendgewichte. DGS-Magazin 14:10-13
- Simon I, Stegemann J (2005) Erste Erfahrungen mit der neuen Cobb [online]. <[http://www.duesse.de/gefluegel/pdfs/cobb\\_iii\\_2005.pdf](http://www.duesse.de/gefluegel/pdfs/cobb_iii_2005.pdf)> [date of quotation 2007-01-17]
- Soliman MAH, Tawfik ES, Hebler W, Klein W, Galal AG (1990) Schlachtkörperwert von Broilern : Gibt es Unterschiede zwischen den Herkünften? DGS-Magazin 16:454-457
- Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar T, Castel V, Rosales M, de Haan C (2006) Livestock's long shadow : Environmental issues and options [online]. <<http://www.fao.org/docrep/010/a0701e/a0701e00.htm>> [date of quotation 2008-10-30]
- Tiller H (1990) Läßt sich die Schlachtkörperqualität des Broilers durch Fütterung beeinflussen? DGS-Magazin 19:307-310
- Tüller R, Velten HJ (1991) Bringt eine Futterrestriktion bei Masthähnchen weniger Fett? DGS-Magazin 10:275-276
- Tüller R, Velten HJ, Poteracki P (1990) Schlachtkörperqualität von Hähnchen : Einfluß verschiedener Futterfabrikate. DGS-Magazin 19:311-313
- Webb J, Misselbrook TH, Sutton MA (2005) Ammonia emission inventories, uncertainty and sensitivity analysis. In: Kuczyński T, Dämmgen U, Webb J, Myczko A (eds) Emissions from European agriculture. Wageningen : Wageningen Academic Publ, pp 113-124
- Wecke C, Sünder A, Liebert F (2006) Untersuchungen zum Futterwert von Sojalezithin : Vorläufige Ergebnisse. In: Rodehurscord M (ed) 9. Tagung Schweine- und Geflügelernährung : 28.-30. November 2006; Halle (Saale) : Tagungsband. Halle/Saale : Univ, 280-282
- ZMP – Zentrale Markt- und Preisberichtsstelle für Erzeugnisse der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft GmbH (1990-2006) Marktbilanz : Eier und Geflügel. Bonn : ZMP

## Long term effects of heavy metal enriched sewage sludge disposal in agriculture on soil biota

Kirsten Stöven\* and Ewald Schnug\*

### Abstract

Long term effects of heavy metal pollution caused by decennial sewage sludge disposal ( $12 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ ) from 1980 to 1990 on soil biota of an experimental field in Northern Germany were investigated 16 years after the last sludge application. The plots still exist to date as permanent pasture. The consequences of the soil treatment were shown by means of heavy metal concentrations of soil and earthworms. Additional effects on soil micro-organisms by enzyme activities were investigated.

The disposal of heavy metal enriched sewage sludge caused increased soil heavy metal concentrations compared to mineral fertilised control plots. The increased soil heavy metal concentration was transferred to soil organisms. The earthworm biomass from the sewage sludge treated plots bore increased heavy metal concentrations. Cadmium showed the highest transfer factor from soil to earthworms. The amount of transfer into biomass is specific for each element and depends on heavy metal soil concentration. Despite the higher heavy metal concentration of earthworm biomass, the number of earthworms was increased in soil of the sewage sludge treated plots which is attributed to the enhanced soil organic matter (SOM) concentration. The number of earthworms did not correlate significantly with SOM but the weight of earthworms did.

The microbial activities of dehydrogenase and alkaline phosphatase enzymes were reduced in soil of the sewage sludge treated plots compared to the control plots. The enzyme activities of cellulase and protease however were enhanced by the application of heavy metal enriched sewage sludge compared to the control plots. On the one hand sewage sludge addition enhanced soil organic matter concentration; on the other hand its microbial decomposition was retarded by toxic effects of heavy metals due to reduced enzyme activities.

**Keywords:** *Sewage sludge, heavy metals, earthworms, microbial enzyme activities*

### Zusammenfassung

#### **Biotische Nachwirkungen der Befruchtung landwirtschaftlicher Böden mit schwermetallreichem Klärschlamm**

Die biotischen Auswirkungen einer durch zehnjährige Klärschlammbehandlung ( $12 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ) verursachten Schwermetall-Belastung eines Bodens in Norddeutschland wurden 16 Jahre nach der letzten Schlammbehandlung untersucht. Bewertet wurden die Gehalte an Schwermetallen in Boden und Regenwürmern sowie die Enzymaktivitäten von Mikroorganismen im Boden. Die Ausbringung von mit Schwermetallen angereichertem Klärschlamm verursachte im Vergleich zur mineralischen Düngung erhöhte Schwermetallgehalte im Boden, welche auf Bodenorganismen übertragen wurden. Regenwürmer von Böden mit Klärschlammapplikation zeigten ebenfalls erhöhte Schwermetallkonzentrationen. Cadmium wies den höchsten Transferfaktor vom Boden zum Regenwurm auf. Die Höhe des Transferfaktors war elementspezifisch und abhängig von der Schwermetallkonzentration im Boden. Trotz der höheren Schwermetallkonzentration in der Biomasse der Regenwürmer war deren Anzahl im Boden der mit Klärschlamm behandelten Fläche erhöht, was auf den gleichfalls gesteigerten Gehalt an organischer Substanz (SOM) zurückgeführt wird.

Die Aktivitäten von Dehydrogenase und alkalischer Phosphatase waren in Klärschlamm-behandelten Böden vermindert. Cellulase und Protease-Aktivitäten wurden hingegen durch die Applikation von mit Schwermetallen angereichertem Klärschlamm erhöht. Klärschlamm-Befruchtung erhöhte somit zwar der Gehalt an organischer Substanz im Boden, die toxische Wirkung der Schwermetalle verzögerte jedoch den biologischen Abbau des Klärschlammes.

**Schlüsselworte:** *Klärschlamm, Schwermetalle, Regenwürmer, mikrobielle Enzymaktivitäten*

\* Julius Kühn-Institut (JKI), Institute for Crop and Soil Science, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, Germany

## 1. Introduction

Sewage sludge is a by-product of wastewater treatment and described by Förstner (2004) as a “metal-containing waste material”. Sewage sludge however contains also reusable plant nutrients, essential trace elements and organic matter (Parat et al., 2005; Hamell and Holzwarth, 1999; Stevenson and Cole, 1999; Benickser, 1997). Thus the disposal of sewage sludge as fertiliser on agricultural land has become a common practice (Pescod, 1992) which was introduced in European countries during the 1970's (Giller et al., 1998). However sewage sludge can also be a hazardous waste as for heavy metals (Creamer et al, 2008). The heavy metals are associated with the organic matter (Hamell and Holzwarth, 1999; Stevenson and Cole, 1999). McBride (1995) used the term “time bomb” for sewage sludge to underline the danger of sewage sludge disposal on soil and explain that adsorbed heavy metals could be released in the course of organic matter decomposition, and affect herbal and faunal organisms. Long term effects of arable soil pollution caused by heavy metal enriched sewage sludge were assessed 16 years after the last application. Heavy metal concentrations in soil and earthworm biomass as well as microbial enzyme activities were used as indicators.

## 2. Material and methods

### 2.1 Site and soil treatment

Investigations were carried out on soil from a long-term field trial which is located at the former Federal Research Centre for Agriculture (FAL) in Braunschweig, Germany (10° 27' E, 52° 18' N, 81 m height above sea level). The soil is composed of 46 % sand, 47 % silt and 7 % clay hence it is characterized as a sandy loam / loam or Cambisol, respectively; after FAO (2006) or USDA classification. Field plots were treated with sewage sludge which was enriched with heavy metals up to the permitted threshold levels of the German Sewage Sludge Ordinance which was in force at beginning of the experiment (German Federal Ministry of the Interior (1982)). Heavy metals were added as water soluble chlorides.

The sewage sludge was stored anaerobic for six weeks to enable transformation of heavy metal chlorides to less available organic or sulphidic species (Fließbach, 1991; Stöven et al., 2005). Total heavy metal concentrations in the sludge applied from 1980–1990 were (mg kg<sup>-1</sup>): Cd 65, Cr 2610, Cu 2011, Ni 387, Pb 2166, Zn 6652. Elements not enriched as As, Fe, Mn, Mo and U are also considered in this study. Results of chemical and biological investigations are compared to samples of plots treated with 90 kg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> N (= control plots).

### 2.2 Analytical methods

Soil was dried and sieved to 2 mm particle size. The total heavy metal concentrations of soil and earthworms were determined by acidic microwave digestion.

Microwave digestion of dry sample material followed the VDLUFA (2000) method for total phosphate concentration. 0.50 g sample material was digested in 6 ml HNO<sub>3</sub> (65 %) and 1.5 ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (30 %) in a PFA vessel at 120 °C for 5 min. and approximate 200 °C for 15 min. After cooling and filtering the extract was transferred to a 50 ml graduated flask and made up to 50 ml with aqua bidist.. The quantitative determination of heavy metals was performed with ICP-MS.

Earthworms were collected from soil and fixed in formalin according to DIN 23611-1:2006, rinsed with tap water and subsequently dried at 70 °C in an oven. Dried earthworms were ground by means of a ball mill (Retsch RS 1, Retsch, Haan, Germany) with heavy metal free zirconium tools.

The soil organic matter (SOM) concentration was determined by loss of ignition at 550 °C in a muffle furnace (DIN EN 12879).

#### Microbial parameters

Microbial enzyme activities of alkaline phosphatase (APA), cellulase (CLA) and protease (PTA) were determined according to Schinner et al. (1996). The method of Schinner et al. (1996) for microbial enzyme activity of dehydrogenase (DHA) was modified for only 40 % of the recommended soil weight.

### 2.3 Data analysis

The significance of heavy metal effects on soil and soil biota was evaluated using the least significance difference (LSD) test provided by the SPSS 12.0 software (SPSS, Chicago IL).

## 3. Results and discussion

### 3.1 Effect of sewage sludge application on soil parameters

The total heavy metal concentration of disposed sewage sludge from 1980-1990 is composed of the native sewage sludge heavy metal concentration and added heavy metals (Stöven et al 2005). The total amounts of heavy metals applied with sewage sludge were presented in materials and methods, site and soil treatment. Beside sludge disposal soil heavy metal pollution is constantly global caused by atmospheric depositions due to traffic emissions (Hildebrand et al., 2005, Legret and Pagotto, 2006, Li et al. 2007) and industrial processes. Also applied agricultural pesticides and fertilisers can pollute agricultural soil by heavy metals. The decennial application of heavy metal enriched sewage

Table 1:

Soil heavy metal concentrations in a Northern German Cambisol 16 years after the last sewage sludge application

| Plot                        | Cd  | Cr  | Cu  | Ni  | Pb  | Zn   |
|-----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Control plots               | 0.1 | 1.2 | 1.5 | 1.8 | 0.5 | 12.5 |
| Sewage sludge treated plots | 0.2 | 1.5 | 1.8 | 2.1 | 0.6 | 15.0 |
| LSD5%                       | 0.1 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.1 | 2.5  |

sludge on agricultural soil increased the soil concentrations of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn significantly (Table 1).

Soil concentrations of As and Fe which were not enriched in the applied sludge were also increased, however not significantly. The soil concentration of Mn was not affected by sewage sludge addition. The soil concentration of Mo was also increased significantly (Table 1). The soil concentration of U was not increased by sewage sludge addition (Table 1).

### 3.2 Soil and soil organic matter (SOM)

The decennial sewage sludge application caused a significant increase in soil organic matter concentration (Stöven et al. 2005; Table 2). The maintained soil organic matter concentrations support the "time bomb hypothesis" of McBride (1995).

Table 2:

Soil organic matter concentration, number and fresh weight of earthworms 16 years after the last sewage sludge disposal in a Cambisol in Northern Germany

| Plot                              | SOM [%] | Number of earthworms [no m <sup>-2</sup> ] | Weight of earthworms [g m <sup>-2</sup> ] |
|-----------------------------------|---------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Control plots                     | 3.6     | 66                                         | 28.4                                      |
| Sewage sludge treated plots       | 5.0     | 76                                         | 47.8                                      |
| LSD5%                             | 0.3     | 26.4                                       | 14.5                                      |
| SOM = soil organic matter         |         |                                            |                                           |
| LSD = last significant difference |         |                                            |                                           |

Heavy metals in soil occur in soil in different chemical species (Stevenson and Cole, 1999) and also in different association with soil organic matter. In sewage sludge heavy metals are mostly organically bound (Benickser, 1997). This relation is verified in the investigations reported here through correlations for Cd, Mo, Ni, Zn and Cr (Table 3).

### 3.3 Effects of long term sewage sludge application on earthworms

The presented results refer to the native occurring earthworms of the investigated site that were extractable by formalin. The number of earthworms was increased not significantly in soil of sewage sludge treated plots due to the enhanced soil organic matter (SOM) concentration. At the control plots with 3.6 % SOM, 66 earthworms m<sup>-2</sup> were found compared to 76 earthworm m<sup>-2</sup> at 5 % SOM in sewage sludge treated plots (Table 2). However, their biomass (EWB) was increased significantly in sewage sludge treated plots as has also been reported by (Lee, 1985). But also, the correlation between the number of earthworms and SOM was not significant (Table 2).

Earthworms are exposed to the soil properties of their surrounding habitat. They also feed on the soil, respectively the soil organic matter (Kizilkaya, 2005) and therefore it was expected that the element composition of earthworms is also affected by long term sewage sludge application. The heavy metal concentrations of earthworms clearly reflected the increase of soil heavy metal concentrations caused by sewage sludge application (Table 4).

Earthworms collected from sewage sludge treated plots showed generally increased heavy metal concentrations compared to those collected from control plots (Table 4). Significantly increased were the concentrations of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn.

Ireland (1983) reported heavy metal accumulation in earthworms both in contaminated and not-contaminated soils. Earthworms feed on soil and can indicate soil pollution by heavy metals due to heavy metal accumulation in their biomass (Morgan and Morgan, 1993; Kizilkaya, 2004). In this study the accumulation factor of As, Cd, Cu, Fe, Mo and Zn in earthworms from control plots exceeded the accumulation factors of these elements in sewage sludge treated plots (Table 5). The accumulation of heavy metals in tissue makes earthworms useable as bio-indicator to monitor hazardous soil pollutions for human and environment (Edwards, 2004; Hinton and Veiga, 2002). However, heavy metal accumulation in earthworms is not only determined by soil heavy metal concentrations (Nahmani et al., 2005).

[illegible]



The observed moderately high Cd concentration in earthworms which is not significantly correlated to the soil Cd concentration (Table 3) and taking into account the high transfer factor suggests an immobilisation of Cd in the tissue of earthworms.

### Molybdenum

Mo is an essential component of several animal and microbial enzymes (Anke, 2004).

In this investigation Mo was only transferred from soil to earthworms in sewage sludge treated plots but not in the control plots. Furthermore the Mo concentration of earthworms is significantly correlated to the soil Mo concentration (Table 3). Also Yoshida et al. (2005) found Mo transfer factors > 1. Asawalam and Johnson (2007) found increased Mo concentrations in soil in the direct vicinity of earthworms which might be derived from earthworm casts. Tomati et al. (1996) assume that casts are settled by micro-organisms rich in Mo-containing enzymes for N-fixation which might be ingested with soil.

### Zinc

Zinc is an essential trace element of all living systems (Peganova and Eder, 2004) and is dynamically regulated after uptake by earthworms (Eijsackers, 2004). The results of the research presented here also show a Zn concentration with significant correlation between concentrations in soil and earthworms (Table 3). The high transfer factor for Zn in control plots suggests also an active absorption of Zn by earthworms.

### 3.4 Effects of long term sewage sludge application on microbial enzyme activities

The metabolic activity of soil micro-organisms is essential for organic matter turnover. The microbial community in soil responds to changes in the organic matter composition and environmental conditions in a shift in metabolic rates (Schinner et al., 1996).

Giller et al (1998) assume that micro-organisms are far more sensitive to heavy metal soil pollution than soil fauna. The authors' differentiate between chronic and acute effects of heavy metals on micro-organisms.

By all means, 26 years after the first application of heavy metal enriched sewage sludge effects observed in enzyme activities are chronic ones.

The enzyme dehydrogenase is involved in intracellular metabolism as oxidoreductase (Schinner et al., 1996). The activity of dehydrogenase activity (DHA) is thought to reflect total oxidative activity of soil micro-organisms (Ladd, 1978). Alkaline phosphatase activity (APA) is mainly produced by micro-organisms in order to mineralise organically bound P-components of organic matter (Schinner et al., 1996). The cellulase activity (CLA) refers to the cleavage of cellulose the most abundant natural organic compound in

soil and belongs to the carbon metabolism. Proteins in soil derive from dead plants and animals which decomposition is performed by microbial protease (PTA) enzymes of the nitrogen metabolism (Schinner et al., 1996).

Table 6:

Microbial enzyme activities in soil 16 years after the last sewage sludge application

| Treatment                      | DHA<br>[µg TPFg <sup>-1</sup><br>dm 24 h <sup>-1</sup> ] | APA<br>[µg p-NP<br>g <sup>-1</sup> dm h <sup>-1</sup> ] | CLA<br>[µg GE g <sup>-1</sup><br>dm 24 h <sup>-1</sup> ] | PTA<br>[µg tyr g <sup>-1</sup><br>dm 2 h <sup>-1</sup> ] |
|--------------------------------|----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Control plots                  | 220                                                      | 1084                                                    | 22772                                                    | 539                                                      |
| Sewage sludge<br>treated plots | 153                                                      | 890                                                     | 89586                                                    | 628                                                      |
| LSD <sub>5%</sub>              | 11                                                       | 69                                                      | 9258                                                     | 12                                                       |
| DHA                            | = dehydrogenase activity                                 |                                                         |                                                          |                                                          |
| APA                            | = alkaline phosphatase activity                          |                                                         |                                                          |                                                          |
| CLA                            | = cellulolytic activity                                  |                                                         |                                                          |                                                          |
| PTA                            | = proteolytic activity                                   |                                                         |                                                          |                                                          |
| LSD                            | = last significant difference                            |                                                         |                                                          |                                                          |

The microbial activities of dehydrogenase and alkaline phosphatase were significantly decreased by sewage sludge addition but the activities of cellulase (CLA) and protease (PTA) were increased (Tab. 6). The investigated enzymes are involved in the degradation of soil organic matter. Thus significant negative correlations of DHA and APA with soil organic matter were found (Table 3). The enzyme activities of CLA and PTA however were significant positively correlated to soil organic matter (Table 3). This result is yielded by the sum of distinct heavy metal effects on micro-organisms. Heavy metals are associated to soil organic matter and become effective to micro-organisms during decomposition process (McBride, 1995). The microbial enzyme dehydrogenase (DHA) is involved in a wide range of oxidative decomposition processes (Ladd, 1978). DHA was negatively affected with all investigated metals except Cr (Table 3). APA showed a not significant but poor positive correlation to nearly all considered soil heavy metals except to Fe which was positive and significant correlated. Positive significant correlations between CLA and distinct trace elements and heavy metals, respectively, were found for Mo, Cu, Zn, Ni, Cr, Pb, As and Cd. PTA was significantly positive correlated to Mo, Zn, Cu, Cr, Pb and As (Table 3).

Heavy metals originating from sewage sludge can enhance or reduce microbial enzyme activity depending on their specific concentration and availability and this decides its role between a beneficial trace element and a toxic hazard (Spain, 2003; Kuperman and Carreiro, 1997). The positive correlation of CLA and PTA to As and Cd could be caused by metal tolerant enzymatic active micro-organisms for example (Table 5).

Cd, Mo and Zn which showed high transfer factors to

and accumulation in earthworms were significantly negative correlated to microbial DHA enzyme activity. APA showed not significant smaller positive correlations to these elements while CLA and PTA were significant positive correlated to Cd, Mo and Zn soil concentrations (Table 3).

All correlations between earthworm biomasses and enzyme activities were not significant. Between earthworm biomass and DHA a negative relationship was found. A poor positive correlation to APA was found. The correlation of earthworm biomass to CLA was not significant as also PTA.

## Conclusions

Earthworms and micro-organisms are faced by same soil conditions. Still 16 years after the last sewage sludge application both were affected showing beneficial and adverse effects. Both groups are conducted by their ecological function to decompose organic matter in cooperation. On the one hand earthworms prepare the soil organic matter for successive microbial decomposition by mechanical destruction. Otherwise microbial settlement of organic matter surfaces improves its digestibility by earthworms. In result the degradation of soil organic matter is impeded by heavy metals. Heavy metals were transferred to earthworms presumably introduced to the food chain of earthworm predators. The effects of heavy metals added to soil sustain and are persistent perceivable at all stages of the degradation process of soil organic matter.

## References

- Asawalam D, Johnson S (2007) Physical and chemical characteristics of soil modified by earthworms and termites. *Comm Soil Sci Plant Anal* 38 (3/4):513-521
- Anke MK (2004) Molybdenum. In: Merian E, Anke M, Ihnat M, Stoeppeler M (eds) *Elements and their compounds in the environment : occurrence, analysis and biological relevance ; vol 2, metals and their compounds*. Weinheim : Wiley-VCH, pp 1007-1037
- Benickser G (ed) (1997) *Fauna in soil ecosystems : recycling processes, nutrient fluxes, and agricultural production*. New York : Dekker, 414 p, Books in soils, plants, and the environment
- Cortet J, Gomot-De Vaulflery A, Poinot-Balaguer N, Gomot L, Texier C, Cluzeau D (1999) The use of invertebrate soil fauna in monitoring pollutant effects. *Eur J Soil Biol* 35(3):115-134
- Creamer RE, Rimmer DL, Black, HIJ (2008) Do elevated soil concentrations of metals affect the diversity and activity of soil invertebrates in the long-term? *Soil Use Manage* 24:37-46
- DIN EN 12879 (2001) *Characterization of sludges : determination of the loss on ignition of dry mass*. Berlin : Beuth
- DIN EN 23611 (2007) *Soil quality : sampling of soil invertebrates ; part 1: Hand-sorting and formaline extraction of earthworms*. Berlin : Beuth
- Edwards CA (ed) (2004) *Earthworm ecology*. Boca Raton : CRC Press, 441 p
- Eijsackers H (2004) *Earthworms in environmental research*. In: Edwards CA (ed) *Earthworm ecology*. Boca Raton : CRC Press, pp 321-337
- FAO (2006) *Guidelines for soil description*. Rome : FAO, 95 p
- Fließbach A (1991) *Auswirkungen mehrjähriger, abgestufter Klärschlammgaben auf die mikrobielle Biomasse des Bodens und ihre Aktivität*. 108 p, Göttingen, Univ, Fachbereich Agrarwissenschaften, Diss, 1991
- Förstner U (2004) *Elements and compounds in waste materials*. In: Merian E, Anke M, Ihnat M, Stoeppeler M (eds) *Elements and their compounds in the environment : occurrence, analysis and biological relevance ; vol 1*. Weinheim : Wiley-VCH, pp 163-197
- Giller KE, Witter E, McGrath SP (1998) *Toxicity of heavy metals to micro-organisms and microbial processes in agricultural soils : a review*. *Soil Biol Biochem* 30:1389-1414
- Hamell M, Holzwarth F (eds) (1999) *Heavy metals, trace elements and organic matter concentration of European soils* [online]. Zu finden in <[http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/pdf/heavy\\_metals\\_feasability\\_study.pdf](http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/pdf/heavy_metals_feasability_study.pdf)>
- Herber RFM (2004) Cadmium. In: Merian E, Anke M, Ihnat M, Stoeppeler M (eds) *Elements and their compounds in the environment : occurrence, analysis and biological relevance : vol. 2*. Weinheim : Wiley-VCH, pp 689-708
- Hillenbrand T (2005) *Einträge von Kupfer, Zink und Blei in Gewässer und Böden : Analyse der Emissionspfade und möglicher Emissionsminderungsmaßnahmen* [online]. Zu finden in <<http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/dateien/2936.htm>> [zitiert am 26.05.2009]
- Hinton JJ, Veiga MM (2002) *Earthworms as bioindicators of mercury pollution from mining and other industrial activities*. *Geochem Exploration Environ Anal* 2(3):269-274
- Ireland MP (1983) *Heavy metal uptake and tissue distribution*. In: Satchell JE (ed) *Earthworm ecology : from Darwin to vermiculture*. London : Chapman & Hall, pp 245-265
- Kizilkaya R (2004) *Cu and Zn accumulation in earthworm Lumbricus terrestris L. in sewage sludge amended soil and fractions of Cu and Zn in casts and surrounding soil*. *Ecol Engin* 22(2):141-151
- Kizilkaya R (2005) *The role of different organic wastes on zinc bioaccumulation by earthworm Lumbricus terrestris L. (Oligochaeta) in successive Zn added soil*. *Ecol Engin* 25(4):322-331
- Klärschlammverordnung (AbfKlärV) (1982) *Bundesgesetzblatt : Teil 1 / Bundesminister der Justiz (21):734-739 andere alphabetische Einordnung!!!*
- Kupermann RM, Carreiro MM (1997) *Soil heavy metal concentrations, microbial biomass and enzyme activities in a contaminated grassland ecosystem*. *Soil Biol Biochem* 29(2):179-190
- Ladd JN (1978) *Origin and range of enzymes in soil*. In: Burns RG (ed) *Soil enzymes*. London : Academic Press, pp 51-96
- Lee KE (1985) *Earthworms : their ecology and relationships with soils and land use*. Sidney : Academic Press, 411 p
- Legret M, Pagotto C (2006) *Heavy metal deposition and soil pollution along two major rural highways*. *Environ Toxicol* 27(3):247-254
- Li FR, Kang LF, Gao XQ, Hua W, Yang FW, Hei WL (2007) *Traffic-related heavy accumulation in soils and plants in northwest China*. *Soil Sedim Contamin* 16(5):473-484
- Lukkari T, Taavitsainen M, Vaisanen A, Haimi J (2004) *Effects of heavy metal on earthworms along contamination gradients in organic rich soils*. *Ecotoxicol Environ Saf* 59(3):340-348
- McBride MB (1995) *Toxic metal accumulation from agricultural use of sewage sludge : are USEPA regulations protective?* *J Environ Qual* 24:5-18
- Morgan JE, Morgan AJ (1993) *Seasonal changes in the tissue-metal (Cd, Zn and Pb) concentrations in two ecophysiologically dissimilar earthworm species : pollution-monitoring implications*. *Environ Pollut* 82(1):1-7
- Nahmani J, Hodson ME, Black S (2007) *A review of studies performed to assess metal uptake by earthworms*. *Environ Pollut* 145:202-242
- Parat C, Chaussod R, Lévêque J, Andreux F (2005) *Long-term effects of metal-containing farmyard manure and sewage sludge on soil organic matter in a fluvisol*. *Soil Biol Biochem* 37:673-6797
- Peganova S, Eder K (2004) *Zinc*. In: Merian E, Anke M, Ihnat M, Stoeppeler M (eds) *Elements and their compounds in the environment : occurrence, analysis and biological relevance ; vol 2*. Weinheim : Wiley-VCH, pp 1203-1237
- Pescod MB (1992) *Wastewater treatment and use in agriculture*. Rome : FAO, 125 p, FAO irrigation and drainage paper 47
- Rida A (1996) *Concentrations et croissance de lumbricidéens et de plantes dans des sols contaminés ou non par Cd, Cu, Fe, Pb et Zn : interactions soil-lumbricidéens*. *Soil Biol Biochem* 28(8):1029-1035



- Schinner F, Öhlinger R, Kandeler E, Margasin R (eds) (1996) *Methods in soil biology*. Berlin : Springer, 426 p
- Stevenson FJ (1999) *Cycles in soil : carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micro-nutrients*. New York : Wiley, 427 p
- Spain A (2003) Implications of microbial heavy metal tolerance in the environment. *Rev Undergraduate Res* 2:1-6
- Stöven K, Al-Issa A, Rogasik J, Kratz S, Schnug E (2005) Effect of long term sewage sludge applications on micro-organisms in an arable soil. *Landbau-forsch Völkensrode* 55(4):219-226
- Suthar S, Singh S, Dhawan S (2008) Earthworm as bioindicator of metals (Zn, Fe, Mn, Cu, Pb and Cd) in soils : is metal bioaccumulation affected by their ecological category?. *Ecol Eng* 32(1):89-107
- Tomati U, Galli E, Pasetti L (1996) Effects of beartworm on molybdenum depending activities. *Biol Fertil Soils* 23: 359-361
- Yoshida S, Muramatsu Y, Peijinenburg WGM (2005) Multi-element analyses of earthworms for radioecology and ecotoxicology. *Radioprotection* 40(Suppl 1): S491-S495
- VDLUFA (2000) Total phosphate content. In: *Methodenbuch : die Untersuchung von Sekundärrohstoffdüngern, Kultursubstraten und Bodenhilfsstoffen*. Darmstadt : VDLUFA-Verl, Loseblattsammlung, VDLUFA-Methodenbuch 2.2

## Fütterung und Haltung von Hochleistungskühen

### 4. Methanproduktion, Wasserverbrauch und Anfall von Exkrementen

Klaus Walter\*

#### Zusammenfassung

Wiederkäuer veredeln Futtermittel in qualitativ hochwertige Nahrungsmittel, aber ihnen ist rd. 6 % der anthropogenen Treibhausgasemission anzulasten.

Für jede der von Jouany (2008) diskutierten Methanproduktionsfunktionen wird das Emissionsprofil für eine Zwischenkalbezeit errechnet. Dabei ergeben sich große Unterschiede hinsichtlich Niveau und Verlauf der einzelnen Profile. Die auf den Inhaltsstoffkonzentrationen basierten Funktionen reagieren mit deutlich erhöhtem Methananfall auf den Eiweißüberschuss bei Frischgrasverfütterung ebenso wie auf den höheren Rohfasergehalt bei Grundfutter mit geringerer Qualität.

Die Schätzfunktionen, die den Methananfall nach dem Grund- oder Kraftfutteranteil in der Ration bemessen, konvergieren gegen eine Konstante, wenn wie im letzten Drittel der Laktation der Erhaltungs- und Leistungsbedarf allein aus Grundfutter gedeckt werden kann.

Wird der Methanausstoß an Hand der Futteraufnahme bemessen, so weisen die hier kalkulierten Funktionen ein ähnliches Niveau und einen vergleichbaren Verlauf auf.

Trotz der Unterschiede bei Niveau und Profil ergeben sich für alle Methanproduktionsfunktionen mit steigender Milchleistung deutliche Größendegressionen beim produktspezifischen Methananfall, der bei einer Verdopplung der Milchleistung von 7.000 auf 14.000 kg Milch zwischen 20 bis 50 % betragen kann. Der produktbezogene Wasserverbrauch sowie der Exkrementenanfall mindern sich bei Leistungssteigerungen in ähnlicher Größenordnung.

Die Berechnungen ergeben, dass die Schadgasemission, der Wasserverbrauch und der Anfall von Exkrementen je kg Milch durch Leistungssteigerung und Verbesserung der Grundfutterqualität effizient mindern lassen, so dass sich hier die ökonomischen und ökologischen Interessen ergänzen.

*Schlüsselworte: Methanproduktionsprofil einer Laktationsperiode, produktspezifischer Methananfall und Milchleistung, produktspezifischer Exkrementenanfall und Wasserbedarf*

#### Summary

#### The feeding and husbandry of high performance cows

#### Part 4. Methane production, water consumption and excretion of waste

Ruminants turn feedstuffs into high quality nutrients in their unique digestive systems, but are attributed with creating almost 6 % of the man-made pollution with their methane excretions.

The emission profile is calculated for an interim calving period for each of the methane production functions discussed by von Jouany (2008). Here, there are large differences with regard to the level and course of the individual profiles. The functions based on the component-concentrations in the ration react to the protein surplus in fresh grass feeding, as well as to the higher crude fibre content in low quality basic rations, with significantly higher methane.

The estimation functions that measure the methane according to the portion of basic fodder or concentrate in a ration converge against a constant if, the needs can be covered solely with basic rations.

If the methane excretion is measured on the basis of the feed intake, the calculated functions indicate a similar level and a comparable course.

Despite the difference in the level and profile, all methane production functions result in increasing milk yield with a significant size degression in product-specific methane yields, which contributed between 20 to 50 % with a doubling of the milk yield from 7000 to 14,000 kg milk. The product-related water consumption and also the excrement output reduce at a similar level.

The calculations show that the pollutant gas emissions, water consumption and the level of excrement per kg milk can be efficiently reduced through an increase in yield and improvement of basic ration quality, so that the economic and ecological interests complement each other.

*Keywords: Methane production profile of a lactation period, product specific methane yield and milk yield, product specific excrement yield and water requirement.*

\* Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI), Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik, Bundesallee 50, 38116 Braunschweig

## 1 Einleitung und Fragestellung

Nach Schätzungen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007) ist die Landwirtschaft mit 17 bis 32 % an der weltweiten anthropogenen Treibhausgasproduktion beteiligt. Davon entfallen rund 6 Prozentpunkte auf Methan, das vor allem der Haltung von Wiederkäuern anzulasten ist. Für die stetig wachsende Weltbevölkerung entsteht daraus ein Dilemma, weil diese Tiere die vom Menschen nur bedingt nutzbaren Pflanzen zu wertvollen Nahrungsmitteln veredeln, aber gleichzeitig Schadgase produzieren, die langfristig die menschliche Lebensgrundlage gefährden. Da vorläufig ein Verzicht auf diese Nahrungsmittel nicht zur Diskussion steht, gewinnt die Suche nach Konzepten zur Verminderung der schädlichen Umweltwirkungen zunehmend an Bedeutung.

Jouany (2008) diskutiert und vergleicht eine Vielzahl von Versuchen zur Ermittlung der Methanproduktion von Rindern, die in diesem Beitrag um eine differenzierte, die Versuchsergebnisse nutzende, quantitative Analyse der Milchproduktion ergänzt wird.

## 2 Literatur und Lösungsansatz

Das IPCC (2006) stellt einen ersten globalen Ansatz vor, um die Methanproduktion der Wiederkäuer weltweit zu ermitteln. Gleichzeitig empfiehlt das Gremium diese erste Schätzung um differenzierte Ansätze zu ergänzen und gegebenenfalls regionale Besonderheiten zu berücksichtigen.

Die Arbeiten des IPCC und die dort genannten Quellen stellen eine erste Grundlage für die Bearbeitung dieses Komplexes dar. Hier wird ein Ansatz gewählt, der eine Vielzahl von Versuchsergebnissen nutzt, um weiter führende Ergebnisse zu erzielen.

### 2.1 Literatur

Brade (2008) nennt die Leistungssteigerung und Anpassung der Fett- und Eiweißgehalte an die Erfordernisse des Marktes als Ansatzpunkt zur Minderung der Schadgasemission. Brunsch (2008) konstatiert: "Weidefutter ist unabhängig von der Bezugsgröße mit den geringsten Treibhausgasemissionen verbunden". Die Arbeitsgruppe Landwirtschaftliche Emissionsinventare (2008) setzt ein Bilanzmodell ein, um die Stoffflüsse zu bilanzieren und die Quellen zu identifizieren.

Jouany (2008) gruppiert die wichtigsten bisher vorgelegten Studien zur Methanproduktion von Rindern nach der von den Experimentatoren abgeleiteten Beziehung. Danach steht der Schadgasanfall in Relation zum Grund- und Kraftfutteranteil, zu den Nährstoffgehalten und zur Futteraufnahme (Tabelle 1). Genannt werden die Autoren,

die im Experiment untersuchte Tiergruppe, die Funktionen und die Legende.

Jouany (2008) verleiht der in Tabelle 1 Nr. 3 von Sauvant und Giger-Reverdin (2007) entwickelten Funktion besondere Bedeutung, weil hier mittels einer speziellen statistischen Methode eine Vielzahl von Einzelversuchen in die Auswertung einbezogen werden. Die darüber hinaus von Jouany (2008, Table 2, page 42) aufgelisteten Funktionen konnten bei den Kalkulationen keine Berücksichtigung finden, weil diese auf Inhaltsstoffangaben zum Futter bzw. zu den Rationen basieren, die nur im Experiment zur Verfügung stehen.

Tabelle 1:

Ansätze zur Quantifizierung der Methanproduktion der Wiederkäuer  
Quelle: Jouany (2008, Table 2, page 42, figure 4, page 43)

| Autor                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Tiergruppe | Nr. | Funktion                                                                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| Funktionen basieren auf dem Grund- oder Kraftfutteranteil                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |            |     |                                                                                           |
| Sauvant et al. 1999                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Rinder     | 1   | $M (\%GEI) = 6,4 + 5,42 \text{ KF} - 7,64 \text{ KF} * \text{KF}$                         |
| Ellis et al. 2007                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Milchkühe  | 2   | $M(\text{MJ/d}) = 8,56 + 0,14 \text{ GF}$                                                 |
| Sauvant und Giger-Reverdin 2007                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Rinder     | 3   | $M(\text{MJ/d}) = 13,2 + 4,2 \text{ KF} - 12 \text{ KF} * \text{KF}$                      |
| Funktionen basieren auf Inhaltsstoffkonzentrationen                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |            |     |                                                                                           |
| Giger-Reverdin et al. 1992                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Rinder     | 4   | $M (\%DE) = 9,77 + 0,873 \text{ CF}\%OM$                                                  |
| Kirchgessner et al. 1995                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Milchkühe  | 5   | $M (\text{g/d}) = 63 + 79 \text{ CF} + 10 \text{ NFE} + 26 \text{ CP} - 212 \text{ Fett}$ |
| Yan et al. 2000                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Rinder     | 6   | $M (\text{MJ/d}) = 3,234 + 0,0547 \text{ GEI}$                                            |
| Yan et al. 2000                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Rinder     | 7   | $M (\%GEI) = 0,0522 + 0,0694 \text{ ADF} / \text{DMI}$                                    |
| Funktionen basieren auf dem Niveau der Futteraufnahme                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |            |     |                                                                                           |
| Shibata et al. 1993                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Rinder     | 8   | $M (\text{L/d}) = -17,766 + 42,793 \text{ DMI} - 0,849 \text{ DMI} * \text{DMI}$          |
| Mills et al. 2003                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Milchkühe  | 9   | $M (\text{MJ/d}) = 5,93 + 0,92 \text{ DMI}$                                               |
| Ellis et al. 2007                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Milchkühe  | 10  | $M (\text{MJ/d}) = 3,23 + 0,81 \text{ DMI}$                                               |
| Ellis et al. 2007                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Rinder     | 11  | $M (\text{MJ/d}) = 3,27 + 0,736 \text{ DMI}$                                              |
| ADF= acid detergent Fibre<br>CF%OM = Rohfaser in % der organischen Masse<br>CF = Rohfaser (kg/Tag)<br>CP = Rohprotein (kg/Tag)<br>DMI = Dry Matter Intake (kg/Tag)<br>DE = Digestible Energy (MJ/d)<br>GEI = Gross Energy Intake (MJ/d)<br>GF = Grundfutter % TM<br>KF = Kraftfutteranteil an der TM mit: $0 < \text{KF} < 1$<br>M = Methananfall<br>MJ = Mega Joule<br>NFE = N- freie- Extraktstoffe (kg/Tag) |            |     |                                                                                           |

## 2.2 Lösungsansatz

Die in Tabelle 1 genannten Funktionen werden in das Simulationsprogramm (Walter, 2008a) implementiert und die tägliche Methanproduktion berechnet. Im Einzelnen werden die optimalen täglichen Rationen mittels Linearer Programmierung bestimmt und daraus die Methanproduktion abgeleitet. Für jede der von Jouany (2008) genannten Funktionen wird die Methanproduktion an Hand des Grund- bzw. Kraftfutteranteiles (Tabelle 1, oberes Drittel), der Inhaltstoffkonzentrationen (Tabelle 1, mittleres Drittel) und der Futteraufnahme (Tabelle 1, unteres Drittel) berechnet. Das heißt, dass alle Schätzungen des täglichen Methananfalles auf der gleichen Tagesration beruhen. Die darauf aufbauenden Berechnungen der jährlichen und auf den Liter Milch bezogenen Methanproduktion basieren ebenfalls auf den gleichen täglichen zu Jahresmengen aufsummierten Futtermengen.

Die Wissenschaftler des IPCC (2007) geben einen vergleichsweise einfachen an der Futteraufnahme orientierten Ansatz vor, plädieren aber gleichzeitig für genauere Vorgehensweisen, wenn entsprechende Daten vorliegen. In dieser Arbeit werden alle in Tabelle 1 genannten Schätzer der Methanproduktion kalkuliert und einander gegenüber gestellt. Es gilt die verschiedenen Produktionsfunktionen zu evaluieren, die Unterschiede herauszuarbeiten und die gemeinsamen Tendenzen herauszufiltern, um Ansätze zur Minderung des Treibhausgasanfalles ableiten zu können.

## 2.3 Methodisches Vorgehen

Aus dem optimalen Produktionsprogramm eines Milchvieh haltenden Betriebs werden die innerbetrieblichen Mengen und Verrechnungspreise des Grundfutters in das Simulationsprogramm übernommen (Walter, 2008a). Die Grundfutterbasis umfasst neben Silomais vor allem Grünland, hier Frischgrasverfütterung im Stall, sowie Grassilage 1. und 2. Schnitt für Milchvieh (3. und spätere Schnitte für Jungvieh sowie Trockensteher). Alternativ wird die ganzjährige Verfütterung von konserviertem Grundfutter kalkuliert. Die Qualitäten der Gras- und Maissilagen orientieren sich an den von Meyer (2008) ausgewiesenen Mittelwerten aller Grundfutteranalysen der LUFA Nord-West des Jahres 2008 sowie den positiven und negativen Abweichungen. Das Kraftfutter besteht aus betriebseigenem Futtergetreide, maximal 4 kg pro Tag, Milchviehmischfutter der Energiestufe 4 (18 % Rohprotein und 7 MJ NEL je kg TM) und einer Vitamin- und Mineralstoffgabe von bis zu 150 Gramm je Tier und Tag bei Höchstleistung.

Das Simulationsprogramm (Walter, 2008a) ermittelt die optimalen täglichen Rationen für Milchleistungen, die zwischen 6.000 bis 14.000 kg Milch je Kuh und Jahr bei einer normierten Zwischenkalbezeit von 360 Tagen variieren,

die jeweils mit geringen, mittleren und sehr guten Grundfutterqualitäten kombiniert werden.

Der Methanausstoß wird von den Experimentatoren in Liter, Gramm oder Energieeinheiten je Tier und Tag ausgewiesen, Tabelle 1. Das Simulationsprogramm errechnet den Energieinhalt der Methanproduktion, wobei die Konstanten  $0,72 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$  und  $35,89 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3}$  für die Umrechnung zu Grunde gelegt werden.

Ausgehend von der Feststellung von Brunsch (2008), dass Weidefutter die geringste Schadgasemission aufweist, kann bei der Analyse der Milchproduktion allein kein gravierender systematischer Fehler entstehen, weil vorrangig Grassilage und Frischgras die Grundfutterbasis prägen. Daneben kann Maissilage bei Frischgrasverfütterung mit max. 3 kg TM und bei ausschließlich konserviertem Grundfutter bis zu 50 % der Grundfuttermenge eingesetzt werden. Die Variation der Grundfutterqualität zeigt, dass steigende Leistungen nicht durch Kraftfutter, sondern durch höhere Energie- und Nährstoffkonzentrationen im Grundfutter erzeugt werden (Walter et al., 2005; Walter 2008c).

## 3 Ergebnisse

Die Ergebnisse basieren auf Messungen mit laktierenden Kühen. Die Milchproduktion ist jedoch an eine Trockenzeit, den generativen Zyklus und auch an die Aufzucht gebunden. Hier soll zunächst<sup>1</sup> nur die Milchviehhaltung allein analysiert werden. Im Einzelnen wird die tägliche Methanproduktion kalkuliert und anschließend die der gesamten Zwischenkalbezeit bestimmt. Der Methananfall steht in Beziehung zur Grundfutterqualität, zum Milchleistungsniveau und anderen Effizienzkriterien, die ebenfalls in die Betrachtung einbezogen werden.

### 3.1 Profile der Methanproduktion für eine Zwischenkalbezeit

Abbildung 1 zeigt die Profile der Methanproduktion für die gesamte Zwischenkalbezeit von hier 360 Tagen, wenn die in Tabelle 1 genannten Beziehungen zu Grunde gelegt werden. Dabei weisen die drei Teilgrafiken auf der linken Seite die Profile für ganzjährige Verfütterung von konserviertem Grundfutter, also Gras- und Maissilage, auf. Die Teilgrafiken der rechten Bildhälfte enthalten die Profile der Methanproduktion bei Frischgrasverfütterung<sup>2</sup> während

<sup>1</sup> Mit der geplanten Integration der Aufzucht in das Simulationsprogramm kann die Fragestellung auf die gesamte Lebensdauer der Kuh ausgedehnt werden.

<sup>2</sup> Es wird Frischgrasverfütterung mit Sommerstallhaltung unterstellt, also entsteht der Kuh kein zusätzlicher Energiebedarf für Weidegang, u. U. hügeliges Weideland und Treiben zum Melken in den Stall.

der Vegetation, dabei ist eine Zufütterung von maximal 3 kg TM Maissilage je Kuh und Tag zugelassen.

Die drei Graphen der beiden oberen Teilgrafiken der Abbildung 1 stellen die auf dem Grund- bzw. Kraftfutteranteil bezogenen Beziehungen dar (oberes Drittel der Tabelle 1). Die mittleren Teilgrafiken der Abbildung 1 zeigen die auf Inhaltsstoffkonzentrationen basierten Ansätze (mittleres Drittel der Tabelle 1). Die beiden unteren Teilgrafiken korrespondieren mit den in Tabelle 1 (untere Drittel) dargestellten Funktionen, die die Methanproduktion in Relation zur Futteraufnahme stellen. Alle 11 Graphen der rechten Teilgrafiken beziehen sich auf die gleichen 360 Rationen einer Kuh in 3. Laktation bei ganzjährigem Einsatz von konserviertem Grundfutter, mit 675 kg Lebendgewicht, einer Jahresleistung von 7.000 kg Milch und 4,0 % MilCHFett sowie 3,3 % Milcheiweiß, bei einer ZKZ von 360 Tagen, die am 1. Februar beginnt und für ein Geburtsgewicht des 4. Kalbes von 45 kg ausgelegt ist. Diese Angaben gelten auch für die 11 Graphen in den drei linken Teilgrafiken der Abbildung 1, jedoch wird während der Vegetationsperiode statt Grassilage Frischgras verfüttert.

Zunächst weisen alle sechs Teilgrafiken einige Gemeinsamkeiten auf:

- Ab dem 275. Tag der Laktation lässt sich ein geringer Anstieg der Methanproduktion feststellen, der auf den beginnenden Energie- und Nährstoffbedarf des Fötus<sup>3</sup> sowie des generativen Systems der Kuh zurück zu führen ist.
- Am 130. bzw. 175. Tag der Laktation erreicht die Kuh erstmals eine ausgeglichene Energiebilanz. Danach werden der Energiebedarf und die Versorgung direkt am Erhaltungs- und Leistungsbedarf bemessen, weil keine Defizite mehr auszugleichen sind.
- Am 300. Tag endet die Laktation. Es sind nur noch die Energie- und Nährstoffansprüche für die Erhaltung sowie den Fötus zu erfüllen und der Methananfall liegt bis zum Ende der Zwischenkalbezeit auf einem geringeren Niveau.

Am 91. Tag der Laktation, hier der 1. Mai, beginnt die Versorgung mit Frischgras und endet am 240. Tag, dem 30. November. Daher weisen die Teilgrafiken auf der rechten Hälfte der Abbildung 1 an diesen Tagen Veränderungen der Methanproduktion auf, wenn diese nach Futterart bzw. Inhaltsstoffen bemessen werden.

Die maximale Futteraufnahmekapazität wird hier nach NRC (2001) aus dem Gewicht der Kuh und aus der Milchleistung errechnet. Das Futteraufnahmevermögen wird vom ersten bis zum 130. bzw. 175. Tag der Laktation voll genutzt, weil die Gesamtenergiebilanz nicht ausgeglichen ist. Danach kann der Futteraufwand entsprechend

dem Leistungs- plus Erhaltungsbedarf ausgelegt werden, der bei einer Kuh mit 7.000 kg Milch je Jahr geringer als die maximale Aufnahmekapazität ausfällt, wenn die von der Kammer ermittelten Grundfutterqualitäten (Meyer, 2008) kalkuliert werden. Die beiden unteren Teilgrafiken stellen die Methanproduktion in Abhängigkeit vom Niveau der Futteraufnahme dar. Die Unterschiede zwischen Verfütterung von konserviertem Grundfutter und Frischgrasverfütterung während der Vegetation fallen gering aus. Wegen der in den Betrieben üblichen Begrenzung der Silomaiszufütterung<sup>4</sup> zu Frischgras ergibt sich für die Variante „ganzjährig konserviertes Futter“ ein früherer Bilanzausgleich, der eine Reduzierung der Futtermenge erlaubt und damit einen geringeren Methanausstoß zur Folge hat. Diese Differenzen erweisen sich jedoch als klein im Vergleich zum Niveauunterschied zwischen der von Mills (Tabelle 1, Nr. 9) und den von Ellis (Tabelle 1, Nr. 10 und 11) sowie Shibata (Tabelle 1, Nr. 8) vorgelegten Methanproduktionsfunktionen.

Die beiden mittleren Teilgrafiken der Abbildung 1 stellen die Profile der von den Inhaltsstoffkonzentrationen definierten Methanproduktionsfunktionen dar, die von Yan (Tabelle 1, Nr. 6 und 7), Kirchgessner (Tabelle 1, Nr. 5) und Giger-Reverdin (Tabelle 1, Nr. 4) veröffentlicht wurden.

Wird nur konserviertes Grundfutter eingesetzt (Abbildung 1, Teilgrafik Mitte links), sind vom ersten bis zum 130. Tag der Laktation dem Futteraufnahmeprofil ähnliche Graphen und damit Methanproduktionsprofile zu verzeichnen. Während der letzten 60 Tage der Zwischenkalbezeit, also dem Zeitraum des Trockenstehens, gilt Ähnliches. Im Zeitraum zwischen dem 130. und 300. Tag der Laktation weisen die Funktionen Nr. 4, 5 und 7 eine höhere tägliche Methanproduktion auf, weil hier die Rohfasergehalte zu Grunde liegen. Die Optimierung<sup>5</sup> der Tagesrationen mit dem Ziel Maximierung der Differenz zwischen Erlösen für Milch abzüglich der Futterkosten führt zum Einsatz der preiswerteren Grassilage 2. Schnittes, die aber wegen der höheren Rohfasergehalte eine größere Methanproduktion zur Folge hat. Die Funktion Nr. 6 kalkuliert die Methanerzeugung proportional zum Anteil von ADF je kg TM, dieser fällt während der ersten 130 Laktationstage hoch aus, nimmt mit sinkender Leistung allmählich ab und weist während des Trockenstehens nur vergleichsweise geringe Werte auf.

Wird die Verfütterung von Frischgras ab dem 91. Tag der Laktation zugelassen (Abbildung 1, Teilgrafik Mitte rechts) verdoppelt sich die Methanproduktion der Funktionen

<sup>4</sup> Da Silomais energiereicher ist als Gras und Grassilage mindert eine Reduzierung der Silomaisgabe in der Sommerfütterung die Energiekonzentration in der Ration mit Frischgras.

<sup>5</sup> Die Optimierung kann um einen Ansatz zur Minderung der Methanproduktion erweitert werden, wenn verlässliche, allgemein akzeptierte Methanproduktionsfunktionen vorliegen und eine monetäre Bewertung der Schadgase oder zumindest Grenzen bzw. Grenzwerte vorgegeben werden.

<sup>3</sup> Das NRC (2001) berücksichtigt erst ab dem 80. Tag vor dem rechnerischen Geburtstermin einen Energie- und Nährstoffbedarf für den Fötus.

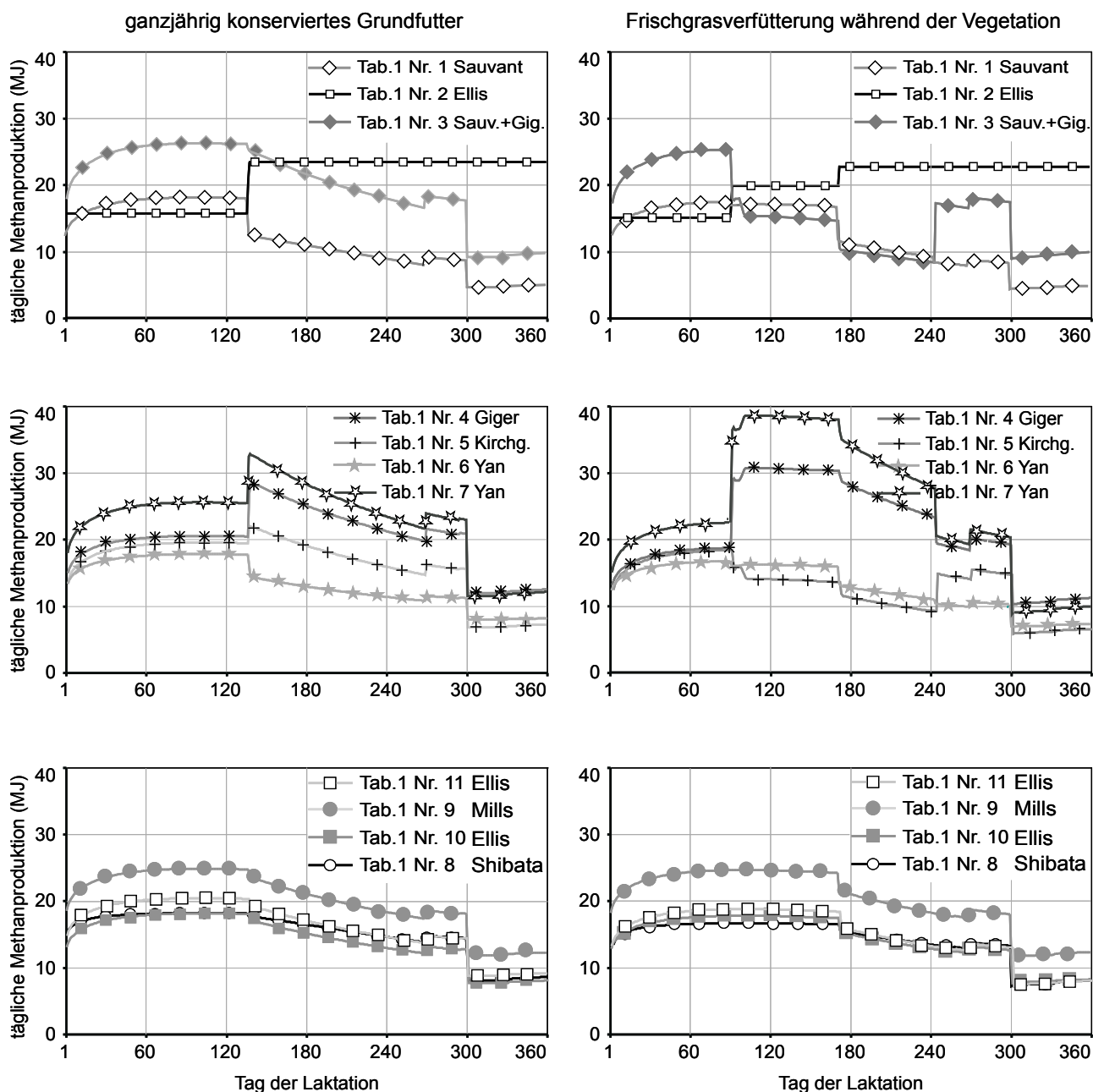


Abbildung 1:

Profil der Methanproduktion einer Kuh in 3. Laktation, mit 675 kg Lebendgewicht, einer Jahresleistung von 7.000 kg Milch, mit 4,0 % Milchfett sowie 3,3 % Milcheiweiß, bei einer ZKZ von 360 Tagen und einem Geburtsgewicht des 4. Kalbes von 45 kg, mit Kalbetermin am 1. Februar, wenn die in Tabelle 1 genannten Methanproduktionsfunktionen kalkuliert werden

Nr. 5 und 7 nahezu, die der Funktionen Nr. 4 und 6 reduziert sich dagegen. Die Funktionen Nr. 5 und 7 enthalten eine positive Beziehung zwischen Energie- sowie Rohproteinkonzentrationen und Methanproduktion, die bei dem eiweißreichen Frischgras einen kräftigen Anstieg zur Folge hat. Die Funktionen Nr. 4 und 6 stellen dagegen eine Beziehung zwischen Energiemerkmalen her, die durch die Optimierung als knapp erkannt und dementsprechend restriktiv eingesetzt werden.

Die beiden oberen Teilgrafiken der Abbildung 1 zeigen die Methanproduktionsprofile der Funktionen, die den Bezug zum Grund- oder Kraftfutteranteil herstellen. Die von Ellis et al. (2007) aus Versuchen abgeleitete Funktion (Tabelle 1, Nr. 2) weist sowohl beim Einsatz von konserviertem Grundfutter als auch bei der Frischgrasfütterung in den ersten 130 bzw. 90 Tagen den geringsten Methanausstoß auf. Ab dem 130. bzw. 170. Tag der ZKZ führt dieser Ansatz zum höchsten Methanausstoß, weil bis

auf die tägliche Vitamin- und Mineralstoffgabe von 100 Gramm nur Grundfutter verfüttert wird. Diese von Ellis entwickelte Funktion zur Ermittlung des Methan-anfalles führt zu einem Kurvenverlauf, der sich deutlich von den übrigen Graphen unterscheidet (Abbildung 1).

Die von Sauvant (1999) sowie von Sauvant und Giger-Reverdin (2007) veröffentlichten Funktionen (Tabelle 1, Nr. 1 und 3) entsprechen eher den Profilen der anderen.

Eine Bewertung der in Abbildung 1 dargestellten Profile der Methanproduktion kann das hier verwendete Simulationsprogramm nicht leisten, da es die vorgegebenen Funktionen lediglich nutzt. Eine Gegenüberstellung der auf den gleichen Rationen basierenden Profile der Methanproduktion weist jedoch auf einige Unterschiede und Unstimmigkeiten hin, insbesondere die Niveauunterschiede beim Einsatz von Frischgras sprechen für weitere Experimente. Während die von Sauvant und Giger-Reverdin (2007) veröffentlichte Funktion (Tabelle 1, Nr. 3) eine gute Übereinstimmung mit den auf Futteraufnahme basierten Funktionen aufweist, weichen die von Ellis (2007) auf Grundfutteranteilen (Tabelle 1, Nr. 2) und die von Yan (2000) auf Nährstoffgehalten basierten Funktionen (Tabelle 1, Nr. 7) deutlich von den anderen Profilen der Methanproduktion ab. Ansätze die sich direkt auf den Grund- oder Kraftfutteranteil stützen, führen langfristig zu Problemen bei der Bewertung der Trockenstehphase,<sup>6</sup> in der kein Kraftfutter<sup>7</sup> eingesetzt wird. Bei weiter verbesserten Grundfutterqualitäten ist die Grundfuttermenge sogar zu begrenzen, um die als nachteilig angesehene Überversorgung zu vermeiden.

Nehmen die Grundfutterqualitäten langfristig weiter zu, tendiert der Kraftfutteranteil sogar während der Laktation gegen Null und alle direkt vom Anteil abhängigen Methanproduktionsfunktionen konvergieren dann gegen die Konstante der jeweiligen Funktion. Das steht nur bedingt im Einklang mit dem Stand des Wissens. Wird der Methanausstoß an einem bzw. an mehreren Inhaltsstoffen bemessen, besteht die Gefahr, dass mit der Weiterentwicklung der Analytik und des Konzeptes zur Nährstoffbewertung die zugehörigen Funktionen „unbrauchbar“ werden, weil neue Bemessungsgrundlagen und Wertmaßstäbe entwickelt werden, wie es die heute nicht genutzten Kennzahlen „NFE“ und „StE“ deutlich machen.

Der tägliche Methanausstoß einer Kuh stellt zwar eine wichtige Kennzahl dar, erlaubt jedoch keine endgültige Bewertung der Milchproduktion. Daher soll im Folgenden

der Methan-anfall je kg Milch, das Leistungsniveau und die Grundfutterqualität als Komplement der Leistungssteigerung diskutiert werden.

### 3.2 Methanproduktion je Liter Milch bei steigenden Milchleistungen

In den Abbildungen 2, 3 und 4 wird für Milchleistungen von 6.000 bis 14.000 Litern der Methan-anfall einer Zwischenkalbezeit ermittelt und je kg Milch ausgewiesen. Erneut wird Frischgrasverfütterung<sup>8</sup> in den drei rechten Teilgrafiken der ausschließlichen Versorgung mit konserviertem Grundfutter (linke Teilgrafiken) gegenübergestellt und die Qualität des Grundfutters variiert. Es werden die aus den eingesandten Silageproben ermittelten durchschnittlichen Qualitäten (Meyer, 2008) in den beiden mittleren Teilgrafiken zu Grunde gelegt. Die beiden oberen Teilgrafiken zeigen den Methan-anfall je kg Milch, wenn die Grundfutterqualität 10 % schwächer ausfällt, die beiden unteren die Ergebnisse für eine um 10 % über dem Mittelwert liegende Grundfutterqualität.

Weil Betriebe mit den besseren Grundfutterqualitäten stets höhere Milchleistungen erzielen, ist die Methanbelastung je kg Milch bei der durchschnittlichen Grundfutterqualität für das Leistungsniveau 6.000 kg und für die hohe Qualität für 6.000 und 7.000 kg gestrichelt dargestellt. Umgekehrt lassen sich mit geringen Grundfutterqualitäten keine hohen Leistungen erzielen, so dass die zugehörigen Graphen in den Abbildungen 2 bis 6 bereits bei 10.000 bzw. 12.000 kg Milch je Kuh und Jahr enden. Um jedoch die Bedeutung der Leistungssteigerung bestmöglich darstellen zu können, wird bei allen Alternativen mit einer Leistung von 6.000 kg Milch je Kuh und Jahr begonnen und jeweils bis zum maximal erzielbaren Leistungsniveau kalkuliert. Bei einer geringeren Grundfutterqualität, die gleichbedeutend mit einer geringeren Konzentration der Wertbestimmenden Inhaltsstoffe ist, können nur Jahresleistungen von maximal 10.000 kg erreicht werden, während die höchsten Qualitäten Milchleistungen von 14.000 kg je Kuh und Jahr ermöglichen.

Abbildung 2 offenbart zwei Auffälligkeiten. Zum einen sind es die deutlichen Unterschiede im Niveau des Methan-anfalles je kg Milch, wenn die Funktionen Nr. 4 (Giger-Reverdin et al., 1992) und Nr. 6 (Yan et al., 2000) mit den Schätzern Nr. 7 (Yan et al., 2000) und Nr. 5 (Kirchgessner, et al., 1995) verglichen werden. Zum anderen ist es die zu

<sup>6</sup> Es sei nochmals darauf verwiesen, dass die Experimente mit laktierenden Kühen durchgeführt worden sind und dass diese Funktionen den Zeitraum des Trockenstehens nicht adäquat abbilden können. Ihre Nutzung ist streng genommen auf die 300 Tage der Laktation zu begrenzen.

<sup>7</sup> Die Anfütterung mit Kraftfutter kurz vor dem Kalben bleibt hier unberücksichtigt.

<sup>8</sup> Da keine Analysen von Frischgras vorliegen, wird die von Zimmer (1969) entwickelte Beziehung zwischen Grassilagequalität und Ausgangsprodukt Gras zu Grunde gelegt. Zimmer zeigt, dass die Silierung mit Verlusten von 3 bis 5 % verbunden ist, daher wird hier für das Frischgras eine um 4 % höhere Nährstoffkonzentration unterstellt.

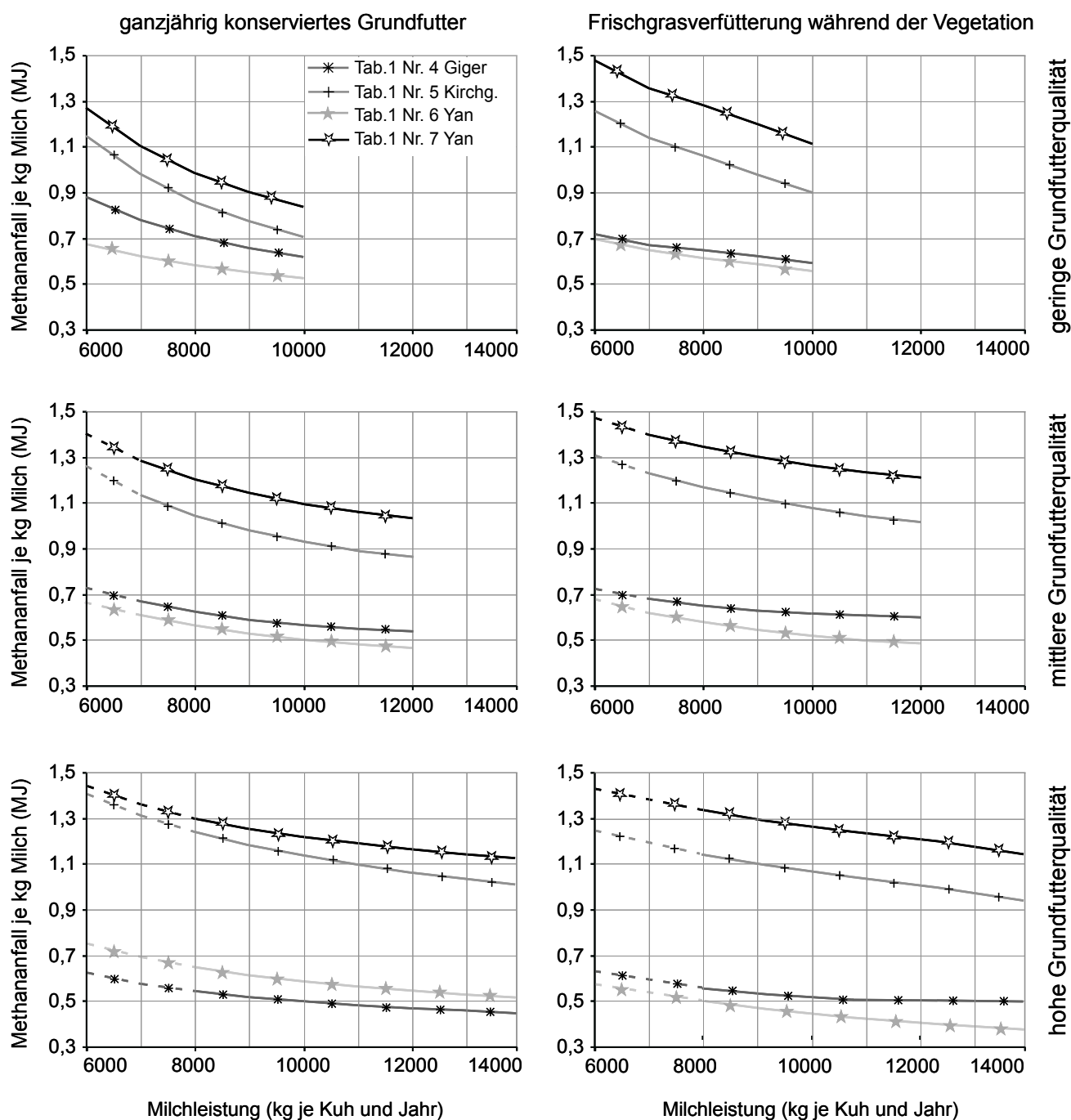


Abbildung 2:

Methanproduktion je kg Milch bei unterschiedlichen Milchleistungen und geringer bzw. mittlerer sowie hoher Grundfutterqualität, wenn die in Tabelle 1 genannten Methanproduktionsfunktionen kalkuliert werden, die auf der Inhaltsstoffkonzentration basieren

verzeichnende Degression des Methanfalles je kg Milch, die mit steigender Grundfutterqualität geringer ausfällt.

Wird der Methanfall je kg Milch nach den Funktionen Nr. 4 bis 7 (Tabelle 1) kalkuliert, wird also von Inhaltsstoffen ausgegangen, dann sind gravierende Niveauunterschiede zwischen zugehörigen Resultaten festzustellen, die das Ausmaß der Degression mit der Leistung weit übertreffen. Der Vergleich mit den in Abbildungen 3 und 4 darge-

stellten Ergebnissen zeigt, dass insbesondere die mit den Schätzern Nr. 7 (Yan et al., 2000) und Nr. 5 (Kirchgessner et al., 1995) gewonnenen Ergebnisse stark abweichen und rechnerisch zu einer hohen Methanproduktion führen.

Erneut ist darauf hinzuweisen, dass das Simulationsprogramm die in den Versuchen gewonnenen Ergebnisse nur nutzt, also nicht im Hinblick auf ihre „Realitätsnähe“ bewerten kann. Es ermöglicht nur Vergleiche, die u. U. von



Experten und Experimentatoren selbst zu diskutieren, zu bewerten, zu ergänzen oder auch zu korrigieren sind.

Abbildung 3 zeigt die Methanproduktion je kg Milch, wenn der Methanfall an Hand der Futteraufnahme (kg TM je Tier und Tag) geschätzt wird. Vergleichbar zu Abbildung 2 werden die Leistungen von 6.000 bis 14.000 kg Milch je Kuh und Jahr variiert, drei Grundfutterqualitäten

analysiert und erneut konserviertes Grundfutter mit der Verfütterung von Frischgras während der Vegetationsperiode verglichen.

Wie schon die Jahresprofile des Methanfalles (Abbildung 1) erkennen lassen, fallen die produktspezifischen Methanbelastungen hinsichtlich des Kurvenverlaufs ähnlich aus, lediglich das Niveau der Funktion Nr. 9 (Mills,

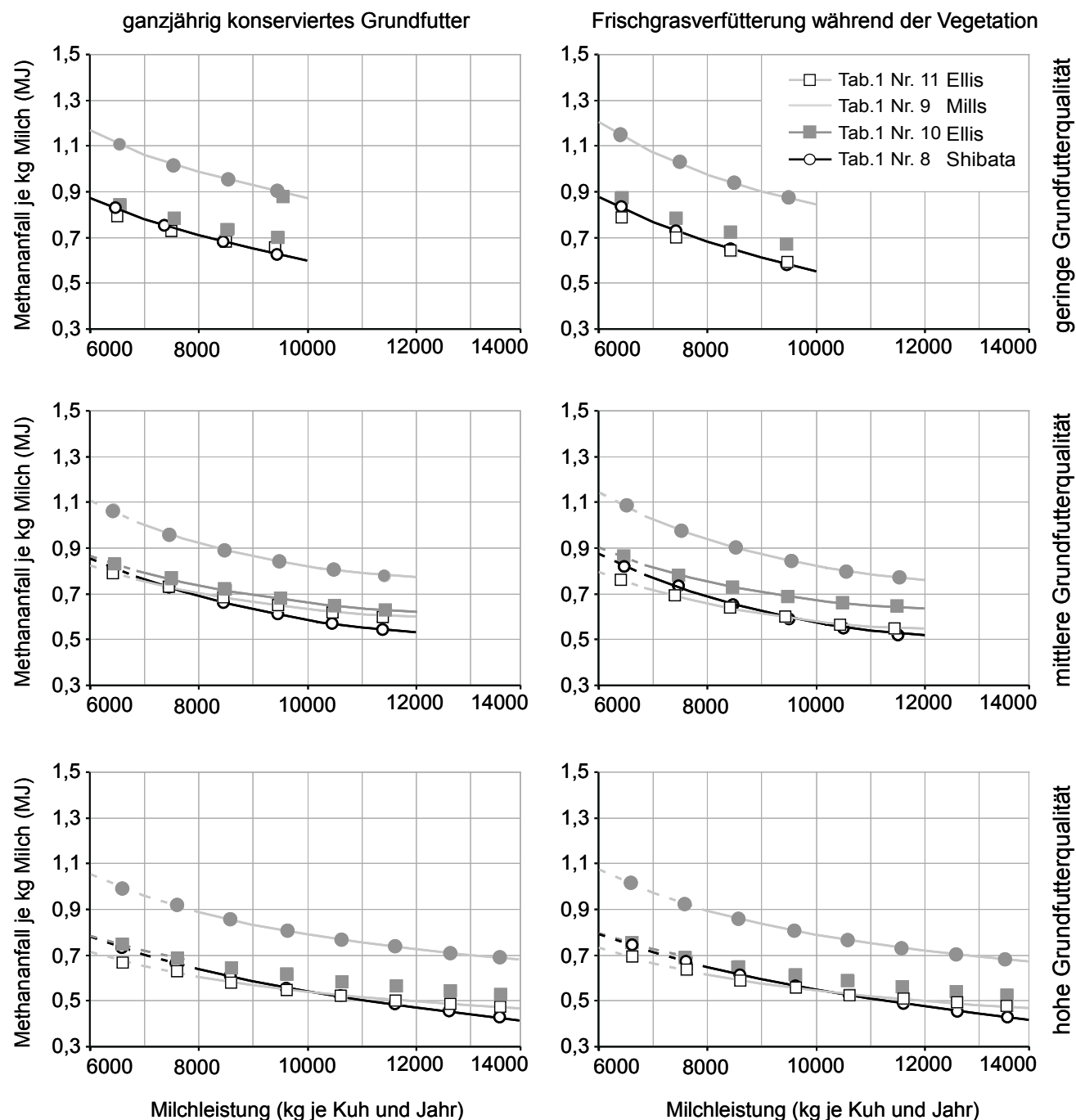


Abbildung 3:

Methanproduktion je kg Milch bei unterschiedlichen Milchleistungen und geringer bzw. mittlerer sowie hoher Grundfutterqualität, wenn die in Tabelle 1 genannten Methanproduktionsfunktionen kalkuliert werden, die auf der Futteraufnahme basieren

2003) liegt um 0,2 bis 0,3 MJ je kg Milch höher. Die Degression bei steigendem Leistungsniveau ist dem der anderen Ansätze zur Bemessung des Methanansfalls ähnlich.

Der Vergleich zwischen den Varianten mit und ohne Frischgraseinsatz zeigt eine geringfügig niedrigere Methanproduktion, wenn nur konserviertes Futter eingesetzt wird. Dieser minimale Vorteil ist bei besseren Leistungen

und Grundfutterqualitäten nicht mehr vorhanden und verliert seine Bedeutung.

Bei höheren Grundfutterqualitäten (Abbildung 3, unteren Teilgrafiken) entsteht ein geringerer Methanausstoß je Produkteinheit als bei den schwächeren Qualitäten. Dieser Unterschied ist für alle Leistungen erkennbar und erweist sich damit als ein Ansatz zur Minderung der Schadgasproduktion.

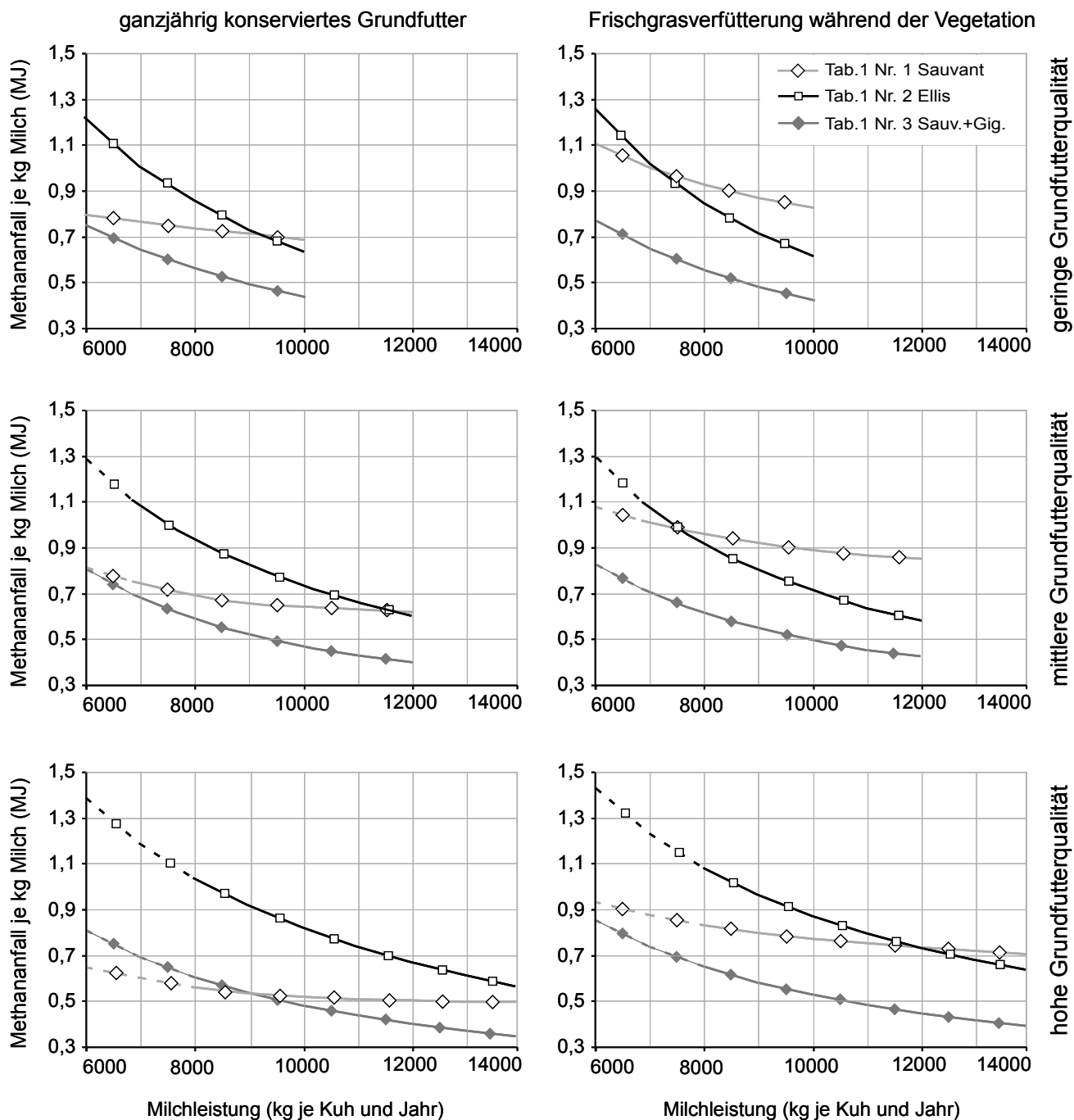


Abbildung 4:

Methanproduktion je kg Milch bei unterschiedlichen Milchleistungen und geringer bzw. mittlerer sowie hoher Grundfutterqualität, wenn die in Tabelle 1 genannten Methanproduktionsfunktionen kalkuliert werden, die auf dem Grund- oder Kraftfutteranteil basieren

Die Berechnung der Methanproduktion auf der Basis der Futteraufnahme (Abbildung 3) liefert deutlich einheitlichere Ergebnisse als die zuvor diskutierten Ansätze, die auf den Futterinhaltsstoffen (Abbildung 2) beruhen und erweisen sich auch im Vergleich zu den auf Futteranteilen beruhenden Ansätzen (Abbildung 4) als wesentlich homogener.

Die mit den Schätzfunktionen 1 bis 3 (Tabelle 1) berechneten Methanmengen je kg Milch fallen sowohl hinsichtlich des Niveaus als auch der Degression außerordentlich uneinheitlich aus (Abbildung 4). Während der von Ellis (Formel 2, Tabelle 1) vorgelegte Ansatz bei niedrigen Leistungen mit 1,3 bis 1,5 MJ Methan je kg Milch beginnt und sich bei hohen Milchleistungen mehr als halbiert, setzt die Methanproduktion gemäß Sauvant (Formel 1, Tabelle 1) bei ca. 0,8 MJ ein und sinkt mit der Leistung unter 0,5 MJ je kg Milch.

Die von Sauvant und Giger-Reverdin (2007) abgeleitete Beziehung (Formel 3, Tabelle 1) führt wegen der geringen Degression zu abweichenden Ergebnisstrukturen (Abbildung 4). Hier wird erneut deutlich, dass die auf Grund- oder Kraftfutteranteilen beruhenden Schätzer gegen eine Konstante konvergieren, wenn mit zunehmender Grundfutterqualität weniger und schließlich kein Kraftfutter mehr eingesetzt wird. Diese Ansätze sind zur Berechnung der Schadgasmengen für ökologisch wirtschaftende Betriebe nur bedingt geeignet.

Kann die Grundfutterqualität in der Zukunft weiter gesteigert werden, wird sich der Kraftfuttereinsatz stark reduzieren (Walter, 2008c), so dass dann auch die herkömmlich produzierenden Betriebe nur unzureichend mittels Funktionen bewertet werden können, die sich auf den Grund- bzw. Kraftfutteranteil beziehen.

#### 4 Exkreme je Kilogramm Milch

Methan wird auch aus den Exkrementen freigesetzt. Das Simulationsprogramm kalkuliert nicht nur den Futterbedarf, die Futteraufnahmekapazität und die Tagesrationen, sondern es verfolgt auch den "Verbleib" der Stoffe auf der Basis von Trockenmasse. Wird von der Futteraufnahme die mit der Milch abgegebene Menge, das bilanzierte Wachstum, der Gewichtszuwachs des Fötus, der Verlust durch Atmung, Schwitzen sowie Speichelfluss und Haare etc. abgezogen, ergibt sich die in den Exkrementen enthaltene Trockenmasse.

Abbildung 5 zeigt eine deutliche Degression der Exkrementmengen je kg Milch, die durch die Leistungssteigerung erzielt werden kann und zusätzlich die mit der Qualitätssteigerung beim Grundfutter erreichbare Minderung. Da die Steigerung der Milchleistung untrennbar mit der Verbesserung der Grundfutterqualität verbunden ist, sind die beiden in Abbildung 5 dargestellten Effekte zu kom-

binieren. Langfristig lassen sich Grundfutterqualität und Milchleistung nur gemeinsam steigern, dementsprechend sinkt der Exkrementenanfall bei Leistungen um 6.000 bis 7.000 kg Milch bei geringer Grundfutterqualität von 0,5 bis 0,6 kg auf nur noch 0,3 bis 0,4 kg TM je kg Milch, wenn die Milchleistung und die Grundfutterqualität Spitzenwerte erreichen.

Der Methananfall aus der Gülle, einer weiteren Quelle für die Entstehung von Treibhausgasen, wird hier nicht kalkuliert, weil der Exkrementenanfall des Jungviehes in dieser Analyse unberücksichtigt bleibt. Da die kleinen Kälber nicht auf Spaltenboden gehalten werden dürfen, sind die Milchvieh haltenden Betriebe gezwungen, neben der Gülle- auch die Festmistschiene zu unterhalten. Das erhöht nicht nur die Kosten, sondern führt auch zu zwei unterschiedlichen Schadgasemissionsquellen.

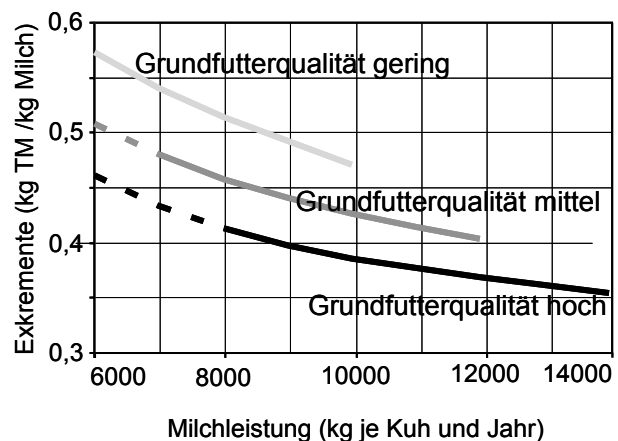


Abbildung 5:

Anfall von Exkrementen je kg Milch bei unterschiedlichen Milchleistungen und Grundfutterqualitäten

Da langfristig mit wachsenden Beständen zu rechnen ist und gleichzeitig die Biogaserzeugung auf Güllebasis sich zu einer (geförderte) Alternative zum herkömmlichen Konzept der Gülleverwendung entwickeln kann, ergeben sich für den Komplex des Schadgasanfalls aus den Exkrementen grundsätzlich andere Perspektiven und Bewertungsmöglichkeiten.

Derartige Kalkulationen bleiben zukünftigen gesamtbetrieblichen Analysen vorbehalten. Gleichzeitig damit sollten dann die Ansprüche der zukünftigen Milchproduktion (inklusive Nachzucht) an Futter, Fläche, Arbeit sowie Kapital analysiert und diskutiert werden. Mittel- bis langfristig wird sich die Milchproduktion grundlegend ändern (müssen), wenn die Anforderungen des Umweltschutzes sowie der Wirtschaftlichkeit in einem „quotenfreien“ Marktgeschehen greifen und gleichzeitig die Preisgarantien und Stützungen seitens der Agrarpolitik ausbleiben.

## 5 Wasserbedarf je Kilogramm Milch

Da die Milchproduktion einen erheblichen Anspruch an die Ressource Wasser hat, wird die Frage nach dem Wasserbedarf je kg Milch gestellt. Das NRC (2001) nennt die von Holter und Dahlborn entwickelten Wasserbedarfsfunktionen. Abbildung 6 zeigt, dass der von Holter (NRC, 2001) entwickelte Ansatz einen um bis zu 50 % höheren Wasserbedarf je kg Milch ausweist. Die nach Holter und Dahlborn (NRC, 2001) kalkulierten Ansprüche an Tränkewasser verdeutlichen eine Degression mit steigendem Leistungsniveau. Daneben ist ein geringer Einfluss der Grundfutterqualität zu erkennen, der einen niedrigeren Tränkewasserbedarf bei höheren Qualitäten beinhaltet.

Das Simulationsprogramm (Walter, 2008a) kalkuliert den Wasserbedarf, indem es das im Futter enthaltene Wasser den Mengen gegenüberstellt, die durch die Milch, das Atmen, den Speichelverlust etc. abgehen. Die Wasseraufnahme errechnet sich aus diesem Abgang und wird erhöht, bis das Kot- und Harnmisch einen mittleren Wassergehalt von 80 % aufweist. Die vom Simulationsprogramm ermittelten Ansprüche an Wasser entsprechen dem Mittel der von Holter und Dahlborn berechneten Mengen. Auf eine Darstellung in Abbildung 6 wird verzichtet.

Eine weitergehende Analyse des Wasserbedarfes wird mit der Bewertung des Klimaeinflusses folgen. Hier soll zunächst gezeigt werden, dass die Leistungssteigerung auch unter diesem Aspekt eine positive Umweltwirkung aufweist.

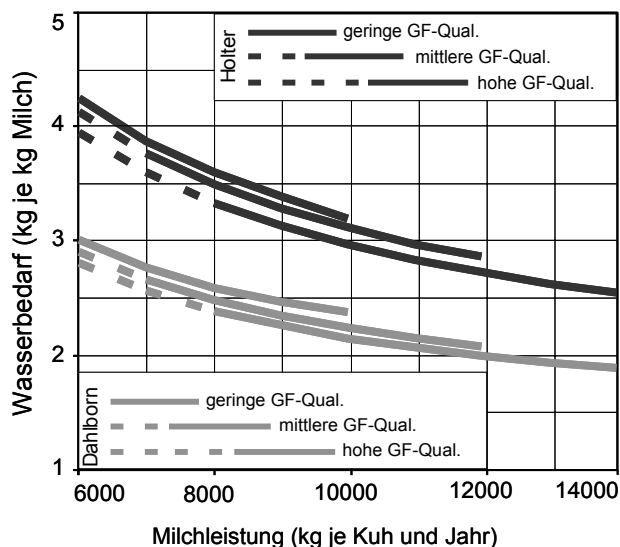


Abbildung 6:

Wasserbedarf je kg Milch bei unterschiedlichen Milchleistungen

## 6 Bewertung

Die Kalkulationen zeigen eine deutliche Degression der Ansprüche mit steigenden Leistungen. Während sich der

Wasserbedarf je kg Milch mit der Verdopplung der Leistung um rd. ein Drittel reduziert, halbiert sich gleichzeitig der erforderliche Viehbestand, wenn eine vorgegebene Quote erfüllt werden soll. Nährstoff- und Futterbedarf je Produkteinheit vermindern sich in ähnlichen Größenordnungen, so dass sich auch der produktspezifische Methan ausstoß entsprechend reduziert. Damit bieten weitere Leistungssteigerungen nicht nur eine höhere Effizienz der Ressourcennutzung, sondern auch einen wirkungsvollen Ansatz zur Minderung der Schadgasemission.

Wegen des immensen experimentellen Aufwandes von Versuchen in Respirationskammern lassen sich nur wenige Kühe für einen begrenzten Versuchszeitraum analysieren. Demzufolge liegt in der Regel nur ein geringer Stichprobenumfang vor, der nur selten eine hochsignifikante statistische Absicherung erlaubt. Moderne statistische Analyseverfahren (St. Pierre, 2001) bieten einen Ansatz, um unterschiedliche Versuche verknüpft auszuwerten, deren gemeinsamen Tendenzen deutlich werden zulassen und gegebenenfalls bessere statistische Prüfmaße zu erhalten.

Dem von Sauvant und Giger-Reverdin (2008) vorgelegten methodischen Ansatz ist daher große Bedeutung zuzumessen, weil sie mittels der "meta-analysis"<sup>9</sup> eine Vielzahl von unterschiedlichen Experimenten statistisch aufarbeiten und auf diese Weise einen vergleichsweise „guten Fit“ erzielen. Die derart berechnete Funktion<sup>10</sup> führt zu einer relativ brauchbaren Übereinstimmung mit den auf Trockenmasseaufnahme basierten Schätzern.

Paul (1990) entwickelte ein Simulationsmodell, das mittels eines Differentialgleichungssystems die Verdauung der Wiederkäuer abbildet. Dieses Simulationsmodell stellt eine effiziente Ergänzung zu den Experimenten dar. Erste Simulationsläufe zeigen, dass der Methan anfall dem der Funktionen Nr. 8, 10 und 11 (Tabelle 1) nahe kommt.

Die hier vorgelegten Kalkulationen lassen erkennen, dass der von der Kuh produzierte Methan anfall je kg Milch mit steigenden Leistungen niedriger ausfällt. Der Einspareffekt beträgt je nach Methanproduktionsfunktion zwischen 30 bis 60 %, wenn die Milchleistung von 6.000 auf 14.000 kg Milch je Kuh und Jahr ansteigt. Dabei lassen sich zwischen den einzelnen Schätzfunktionen erhebliche Niveauunterschiede feststellen. Die Schätzfunktionen Nr. 7, 5 und 3 ergeben bei 6.000 kg Milch 1,3 bis 1,5 MJ Methan je kg Milch, wohingegen die Schätzer Nr. 1, 4 und 6 nur zu einem Methan anfall von 0,5-0,8 MJ je Produkteinheit kommen. Die Niveauunterschiede stehen für eine große Unsicherheit bei der Bestimmung des tatsächlichen Methan anfalles und sprechen für zusätzliche Experimente, aber auch für die umfassende Bewertung der bisher

<sup>9</sup> Vergleiche St. Pierre (2001)

<sup>10</sup> Vergleiche Jouany (2008, figure 4, page 43)

durchgeführten Versuche mittels der von Sauvant und Giger-Reverdin (2008) genutzten "meta-analysis".

Gelänge eine Präzisierung der Methanproduktionsfunktion und würde eine monetäre Bewertung der Schadgasemission vorgegeben werden, dann könnte die Optimierung der Milchproduktion die Emissionsreduktion mit umfassen.

## Literatur

- Arbeitsgruppe Landwirtschaftliche Emissionsinventare (2008) Bilanzierung der klimarelevanten Wirkungen durch Tierernährung und Tierhaltung. In: BMELV (2008) Moderne Tierernährung - sicher, effizient und klimaschonend : Tagungsband ; Braunschweig, 13./14. November 2008. Bonn : BMELV, p 37
- Brade W, Lebzién P (2008) Reduzierungspotentiale für Treibhausgase in der Tierernährung und Tierhaltung. In : BMELV (2008) Moderne Tierernährung - sicher, effizient und klimaschonend : Tagungsband ; Braunschweig, 13./14. November 2008. Bonn : BMELV, pp 45-46
- Brunsch R, Kraatz S, Berg W, Rus CG (2008) Treibhausgasemissionen bei der Futtererzeugung. In: BMELV (2008) Moderne Tierernährung - sicher, effizient und klimaschonend : Tagungsband ; Braunschweig, 13./14. November 2008. Bonn : BMELV, pp 35-36
- GfE (2001) Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung der Milchkühe und Aufzuchttrinder. Frankfurt a M : DLG Verl, 136 p, Energie- und Nährstoffbedarf landwirtschaftlicher Nutztiere 8
- IPCC Report (2006) Emissions from livestock and manure management [online]. Zu finden in <[http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4\\_Volume4/V4\\_10\\_Ch10\\_Livestock.pdf](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_10_Ch10_Livestock.pdf)> [zitiert am 14.04.2009]
- IPCC (2007) Climate change 2007 : synthesis report [online]. Zu finden in <[http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf)> [zitiert am 01.04.2009]
- Jouany J-P (2008) Enteric methane production by ruminants and its control. In: Andrieu S, Wilde D (eds) Gut efficiency : the key ingredient in ruminant production : elevating animal performance and health. Wageningen : Wageningen Acad Publ, p 35
- Meyer A (2008) Ergebnisse der Grassilageuntersuchung 2008 [online]. Zu finden in <<http://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/tier/nav/752/article/11042.html>>
- NRC (2001) Nutrition requirements of dairy cattle. Washington, DC : National Academy Pr
- Durbal V (2001) NRC dairy cattle program computations. In: Nutrition requirements of dairy cattle. Washington, DC : National Academy Pr
- Oltencu PA, Rounsaville TR, Milligan RA, Hintz RL (1980) Relationship between days open and cumulative milk yield at various intervals from parturition for high and low producing cows. J Dairy Sci 63:1317-1327
- Paul W (1990) Physiologie der Milchkuh –eine mathematische Systemanalyse. Braunschweig : FAL, 290 p, Landbauforsch Völknerode SH 116
- Robinson PH (2006) Excel Spreadsheets: PredDMI.xls, NRGREQ.xls [online]. Zu finden in <<http://animalscience.ucdavis.edu/faculty/robinson/Excel/default.htm>> [zitiert am 10.06.2009]
- St Pierre NR (2001) Integrating quantitative findings from multiple studies using mixed model methodology. J Dairy Sci 84:741-755
- Walter K, Bockisch F-J, Ohrtmann J, Thomsen J (2005) Entwicklung der Milchleistung, des Kraftfuttereinsatzes und der Grundfutterqualität. Landbauforsch Völknerode 55(2):119-126
- Walter K (2008a) Das Simulationsprogramm „Milchproduktion der Zukunft“ – methodischer Ansatz und Realisierung : Version 1.2. Braunschweig : FAL, 95 p, Ber Inst Agrartechnol Biosystemtechnik 398
- Walter K (2008b) Fütterung und Haltung von Hochleistungskühen : 1, Rationsoptimierung, Nährstoffdefizit und -bedarf. Landbauforsch 58(1-2):1-17
- Walter K (2008c) Fütterung und Haltung von Hochleistungskühen : 2, Grundfutterqualität und erzielbare Leistung. Landbauforsch 58(3):211-230

Zimmer E (1969) Biochemische Grundlagen der Einsäuerung. In: Crop conservation and grassland : proceedings of the 3rd General Meeting of the European Grassland Federation. Frankfurt a M : DLG, pp 1125

## Suitability of soil electrical conductivity as an indicator of soil nitrate status in relation to vegetable cultivation practices in the Yangtze River Delta of China

Yi-Chao Shi<sup>\*, \*\*</sup>, Zheng-Yi Hu<sup>\*, \*\*</sup>, Silvia Haneklaus<sup>\*\*\*</sup>, Wei-Guo Long<sup>\*\*</sup>, <sup>\*\*\*\*</sup>, Xu Xia<sup>\*\*</sup>, Yan-Wen Zhao<sup>\*\*\*\*</sup>, Tian Lin<sup>\*\*</sup> and Ewald Schnug<sup>\*\*\*</sup>

### Abstract

In soil samples from sites where vegetables were grown in foil tunnels and open fields. Chemical soil analysis comprised the parameters electrical conductivity (EC), pH,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ , total N and organic matter. Cultivation practices had no influence on soil pH values. In comparison, EC was significantly higher with 462.5  $\mu\text{S/cm}$  in soils under foil tunnels than in open fields with a mean value of 251.2  $\mu\text{S/cm}$ . About one third (35 %) of all samples showed secondary salinization with EC values > 500  $\mu\text{S/cm}$  under foil tunnels, and still 9 % of all samples from field-grown vegetables. Soil EC values increased with the time period of vegetable growing and exceeded 500  $\mu\text{S/cm}$  after more than 4 years of continuous cultivation. A highly significant correlation ( $p < 0.001$ ) was determined between soil  $\text{NO}_3\text{-N}$  and soil EC irrespective of the cultivation practice if EC was < 500  $\mu\text{S/cm}$ , while no relationship existed in soils with EC values > 500  $\mu\text{S/cm}$ . The results suggest that  $\text{NO}_3\text{-N}$  is a main factor influencing EC values, but  $\text{NO}_3\text{-N}$  is of minor relevance for the complex phenomenon of secondary salinization as found in soils under foil tunnels. This implies that a reduction of the N fertilizer input is not sufficient to decrease EC values in these production units. Soil EC values might be used as an indicator for excessive  $\text{NO}_3\text{-N}$  soil contents and as a benchmark for calculating site-specific N rates. Thus crop productivity and quality parameters of vegetables can be improved and environmental burdens, for example N loads to water bodies significantly reduced.

**Keywords:** codes of good agricultural practice (GAP), eutrophication, foil tunnel, geo-electric sensor, site-specific nutrient management, secondary salinization

### Zusammenfassung

#### Eignung der elektrischen Leitfähigkeit als Indikator für den Nitratgehalt im Boden in Gemüseanbaubetrieben des Yangtze Flussdeltas in China

In Bodenproben von Feldern auf denen Gemüse im Freiland und unter Folientunneln angebaut wurde, wurden elektrische Leitfähigkeit (EC), pH,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ , Gesamt-N und der Gehalt an organischer Substanz bestimmt. Das Anbauverfahren hatte keinen Einfluss auf den pH-Wert im Boden. Böden unter Folientunneln wiesen mit 462,5  $\mu\text{S/cm}$  eine signifikant höhere elektrische Leitfähigkeit auf als Böden im Freiland (251,2  $\mu\text{S/cm}$ ). Ungefähr ein Drittel (35 %) aller Proben unter Folientunneln und 9 % im Freiland wiesen mit > 500  $\mu\text{S/cm}$  eine sekundäre Versalzung auf. Bereits nach 4 Jahren kontinuierlichen Gemüseanbaus wurde der kritische Wert von 500  $\mu\text{S/cm}$  überschritten. Es wurde eine hochsignifikante Korrelation ( $p < 0,001$ ) zwischen  $\text{NO}_3\text{-N}$  und EC unabhängig vom Anbauverfahren ermittelt, sofern die EC-Werte < 500  $\mu\text{S/cm}$  lagen. Bei höheren EC-Werten bestand hingegen keine signifikante Beziehung. Der  $\text{NO}_3\text{-N}$  Gehalt im Boden hatte einen starken Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit, während  $\text{NO}_3\text{-N}$  für das komplexe Phänomen der sekundären Versalzung nur eine untergeordnete Rolle spielt. Dies bedeutet, dass eine Reduzierung des N-Düngereinsatzes in diesem Produktionssystem nicht ausreichend ist, um die EC-Werte zu senken. Die elektrische Leitfähigkeit könnte nicht nur als Indikator für exzessive  $\text{NO}_3\text{-N}$  Gehalte im Boden, sondern auch als Orientierungswert für standortspezifische N-Gaben dienen. Auf diese Weise ließen sich Ertrags- und Qualitätsparameter des Gemüses verbessern und die umweltbeeinträchtigende Wirkung durch den Austrag von N in Gewässer signifikant reduzieren.

**Schlüsselworte:** Eutrophierung, Folientunnel, geo-elektrischer Sensor, Regeln guter fachlicher Praxis, sekundäre Versalzung, teilflächenspezifische Düngung

\* College of Resources and Environment, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 19A, Yuquan Road, Beijing, China, 100049

\*\* State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, 71st East Beijing Road, Nanjing, P.R. China, 210008

\*\*\* Julius Kühn-Institut (JKI), Institute for Crop and Soil Science, Federal Research Centre for Cultivated Plants, Bundesallee 50, D-38116 Braunschweig, Germany

\*\*\*\* Nanjing Agricultural University, 1st Weigang Road, Nanjing, China, 210095

## Introduction

In China, the cultivation area of vegetables increased from  $9.5 \times 10^6$  ha (6.3 % of arable land) in 1995 to  $1.8 \times 10^7$  ha (11.6 % of arable land) in 2006 (Anon, 2007). The Yangtze River Delta is meanwhile a major vegetable production centre in China. In 2007, 10.8 % of all vegetables originated from this area (Anon, 2007). Land use changed basically during the past years from paddy to vegetable fields, and from conventional field vegetable cultivation to foil tunnel systems. It was observed that crop productivity decreased distinctly over time (Wang, 2005; Du et al., 2006) and secondary salinization seems to be a major obstacle, particularly in foil tunnel systems because of an excessive use of nitrogen (N) fertilizers (Cao et al., 2004; Chen et al., 2004; Shi et al., 2008). Excessive fertilizer use in specialty crops is a well-known problem with serious agronomic and environmental implications. In case of N,  $\text{NO}_3\text{-N}$  will accumulate in soils and crops and  $\text{NO}_3\text{-N}$  may diminish crop quality if taken up in significant amounts. Ecological problems comprise gaseous N losses to the atmosphere, leaching of  $\text{NO}_3\text{-N}$ , eutrophication of water bodies and soil salinization, particularly when vegetable crops are grown under cover (Maxted and Diebel 2008; Stigter et al., 1998; Chen et al., 2004). Vegetable crops and particularly those grown under cover receive fertilizers more often and at higher rates than cereals and oilseed (Power and Schepers, 1989; Cao et al., 2004; He et al., 2007). In soils under foil tunnels  $\text{NO}_3$  accounted for 56 to 76 % of all anions (Yu et al., 2005).

One factor influencing the salt content in the soil is the concentration of soluble nutrients and geo-electric sensor data have been used to delineate N management zones in Precision Agriculture (Cockx et al., 2004). Despite this basic knowledge, only limited studies have been carried out in vegetable farming to determine interactions between  $\text{NO}_3\text{-N}$  and electric conductivity (EC) in soils (Cao et al., 2004; Ju et al., 2007; Shi et al., 2008 and 2009). Soil EC values of  $> 500 \mu\text{S/cm}$  impaired crop growth and soil EC values of  $> 1000 \mu\text{S/cm}$  resulted in withering of the crop (Li, 1993). A soil EC value of  $> 500 \mu\text{S/cm}$  has been defined as the critical value for secondary salinization in foil tunnel production systems (Li, 1993). Surveys on fertilizer-related salinization in conventional field-grown vegetables are scarce. It was the objective of the presented study firstly to determine soil EC values and assess the risk of secondary salinization in relation to cultivation practices in vegetable growing in the Yangtze River Delta of China, and secondly to evaluate the suitability of EC as an indicator for the  $\text{NO}_3\text{-N}$  status of soils.

## Materials and methods

Soil samples were collected from August 11 to September 5, 2007 on vegetable fields in the Yangtze River Delta (China). Vegetables were grown in open fields or under foil tunnels. Sampling locations of both cultivation systems were neighboring sites with similar soil characteristics in the vicinity of the cities Yixing, Yangzhou, Zhenjiang, Suzhou, and Changzhou (Table 1, Figure 1). The mean field size was 0.2 ha. The soil samples were selected on basis of characteristic soil types, vegetable rotations, length of vegetable cultivation and N fertilizer input. The total N fertilizer input varied between 370 kg/ha N and 1110 kg/ha N in foil tunnel systems (with a mean N expenditure of 630 kg/ha N); in open fields between 240 and 670 kg/ha N were applied (with a mean N expenditure of 440 kg/ha N).

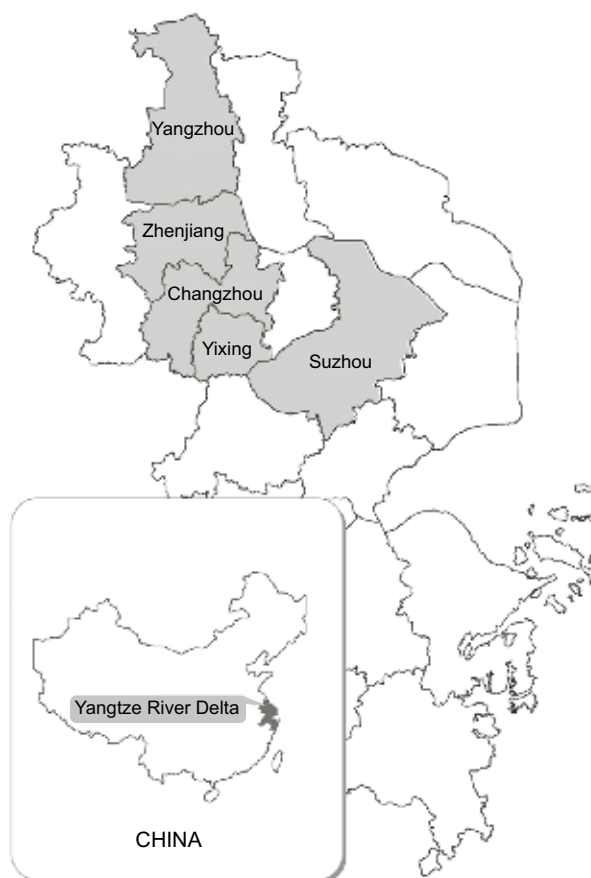


Figure 1:  
Location of the investigation area in the Yangtze River Delta in China

At each sampling location one soil profile sample (0 to 10 cm, 10 to 20 cm, 20 to 30 cm) was taken together with 8 to 10 topsoil samples (0 to 10 cm). Soils were air-dried and passed through a 2 mm and then 0.15 mm sieve for the analysis of organic matter and total N; for

the determination of soil electrical conductivity (EC), pH, and  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$  soils were ground to a particle size of < 0.75 mm (Lu, 1999).

Table 1:

Distribution of soil samples collected on different vegetable fields in relation to cultivation practice in five cities in the Yangtze River Delta

| City      | Position (N,E)        | (n)        | (n)         |
|-----------|-----------------------|------------|-------------|
|           |                       | Open field | Foil tunnel |
| Yixing    | 31° 22' N, 119° 49' E | 10         | 9           |
| Yangzhou  | 32° 39' N, 119° 42' E | 10         | 10          |
| Zhenjiang | 32° 11' N, 119° 27' E | 9          | 9           |
| Suzhou    | 32° 20' N, 121° 20' E | 8          | 8           |
| Changzhou | 32° 16' N, 120° 17' E | 8          | 8           |
| Total     |                       | 45         | 44          |

For chemical soil analysis standard analytical procedures had been employed (Lu, 1999). Soil pH was determined potentiometrically in a soil:water suspension of 1:2.5 (w/v). Soil organic carbon was analyzed after oxidation by potassium dichromate and the organic matter con-

tent (OMC) was calculated by multiplying with 1.724. Soil electric conductivity (EC) was measured in a 1:5 (w/v) water extract with an electric conductivity meter (Kang Yi Corp., China). The semi-micro *Kjeldahl* method was employed for the determination of total N ( $\text{N}_t$ ). Soil  $\text{NO}_3\text{-N}$  and  $\text{NH}_4\text{-N}$  was extracted by 2 M KCl solution in a 1:10 ratio (w/v);  $\text{NO}_3\text{-N}$  was determined by spectrophotometry at dual-wavelength (220 nm and 275 nm), and  $\text{NH}_4\text{-N}$  colorimetrically by indophenol blue.

For the ANOVA and t-test of the SPSS statistical package Version 13.0 was employed.

## Results

*Influence of cultivation practice, soil depth and provenance on pH, electrical conductivity and nitrogen fractions in soil*

The results of soil analysis are summarized in Table 2. Cultivation practice had no significant influence on soil pH and soil organic matter content. In comparison, in soils under foil tunnels EC values and  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{N}_t$  (total N) concentrations were higher than in open fields. This differ-

Table 2:

Influence of vegetable cultivation practice on soil pH, EC, OMC,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ , and  $\text{N}_t$  content

| Sample set  |                       |      | pH   | EC<br>( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) | $\text{NO}_3\text{-N}$ | $\text{NH}_4\text{-N}$<br>(mg/kg) | $\text{N}_t$ | OMC<br>(g/kg) |
|-------------|-----------------------|------|------|-----------------------------------|------------------------|-----------------------------------|--------------|---------------|
| Foil tunnel | EC < 500<br>(n=32)    | max  | 7.8  | 498.0                             | 86.3                   | 114.6                             | 262.8        | 36.7          |
|             |                       | min  | 5.0  | 135.0                             | 22.6                   | 4.4                               | 43.0         | 10.9          |
|             |                       | mean | 6.5  | 298.9                             | 60.4                   | 17.9                              | 175.7        | 24.9          |
|             | EC > 500<br>(n=12)    | max  | 7.5  | 1554.0                            | 88.4                   | 146.8                             | 264.9        | 31.8          |
|             |                       | min  | 4.6  | 538.0                             | 71.9                   | 6.0                               | 112.9        | 17.9          |
|             |                       | mean | 6.1  | 898.7                             | 80.3                   | 34.2                              | 196.4        | 25.5          |
|             | All samples<br>(n=34) | max  | 7.8  | 1554.0                            | 88.4                   | 146.8                             | 264.9        | 36.7          |
|             |                       | min  | 4.6  | 135.0                             | 22.6                   | 4.4                               | 43.0         | 10.9          |
|             |                       | mean | 6.4  | 462.5                             | 65.9                   | 22.4                              | 181.3        | 25.1          |
| Open field  | EC < 500<br>(n=41)    | max  | 7.9  | 480.0                             | 74.3                   | 109.0                             | 246.0        | 36.5          |
|             |                       | min  | 5.1  | 72.0                              | 16.8                   | 2.6                               | 63.9         | 12.2          |
|             |                       | mean | 6.5  | 214.6                             | 48.5                   | 14.0                              | 163.9        | 22.8          |
|             | EC > 500<br>(n=4)     | max  | 6.3  | 681.0                             | 79.6                   | 78.0                              | 246.8        | 29.9          |
|             |                       | min  | 5.2  | 564.0                             | 76.9                   | 8.8                               | 137.8        | 25.4          |
|             |                       | mean | 5.8  | 626.0                             | 78.0                   | 35.1                              | 183.3        | 27.7          |
|             | All samples<br>(n=45) | max  | 7.9  | 480.0                             | 74.3                   | 109.0                             | 246.0        | 36.5          |
|             |                       | min  | 5.1  | 72.0                              | 16.8                   | 2.6                               | 63.9         | 12.2          |
|             |                       | mean | 6.5  | 214.6                             | 48.5                   | 14.0                              | 163.9        | 22.8          |
| p           | EC < 500              |      | 0.99 | 0.0009                            | 0.0133                 | 0.38                              | 0.31         | 0.14          |
|             | EC > 500              |      | 0.48 | 0.015                             | 0.20                   | 0.97                              | 0.65         | 0.23          |
|             | All samples           |      | 0.78 | 0.0003                            | 0.0006                 | 0.21                              | 0.12         | 0.13          |

Note: differences between treatment means are significant at  $p < 0.05$



ence was most pronounced for  $\text{NO}_3\text{-N}$  (Table 2). Most striking was the fact that the  $\text{NO}_3\text{-N}$  content was significantly higher in soils with an EC value of  $> 500 \mu\text{S/cm}$  when foil tunnel systems were used for vegetable growing.

A classification of samples based on the critical EC value of  $500 \mu\text{S/cm}$  (Li, 1993) revealed that 35 % of all samples from foil tunnels exceeded this threshold, while the corresponding percentage was only 9 % in open field cultivation (Table 2). A strongly negative impact of secondary salinization going along with EC values of  $> 1000 \mu\text{S/cm}$  (Li, 1993) was determined in 11 % of all soil samples from foil tunnels.

The influence of cultivation practice on EC and  $\text{NO}_3\text{-N}$  was consistent in all soil profiles and most pronounced in the two upper soil layers (Table 3).

Within the soil profile EC values decreased continuously from the top to deeper soil layers irrespective of the cultivation practice (Table 3), though differences were somewhat smaller in open fields.

Differences in EC between cultivation areas (Table 1) were pronounced and decreased in the following order: Changzhou  $>$  Suzhou  $>$  Yangzhou, Zhenjiang and Yixing

(Figure 1). The highest soil EC value was determined in soil samples from foil tunnels in Changzhou and this is most likely related to the time period of cultivating vegetables (Figure 2 and 3).

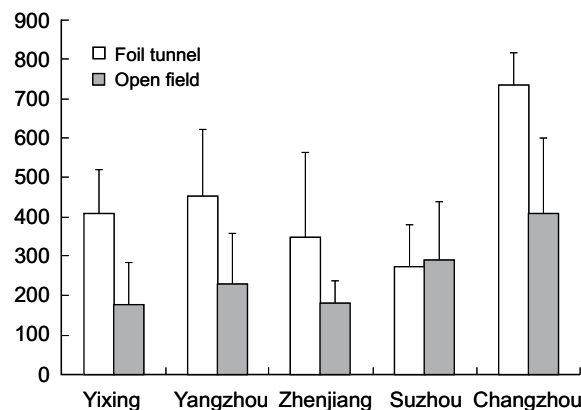


Figure 2:

Variation of soil EC values in relation to vegetable cultivation practice in the vicinity of the cities Changzhou, Suzhou, Yangzhou, Zhenjiang and Yixing in the Yangtze River Delta

Table 3:

Variation of pH, EC,  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$  and  $\text{Nt}$  in different soil depths in relation to cultivation practice in five vegetable cultivation areas in the Yangtze River Delta

| Cultivation practice |          | Soil depth (cm) | pH   | EC ( $\mu\text{S/cm}$ ) | $\text{NO}_3\text{-N}$ | $\text{NH}_4\text{-N}$ (mg/kg) | Nt     |
|----------------------|----------|-----------------|------|-------------------------|------------------------|--------------------------------|--------|
| Foil tunnel          | max      | 0-10            | 7.83 | 1554                    | 88.41                  | 146.75                         | 264.86 |
|                      | min      |                 | 4.60 | 135                     | 20.04                  | 4.38                           | 42.97  |
|                      | mean     |                 | 6.38 | 462                     | 64.88                  | 22.36                          | 181.35 |
| Open field           | min      | 0-10            | 7.88 | 681                     | 79.62                  | 108.99                         | 246.75 |
|                      | max      |                 | 5.10 | 72                      | 16.80                  | 2.65                           | 63.89  |
|                      | mean     |                 | 6.43 | 251                     | 51.09                  | 15.87                          | 165.58 |
|                      | <i>p</i> |                 | 0.78 | 0.0003                  | 0.0006                 | 0.21                           | 0.12   |
| Foil tunnel          | max      | 10-20           | 7.85 | 444                     | 77.10                  | 9.41                           | 210.35 |
|                      | min      |                 | 5.33 | 149                     | 27.67                  | 5.37                           | 72.87  |
|                      | mean     |                 | 6.35 | 273                     | 51.86                  | 7.33                           | 140.05 |
| Open field           | max      | 10-20           | 7.78 | 358                     | 74.93                  | 9.69                           | 152.36 |
|                      | min      |                 | 5.85 | 112                     | 21.17                  | 3.47                           | 64.90  |
|                      | mean     |                 | 6.75 | 186                     | 36.58                  | 7.11                           | 119.15 |
|                      | <i>p</i> |                 | 0.55 | 0.25                    | 0.28                   | 0.87                           | 0.52   |
| Foil tunnel          | max      | 20-30           | 7.84 | 319                     | 68.84                  | 8.56                           | 98.98  |
|                      | min      |                 | 6.25 | 155                     | 20.78                  | 1.84                           | 40.46  |
|                      | mean     |                 | 6.81 | 206                     | 34.98                  | 4.36                           | 71.45  |
| Open field           | max      | 20-30           | 7.79 | 170                     | 50.31                  | 8.77                           | 168.11 |
|                      | min      |                 | 6.64 | 80                      | 11.79                  | 4.38                           | 43.89  |
|                      | mean     |                 | 7.26 | 121.4                   | 27.35                  | 6.41                           | 89.23  |
|                      | <i>p</i> |                 | 0.27 | 0.04                    | 0.53                   | 0.19                           | 0.48   |

Note: differences between treatment means are significant at  $p < 0.05$

Soil EC values increased with the time period of cultivating (Figure 3). On an average the critical threshold of 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  was hit after 5 years of continuous vegetable growing. From then onwards soils were objected to secondary salinization. Macroscopic symptoms became visible as white salt spots in the soil surface. Their number and size increased over time.

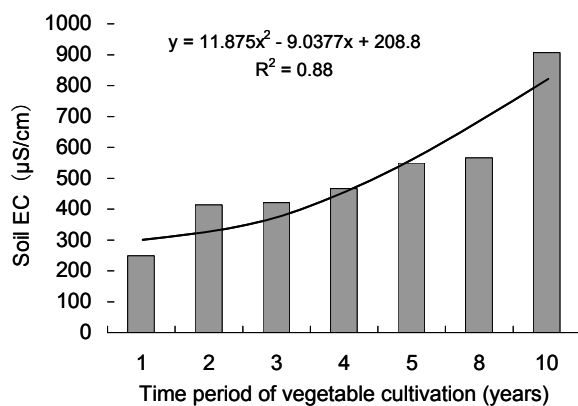


Figure 3:  
Relationship between time period of vegetable cultivation and soil EC values in foil tunnel systems

#### *Relationship between soil electrical conductivity and nitrogen fractions in soil*

Soil samples were divided into two sets, one with EC values of  $< 500 \mu\text{S}/\text{cm}$ , and one with soil EC values  $> 500 \mu\text{S}/\text{cm}$ . A highly significant, positive correlation existed between soil  $\text{NO}_3\text{-N}$  and EC in soils that are not affected by secondary salinization ( $p < 0.001$ ) independent of the cultivation practice, while no correlation was found in soils affected by secondary salinization (Figure 4; Table 4). The correlation coefficient was higher in foil tunnel systems where 50 % of the variability of EC could be explained by variations in the  $\text{NO}_3\text{-N}$  content of the soil, while the corresponding values was 32 % in open fields. The results reveal that  $\text{NO}_3\text{-N}$  is a major contributor to soil EC in soils that are not yet affected by secondary salinization.

No significant relationship existed between soil EC and soil  $\text{NH}_4\text{-N}$ , and soil  $\text{N}_t$  for both cultivation practices (Table 4). Thus the influence of  $\text{NH}_4\text{-N}$  on soil EC seems negligible though in soils under foil tunnels up to 9 % of N was abundant as  $\text{NH}_4\text{-N}$  and in open fields up to 10 % (Table 1). Besides that the temporal variability of  $\text{NH}_4\text{-N}$  is high as nitrobacteria oxidize  $\text{NH}_4\text{-N}$  into  $\text{NO}_3\text{-N}$  within a couple of days (Zhu and Wen, 1992).

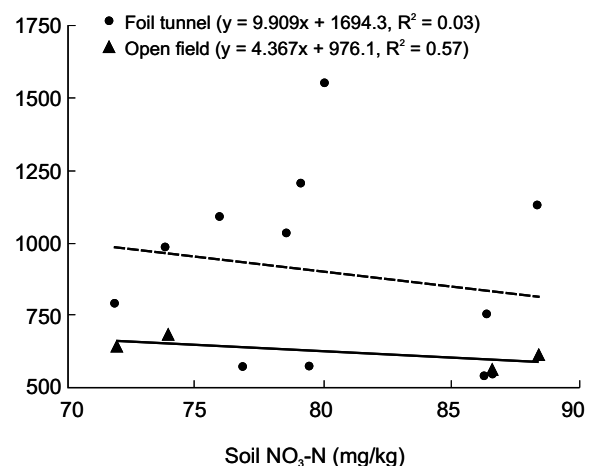
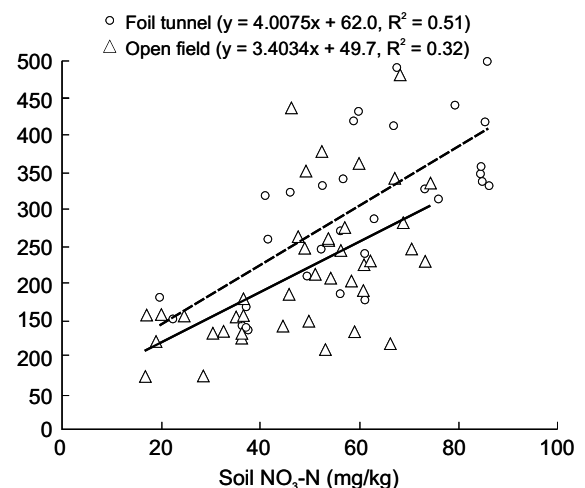


Figure 4:  
Relationship between soil  $\text{NO}_3\text{-N}$  content and EC readings in relation to cultivation practice and salinity level (EC  $<$  or  $>$  500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

OMC is a sink for nutrients through binding in organic and mineral form as is CEC, for which a positive correlation with OMC was documented (Xiong and Li, 1990). There was a significant, positive correlation between soil OMC and soil EC in soils under cover, while none was found in open fields (Table 4). A possible explanation for these differences might be substantial leaching of nutrients under field conditions.

## **Discussion**

Only a restricted number of investigations are available, which determined the influence of cultivation practices on secondary salinization in agricultural soils of the Yangtze River Delta. The present study suggests that N was leached under open field conditions and thus is one component counteracting secondary salinization. Another relevant factor, which favors salinization, is temperature. Higher

Table 4:

Correlation coefficients for the relationships between soil EC and  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{N}_t$  and OMC in relation to vegetable cultivation practice

| Cultivation practice | Sample set         | $\text{NO}_3\text{-N}$ | $\text{NH}_4\text{-N}$ | $\text{N}_t$ | OMC    |
|----------------------|--------------------|------------------------|------------------------|--------------|--------|
| Foil tunnel          | EC <500 (n=32)     | 0.71***                | 0.27                   | - 0.11       | 0.53** |
|                      | EC > 500 (n=12)    | - 0.17                 | 0.11                   | 0.22         | 0.16   |
|                      | All samples (n=44) | 0.57***                | 0.27                   | 0.13         | 0.50** |
| Open field           | EC <500 (n=41)     | 0.57***                | 0.13                   | 0.11         | - 0.03 |
|                      | EC > 500 (n=4)     | - 0.62                 | 0.41                   | 0.64         | 0.84   |
|                      | All samples (n=45) | 0.68***                | 0.33*                  | 0.19         | 0.19   |

Note: \*\*, \*\*\* significance level at  $p < 0.01$  and  $p < 0.001$ , respectively

temperatures in foil tunnels increase evapotranspiration and amplify salt accumulation in the topsoil layer. A third relevant factor is the fertilization level. Application rates proved to be two to three times higher in foil tunnel systems than in open fields (Cao et al., 2004). When compared to paddy fields fertilizer rates were even four to five times higher (Cao et al., 2004).

The present study and that of Huang et al. (2003) revealed that vegetable cultivation in foil tunnels caused secondary salinization on one third of the experimental sites. Using this form of cultivation soils will reach the critical EC value of 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  within about five years (Figure 3). Thus it is recommended to give up foil tunnels in favor of open field cultivation latest after four years in order to avoid secondary salinization. The fact that EC values of > 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  were found after < 3 to 9 years of continuous vegetable cropping under foil tunnel systems indicates that not only the cultivation practice itself, but also excessive fertilizer applications contributed to the problem (Figure 3 and 4). The mean N fertilizer rate applied to vegetables grown in foil tunnels was 1351 kg/ha N, which is about 820 kg/ha higher than the estimated N demand (Liu, 2008). The mean N fertilizer rates in open fields vary between 366 kg/ha for root vegetables, 460 kg/ha for leafy vegetables, and 495 kg/ha for solanaceous vegetables (Chen, 2006), but the actual N demand is only about 75, 120 and 200 kg/ha N (Chen et al., 2003). The unavoidable side effects of disproportionate N surpluses are besides secondary salinization increased losses of N to the environment in form of gaseous  $\text{NO}_x$  emissions (Li and Wang, 2007) and leaching of nitrate and eutrophication of water bodies (Shi et al., 2009). From agronomic point of view impairment of crop productivity can be expected when EC values exceed 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Li, 1993). However, already beyond this critical value excessive  $\text{NO}_3$  will accumulate favorably in leaves. In leafy vegetables cultivated in foil tunnels  $\text{NO}_3$  concentrations of up to 1448 mg/kg were found in the Shanxi province of China (Wang, 2002).

The present study showed that soil EC values proved to be an adequate indicator for the  $\text{NO}_3\text{-N}$  status in vegetable

cultivation, particularly in foil tunnel systems and if fields are not yet affected by secondary salinization. A significant positive relationship between soil EC and soil  $\text{NO}_3\text{-N}$  was confirmed in the present study (Figure 3) and other field experiments (Cao et al., 2004; Ju et al., 2007; Shi et al., 2008 and 2009).

Investigations in the field of Precision Agriculture revealed that one factor, which influences the salt content in the soil is the concentration of soluble nutrients (Cockx et al., 2004). Geo-electric sensors are used for establishing on-the-go soil salinity maps (Corwin and Plant, 2005; Lilienthal et al., 2005) and Cockx et al. (2004) used EC readings for variable rate input of N. Site-specific nutrient management on paddock scale, which may span an acreage of only 500  $\text{m}^2$  in China (Hu et al., 2004) is a promising approach to add value to vegetable products by improving crop quality, maintaining crop productivity, inhibiting/ameliorating secondary salinization and reducing avoidable nutrient losses to the environment.

At this point it may be suggested to employ EC sensors for establishing a recommendation system, which is based on instant *in situ* EC measurements and N fertilizer recommendations, which match the site and crop-specific demand in intensive vegetable cultivation areas in order to improve crop productivity and quality and to limit adverse effects of excessive N rates. He et al. (2007) demonstrated that site-specific N fertilization reduced the N input by up to 80 % without any negative impact on crop productivity. The necessity to calibrate sensor data with soil analytical data shall not be left unmentioned here (Lilienthal et al., 2005). Such cheap and effective system could for instance be implemented as one code for good agricultural practice (GAP). GAP codes are a set of simple rules for agricultural practice with high impact for reducing agrochemical losses (Paulsen et al., 2002). It is of prime relevance for the protection of the water bodies and a prerequisite for sustainable agricultural production to reduce non-point nutrient losses (particularly N and phosphorus). In the Lake Erhai Basin of Dali in China, the contribution of N to basin pollution achieved meanwhile a level of 97 % (He, 2005;

Yang, 2004). In 2007, it was calculated for China that only the  $\text{NH}_4\text{-N}$  discharge from rivers to Sea was  $84.2 \times 10^4$  tons; municipal sewage contributed with  $41.5 \times 10^4$  tons to about 50 % of the problem, while the other half has to be attributed to losses from agriculture (Anon, 2007). This means that the strict limitation of agricultural non-point pollution is a key factor for controlling and improving water pollution worldwide. Another option to reduce N surpluses is a regular change of land use. This implies vegetable cultivation in the field rather than under foil tunnels, and substitution of vegetable by versatile crop rotations. A positive side effect of land use change combined with reduced N input is decreased acidification (Hu et al., 2006; Xu, 1980).

## Conclusions

The results of the present study reveal that soil electrical conductivity (EC) is an opportune indicator for the soil  $\text{NO}_3\text{-N}$  status in intensive vegetable cultivation. In addition, the results showed that foil tunnel systems drastically enhance the problem of secondary salinization last but not least because of a multiple higher fertilizer input when compared to cultivation of vegetables in open fields and other crop plants. Eutrophication of water bodies is a worldwide problem and GAP codes have been established in many countries for reducing non-point nutrient losses. In China, GAP codes have been developed for the cultivation of medicinal plants (Leung and Cheng, 2008), but for agricultural production so far only singular measures have been proposed for individual crop plants and regional agro-environmental conditions (Zhang and Gao, 2008; Wang et al., 2006).

EC measurements in the laboratory or by geo-electric sensors in the field offer the chance to adapt N fertilizer recommendations to the plant available N pool in the soil. Consequently N input can be balanced and N surplus reduced efficiently. EC measurements are a proactive measure against secondary salinization besides a legally restricted cultivation period of vegetables under foil tunnels. Most important with view to sustainable agricultural production is, however, the professional education of farmers. The understanding of the farmer as the biological interface, which safeguards the nutritional status of crops is vital for recognizing the need for professional training as only then traditional fertilizer practices will be replaced by site-specifically adjusted fertilizer rates, which match the actual nutrient demand of the crop (Haneklaus and Schnug, 2006).

## Acknowledgments

This project was financially supported by Key Project of Knowledge Innovation Program, Chinese Academic of Sciences (KSCX2-YW-N-038) and it was part of the Sino-German bilateral co-operation.

## References

- Anon (2007) China statistical yearbook. National Bureau of Statistics of China
- Anon (2007) Report on the state of the environment in China 2007. Ministry of Environmental Protection of China
- Arkady G, Jacob B (1994) The influence of free convection on soil salinization in arid region. *Transport Porous Media* 23:275-301
- Barica J (1972) Salinization of groundwater in arid zones. *Water Res* 6:925-933
- Cao ZH, Huang JF, Zhang CS, Li AF (2004) Soil quality evolution after land use change from paddy soil to vegetable land. *Environ Geochem Health* 26:97-103
- Chen JZ, Kang QX, Zhang QX (2003) The nutrient status of vegetable fields and balance fertilization for vegetables. *Plant Nutrition Fertilizer Science (in Chinese)* 9:117-122
- Chen Q, Zhang XS, Zhang HY (2004) Evaluation of current fertilizer practice and soil fertilizer in vegetable production in the Beijing region. *Nutr Cycl Agroecosystems* 69:51-58
- Chen XP, Zhang FS (1996) The problems and countermeasures of vegetable fertilization in Beijing. *J China Agric Univ* 1(5):63-66
- Chen YM (2006) Problems of fertilizer application in vegetables of Lishui county in China. *Modern Agricultural Technology (in Chinese)* 7:52-55
- Cockx L, Van Meirvenne M, Hofman G (2004) The use of electromagnetic induction in delineating nitrogen management zones. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management*, July 25-28, 2004, Minneapolis, MN USA. Madison : ASA-CSSA-SSSA [CD-Rom]
- Corwin DL, Plant RE (2005) Applications of apparent soil electrical conductivity in precision agriculture. *Comput Electron Agric* 46:1-397
- Corwin DL, Rhoades JD, Simunek J (2007) Leaching requirement for soil salinity control : steady state versus transient models. *Agric Water Manage* 90:165-180
- Du LF, Zhang WL, Li ZH (2006) Soil quality with various planting patterns in Yangtze River Delta Area (in Chinese). *J Agro-Environ Sci* 25:95-99
- Ghassemi F, Jakeman AJ, Nix HA (1995) *Salinisation of land and water resources : human causes, extent, management and case studies*. Wallingford : CAB International, 526 p
- Haneklaus S, Schnug E (2006) Site-specific nutrient management : objectives, current status and future research needs. In: A Srinivasan (ed) *Handbook of precision agriculture : principles and applications*. New York : Food Products Press, pp 91-134
- He R-M, Zhang J-Y, Lu G-H (2005) The trend of study on non-point source pollution. *J China Hydrol* 25:10-14
- He FF, Chen Q, Jiang RF, Chen X, Zhang FS (2007) Yield and nitrogen balance of greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) with conventional and site-specific nitrogen management in northern China. *Nutr Cycl Agroecosystems* 77:1-14
- Hollger E, Baginska B, Cornish PS (1998) Factors influencing soil and nutrient loss in storm water from a market garden [online]. Zu finden in <<http://www.regional.org.au/au/asa/1998/B/182hollinger.htm>> [zitiert am 27.05.2009]
- Hu ZH, Haneklaus S, Liu Q, Xu C, Cao Z, Schnug E (2003) Small-scale spatial variability of phosphorus in a paddy soil. *Commun Soil Sci Plant Anal* 34:2791-2801
- Hu ZY, Wang CR, Cao ZH (2006) Migration of nitrogen and phosphorus from vegetable soils to water system. In: Cao ZH, Lin XG (eds) *Substance exchange in soil-water system and water environment quality in Tai-lake Basin (in Chinese)*. Beijing : Science Press, pp 118-138

- Huang JF, Cao ZH, Lian F, Zhang CS (2003) Soil fertility quality evolution after land use change from rice-wheat rotation to plastic film covered vegetable (in Chinese). *Plant Nutr Fertilizer Sci* 9:19-25
- Ju XT, Kou CL, Christie P, Dou ZX, Zhang FS (2007) Changes in the soil environment from excessive application of fertilizers and manures to two contrasting intensive cropping systems on the North China Plain. *Environ Pollut* 145:497-506
- Lesch M, Rhoades JD, Lund LJ, Corwin DL (1992) Mapping soil salinity using calibrated electromagnetic measurements. *Soil Sci Soc Am J* 56:540-548
- Leung PC, Cheng KF (2008) Good agricultural practice (GAP) : does it ensure a perfect supply of medicinal herbs for research and drug development? *Int J Appl Res Natural Prod* 1:1-8
- Li HY, Xing YX, Wang XF (2001) Research progress in control measure of nitrate accumulation in vegetable (in Chinese). *Changjiang Vegetable* 4:8-10
- Li D, Wang XM (2007) Nitric oxide emission from a typical vegetable field in the Pearl River Delta, China. *Atmos Environ* 41:9498-9505
- Li XL, Zhang FS (2002) The fertilizer utilization of vegetable production in China. In: Li XL, Zhang FS *Fertilizing for sustainable production of high quality vegetable* (in Chinese). Beijing : China Agric Univ Press, pp 270-277
- Li XZ, Wang YL, Zhang ZB (1993) Research on accumulation of salt ions of greenhouse vegetable land in Beijing suburb (in Chinese). *China Vegetable* 4:15-17
- Lilienthal H, Ponomarev M, Schnug E (2004) Application of LASSIE to improve agricultural field experimentation *Landbauforsch Völkenrode* 54(1):21-26
- Liu ZH (2000) Characteristics of greenhouse vegetable soil and reasonable fertilization in Shandong Province (in Chinese). Beijing : Agric Univ, pp 35-40
- Liu ZH, Jiang LH (2008) Evolution of fertilization rate and variation of soil nutrient contents in greenhouse vegetable cultivation in Shandong. *Acta Pedol Sin* 45(2):296-303
- Lu RK (1999) Soil sample analysis (in Chinese). In: Lu RK *Soil agriculture chemistry analysis method*. Beijing : Agriculture Science Press of China, pp146-163
- Maxted JT, Diebel MW (2008) Landscape planning for agricultural non-point source pollution reduction : II Balancing watershed size, number of watersheds, and implementation effort. *Environ Manage* 43(1):60-68
- Paulsen HM, Volkgenannt U, Schnug E (2002) Contribution of organic farming to marine environmental protection. *Landbauforsch Völkenrode* 52(4):211-218
- Power JF, Schepers JS (1989) Nitrate contamination of groundwater in North America. *Agric Ecosyst Environ* 26:165-187
- Rhoades JD (1982) Soluble salts. In: Page AL (ed) *Methods of soil analysis : part 2, chemical and microbiological properties*. Madison, Wis :Am Soc Agron, pp167-179
- Shi WM, Yao J, Yan F (2008) Vegetable cultivation under greenhouse conditions leads to rapid accumulation of nutrients, acidification and salinity of soils and groundwater contamination in South-Eastern China. *Nutr Cycl Agroecosystems* 83:73-84
- Stigter TY, Ooijen SPJ, Post VEA, Applello CAJ, Dill AMMC (1998) A hydrogeological and hydrochemical explanation under irrigated land in a Mediterranean environment, Algarve, Portugal. *J Hydrol* 208:262-279
- Tanji KK (1990) Nature and extent of agricultural salinity In: Tanji KK (ed) *Agricultural salinity assessment and management*. New York : American Society of Civil Engineers, pp 71-92, ASCE manuals and reports on engineering practice 71
- Wang H, Dong YH, Li DC (2005) Nutrient variation in plastic greenhouse soils with the years of cultivation (in Chinese). *Soils* 37:460-466
- Wang X, Tao LX, Tan HJ, Cheng SH (2006) Innovating rice farming systems, ensuring food and environments safety. *Scientia Agricultura Sinica* 39:1984-1991
- Wang ZH, Zong ZQ, Li SX, Chen BM (2002) Nitrate accumulation in vegetables and its residual in vegetable field (in Chinese). *Environ Sci* 23(3):79-83
- Wells AT, Chan KY, Cornish PS (2000) Comparison of conventional and alternative vegetable farming systems on the properties of a yellow earth in New South Wales. *Agric Ecosyst Environ* 80:47-60
- Xiong Y, Li QK (1990) Organic matter of soil (in Chinese). In: *Soils of China* (in Chinese). Beijing : Science Press, pp 206-232
- Xu Q, Zhu HG (1980) Physical and chemical properties of the paddy soil of Taihu region (in Chinese). In: Xu Q, Lu YC, Liu YC, Zhu HG *The paddy soil of Taihu region in China*. Shanghai : Shanghai Science & Technology Press, pp 1-98
- Yang J-Y (2004) Non-point source pollution and water quality deterioration in Er Hai Lake Yunnan. *Environ Sci* 23:104-105
- Zhang DL, Gao QS (2008) Application of good agricultural practice on vegetable sites – based on panel data and linguistic information processing for agricultural produce safety evaluation. *J China Agric Univ* 13:105-110
- Zhu ZL, Wen QX (1992) Transformation of nitrogen in soil (in Chinese). In: Zhu ZL, Wen QX *Nitrogen in the Chinese soil*. Jiangsu : Scientific and Technology Publishing House, pp 5-30

**Lieferbare Sonderhefte / Special issues available**

|        |                                                                                                                                                                                                                                                                                             |         |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 296    | Wilfried Brade und Gerhard Flachowsky (Hrsg.) (2006)<br><b>Schweinezucht und Schweinefleischerzeugung – Empfehlungen für die Praxis</b>                                                                                                                                                     | 12,00 € |
| 297    | Hazem Abdelnabby (2006)<br><b>Investigations on possibilities to improve the antiphytopathogenic potential of soils against the cyst nematode <i>Heterodera schachtii</i> and the citrus nematode <i>Tylenchulus semipenetrans</i></b>                                                      | 8,00 €  |
| 298    | Gerold Rahmann (Hrsg.) (2006)<br><b>Ressortforschung für den Ökologischen Landbau 2006</b>                                                                                                                                                                                                  | 9,00 €  |
| 299    | Franz-Josef Bockisch und Klaus-Dieter Vorlop (Hrsg.) (2006)<br><b>Aktuelles zur Milcherzeugung</b>                                                                                                                                                                                          | 8,00 €  |
| 300    | <b>Analyse politischer Handlungsoptionen für den Milchmarkt (2006)</b>                                                                                                                                                                                                                      | 12,00 € |
| 301    | Hartmut Ramm (2006)<br><b>Einfluß bodenchemischer Standortfaktoren auf Wachstum und pharmazeutische Qualität von Eichenmisteln (<i>Viscum album</i> auf <i>Quercus robur</i> und <i>petraea</i>)</b>                                                                                        | 11,00 € |
| 302    | Ute Knierim, Lars Schrader und Andreas Steiger (Hrsg.) (2006)<br><b>Alternative Legehennenhaltung in der Praxis: Erfahrungen, Probleme, Lösungsansätze</b>                                                                                                                                  | 12,00 € |
| 303    | Claus Mayer, Tanja Thio, Heike Schulze Westerath, Pete Ossent, Lorenz Gygax, Beat Wechsler und Katharina Friedli (2007)<br><b>Vergleich von Betonspaltenböden, gummimodifizierten Spaltenböden und Buchten mit Einstreu in der Bullenmast unter dem Gesichtspunkt der Tiergerechtigkeit</b> | 8,00 €  |
| 304    | Ulrich Dämmgen (Hrsg.) (2007)<br><b>Calculations of Emissions from German Agriculture – National Emission Inventory Report (NIR) 2007 for 2005</b>                                                                                                                                          | 16,00 € |
| [304]  | <b>Introduction, Methods and Data (GAS-EM)</b>                                                                                                                                                                                                                                              |         |
| [304A] | <b>Tables</b>                                                                                                                                                                                                                                                                               |         |
|        | <b>Berechnungen der Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft – Nationaler Emissionsbericht (NIR) 2007 für 2005</b>                                                                                                                                                                       |         |
| [304]  | <b>Einführung, Methoden und Daten (GAS-EM)</b>                                                                                                                                                                                                                                              |         |
| [304A] | <b>Tabellen</b>                                                                                                                                                                                                                                                                             |         |
| 305    | Joachim Brunotte (2007)<br><b>Konservierende Bodenbearbeitung als Beitrag zur Minderung von Bodenschadverdichtungen, Bodenerosion, Run off und Mykotoxinbildung im Getreide</b>                                                                                                             | 14,00 € |
| 306    | Uwe Petersen, Sabine Kruse, Sven Dänicke und Gerhard Flachowsky (Hrsg.) (2007)<br><b>Meilensteine für die Futtermittelsicherheit</b>                                                                                                                                                        | 10,00 € |
| 307    | Bernhard Osterburg und Tania Runge (Hrsg.) (2007)<br><b>Maßnahmen zur Reduzierung von Stickstoffeinträgen in Gewässer – eine wasserschutzorientierte Landwirtschaft zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie</b>                                                                            | 15,00 € |
| 308    | Torsten Hinz and Karin Tamoschat-Depolt (eds.) (2007)<br><b>Particulate Matter in and from Agriculture</b>                                                                                                                                                                                  | 12,00 € |
| 309    | Hans Marten Paulsen und Martin Schochow (Hrsg.) (2007)<br><b>Anbau von Mischkulturen mit Ölpflanzen zur Verbesserung der Flächenproduktivität im ökologischen Landbau – Nährstoffaufnahme, Unkrautunterdrückung, Schaderregerbefall und Produktqualitäten</b>                               | 9,00 €  |
| 310    | Hans-Joachim Weigel und Stefan Schrader (Hrsg.) (2007)<br><b>Forschungsarbeiten zum Thema Biodiversität aus den Forschungseinrichtungen des BMELV</b>                                                                                                                                       | 13,00 € |
| 311    | Mamdoh Sattouf (2007)<br><b>Identifying the Origin of Rock Phosphates and Phosphorus Fertilisers Using Isotope Ratio Techniques and Heavy Metal Patterns</b>                                                                                                                                | 12,00 € |

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                             |         |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 312  | Fahmia Aljmlil (2007)<br><b>Classification of oilseed rape visiting insects in relation to the sulphur supply</b>                                                                                                                                                           | 15,00 € |
| 313  | Wilfried Brade und Gerhard Flachowsky (Hrsg.) (2007)<br><b>Rinderzucht und Rindfleischerzeugung – Empfehlungen für die Praxis</b>                                                                                                                                           | 10,00 € |
| 314  | Gerold Rahmann (Hrsg.) (2007)<br><b>Ressortforschung für den Ökologischen Landbau, Schwerpunkt: Pflanze</b>                                                                                                                                                                 | 12,00 € |
| 315  | Andreas Tietz (Hrsg.) (2007)<br><b>Ländliche Entwicklungsprogramme 2007 bis 2013 in Deutschland im Vergleich – Finanzen, Schwerpunkte, Maßnahmen</b>                                                                                                                        | 12,00 € |
| 316  | Michaela Schaller und Hans-Joachim Weigel (2007)<br><b>Analyse des Sachstands zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die deutsche Landwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung</b>                                                                                        | 16,00 € |
| 317  | Jan-Gerd Krentler (2008)<br><b>Vermeidung von Boden- und Grundwasserbelastungen beim Bau von Güllelagern Prevention of soil and groundwater contamination from animal waste storage facilities</b>                                                                          | 12,00 € |
| 318  | Yelto Zimmer, Stefan Berenz, Helmut Döhler, Folkhard Isermeyer, Ludwig Leible, Norbert Schmitz, Jörg Schweinle, Thore Toews, Ulrich Tuch, Armin Vetter, Thomas de Witte (2008)<br><b>Klima- und energiepolitische Analyse ausgewählter Bioenergie-Linien</b>                | 14,00 € |
| 319  | Ludger Grünhage and Hans-Dieter Haenel (2008)<br><b>Detailed documentation of the PLATIN (PLant-ATmosphere Interaction) model</b>                                                                                                                                           | 10,00 € |
| 320  | Gerold Rahmann und Ulrich Schumacher (Hrsg.) (2008)<br><b>Praxis trifft Forschung — Neues aus der Ökologischen Tierhaltung 2008</b>                                                                                                                                         | 14,00 € |
| 321  | Bernd Degen (Editor) (2008)<br><b>Proceedings of the international workshop “Fingerprinting methods for the identification of timber origins”, Bonn, October 8-9 2007</b>                                                                                                   | 18,00 € |
| 322  | Wilfried Brade, Gerhard Flachowsky, Lars Schrader (Hrsg.) (2008)<br><b>Legehuhnzucht und Eierzeugung - Empfehlungen für die Praxis</b>                                                                                                                                      | 12,00 € |
| 323  | Christian Dominik Ebmeyer (2008)<br><b>Crop portfolio composition under shifting output price relations – Analyzed for selected locations in Canada and Germany –</b>                                                                                                       | 14,00 € |
| 324  | Ulrich Dämmgen (Hrsg.) (2009)<br><b>Calculations of Emissions from German Agriculture – National Emission Inventory Report (NIR) 2009 for 2007</b><br><b>Berechnungen der Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft – Nationaler Emissionsbericht (NIR) 2009 für 2007</b> | 8,00 €  |
| 324A | <b>Tables</b><br><b>Tabellen</b>                                                                                                                                                                                                                                            | 8,00 €  |
| 325  | Frank Offermann, Martina Brockmeier, Horst Gömann, Werner Kleinhanß, Peter Kreins, Oliver von Ledebur, Bernhard Osterburg, Janine Pelikan, Petra Salamon (2009)<br><b>vTI-Baseline 2008</b>                                                                                 | 8,00 €  |
| 326  | Gerold Rahmann (Hrsg.) (2009)<br><b>Ressortforschung für den Ökologischen Landbau 2008</b>                                                                                                                                                                                  | 8,00 €  |
| 327  | Björn Seintsch, Matthias Dieter (Hrsg.) (2009)<br><b>Waldstrategie 2020</b><br>Tagungsband zum Symposium des BMELV, 10.-11. Dez. 2008, Berlin                                                                                                                               | 18,00 € |
| 328  | Walter Dirksmeyer, Heinz Sourell (Hrsg.) (2009)<br><b>Wasser im Gartenbau</b><br>Tagungsband zum Statusseminar am 9. und 10. Februar 2009 im Forum des vTI in Braunschweig. Organisiert im Auftrag des BMELV                                                                | 8,00 €  |

Dr. Jürgen Bender, Institut für Agrarrelevante Klimaforschung, vTI  
Dr. Jutta Berk, Institut für Tierschutz und Tierhaltung, FLI  
Prof. Dr. Franz-Josef Bockisch, Institut für Anwendungstechnik, JKI  
Dr. Herwart Böhm, Institut für Ökologischen Landbau, vTI  
Prof. Dr. Andreas Bolte, Institut für Waldökologie und Waldinventuren, vTI  
PD Dr. Martina Brockmeier, Institut für Marktanalyse und Agrarhandelspolitik, vTI  
Dr. Ulrich Dämmgen, Institut für Agrarrelevante Klimaforschung, vTI  
PD Dr. Sven Dänicke, Institut für Tierernährung, FLI  
Dr. habil. Bernd Degen, Institut für Forstgenetik, vTI  
Dr. Matthias Dieter, Institut für Ökonomie der Forst- und Holzwirtschaft, vTI  
PD Dr. habil. Bettina Eichler-Löbermann, Universität Rostock  
Dr. Peter Elsasser, Institut für Ökonomie der Forst- und Holzwirtschaft, vTI  
Prof. Dr. Andreas Fangmeier, Universität Hohenheim  
PD Dr. Matthias Fladung, Institut für Forstgenetik, vTI  
Prof. Dr. Ulrike Grabski-Kieron, Universität Münster  
PD Dr. Jörg-Michael Greef, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, JKI  
Prof. Dr. Konrad Hagedorn, Humboldt-Universität Berlin  
PD Dr. Ingrid Halle, Institut für Tierernährung, FLI  
Dr. Silvia Haneklaus, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, JKI  
Prof. Dr. Eberhard Hartung, Universität Kiel  
Prof. Dr. Roland Herrmann, Universität Gießen  
Prof. Dr. habil. Pierre Ibisch, FH Eberswalde  
Prof. Dr. Folkhard Isermeyer, Institut für Betriebswirtschaft, vTI  
Dipl. Ing.-Agr. Robert Kaufmann, Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Schweiz  
Dr. Jörg Kleinschmit, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt  
Prof. Dr. Luit de Kok, Universität Groningen, Niederlande  
Prof. Dr. Uwe Latacz-Lohmann, Universität Kiel  
Dr. Oliver von Ledebur, Institut für Marktanalyse und Agrarhandelspolitik, vTI  
Prof. Dr. Bernd Linke, Institut für Agrartechnik Bornim e.V.  
Dipl. Met. Franz-Josef Löpmeier, Agrarmeteorologische Forschung des Deutschen Wetterdienstes  
Prof. Dr. Udo Mantau, Universität Hamburg  
Prof. Dr. Axel Munack, Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik, vTI  
Dr. Hiltrud Nieberg, Institut für Betriebswirtschaft, vTI  
Dr. Rainer Oppermann, Institut für Ökologischen Landbau, vTI  
Prof. Dr. Herbert Oberbeck, TU Braunschweig  
Dr. Jürgen Puls, Institut für Holztechnologie und Holzbiologie, vTI  
Prof. Dr. Gerold Rahmann, Institut für Ökologischen Landbau, vTI  
Prof. Dr. Detlef Rath, Institut für Nutztiergenetik, FLI  
Dr. Thomas Schneider, Institut für Weltforstwirtschaft, vTI  
Prof. Dr. Dr. Ewald Schnug, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, JKI  
Dr. Lars Schrader, Institut für Tierschutz und Tierhaltung, FLI  
Prof. Dr. Andreas Susenbeth, Universität Kiel  
Prof. Dr. Friedhelm Taube, Universität Kiel  
Prof. Dr. Klaus-Dieter Vorlop, Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik, vTI  
Prof. Dr. Dr. habil. Drs. h.c. Gerd Wegener, TU München  
Prof. Dr. Hans-Joachim Weigel, Institut für Biodiversität, vTI  
Prof. Dr. Peter Weingarten, Institut für Ländliche Räume, vTI  
Dr. Nicole Wellbrock, Institut für Waldökologie und Waldinventuren, vTI