

Institute of Plant Nutrition and Soil Science

Silvia Haneklaus
Rose-Marie Rietz
Jutta Rogasik (Eds.)

Recent advances in agricultural chemistry

Published as: Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 286

Braunschweig
Federal Agricultural Research Centre (FAL)
2005

Sonderheft 286
Special Issue



Landbauforschung
Völkenrode
FAL Agricultural Research

Recent advances in agricultural chemistry

edited by

**Silvia Haneklaus, Rose-Marie Rietz, Jutta Rogasik
and Susanne Schroetter**

Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie;
detailed bibliographic data is available in the Internet at <http://dnb.ddb.de> .

Die Verantwortung für die Inhalte der einzelnen Beiträge liegt bei den jeweiligen Verfassern
bzw. Verfasserinnen.

2005

**Landbauforschung Völkenrode - FAL Agricultural Research
Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL)
Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, Germany**

landbauforschung@fal.de

Preis / Price: 11 €

**ISSN 0376-0723
ISBN 3-933140-92-7**

Contents

Preface

S. Haneklaus, H. Daybell and K. Walker

The importance of low mobile soil water for crop supply with sulphur

E. Bloem, R. Cichota, Q. de Jong van Lier, G. Sparovek and E. Schnug

1

Schwefelgehalte, Proteinfractionen und Kleberzugfestigkeit von Weizen eines Ringversuchs biologisch-dynamischer Züchter

I. Hagel, S. Haneklaus und E. Schnug

11

Influence of elemental sulphur and nitrogen fertilisation on the concentration of essential micro-nutrients and heavy metals in nasturtium (*Tropaeolum majus* L.)

S. Haneklaus, E. Bloem, S. Hayfa and E. Schnug

25

Schwermetalle in P-Düngern

S. Kratz und E. Schnug

37

Eignung spektraler Signaturen zur Lokalisierung von Schwefelmangel in Raps mit Hilfe der Fernerkundung

H. Lilienthal und E. Schnug

47

15 years of precision farming – lessons to be learned for Malaysia

M.F. Mohd Noor, A. Gassner and E. Schnug

55

Predicting sugar beet yield variability using yield maps of combinable crops and the ‘monitor pedo cell’ approach

K. Panten, S. Haneklaus, J. Rogasik and E. Schnug

65

Kalkung und Bodenfruchtbarkeit

J. Rogasik, P. Kurtinez, K. Panten, U. Funder, H. Rogasik, S. Schroetter und E. Schnug

71

Research aspects for crop salt tolerance under irrigation with special reference to root environment

U. Schleiff

83

Einfluss von Parametern der Bodenfruchtbarkeit und Düngung auf den Uran-Transfer Boden-Pflanze

S. Schroetter, M. Rivas, M. Lamas, E. Schnug und J. Fleckenstein

95

Genotypical differences in callus induction and regeneration of plantlets produced from asparagus (*Asparagus officinalis* L.) anther cultures

T. Shalaby, S. Haneklaus and E. Schnug

107

Kalkung und Bodenleben

K. Stöven und E. Schnug

113

Untersuchung zum Informationspotenzial multispektraler Satellitendaten zur Aktualisierung großmaßstäbiger Bodenkarten

E. Zillmann und E. Schnug

123



Frank R

PREFACE

This book is a homage to Ewald Schnug who has been a scientist now for more than 25 years and who has always been a friend and shining example of a complete professional to all who have worked and studied with him. What he did in the previous 25 years we can not comment on.

For all of us, dear Ewald, who contributed to this book we simply cannot imagine life without your visions, motivation and confidence in our capabilities, so it is with very real pleasure that we give back a little bit of what you have done for all of us by writing this book.

Thinking of the good, old days we could certainly contribute one or more interesting chapters that might fascinate the reader even more than a scientific paper. Yet, in this book you will find topics that accompanied you throughout your scientific career, such as the influence of acidifying fertilisers on the uptake of heavy metals by plants. When you see others, such as the contribution on the model for predicting S deficiency, we know for sure it will make you particularly happy to see it published. After all it should be easy for you to see your fingerprints on all of our contributions.

We hope that this book will be your favourite literature, for at least the next 10 years and that you are proud of the traces you left in the world of science by teaching us.

Our wish for you for the next 50 years is that you never lose your unique enthusiasm and that you will go on to inspire many more people - as you did us!

One last word from Stevie Wonder's song "That's what friends are for!"

*Keep smiling, keep shining
Knowing you can always count on me for sure
That's what friends are for
For good times, and bad times
I'll be on your side forever-more
That's what friends are for*

Silvia, Herbert and Kerr

The importance of low mobile soil water for the S supply of plants

Elke Bloem¹, Rogerio Cichota², Quirijn de Jong van Lier³, Gerd Sparovek³, and Ewald Schnug¹

¹Institute of Plant Nutrition and Soil Science, Federal Agricultural Research Centre (FAL), Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, Germany

²Institute of Natural Resources, Massey Univ. Palmerston, New Zealand

³Univ. of Sao Paulo, CP9, 13418-900 Piracicaba (SP) Brazil

Summary

Sulphur (S) deficiency is a serious nutrient disorder in European agriculture and there is a need for reliable methods to predict the S nutritional status of crops under various conditions. Former studies have shown that the soil water content is of special relevance for the S supply because soil sulphate mainly follows the water movement in agricultural soils with a pH > 5. Groundwater can contribute with high amounts of S for plant uptake when ascension takes place. On the other side, precipitation can leach plant available S out of the rooting zone. S that is stored in the low mobile water fractions is thought to be protected from leaching but still available for plant uptake. The significance of this important pool for plant nutrition is usually neglected in modelling. A simulation model was developed to describe the size and meaning of the low mobile soil water pool. It was the aim of this study to calculate the amount of plant available S stored in the low mobile water fraction using varying model parameters for soils under humid conditions. Additionally, the capability of the model to provide accurate data was tested by means of measured input data. The simulation results showed that HySuMo (Hydrological Sulphur Model) was able to calculate the S nutritional status of crops sufficiently accurate under different climatic scenarios and different soil conditions. Besides that the model proved to be suitable to predict S deficiency under different soil conditions. Another result of the presented study was that the low mobile soil water fraction is supposedly a highly significant S pool for plants.

Keywords: *HySuMo (Hydrological Sulphur Model), low mobile water, mobile water, solute transport, sulphur supply*

Zusammenfassung

Schwefel(S)mangel hat sich in den letzten Jahrzehnten in Europa zu einer der wichtigsten Ernährungsstörungen bei landwirtschaftlichen Kulturen ausgeweitet und bis heute fehlen immer noch zuverlässige Methoden, um den S-Versorgungszustand einer Fläche sicher zu prognostizieren. Studien haben ergeben, dass das Bodenwasser von besonderer Bedeutung für die S-Versorgung ist, da die pflanzenverfügbare S-Form, das Sulfat, in landwirtschaftlichen Böden mit pH-Werten über 5 der Wasserbewegung im Boden folgt. Das Grundwasser kann zu wesentlichen Einträgen in

Agrarökosysteme führen, wenn ein kapillarer Aufstieg von Bodenwasser möglich ist, während hohes Regenaufkommen zu einer starken S-Auswaschung führt. Ein Teil des Bodenwassers, das in Mikroporen gespeichert ist, ist nahezu immobil, und das darin gelöste Sulfat ist vor Auswaschung geschützt. Die Bedeutung dieses Pools für die Pflanzenernährung wurde bislang weder berücksichtigt, noch quantifiziert.

In diesem Beitrag wird ein Simulationsmodell vorgestellt, das Größe und Bedeutung dieses nur geringfügig mobilen Wassers für die Pflanzenernährung kalkulieren sowie eine Vorhersage über die S-Versorgung am Standort erlauben soll. Ziel der Untersuchung war es, die Menge an pflanzenverfügbarem S in der mobilen und geringfügig mobilen Wasserfraktion unter verschiedenen Umweltbedingungen zu berechnen und zu testen, ob das Model HySuMo in der Lage ist, den Nährstoffversorgungszustand einer Fläche zu prognostizieren. Die Ergebnisse zeigen, dass das Modell unterschiedliche Bedingungen sehr gut abbildet und darüber hinaus brauchbar ist, den S-Versorgungszustand einer Fläche vorauszusagen. Des Weiteren konnte anhand des Modells gezeigt werden, dass geringfügig mobiles Bodenwasser anscheinend eine wichtige Reservefraktion für S im Boden darstellt.

Schlüsselwörter: *geringfügig mobiles Bodenwasser, HySuMo (Hydrological Sulphur Model), mobiles Bodenwasser, Nährstofftransport, Schwefelversorgung*

Introduction

Although most nutrients are excessively abundant in northern European agricultural systems, sulphur (S) is one of the most important yield-limiting factors since clean air acts came into force (Richards, 1990; Booth et al., 1991; Pedersen, 1992; Knudsen & Pedersen, 1993; Kjellquist & Gruvaeus, 1995). Besides the drastic reduction of atmospheric S depositions since the beginning of the 1980s, an increasing use of S-free fertiliser products were the main reasons for this trend (Schnug & Haneklaus, 1994).

S deficiency can cause yield losses (Booth et al., 1991; Schnug & Haneklaus, 1994), may have a great influence on crop quality parameters such as protein content and composition (Eppendorfer & Eggum, 1994) and influences the baking quality of wheat

(Haneklaus et al., 1992; Schnug et al., 1993a). Also, environmental factors such as the efficiency of nitrogen utilisation by plants are related to the S status of plants (Schnug et al., 1993b) and the susceptibility of crops against some diseases was observed to be influenced by the S nutrition (Schnug et al., 1995; Bourbos et al., 2000; Klikocka et al., 2004). Severe S deficiency is still an important problem in agricultural production and thus, reliable fertiliser recommendations are required. The most common methods for the determination of the S nutritional status are soil and plant analysis (e.g. Anderson et al., 1992; Eriksen et al., 1998), and the assessment of a site-specific S balance. Soil analysis (plant available sulphate) is, in general, not reliable because of a high spatial and temporal variability of sulphates in soils (Schnug & Haneklaus, 1998; Bloem et al., 2001; Haneklaus et al., 2002). The high variability results from the high mobility of sulphate in agricultural soils with a pH > 5 (Curtin & Syers, 1990; Ajwa & Tabatabai, 1995) thus, following the water movement. Leaching (Kühn & Weller, 1977; Widdowson & Blakemore, 1982) and ascension of sulphate from subsoil or shallow groundwater sources (Bloem, 1998; Eriksen et al., 1998) may change the amount of plant available sulphate within short time intervals. Therefore, the analysis of soil sulphate delivers only a temporary value in most humid soils, which can change quickly (Bloem et al., 2001). In tropical soils, like those prevailing in the south-eastern parts of Brazil, soil sulphate adsorption is more important, because of the lower pH values resulting from the higher acidity in the soil solution (Prochnow et al., 1998; Lara et al., 2001; Da Rocha et al., 2003).

Plant analysis (total S) is a well-adopted method for the determination of the S status of crops but practically not applicable due to possible contaminations by foliar application of S containing products and the short time gap between sampling and fertilisation (Haneklaus et al., 1995; Schnug & Haneklaus, 1998).

S balances are a promising possibility for farmers to estimate the nutritional status of a site. Sources and sinks commonly included in S balances are inputs by atmosphere, fertilisers, plant residues and mineralisation. Outputs are represented by S off-take and S losses due to leaching. A frequent problem when establishing S balances is that the budget does not correspond with the observed S supply. The main reason is that under temperate conditions the spatio-temporal variation of hydrological soil properties controls most of the plant available sulphate content. The significance of plant available soil water as a source and storage pool for S has been disregarded or underestimated so far. Especially under humid growth conditions, plant available soil water can be the largest contributor to the S balance (Bloem, 1998) because groundwater is a large pool for S with

concentrations of 5 - 100 mg L⁻¹ S (Isermann, 1993; Bloem, 1998). A site-specific S budget, which includes hydrological information, is a more promising way for the evaluation of the S supply. HySuMo (**H**ydrological **S**ulphur **M**odel) was developed to combine water flow patterns in the soil-plant system and the availability of soil sulphate for plants with the aim to deliver an assessment of the S supply.

S deficiency occurs more often on sandy soils because soils rich in clay minerals can store more water and consequently more sulphate (Bloem, 1998; Schnug & Haneklaus, 1998). Clay soils contain a higher quantity of micro-pores, storing water under higher potentials in a less mobile form. The mobile soil water pool is defined as the water-filled pore space which transports water and chemicals, while the low mobile fraction is the water-filled pore space that apparently contains stagnant water and chemicals (Okom et al., 2000) and this fraction is often addressed as immobile water from a hydrological point of view. In the present study this fraction is further addressed as the low mobile water because the nutrients which are bound in this fraction are not immobile but only low mobile. The understanding of the importance of this micro-pore space as a pool for storing nutrients, protecting them from excessive leaching and making them available for plant nutrition, is still insufficient. The retention of S in surface soils is strongly dependent on soil pH and mineralogy. Rapid leaching may, however, also be observed under tropical soil conditions by preferential flow under non-equilibrium conditions that usually occur during and shortly after rainfall.

The mobile, and low mobile water fractions and the transport of solutes are usually followed up by using tracer ions (e.g.: Cl⁻ or Br⁻) in soil columns under field saturated or unsaturated conditions (Flühler et al., 1985; Angulo-Jaramillo et al., 1996; Shukla et al., 2000). Different models (mobile-immobile model - MIM, pulse breakthrough curves, frontal breakthrough curves, single tracer method, or sequential tracer experiments) were used to describe the transport of solutes in soils (Clothier et al., 1992; Jacobsen et al., 1992; Jaynes et al., 1995; Oliver & Smettem, 2003), but no method delivered satisfactory results under varying field conditions for S (Oliver & Smettem, 2003).

HySuMo simulates the S cycle in the soil, the soil water fractions and plant uptake, including the mobile and low mobile soil water fraction. In HySuMo a combination of the convection-dispersion equation for the evaluation of solute flow and the mobile-immobile model (Van Genuchten & Wierenga, 1976; Vogeler et al., 1998) was expected to significantly improve the prognosis of S fluxes and the modelling of soil S balance for different soil and climatic conditions and therefore was chosen as a basic input. Usually, solute

transport and the different water fractions are calculated to simulate nutrient leaching, or contamination with harmful solutes (Flühler et al., 1985). The possible protective function of the low mobile fraction (against leaching) with respect to mobile nutrients was not discussed before.

The aims of this paper were to show the relevance of the mobile/immobile soil water concept for S balance modelling and to evaluate the suitability of the model to predict the S status for soils under humid conditions by verifying if the model is sensitive to factors that are known to influence the S balance in agricultural systems.

Model Description

HySuMo was designed to predict the risk of S deficiency and to calculate the S content of different soil water fractions. HySuMo combines a hydrological, a plant growth, and a soil S model. In the following section the corner marks of HySuMo are described.

The S balance was simulated for a soil depth of 50 cm, defined in terms of its hydraulic properties. Plant development was simulated using the heat unit approach. (Wilson & Barnett, 1983). Carbon assimilation was estimated by the method proposed by Goudriaan and Laar (1978) and Van Heemst (1986). S requirement was defined by a fixed C:S ratio.

Initial water and S content of both, mobile and low mobile fractions were defined and a simulation was performed using a time step Δt . During each time step (Δt) the water and S balances were calculated subsequently.

Water balance

The water balance is composed of drainage, transpiration, evaporation, capillary ascension and rainfall, considered in this order. Drainage was calculated by

$$f_D = f_{D,\max} \left(\frac{\theta - \theta_{nd}}{\theta_s - \theta_{nd}} \right)^k$$

with f_D ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) being the drainage rate,

$f_{D,\max}$ ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) the drainage rate at saturation,

θ_s ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) the soil water content at saturation,

θ_{nd} ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) the soil water content at which drainage ceases and

θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) the current soil water content.

Drainage was subtracted from the mobile water fraction.

Daily transpiration and evaporation were estimated by the FAO-Penman-Monteith equation (FAO, 1998). Transpiration and evaporation rates were calculated separately for both, mobile and low mobile water, based on extractability factors that are defined as a function of soil water content. Mobile and low mobile

water fractions have individual critical soil water contents (θ_{lm} and θ_{li}), which were used to calculate the corresponding extractability factor F_{em} and F_{ei} (Fig. 1). The total extraction was weighted according to these extractability factors.

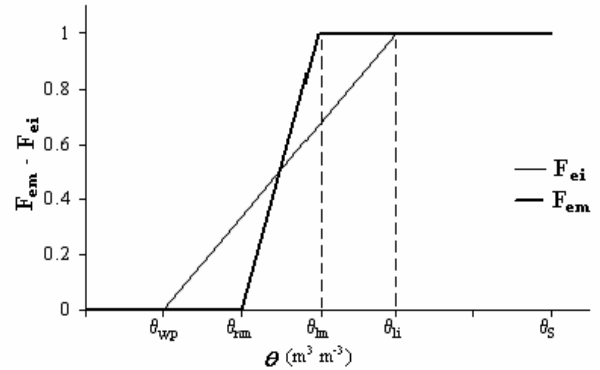


Fig. 1: Extractability factors as a function of soil water content

Ascension was calculated as a function of the soil water content by

$$f_A = f_{A,\max} \left[\cos \left(\pi \frac{\theta - \theta_{na}}{\theta_{ba} - \theta_{na}} \right) \right]^2$$

with f_A ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) being the ascension rate,

$f_{A,\max}$ ($\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) the maximum ascension rate,

θ_{ba} ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) the soil water content at which ascension starts,

θ_{na} ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) the soil water content at which ascension ceases and

θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) the current soil water content. Ascension was added to the mobile water fraction.

Rainfall data was based on hourly measurements; no runoff was supposed to occur, and rainfall was added to the mobile water fraction.

In the model the low mobile water content is filled up to saturation by the mobile water, if enough water is available.

Sulphur balance

S in- and outputs from pores can occur by mass flow with water, mineralisation and active plant uptake. Mass flow with water was estimated as the product of water flows calculated in the water balance and the concentration of S in this water. The mineralisation rate was assumed to be constant, and mobilisation and immobilisation processes in these fractions are balanced. Active uptake of S by plants was estimated as a function of S concentration (S_{soil} , $\text{kg m}^{-3} \text{S}$) for each S pool. Below a critical concentration of plant available sulphate in the soil (S_{crit}) S uptake becomes less than required for optimum plant growth ($U_{S,\max}$). It was assumed to be reduced according to,

$$U_S = U_{S,\max} \left(\frac{S_{\text{soil}}}{S_{\text{crit}}} \right)^r$$

where the exponent r allows simulation of different shapes of S-uptake reduction. For $S_{\text{soil}} > S_{\text{crit}}$, U_S equals $U_{S,\max}$ at a maximum S uptake rate (Fig. 2).

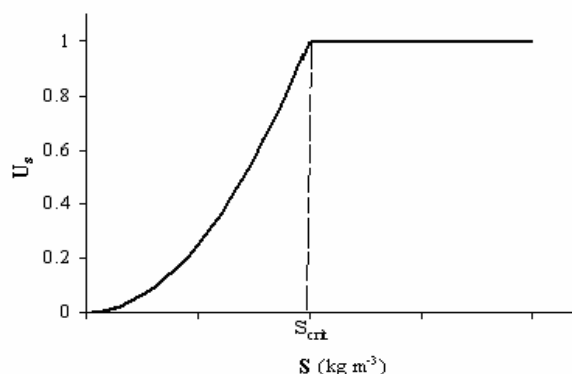


Fig. 2: Sulphur uptake factor (U_S) in relation to the soil sulphur concentration

At last, the S transfer (Q , kg) between mobile and low mobile fractions was estimated by Fick's equation of diffusion:

$$Q = D_s \frac{\Delta S}{l} A_i \Delta t$$

with D_s ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) being the diffusivity of S in water,

ΔS (kg m^{-3}) the difference of S concentration between low mobile and mobile fractions,

l (m) the boundary layer thickness,

A_i (m^2) the interface area between both fractions and Δt (s) the time interval.

The model HySuMo calculates the S content in the different soil water fractions, and in soils and plants on a daily basis. The result is influenced by the different input parameters of the model like soil texture, groundwater influence and climatic conditions.

Evaluation of model input parameters and simulation scenarios

Calculations of the immobile water fraction delivered values ranging from up to 40% to less than 1% of the total water content (De Smedt et al., 1992; Okom et al., 2000; Oliver & Smettem, 2003). The mobile water was generally found to range from 70 to 95% of the total water content (Van Wesenbeck & Kachanowski, 1991; Izadi et al., 1993; Clothier et al., 1995; Okom et al., 2000) with an average of 85% for several soils ranging in texture from sand to clay (5.5 – 50.2 % clay). Oliver and Smettem (2003) found immobile water contents of 10% for sandy soils. In the simulations presented in this study for a sandy soil (IS) a low mobile water content of $0.07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ was assumed and for loamy soils (sL) a corresponding

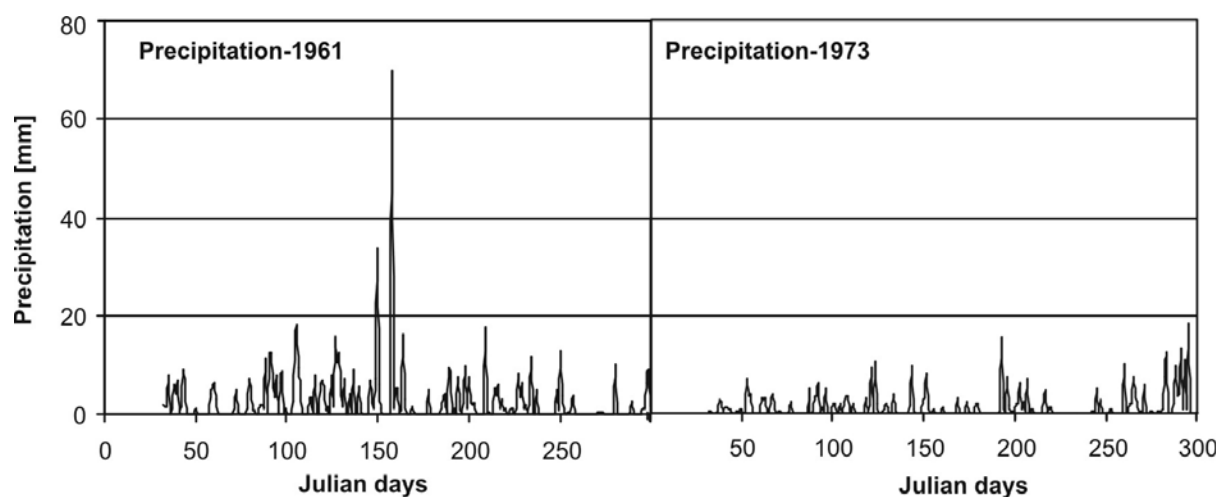
value of $0.135 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. The actual storage capacity of nutrients in the low mobile water is not yet known. Theoretically, nutrients in the low mobile water fraction are protected from leaching, but available for plants. Therefore the higher the fraction of low mobile water, the higher will be the storage of nutrients in this pool. This is of special importance for highly mobile and limited nutrients like sulphate. Field experiments have already shown that soil texture is an important parameter for the S supply of crops: the higher the clay content of a soil, the higher was the S content in younger leaves of oilseed rape ($Y = 0.141 \cdot X + 2.186$ with $Y = S$ [mg g^{-1} S] content in leaves of oilseed rape and $X = \text{clay content}$ [%]; (Bloem, 1998). Deeper soil layers from 60 to 150 cm soil depth were of special importance for the S supply of the crop because of the high mobility of the soil sulphate: leaching of S and capillary rise of S are important processes and deeper soil layers contribute significantly to the S nutrition of crops (Bloem, 1998). HySuMo calculates the S contents in the upper 50 cm of the soil, because the immobile water and its relevance for plant nutrition is thought to be highest in the rooted soil horizon where the nutrients can be depleted by the crops and differences in the nutrient content are highest between the different water fractions. The S input from deeper soil layers by capillary rise is, however, considered in the model.

The study of Bloem (1998) also showed that under humid conditions the amount of precipitation during winter was of great relevance for the S supply in the main growth season as most sulphate was leached from the soil, resulting in a low concentration of plant available sulphate. Another important factor was the access of plants to groundwater as this stores significant amounts of sulphate that can supply S for crop growth. Therefore, the influence of soil texture, groundwater level and precipitation over winter on the S supply of agricultural crops was calculated by HySuMo for plants grown under humid conditions (Tab. 1).

The calculations were made for two years with distinct amounts of precipitation. Climate data from an extremely rainy year (948 mm in 1961) and a dry year (443 mm in 1973) were chosen from Braunschweig (Germany) (Fig. 3). The calculations were done for maize (*Zea mays* L.) from February, 1 until October, 26. The S input through precipitation and mineralisation was set very low, therefore changes in the S content of the different water fractions were mainly caused by hydrological factors and plant uptake. In table 2 the most important simulation parameters are summarised.

Tab. 1: Different scenarios tested by HySuMo

Scenario	Soil texture	Access to groundwater	Amount of precipitation	Expected S nutritional status based on empirical data
	Sandy	no	High (948 mm)	Extreme S deficiency
	Sandy	no	Low (443 mm)	S deficiency
	Sandy	yes	High (948 mm)	S deficiency only when the groundwater table is deeper than rooting depth
	Sandy	yes	Low (443 mm)	S deficiency only when the groundwater table is deeper than rooting depth
	Loamy	no	High (948 mm)	S deficiency
	Loamy	no	Low (443 mm)	Sufficient S supply possible
	Loamy	yes	High (948 mm)	Sufficient S supply
	Loamy	yes	Low (443 mm)	Sufficient S supply

**Fig. 3:** Comparison of the precipitation in 1961 and 1973 in Braunschweig (Germany) during the simulation period from day 32 (February, 1) until day 300 (October, 26)**Tab. 2:** Input parameters for the simulation of the S supply in the mobile and low mobile water fraction with HySuMo

Input parameter		Input value	Unit
Groundwater S concentration		50	mg L ⁻¹
Initial S content of mobile water		20	mg L ⁻¹
Initial S content of immobile water		20	mg L ⁻¹
Initial soil water content mobile fraction	sandy soil	0.180	m ³ m ⁻³
	loamy soil	0.265	m ³ m ⁻³
Initial soil water content immobile fraction	sandy soil	0.07	m ³ m ⁻³
	loamy soil	0.135	m ³ m ⁻³
Profile thickness		50	cm
Start of simulation		01. Feb	Day 32
Sowing date		01. Apr	Day 91
End of simulation		26. Oct	Day 300 ¹
¹ Julian day			

Model results of the simulation scenarios

With the model HySuMo different important hydrological data were calculated (soil water content, low mobile and mobile water content, evapotranspiration) as well as the S content in the different compartments (water fractions, soil, plant), leaching of S, capillary rise, erosion, mineralisation and plant uptake. In figure 4 the results from the HySuMo-simulation which were carried out for the different scenarios shown in table 1 are summarised. In figure 4 the S content in the low mobile water fraction during time course is shown and the cumulative value for the S content in the mobile and low mobile fraction. In all four scenarios the S content was higher in the dry season 1973 than in the wet year 1961 where leaching was obviously the predominant process. Without ascending soil water the S content in both water fractions was decreasing continuously in both years but the process was faster in the rainy year and leaching was higher and faster in sandy soils compared to loamy ones because less water could be stored.

The S-contents in the water fractions were distinctly higher when ascension of soil water occurred. In the loamy soil in 1973 groundwater ascension was important and led to an S input of 38 kg ha⁻¹ S (Tab. 3).

The shapes of the cumulative curves in figure 4 were mainly influenced by the mobile fraction, which was reacting fast to precipitation events and ascension and which was the first to be depleted by the crops. The model is calculating the different parameters for

homogeneous soils but natural soils are often more or less heterogeneous. In such heterogeneous soils, preferential flow of water and chemicals is often observed (Van de Pol et al., 1977; Scotter & Kanchanasut, 1981; White, 1987; Ghodrati & Jury, 1990; Heng et al., 1999a) which is not considered by the model HySuMo. The cause of such preferential flow may include density or viscosity differences between resident and invading fluids, existence of structural voids, layering, discrete lenses in sandy soils, as well as the existence of two or more distinct flow domains (Jury & Flüher, 1992).

The S content in the low mobile water is generally changing more smoothly because of the slow diffusion process (Oliver & Smettem, 2003). Leaching of S occurs in the first place from the mobile fraction.

Therefore, even when starting with the same S content in both fractions the low mobile fraction contained higher S concentrations after a short period of time. The results in figure 4 clearly reveal that in the dry year a significant amount of S was transported into the soil profile from the groundwater. This increase took place mainly in the mobile fraction. The model seems to reflect these processes in a realistic and predictable way. The protection of nutrients in the low mobile fraction from leaching is the reason why this fraction can become important for plant nutrition. In table 3 S drainage, S ascension and S uptake by the plant from the water fractions are shown.

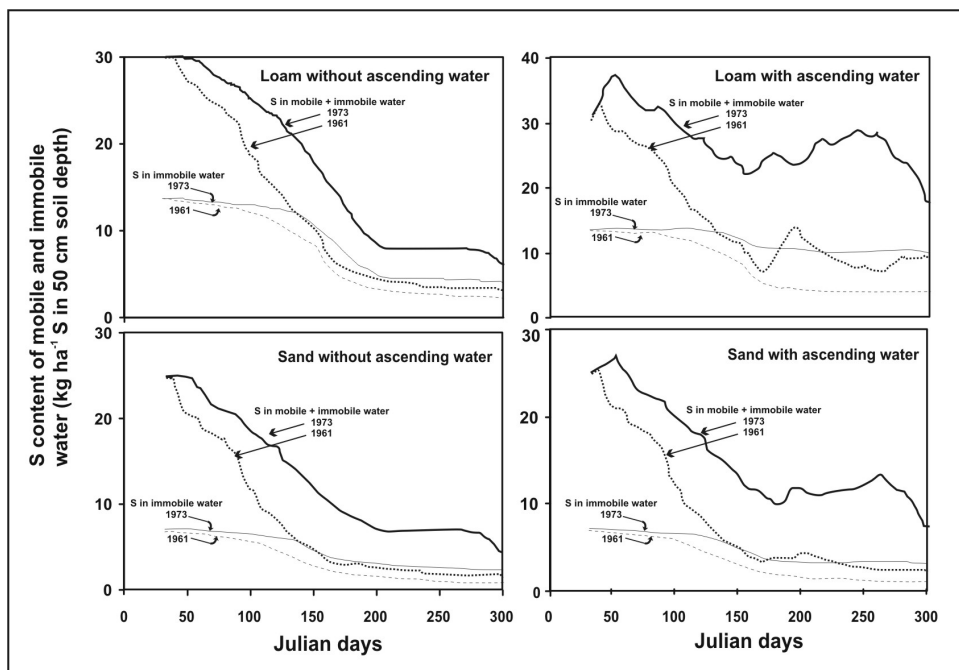


Fig. 4: S content in mobile and low mobile water in relation to soil texture, access of plants to groundwater and amount of precipitation

Additionally, the S nutritional status is characterised and the day is reported when the S content in both water fractions dropped below $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ S}$. Most agricultural crops have high S demands, e.g. oilseed rape 45 to $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ S}$ or cereals about $30 \text{ kg ha}^{-1} \text{ S}$ (Haneklaus et al., 2003). Therefore a plant available soil S content of about 10 kg ha^{-1} will induce S deficiency in most crops.

Under sandy soil conditions without ascension and a high precipitation the S content in the soil profile dropped below 10 kg ha^{-1} on day 107, in the middle of April only two weeks after sowing. In the dry year (1973) the same happened at day 165 (middle of June) without ascension or at day 290 (after harvest) considering ascension. In the rainy year, S deficiency occurred independently of ascension because it accounted only for $2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ S}$ as a result of the high amount of rain during the growth period. In the dry year, no S deficiency occurred when the plant had access to the groundwater while S deficiency was expected when no ascension occurred and the S content was below 10 kg ha^{-1} during main crop growth. The S status in table 3 was estimated on basis of the period when the S content fell below $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ S}$. Plant S uptake was low in all simulations, as a result of the selected low input parameter, to focus the simulation on soil hydrological parameter. The value of 10 kg ha^{-1} was chosen as an extreme value and most crops will already show S deficiency at higher values.

In the loamy soil the S uptake by the plant was comparatively high in the dry year 1973 with a value of up to $19 \text{ kg ha}^{-1} \text{ S}$. But also in the loamy soil S can

become a limiting factor. Only $7.8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ S}$ were available for the crop in the rainy year without ascension. In the rainy year with ascension there was only a short time period of two weeks when the available soil S content fell below 10 kg ha^{-1} . After that, ascending soil water increased the S content again. Ascension of S was of special meaning for the nutritional status of crops in years with high amounts of precipitation interrupted by dry periods. High amounts of precipitation during the vegetative growth can lead to S deficiency, but if plants can overcome a short time of S deficiency the S supply can normalize again after a hot and warm period which allowed ascension of S rich soil or groundwater. This phenomenon can sometimes be observed in oilseed rape. Up to approximately one week after blooming, even severe S starving oilseed rape plants are able to restart and continue with flowering, pod insertion and seed filling and regain full yield if sufficient S is supplied by S rich ascending soil water (Schnug, 1988). This performance is also well reflected by the model estimations. The comparison of the calculated S status of the crop (Tab. 3) with the expected S nutritional status (Tab. 1) reveal that HySuMo could describe the expected plant performance realistically and that the main model parameter and input values are in the right order of magnitude.

Nevertheless, it is necessary to measure the nutrient transport in soils under different conditions of adsorption and drainage to evaluate if HySuMo is able to describe the S nutritional status of a site even under very different hydrological and physical conditions.

Tab. 3: Input parameters for S drainage and S ascension, plant uptake and the S status and HySuMo calculations for different scenarios

Soil	Ascension of ground-water	Soil water content ----- ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) -----	Low mob. water	Year	S Drainage	S ascension	Plant uptake from different pools			S status	Day when plant available S was $<10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ S}$
							mob.	low mob.	total		
							----- ($\text{kg ha}^{-1} \text{ S}$) -----				
Sand	No	0.25	0.07	1961	21	0	0.3	2.7	3.0	Strong S deficiency	107
		0.25	0.07	1973	14	0	2.5	4.7	7.2	S deficient	165
	Yes	0.25	0.07	1961	22	2	0.4	2.8	3.2	Strong S deficiency	108
		0.25	0.07	1973	18	9	4.4	5.1	9.5	Sufficient	290
Loam	No	0.30	0.135	1961	19	0	0.4	7.4	7.8	S deficient	151
		0.30	0.135	1973	12	0	2.5	10.0	12.5	Sufficient	188
	Yes	0.30	0.135	1961	30	19	2.7	8.0	10.7	Sufficient	155-178; 216
		0.30	0.135	1973	32	38	10.4	8.6	19.0	High S supply	Never

Heng et al. (1999a) showed that drainage and retention of sulphate in soil cores changed under varying water flow rates: in fast flow cores the solutes by-passed most of the soil matrix and appeared in the effluent very soon after they were applied. Good simulation results of cation and anion leaching could only be calculated at flow rates of 3-20 mm h⁻¹; at high flow rates of 350 mm h⁻¹ the results were not satisfactory. Oliver and Smettem (1999) found differences in the immobile water content with soil depth ranging from 11-13% in the topsoil and 4.5-21% in the subsoil.

The results of the model show, that the immobile water can contribute significantly to plant nutrition in sandy and loamy soils (Tab. 3) with a plant S uptake from this fraction of 3-5 kg ha⁻¹ S in the sandy and 7-10 kg ha⁻¹ S in the loamy soil. Because of the fine texture more water and therefore more S is stored in the immobile water fraction of the loamy soil. Especially in the rainy year the nutrients in the immobile water are of importance when leaching is the predominant process in the mobile water fraction (Tabel 3) and S uptake from the mobile fraction is extremely low.

Conclusions

Values for the low mobile water content in relation to soil texture were adopted from data reported in literature. With these values HySuMo delivered reasonable values to describe expected plant performance. Sandy soils could store less plant available S and show faster symptoms of S deficiency because of high drainage and low water contents. Wet years led to S deficiency in sandy and loamy soils, while ascending soil water contributed significantly to S balance under dry conditions. HySuMo was able to describe the expected S dynamic at a site considering hydrology, plant growth and soil parameters together. The simulation results also showed that the low mobile water contributed to the S balance in an important way. On an average, 9 - 14 mg L⁻¹ S were prevented from leaching in the low mobile soil water fraction in the sandy soil accounting for 3 - 5 kg ha⁻¹ S in the 0 - 50 cm soil layer. In the loamy soil this value was distinctly higher because of the higher water storage capacity (11 - 17 mg L⁻¹ S equivalent to 7 - 12 kg ha⁻¹ S).

Therefore the immobile soil water is most likely an important storage pool for S in the soil and can be an important source of S for crop nutrition.

The model delivered reasonable theoretical values, so that in a next step simulation data need to be verified by field experiments.

References

Ajwa HA, Tabatabai MA (1995) Metal-induced sulfate adsorption by soils: I. Effect of pH and ionic strength. *Soil Sci* 159: 32-42

Anderson G, Lefroy R, Chinoim N, Blair G (1992) Soil sulphur testing. *Sulphur in Agriculture* 16: 6-14

Angulo-Jaramillo R, Gaudet J-P, Thony J-L, Vauclin M (1996) Measurement of hydraulic properties and mobile water content of a field soil. *Soil Sci Soc Am J* 60: 710-715

Bloem E (1998) Schwefel-Bilanz von Agrarökosystemen unter besonderer Berücksichtigung hydrologischer und bodenphysikalischer Standorteigenschaften. Dissertation, TU Braunschweig

Bloem E, Haneklaus S, Sparovek G, Schnug E (2001) Spatial and temporal variability of sulphate concentration in soils. *Commun Soil Sci Plant Anal* 32 (9&10): 1391-1403

Booth E, Walker KC, Schnug E (1991) The effect of site, foliar sulfur and nitrogen application on glucosinolate content and yield of oilseed rape; proceedings of the International Rapeseed Congress, Saskatoon 2: 567-572

Bourbos VA, Skoudridakis MT, Barbopoulou E, Venetis K (2000) Ecological control of grape powdery mildew (*Uncinula necator*). <<http://www.landwirtschaft-mlr.badenwuerttemberg.de/la/lvwo/kongress/SULFUR.html>>

Clothier BE, Kirkham MB, McLean JE (1992) In situ measurement of the effective transport volume for solute moving through soil. *Soil Sci Soc Am J* 56: 733-736

Clothier BE, Heng LK, Magesan GN, Vogeler I (1995) The measured mobile-water content of an unsaturated soil as a function of hydraulic regime. *Australian Journal Soil Research* 33: 397-414

Curtin D, Syers JK (1990) Extractability and adsorption of sulfate in soils. *J Soil Sci* 41: 305-312

Da Rocha GO, Franco A, Allen AG, Cardoso AA (2003) Sources of atmospheric acidity in an agricultural-industrial region of Sao Paulo State, Brazil. *J Geophysical Research* 108, NO. D7, 4207

De Smedt F, Wauters F, Sevilla J (1986) Study of tracer movement through unsaturated sand. *J Hydrology* 85: 169-181

Eppendorfer WH, Eggum BO (1994) Dietary fibre, starch and amino acids and nutritive value of potatoes as affected by sulfur, nitrogen, phosphorous, potassium, calcium and water stress. *Acta Agric Scand Sect B Soil and Plant Sci* 44: 1-11

Eriksen J, Murphy MD, Schnug E (1998) The soil sulphur cycle. In: Schnug E (ed) *Sulphur in Agroecosystems*, Dordrecht: Kluwer Academic Publ, pp 39-73

FAO (1998) Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO. Rome

- Flühler H, Ferlin P, Selim HM, Schulin R** (1985) Transport von Fluorid, Bromid und Chlorid in Bodensäulen und in einem natürlich gelagerten Boden. *Z Dt Geol Ges* 136: 375-383
- Ghodrati M, Jury WA** (1990) A field study using dyes to characterize preferential flow of water. *Soil Sci Soc Am J* 54: 1558-1563
- Goudriaan J, van Laar HH** (1978) Measurement of some relations between leaf resistance, CO₂-concentration and CO₂-assimilation in maize, beans, lalanggrass and sunflower. *Photosynthetica* 12, 241-249
- Haneklaus S, Evans E, Schnug E** (1992) Baking quality and sulphur content of wheat. I. Influence of grain sulphur and protein concentration on loaf volume. *Sulphur in Agriculture* 16: 31-35
- Haneklaus S, Murphy DPL, Nowak GA, Schnug E** (1995) Effects of the timing of sulphur application on grain yield and yield components of wheat. *Z Pflanzenernaehr Bodenkd* 158: 83-85
- Haneklaus S, Bloem E, Schnug E** (2002) Sulfur. In: Rattan Lal (ed) *Encyclopedia of Soil Science*, New York: Marcel Dekker Inc., ISBN 08247-0634-x, 1282-1288
- Haneklaus S, Bloem E, Schnug E** (2003) The global sulfur cycle and its links to plant environment. In: Abrol YP, Ahmad A (eds) *Sulphur in Plants*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, pp 1-28
- Heng LK, Tillman RW, White RE** (1999a) Anion and cation leaching through large undisturbed soil cores under different flow regimes. 1. Experimental results. *Aust J Soil Res* 37: 711-726
- Heng LK, White RE, Tillman RW** (1999b) Anion and cation leaching through large undisturbed soil cores under different flow regimes. 1. Simulation results. *Aust J Soil Res* 37: 727-741
- Isermann K** (1993) Löslicher N, Sulfat-S und (DO)C im (un-)gesättigten Untergrund von Porengrundwasserleitern bei unterschiedlicher Landbewirtschaftung/Düngung. *Mitt Dt Bodenkd Ges* 71: 141-144
- Izadi B, King B, Westermann D, McCann I** (1993) Field scale transport of bromide under variable conditions in a furrow-irrigated field. *Transaction of the ASAE* 36 (6): 1679-1685
- Jacobsen OH, Leij FJ, van Genuchten MT** (1992) Parameter determination for chloride and tritium transport in undisturbed lysimeters during steady flow. *Nordic Hydrology* 23: 89-104
- Jaynes DB, Logsdon SD, Horton R** (1995) Field method for measuring mobile immobile water content and solute transfer rate coefficient. *Soil Sci Soc Am J* 59: 352-356
- Jury WA, Flühler H** (1992) Transport of chemicals through soil: mechanisms, models and field applications. *Advances in Agronomy*, 141-201
- Kjellquist T, Gruvaeus I** (1995) Sulphur deficiency in oilseed rape and cereals- experience from Swedish field trials. *Z Pflanzenernaehr Bodenkd* 158: 101-103
- Klikocka H, Haneklaus S, Bloem E, Schnug E** (2004) Influence of sulfur fertilization on infections of potato tubers (*Solanum Tuberosum*) with *Rhizoctonia solani* and *Streptomyces scabies*. *Commun Soil Sci Plant Anal* 2004 (in press)
- Knudsen L, Pedersen CA** (1993) Sulfur fertilization in Danish agriculture. *Sulphur in Agriculture* 17: 29-31
- Kühn H, Weller H** (1977) 6 jährige Untersuchung über Schwefelzufuhr durch Niederschläge und Schwefelverluste durch Auswaschung (Lysimeter). *Z Pflanzenernaehr Bodenkd* 140: 431-440
- Lara LBL, Artaxo P, Martinelli LA, Victoria RL, Camargo PB, Krusche A, Ayers GP, Ferraz ESB, Ballester MV** (2001) Chemical composition of rainwater and anthropogenic influences in the Piracicaba River Basin, Southeast Brazil. *Atmospheric Environment* 35: 4937-4945
- Okom AEA, White RE, Heng LK** (2000) Field measured mobile water fraction for soils of contrasting texture. *Aust J Soil Res* 38: 1131-1142
- Oliver YM, Smettem KRJ** (2003) Parameterisation of physically based solute transport models in sandy soils. *Aust J Soil Res* 41: 771-788
- Pedersen CA** (1992) Sulphur deficiency in oilseed rape in Denmark. *Proc. 2nd ESA Congr, Warwick*, pp 280-281
- Prochnow LI, Pismel FS, Cantarella H, Vitti GC, Corrente JE, Kiehl JC** (1998) Use of ion-exchange resin to evaluate the bioavailability of sulfur in the soil. *Comm Soil Sci Plant Anal* 29 (11-14): 1833-1841
- Richards IR** (1990) Sulfur as a crop nutrient in the United Kingdom. *Sulphur in Agriculture* 14: 8-10
- Schnug E** (1988) Quantitative und qualitative Aspekte der Diagnose und Therapie der Schwefelversorgung von Raps (*Brassica napus* L.) unter besonderer Berücksichtigung glucosinolatärmer Sorten. *Habilitationsschrift (DSC thesis)*, Agrarwiss. Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
- Schnug E, Haneklaus S** (1994) Sulphur Deficiency in *Brassica Napus*- Biochemistry- Symptomatology- Morphogenesis-. *Landbauforsch Völkenrode*, SH 144
- Schnug E, Haneklaus S** (1998) Diagnosis of sulphur nutrition. In: Schnug E (ed) *Sulphur in Agroecosystems*, Kluwer Academic Publ., Dordrecht, pp 1-38
- Schnug E, Haneklaus S, Murphy DPL** (1993a) Impact of sulphur supply on the baking quality of wheat. *Asp Appl Biol. Cereal Quality* 36: 337-345
- Schnug E, Haneklaus S, Murphy DPL** (1993b)

Impact of sulphur fertilization on fertilizer nitrogen efficiency. *Sulphur in Agriculture* 17: 8-12

Schnug E, Haneklaus S, Booth E, Walker KC (1995) Sulphur and stress resistance in oilseed rape; proceedings of the 9th International Rapeseed Congress "Rapeseed today and tomorrow", Cambridge, UK, 4-7 Jul 1995, Vol. 1 of 4, 229-231

Scotter DR, Kanchanasut P (1991) Movement of solutes associated with intermittent soil water flow. I. Tritium and bromide. *Austr J Soil Res* 29: 175-183

Shukla MK, Kastanek FJ, Nielsen DR (2000) Transport of chloride through water-saturated soil columns. *Bodenkultur* 51 (4): 235-246

Van de Pol RMP, Wierenga PJ, Nielsen DR (1977) Solute movement in a field soil. *Soil Sci Soc Am J* 41: 10-13

Van Genuchten MT, Wierenga PJ (1976) Mass transfer studies in sorbing porous media. I. Analytical solutions. *Soil Sci Am J* 40: 473-480

Van Heemst HDJ (1986) Physiological principles. In: Van Keulen H, Wolf J (eds) *Modelling of agricultural production: weather, soils and crops*, Pudoc Wageningen: 13-26

Van Wesenbeeck IJ, Kachanowski RG (1991) Spatial scale dependence of in situ solute transport. *Soil Sci Soc Am J* 53: 3-7

Vogeler I, Scotter DR, Clothier BE, Tillman RW (1998) Anion transport through intact soil columns during intermittent unsaturated flow. *Soil & Tillage Res* 45: 147-160

White RE (1987) A transfer function model for the prediction of nitrate leaching under field conditions. *J Hydrology* 92: 207-222

Widdowson JP, Blakemore LC (1982) The sulphur status of soils of the south-west Pacific area; proceedings of the International Sulphur Conference, London 2, pp 805-819

Wilson LT, Barnett WW (1983) Degree-days: an aid in crop and pest management. *California Agriculture*, Oakland, 37 (1/2): 4-7

Schwefelgehalte, Proteinfractionen und Kleberzugfestigkeit von Weizen – Ergebnisse eines Ringversuches biologisch-dynamischer Züchter

Ingo Hagel¹, Silvia Haneklaus² und Ewald Schnug²

¹Umkreis-Institut, Martinstr. 73, D-64285 Darmstadt

²Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, Bundesallee 50, D-38116 Braunschweig

Zusammenfassung

In 91 Weizenproben der Ernte 1997 aus einem Ringversuch biologisch-dynamischer Züchter (fünf verschiedene Standorte) wurde der N- und S-Gehalt sowie verschiedene Proteinfractionen (Gliadin, Gesamt- und HMW-Glutenin) bestimmt. Am Kleber wurden Zugfestigkeitsmessungen durchgeführt.

Zwischen den verschiedenen Sorten bestanden starke Unterschiede in den N:S-Verhältnissen. Keine der Proben wies einen S-Mangel auf, das heißt die N:S-Verhältnisse waren < 17:1; auch die S-Gehalte waren ausreichend für eine hohe Backqualität. Die Kleberzugfestigkeit sank mit steigendem N-Gehalt der Proben. Sie konnte durch die Glutenin: Gliadin-Verhältnisse nur unzureichend erklärt werden: Bei vergleichbaren Glutenin:Gliadin-Verhältnissen > ca. 0,35 stieg die Kleberzugfestigkeit mit sinkenden N- bzw. HMW-Glutenin-Gehalten des Mehls. Diesbezüglich trug HMW-Glutenin nicht zur Erklärung der Klebereigenschaften dieses biologisch-dynamisch angebauten Sortimentes bei. Vermutlich ist nicht nur der Versorgungszustand der Pflanze mit Schwefel, sondern auch mit Stickstoff für die Proteinstruktur bedeutsam, da sinkende Gehalte verfestigend wirkten, insbesondere unter dem Gesichtspunkt vergleichbarer Glutenin:Gliadin-Verhältnisse. Weizentypen mit festen Klebern scheinen daher Ausdruck einer unzureichenden N-Ernährung beziehungsweise eines zu hohen N-Bedarfs der Pflanze zu sein. Die Eignung dieser Sorten für die Verwendung im ökologischen, hier insbesondere im biologisch-dynamischen Landbau, ist daher nur bedingt gegeben.

Einleitung

Schwefelmangel führt bei Weizen zu erheblich festere Teigen (Wrigley et al., 1984). Daher kollidierte in den 80er Jahren unvorhergesehen das Zuchtziel einer Steigerung der Backqualität durch eine Straffung der Proteinstruktur mit einer exogen bewirkten zusätzlichen Verfestigung der Proteinmatrix infolge drastisch reduzierter Schwefel-Einträge in die Ökosysteme (Schnug & Haneklaus, 1994). Eine S-Düngung führte dann auch zu einer Steigerung des Backvolumens (Haneklaus et al., 1992). Und zwar nicht weil die Kleber der modernen Weizensorten zu weich, sondern weil sie durch die Züchtung bereits zu stark verfestigt waren und den neuen Umweltverhältnissen nicht mehr angepasst waren. Die hohe technologische Qualität dieser Sorten kann daher als Resultat eines züch-

terisch unbewusst induzierten S-Mangels angesehen werden, denn sie weisen Kennzeichen auf, wie sie unter S-Mangel-Verhältnissen auftreten: höhere Gehalte besonders an (schwefelarmem) hochmolekularem Glutenin, festere Kleber- und Teigstruktur (Hagel, 2000, 2002). Im Rahmen eines Ringversuches biologisch-dynamischer Züchter wurden verschiedene Weizen-Sorten hinsichtlich ihrer Schwefel- und Stickstoffgehalte, Proteinfractionen und Kleberzugfestigkeit untersucht. Hierbei wurde festgestellt, dass der Kleber bei abnehmender N-Versorgung des Korns und – was zu beachten ist – bei vergleichbaren Glutenin:Gliadin-Verhältnissen fester wird.

Schlüsselwörter: *Backqualität, Schwefel, Stickstoff, Weizen*

Material und Methoden

Die untersuchten Proben stammten aus einem Winterweizenringversuch (Kunz et al., 1997; Müller et al., 1997) von fünf biologisch-dynamischen Züchtern (Dr. B. Heyden, E. Irion, P. Kunz, Dr. K.J. Müller, Dr. H. Spieß) der Ernte 1997. Diese Züchtungsinitiativen sind an verschiedenen Standorten aktiv: Bad Vilbel (bei Frankfurt), Grub (ca. 50 km östlich von München), Köhlingen (Rand der Ostheide im Naturpark Elbufer-Drawehn), Rimpertsweiler (Bodenseebecken), Egg (zwischen Zürichsee und Greifensee, Schweiz). Jeder Züchter brachte drei bis vier eigene Selektionen (vgl. Abschnitt Ergebnisse) in die Prüfung an den fünf Standorten des Ringversuchs ein, die gemäß den unterschiedlichen Züchtungszielen und der Abstammung (moderne, ältere Sorten und alte Landsorten) festere oder weichere Kleberstruktur aufwiesen. Dazu wurden an allen Standorten drei Vergleichssorten (Standard) angebaut (in Klammern die Qualitätseinstufungen): Bussard (E), Batis (A), Tambor (A). Die Feldversuche wurden auf jedem Standort mit 2 - 4 Wiederholungen angelegt. Untersucht wurden jeweils Mischproben dieser Wiederholungen (n = 90). Die Varianten wurden im Folgenden, auch wenn es sich um Zuchtstämme handelte, als Sorten bezeichnet.

Folgende Analysen wurden durchgeführt:

Vermahlung:

Die Proben wurden für die Ganzkornanalysen mittels einer Ultrazentrifugalmühle ZM1 (Fa Retsch, Siebgröße 120 µm) sowie für die Bereitung des Endospermmehls mittels einer Laborwalzenstuhlmühle AQC 109 (baugleich mit Brabender Quadrumat Juni-

or) vermahlen. Letzteres Produkt wird im Text als Mehl bezeichnet. N- und S-Analyse: Die Schwefelanalyse erfolgte mittels Röntgenfluoreszenzanalyse nach Schnug und Haneklaus (1999). Der N-Gehalt der Proben wurde nach *Kjeldahl* bestimmt.

Proteinfraktionierung:

Die Analyse von Gliadin und Glutenin (Gesamt- und HMW-Glutenin) erfolgte nach Wieser (2000 a) mittels fraktionierter Extraktion und nachfolgender Quantifizierung durch Fällung der Proteine und photometrischer Trübungsmessung bei 450 nm. Die für die Trübungsmessung der verschiedenen Proteinfraktionen anfallenden Aliquote differieren, und die gemessenen Absorptionseinheiten dieser Methode stellen keine absoluten Proteingehalte dar. Die erhaltenen Werte von Gesamt- und HMW-Glutenin wurden daher auf das Aliquot des Gliadins (von 0,1 ml) sowie gleiche Ansätze in der Kuvette (von 1,5 ml) umgerechnet, besonders um für die Glutenin:Gliadin-Verhältnisse mit anderen Methoden vergleichbare Werte zu erhalten. Die Variationskoeffizienten der Proteinfraktionen (zusammen für Extraktion, Fällung, Messung) betragen im Mittel aller Untersuchungen 1,8 % (Gliadin), 3,0 % (Gesamt-Glutenin) und 2,8 % (HMW-Glutenin) und lagen damit in dem von Wieser (2000 a) für dieses Verfahren als ausreichend angegebenen Bereich.

Zugfestigkeitsmessungen an Weizenklebern:

Die Kleberpräparation erfolgte mit einer Glutomatic (Fa. Falling Number). Hierzu wurden 10 g Mehl mit ca. 6 ml 2 %iger NaCl angeteigt, und nach 2 Min. Teigruhe wurde der Kleber in der Glutomatic ausgewaschen. Die Zugfestigkeit des präparierten Klebers wurde nach Kieffer et al. (1981, 1998) mit einem SMS Texture Analyzer (Fa. Winopal) bestimmt.

Ergebnisse

Die N-Gehalte der Proben variierten mit Werten von 1,50 – 2,79 % um fast das Doppelte (Abb. 1). Da Schwefel ein Bestandteil des Proteins ist, stieg auch dessen Gehalt mit dem N-Gehalt an (Abb. 1). Alle Proben wiesen ausreichende S-Gehalte auf, und das N:S-Verhältnis war stets enger als 17:1, welches als Grenzwert für eine hohe Backqualität gilt. Die S-Gehalte und N:S-Verhältnisses zeigten jedoch deutliche Sortenunterschiede: Die S-Gehalte der Sorten Imu, Inntaler, Hafi, S2.27.3, S1.09.1, SDA, B7 und Rastatter (im Folgenden bezeichnet als Sortengruppe S+) lagen deutlich höher und stets oberhalb des Mittels (Regressionslinie) der Sorten Batis, Bussard, Tambor, BP-130, C7, EPG-18, F113, FMH-144, Jacoby 2, PGR und PK54 (bezeichnet als Sortengruppe S-) (Abb. 1). Die mittleren N:S-Verhältnisse unterschieden sich mit 14,0 (Sortiment S-) und 12,2 (Sortiment S+) signifikant. Mit Blick auf einzelne Sorten wiesen Imu und EPG-18 mit Werten von 11,4 und 15,1 die am stärksten sich unterscheidenden N:S-Verhältnisse

auf und kennzeichnen damit sowohl die starke Variabilität des untersuchten Materials, als auch den weiten Selektionsspielraum für die Züchtung.

Auch die Kleberzugfestigkeiten variierten stark, wie an einigen Extensogrammbeispielen ersichtlich wird (Abb. 2). Der Grund dafür liegt natürlich zum einen in den Sortenunterschieden, zum anderen in den N-Gehalten der Mehle begründet: Stiegen letztere, sanken die Dehnwiderstände der Kleber. Diese Beziehung ist exemplarisch in Abb. 3 dargestellt. Die verschiedenen Sorten reagierten auf sinkende N-Gehalte des Mehls sehr unterschiedlich: Die Steigungskoeffizienten der linearen Regressionen aller Sorten lagen zwischen -0,01 (Imu) und -1,0 (B7) (Abb. 3). Dabei wiesen 15 der untersuchten 19 Sorten sehr hohe Bestimmtheitsmaße von 57 bis 95 % auf, was innerhalb einer Sorte die bekannte Bedeutung des N-Gehaltes des Korns für die Kleberstruktur unterstreicht.

Aufgrund der geringen Probenzahl ($n = 5$) fielen trotz hoher Bestimmtheitsmaße nicht alle Regressionen signifikant aus. Dennoch wurden in Abb. 3 zur besseren Darstellung des Spektrums der Steigungen (d.h. des unterschiedlichen Verhaltens der Sorten, auf sinkende N-Gehalte mit steigenden Dehnwiderständen zu reagieren) auch bei nicht signifikanten Beziehungen (n.s.) die Regressionsgeraden angezeigt.

Die Beziehung zwischen den N-Gehalten und den Kleberzugfestigkeiten zeigte deutlich zwei Gruppen (Abb. 4): Die Dehnwiderstände der Sorten EPG-18, Hafi, Imu, Inntaler, PK54, Rastatter, SDA und S2.27.3 (im Folgenden bezeichnet als DW-) lagen bei vergleichbaren N-Gehalten niedriger als die der Sorten Batis, Bussard, Tambor, BP130, B7, C7, F113, FMH144, Jacoby 2, PGR und S1.09.1 (im Folgenden bezeichnet als DW+).

Der über alle Sorten der Gruppe DW- gemittelte Steigungskoeffizient der linearen

Regressionen der Beziehungen zwischen N-Gehalten und Dehnwiderständen (gemäß Abb. 3) lag mit einem Wert von -0,35 signifikant niedriger als der der Sortengruppe DW+ mit einem Wert von -0,58. Damit reagierten die Sorten der Gruppe DW- auf sinkende N-Gehalte des Korns weniger empfindlich mit einer Verfestigung des Klebers als die der Gruppe DW+, wiesen allerdings auch weichere Kleber auf. Zu beachten ist, dass die Sorten der Gruppen DW- und DW+ (Abb. 4) zwar weitgehend, aber nicht vollständig mit den Sorten der Gruppen S+ und S- (Abb. 1) identisch sind. Diese unterschiedliche Klassifizierung ist darauf zurückzuführen, dass die Gruppierung für jedes Merkmal getrennt erfolgte und nicht auf Basis einer Zuordnung zur S- und S+ Gruppe.

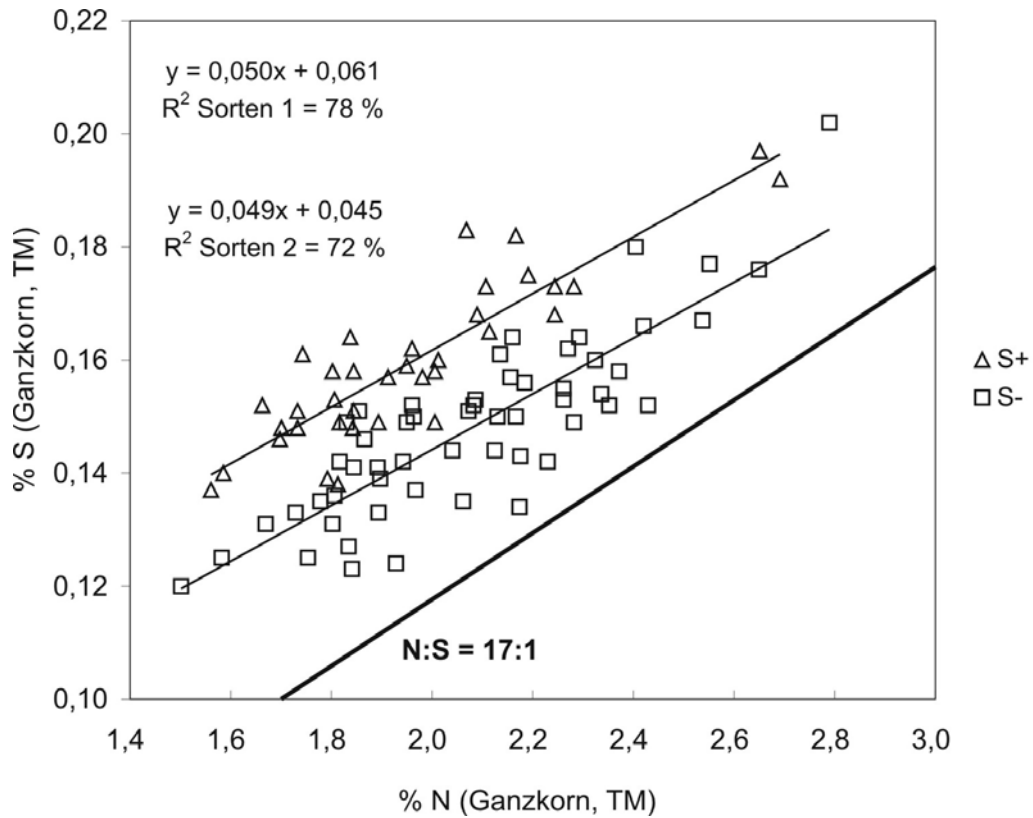


Abb. 1: Beziehung zwischen N- und S-Gehalten von Weizensorten (Ganzkorn) eines Ringversuchs (Erklärungen: S+ = Sorten B7, Hafi, Imu, Inntaler, Rastatter, SDA, S1.09.1 und S.2.27.3; S- = Sorten Batis, BP-130, Bussard, C7, EPG-18, FMH-144, F113, Jacoby 2, PK54 und Tambor)

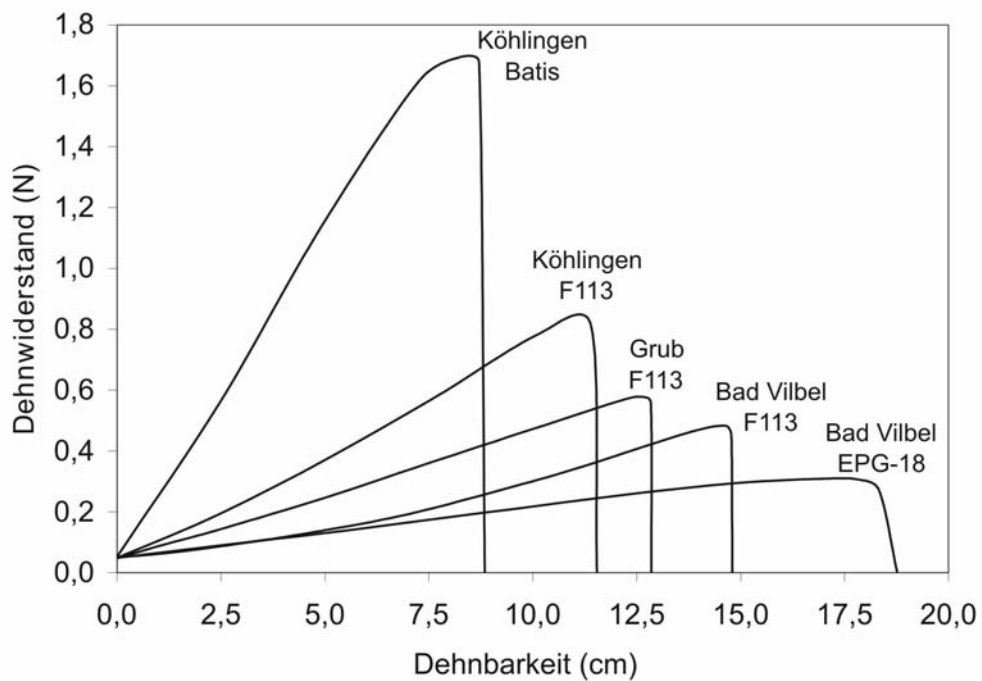


Abb. 2: Spektrum des Zugverhaltens von Weizen eines Ringversuchs anhand verschiedener Weizensorten (Batis, EPG-18, F113) ausgewählter Standorte (Bad Vilbel, Grub, Köhlingen) (Erklärung: N = Newton)

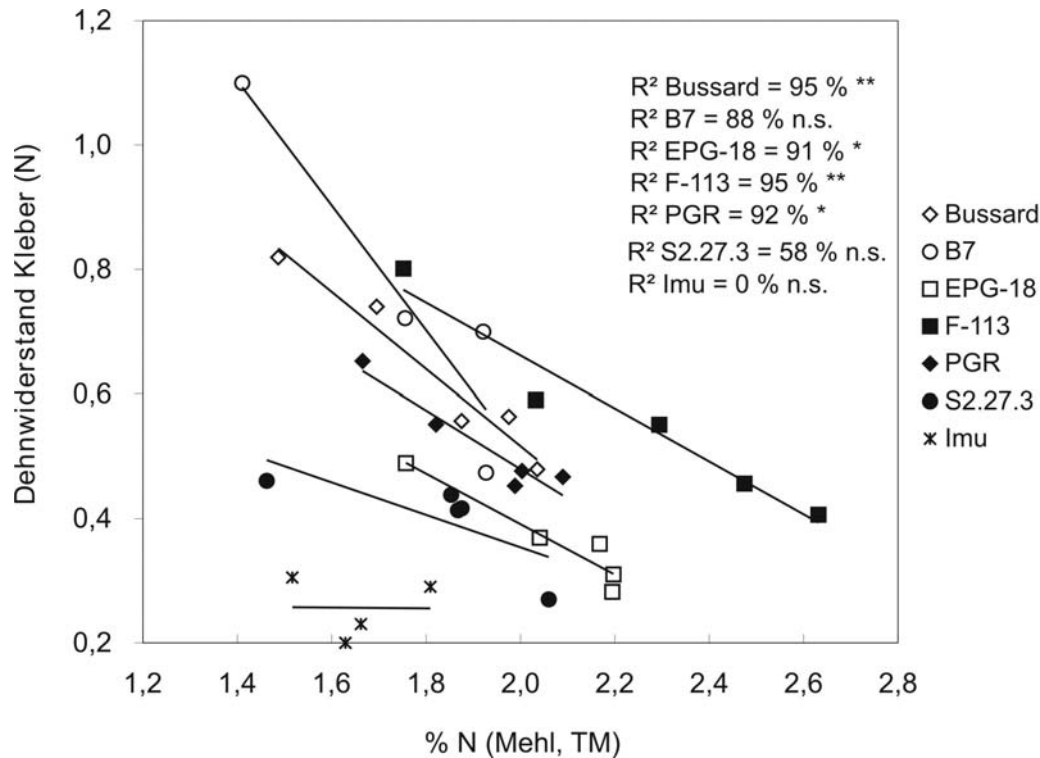


Abb.3: Beziehungen zwischen N-Gehalten (Mehl) und Kleberzugfestigkeiten von Weizensorten eines Ringversuchs (Dehnwiderstand des Klebers, angegeben in Newton (N))

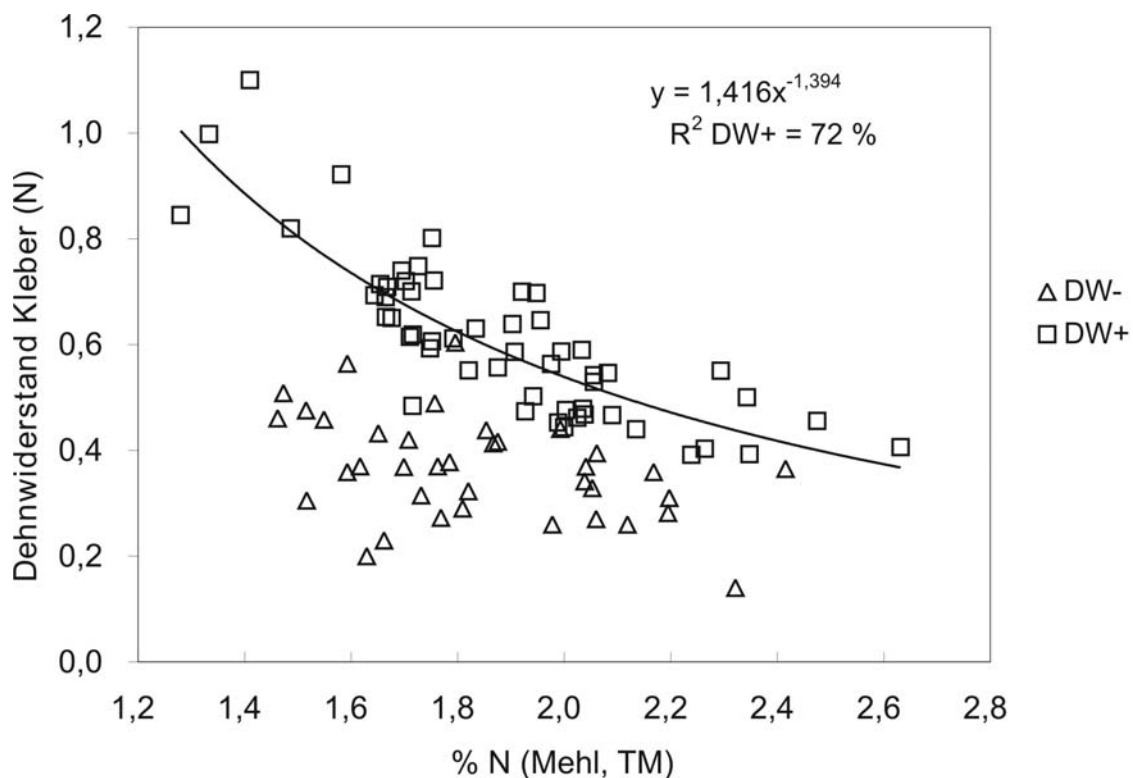


Abb. 4: Beziehungen zwischen N-Gehalten (Mehl) und Kleberzugfestigkeiten von Weizensorten eines Ringversuchs (Erklärungen: N = Newton; DW- = Sorten EPG-18, Hafi, Imu, Inntaler, PK54, Rastatter, SDA, S2.27.3; DW+ = Sorten Batis, Bussard, Tambor, BP-130, B7, C7, FMH-144, F113, Jacoby 2, PGR, S1.09.1)

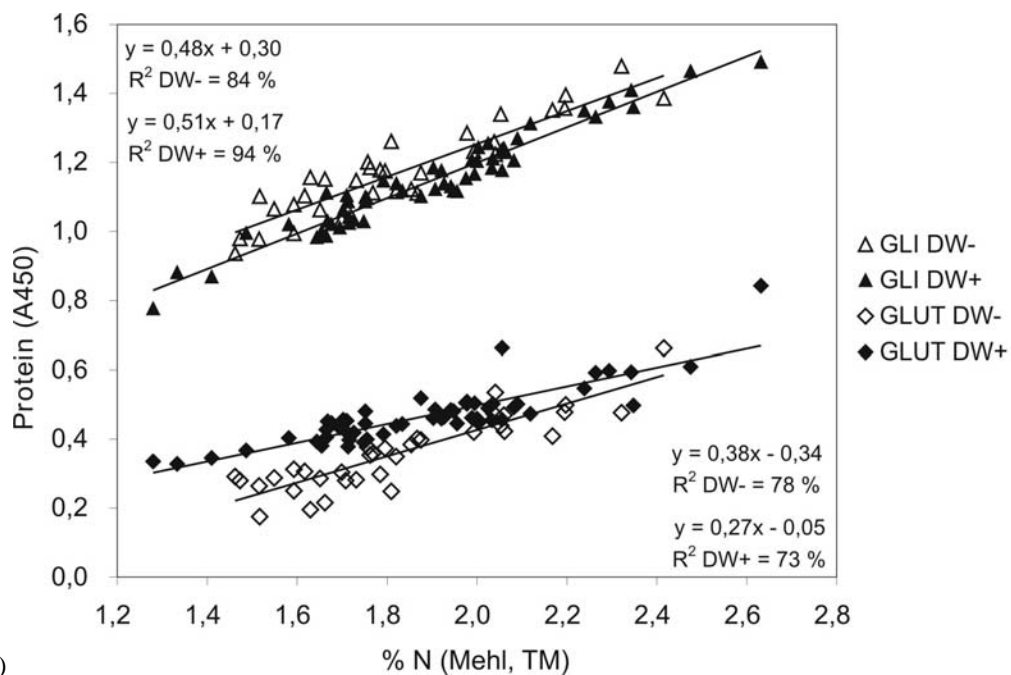


Abb. 5: Beziehungen zwischen den N-Gehalten sowie Gliadin (GLI) und Gesamt-Glutenin (GLUT) von Weizen (Mehl) eines Ringversuchs (Erklärungen: A 450 = Absorptionseinheiten, DW- und DW+ = Sortengruppen gemäß Abb. 4)

Mit steigenden N-Gehalten der Mehle stiegen auch die Gehalte an Gliadin, Gesamt- und HMW-Glutenin (Abb. 5 und 6). Aus den Steigungskoeffizienten der linearen Regressionen ist der gegenüber dem Gesamt-Gluteningehalt stärkere Anstieg des Gliadins ersichtlich. Da die verschiedenen Proteinfractionen von großem Einfluß auf den Dehnwiderstand des Klebers sind, wurden die in den Abb. 5–7 dargestellten Beziehungen gemäß den Sortengruppen DW- und DW+ (Abb. 4) untergliedert: Die Gruppe DW+ wies gegenüber der Gruppe DW- auf niedrigerem Niveau liegende Gliadin-Gehalte sowie auf höherem Niveau liegende Gesamt- und HMW-Glutenin-Gehalte auf. Dementsprechend unterschiedlich fielen auch die Beziehungen der N-Gehalte zu den Glutenin:Gliadin-Verhältnissen aus (Abb. 7). Während die der Sortengruppe DW- mit steigendem N-Gehalt ebenfalls stieg ($R^2 = 47\%$), fiel die Beziehung der Gruppe DW+ nicht signifikant aus. Deren Proben wiesen schon bei niedrigen N-Gehalten hohe Glutenin:Gliadin-Verhältnisse auf, die mit steigenden N-Gehalten nicht mit einer weiteren Steigerung reagierten. Insgesamt variierten die Glutenin:Gliadin-Verhältnisse mit Werten von 0,16 bis 0,56 stark, was noch einmal die qualitative Heterogenität des untersuchten Materials unterstreicht. Mit steigendem Glutenin:Gliadin-Verhältnis stieg der Dehnwiderstand der Kleber (Abb. 8). Allerdings war diese Beziehung über alle Proben nur schwach ausgeprägt ($R^2 = 19\%$). Dies änderte sich allerdings, nachdem die Proben in drei Gruppen mit unterschiedlichen N-Gehalten des Korns unter-

gliedert wurden: Die Gruppen mit niedrigen (1,28–1,65 %) und mittleren N-Gehalten (1,66–2,0 %) wiesen starke und positive Beziehungen zwischen dem Glutenin:Gliadin-Verhältnis und dem Dehnwiderstand auf ($R^2 = 79$ und 49% ; Abb. 8). Dagegen wies die Gruppe der Proben mit dem höchsten N-Gehalt (2,02–2,63 %) nur eine schwache Beziehung zum Dehnwiderstand auf ($R^2 = 19\%$). Je höher der N-Gehalt der Proben war, desto geringer wurde also innerhalb dieser Gruppe die Bedeutung des Glutenin:Gliadin-Verhältnisses für den Dehnwiderstand des Klebers. Die differenzierende Wirkung des N-Gehaltes des Korns auf die Kleberzugfestigkeit war umso deutlicher, je höher das Glutenin:Gliadin-Verhältnis der Proben ausfiel. Das heißt, bei niedrigen Glutenin:Gliadin-Verhältnissen von ca. 0,15–0,35 war der N-Gehalt ohne Einfluss auf die Kleberstruktur (Abb. 8). Bei Betrachtung aller Proben und einem vergleichbaren Glutenin:Gliadin-Verhältnis $>$ ca. 0,35 war damit der N-Gehalt des Korns für die Kleberzugfestigkeitausschlaggebend: Letzterer stieg bei einem Glutenin: Gliadin-Verhältnis von z.B. 0,40 mit sinkendem N-Gehalt von rund 0,4 N auf 0,9 N um mehr als das Doppelte an (Abb. 8). Dies ist insofern bemerkenswert, als die für die Steigerung der Kleberzugfestigkeit wichtigen HMW-Glutenin-Gehalte im Mehl bei einem Glutenin:Gliadin-Verhältnis von 0,40 mit abnehmenden N-Gehalt des Mehls erwartungsgemäß sanken (Abb. 9).

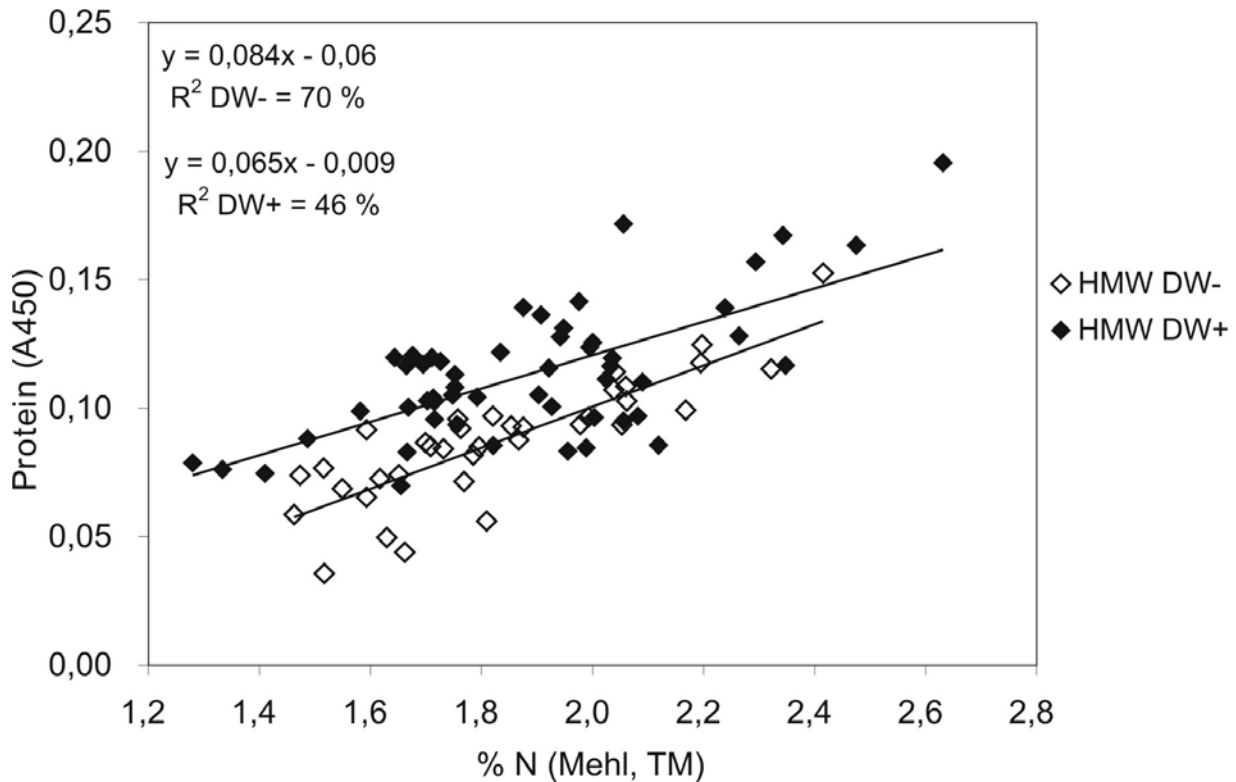


Abb. 6: Beziehungen zwischen den Gehalten an N und HMW-Glutenin (HMW) von Weizen (Mehl) eines Ringversuchs, (Erklärungen: A 450 = Absorptionseinheiten, DW- und DW+ = Sortengruppen gemäß Abb. 4)

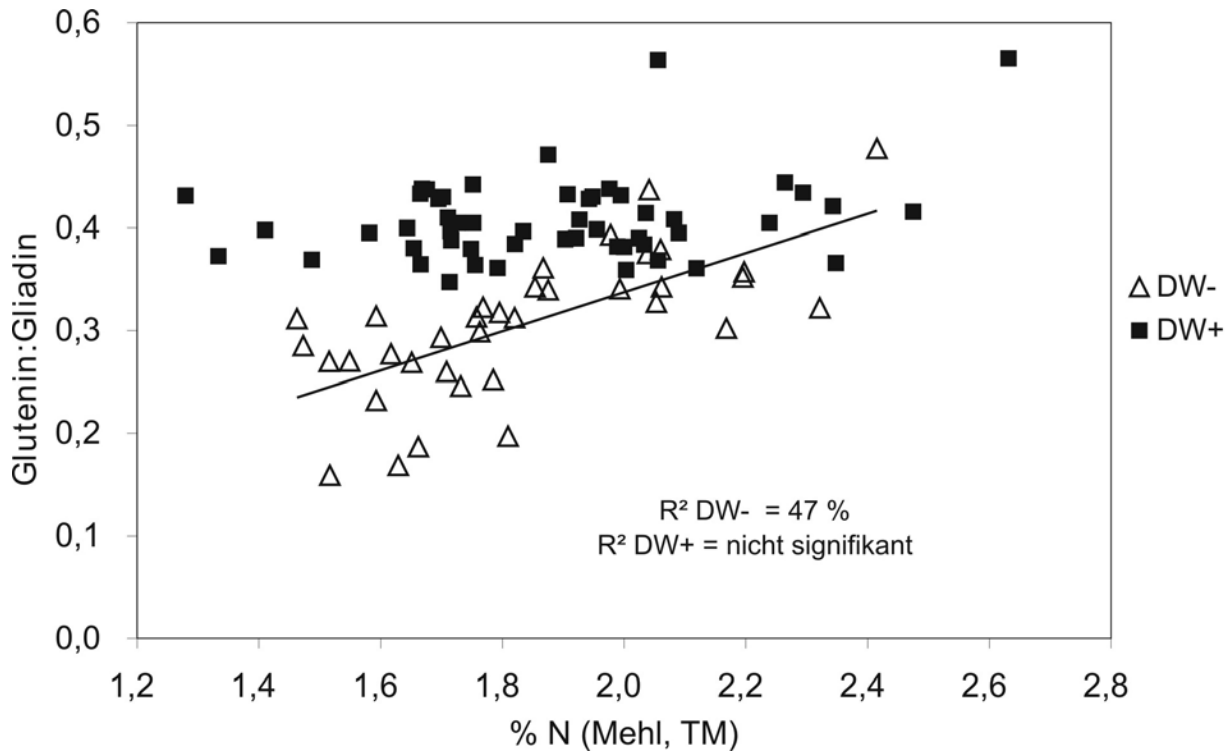


Abb. 7: Beziehung zwischen N-Gehalten und Glutenin:Gliadin-Verhältnissen von Weizen (Mehl) eines Ringversuchs, (Erklärungen: DW- und DW+ = Sortengruppen gemäß Abb. 4)

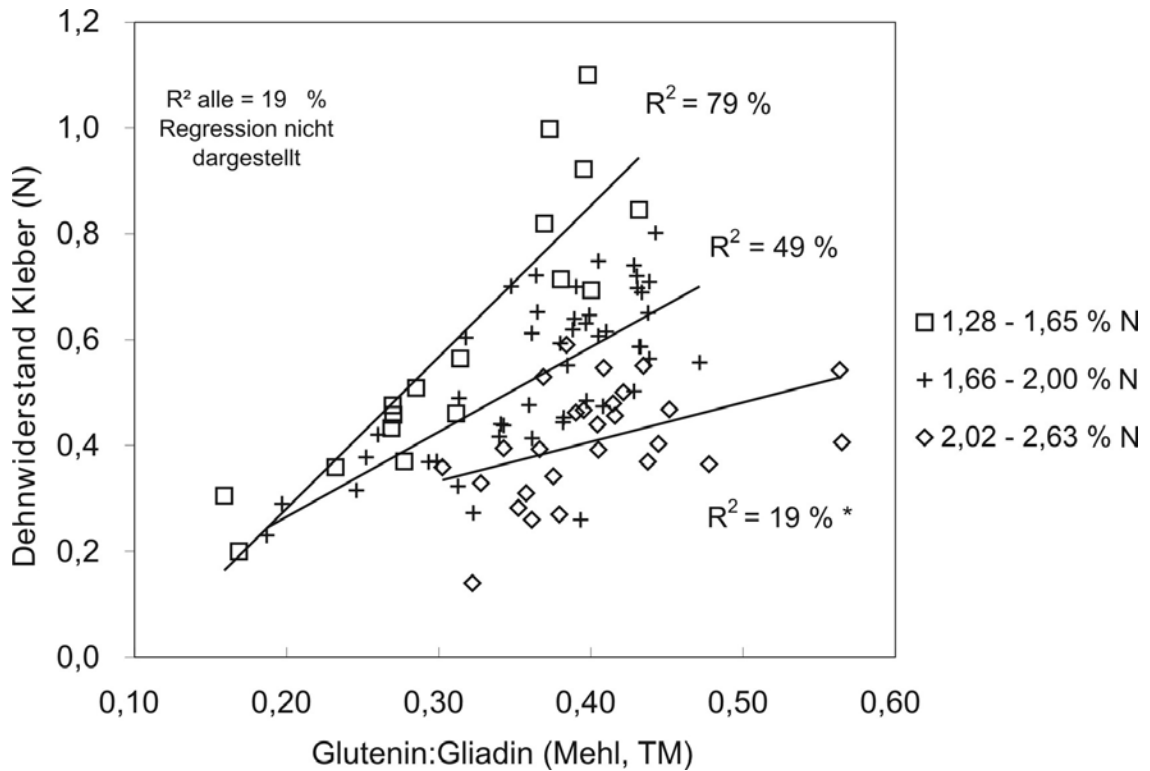


Abb. 8: Beziehungen zwischen Glutenin:Gliadin-Verhältnissen und Kleberzugfestigkeiten von Weizen eines Ringversuchs, gegliedert in drei Gruppen unterschiedlicher N-Gehalte

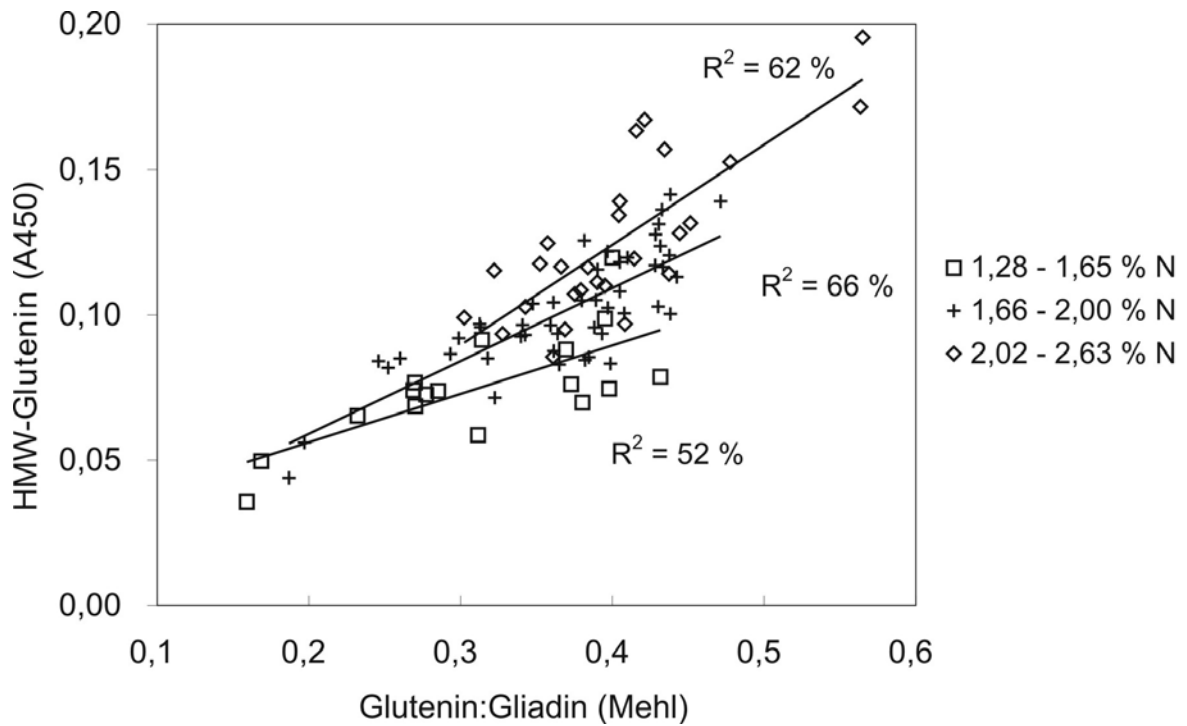


Abb. 9: Beziehung zwischen Glutenin:Gliadin-Verhältnissen und HMW-Glutenin-Gehalten von Weizen eines Ringversuches, gegliedert in drei Gruppen unterschiedlicher N-Gehalte

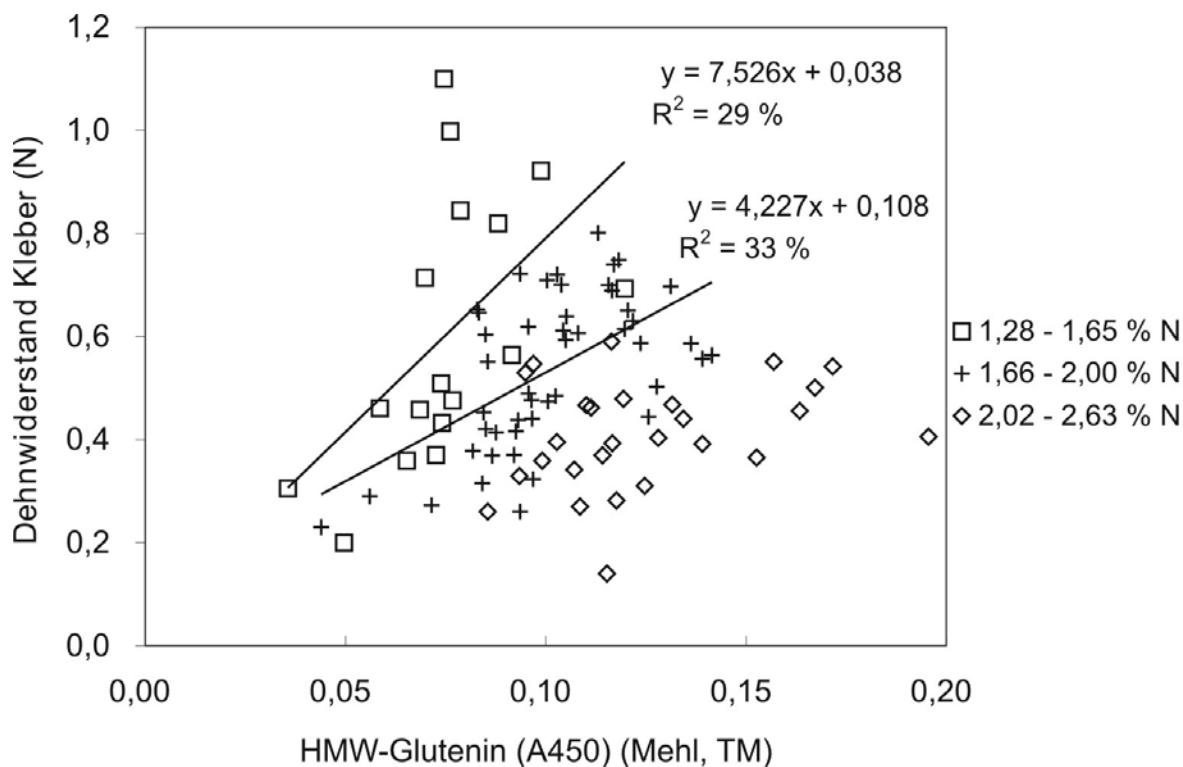


Abb. 10: Beziehungen zwischen HMW-Glutenin-Gehalten und Kleberzugfestigkeiten von Weizen eines Ringversuchs (Erklärung: A450 = Absorptionseinheiten)

Auch der Gehalt an HMW-Glutenin wies nicht auf eine herausragende Bedeutung dieser Proteinfraction für den Dehnwiderstand hin, da die Beziehungen zwischen diesen beiden Parametern nur schwach ausgeprägt waren ($R^2 = 29$ und 33%) bzw. in der Proben-Gruppe mit den höchsten N-Gehalten des Mehls (2,02–2,63 %) nicht signifikant ausfielen (Abb. 10). Im Vergleich hierzu war der N-Gehalt des Mehls bei einem vergleichbaren Gehalt an HMW-Glutenin (von z.B. 0,10 Absorptionseinheiten) ausschlaggebend für die Zugfestigkeit des Klebers, wobei niedrigere N-Gehalte im Mittel festere Kleber lieferten (Abb. 10).

Diskussion

Die Lockerung des Teiges durch die Gärgase ist entscheidend für Aussehen, Textur, sensorische Eigenschaften und Volumenausbeute des Gebäckes. Vor allem Art und Mengenverhältnis der verschiedenen Proteinfractionen des Weizens beeinflussen Kleber- und Teigstruktur und damit das Backergebnis. Während die Gliadine zur Viskosität und Dehnbarkeit beitragen, werden die Glutenine als Hauptfaktor für die Elastizität (d.h. für die Festigkeit) angesehen (Wieser et al., 1994). Zusätze von Gliadin führen zu weicheren und dehnbareren Klebern (Kim et al., 1988). Dagegen wurde seit der grundlegenden Arbeit von Orth und Bushuk (1972) immer wieder die den Kleber und Teig festigende (Seilmeier et al., 1992; Antes & Wieser, 2000; Wieser & Kieffer, 2001) bzw. zu einer besseren

Backqualität (höherem Backvolumen) führende Wirkung des Glutenins bestätigt (Field et al., 1983; Gupta et al., 1993). Besonders das HMW-Glutenin induziert höhere Dehnwiderstände des Klebers (Wieser et al., 1994; Seilmeier et al., 1992; Schropp & Wieser, 1994; Antes & Wieser, 2000; Wieser & Kieffer, 2001) und spielt daher eine Schlüsselrolle in der Kleberstruktur (Wieser & Zimmermann, 2000). Das niedrigere molekulare LMW-Glutenin besitzt diese Fähigkeit nicht bzw. in viel geringerem Maße (Antes & Wieser, 2000; Wieser & Kieffer, 2001). Zwischen der Festigkeit von Kleber und Teig und dem Gebäckvolumen bestehen starke Beziehungen (Field et al., 1983; Kieffer et al., 1998), da festere Kleber und daher eine festere Proteinmatrix des Teiges ein zu starkes Entweichen der Gärgase aus dem Gebäck verhindert. Noch zu Beginn der 60er Jahre musste in Deutschland der inländische Weizen - der damals mit 10,5 bis 11 % auch noch niedrigere Proteingehalte aufwies als heute - mit 25 bis 28 % kanadischem bzw. amerikanischem Weizen aufgemischt werden (Bolling, 1989). Verständlicherweise bestanden daher die züchterischen Intentionen mit Blick auf die Backqualität des Weizens in einer Straffung seiner Proteinstruktur. Trotz der hervorragenden Backeigenschaften der existierenden E- und A-Sorten ist dieser Prozess der züchterischen Steigerung des Backvolumens heute noch nicht beendet.

Bekanntlich wird mit steigender N-Düngung des Weizens der Teig (Jahn-Deesbach et al., 1989; Brümmer & Seibel, 1991; Prieto et al., 1992). bzw. der Kleber weicher (Johansson & Svensson, 1999). Entsprechend belegen Untersuchungen (auch mit Blick auf den Ökolandbau) bei niedrigeren Rohproteingehalten des Korns kürzere (d.h. festere) Teige (Wirries & Büning-Pfaue, 1995) bzw. festere Kleber (Rychener et al., 1992; Münzing, 2001), was durch die Ergebnisse dieser Untersuchung bestätigt wird (Abb. 3 und 4). Ein Hauptfaktor dafür wird in der den Kleber erweichenden Wirkung des Gliadin-Gehaltes gesehen, der mit steigendem Rohproteingehalt des Korns stärker ansteigt als das den Kleber verfestigende Glutenin (Jahn-Deesbach & Weipert, 1967; Doekes & Wennekes, 1982; Gupta et al., 1992; Wieser & Seilmeier, 1998), was ebenfalls durch die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit bestätigt wird (Abb. 5). Aus den oben genannten Eigenschaften von Gliadin und Glutenin ist die herausragende Bedeutung des Glutenin:Gliadin-Verhältnisses für Rheologie und Backvolumen verständlich (Wieser, 2000b; Khatkar et al., 1995; Janssen et al., 1996; Uthayakumaran et al., 1999). Umso erstaunlicher ist die bei den Proben dieser Untersuchung zu konstatierende unzureichende Erklärbarkeit der Kleberzugfestigkeiten aus den Glutenin:Gliadin-Verhältnissen: Die mit ca. 0,4 – 1,1 N sehr großen Unterschiede im Dehnwiderstand der Sortengruppe DW+ (Abb. 4) sind nicht aus deren Glutenin:Gliadin-Verhältnissen zu erklären, da letztere sich nicht veränderten bzw. keine Beziehung zum N-Gehalt aufwiesen (Abb. 7). Andererseits lagen die Glutenin:Gliadin-Verhältnisse der weichere Kleber aufweisenden Sortengruppe DW- im Bereich niedrigerer N-Gehalte (1,4 – 1,8% N) zwar deutlich unter denen der festere Kleber aufweisenden Gruppe DW+ (Abb. 7), was der bekannten Kausalität dieser beiden Parameter entspricht. Jedoch führten mit steigenden N-Gehalten ebenfalls ansteigende Glutenin:Gliadin-Verhältnisse nicht ebenfalls zu höheren, sondern zu niedrigeren Dehnwiderständen (Abb. 4). Bereits hier muss also die Frage gestellt werden, ob das bekannte Erklärungsschema der Kleberzugfestigkeit vor allem aus den verschiedenen Proteinfractionen und ihren Proportionen zueinander immer zutrifft oder ergänzungsbedürftig ist. Bisher wurden Differenzierungen der Kleberzugfestigkeit durch den N-Gehalt des Korns bei vergleichbaren Glutenin:Gliadin-Verhältnissen (Abb. 8) nicht untersucht. Daher stellen die Ergebnisse ein Novum dar. Die bei einem vergleichbaren Glutenin:Gliadin-Verhältnis beobachteten Steigerungen des Dehnwiderstandes von der Gruppe mit den höchsten zu der mit den niedrigsten N-Gehalten waren mit mittleren Kleberzugfestigkeitswerten von rund 0,4 – 0,9 N beträchtlich. Der Gehalt an HMW-Glutenin war hierbei jedoch ohne Bedeutung, da die Beziehungen zwischen den Glutenin:Gliadin-Verhältnissen und den Gehalten an

HMW-Glutenin (Abb. 9) eine inverse Gliederung der drei Probengruppen aufwies, das heißt bei vergleichbaren Glutenin:Gliadin-Verhältnissen wies z.B. die Gruppe mit den niedrigsten N-Gehalten von 1,28 – 1,65% (und den höchsten Zugfestigkeiten) die niedrigsten HMW-Glutenin-Gehalte auf. Dasselbe traf für die Beziehungen zwischen den HMW-Glutenin-Gehalten und dem Dehnwiderstand (Abb. 10) zu: Auch hier war es die Gruppe mit den niedrigsten N-Gehalten, die bei vergleichbaren HMW-Glutenin-Gehalten im Mittel die höchsten Zugfestigkeiten aufwies.

Vermutlich kommen daher für die Beeinflussung der Kleberzugfestigkeit bisher nicht berücksichtigte oder bislang unbekannte Faktoren in Betracht. Um Anomalien in der S-Versorgung kann es sich bei dem Weizen dieses Ringversuches nicht gehandelt haben, da keine der Proben S-Mangel anzeigende N:S-Verhältnisse unter 17:1 aufwies und der S-Gehalt mit Werten von $\geq 0,12\%$ als ausreichend versorgt eingestuft werden konnte (Abb. 1). Offenbar ist die N-Versorgung des Weizens für die Kleberkonformation bzw. -struktur ähnlich bedeutungsvoll wie eine ausreichende Schwefelernährung, da eine abnehmende N-Versorgung insbesondere bei vergleichbaren Glutenin:Gliadin-Verhältnissen zu festeren Klebern führt.

Die Analyse von Daten einer Studie von Kieffer und Wieser (1996) bestätigt diese Hypothese eines Einflusses des N-Gehaltes auf die Proteinstruktur, allerdings mit umgekehrten Vorzeichen: Diese Autoren untersuchten ein Probensortiment von konventionell angebauten Weizensorten mit stark variierenden Kleberzugfestigkeiten. Die Glutenin:Gliadin-Verhältnisse dieser Sorten (Abb. 11) waren mit denen der vorliegenden eigenen Untersuchung vergleichbar (Abb. 8). Deren Glutenin:Gliadin-Verhältnisse standen in direkter und enger Beziehung zum Dehnwiderstand ($R^2 = 93\%$), sofern nur die Proben ($n = 8$) mit einem N-Gehalt zwischen 1,63 – 1,91% in die Berechnung einfließen (Abb. 11). Die Kleberzugfestigkeit nahm im Gegensatz zu den vorgestellten Untersuchungen (Abb. 8) mit steigendem N-Gehalt der Probe allerdings nicht ab, sondern zu.

Sicher sind weitere Untersuchungen notwendig, um die Bedingungen, die die Kleberzugfestigkeit bei vergleichbaren Glutenin:Gliadin-Verhältnissen in Abhängigkeit vom N-Gehalt des Korn beeinflussen, näher zu prüfen. Möglicherweise kommt jedoch dem HMW-Glutenin nicht oder nicht in diesem Maße die ihm zugeschriebene prominente Rolle für die backtechnologischen Eigenschaften des Weizens zu. Zwar belegen seit fast drei Jahrzehnten viele Untersuchungen dessen besondere Bedeutung für Kleberstruktur und Backvolumen. Shewry et al. (1992) bezeichneten daher die 80er Jahre für die Getreidechemiker als «the decade of the HMW-subunit». Die Reihe der Faktoren der Backqualität war um ein wichtiges Element erweitert worden. Nicht ohne Grund wurde ja von Wieser

(1996, 2000a) für Züchtung, Selektion und genetische Verbesserungen des Weizens die (auch in der vorliegenden Arbeit angewandte) Methode einer Quantifizierung der verschiedenen Proteinfractionen durch Trübungsmessung entwickelt, mit der sehr viel schneller und kostengünstiger größere Probenmengen aufgearbeitet werden konnten als mit der aufwendigen High-Performance-Liquid-Chromatography (HPLC). Nichtsdestotrotz sind gute korrelative Beziehungen zwischen proteinchemischen, rheologischen und backtechnologischen Parametern bei ausgewählten Probensortimenten nicht konsistent zu finden. Hier dürfte Standorteinflüssen eine entscheidende Bedeutung zukommen, die in den Untersuchungen der Getreidechemie jedoch nur selten umfassend berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang wurde bereits auf die Bedeutung der S-Versorgung für die Rheologie hingewiesen. Auch höhere Temperaturen während der Abreife der Pflanze beeinflussen die Teigeigenschaften und das Backvolumen von Weizen erheblich (z.B. Schipper, 1991). Weitere Arbeiten zur Modifizierung rheologischer Eigenschaften von Weizen durch den Faktor Wärme wurden erst kürzlich zusammengefasst (Hagel, 2005). Und sicher haben nicht nur Züchtung und Selektion zu einem Anstieg des Glutenin:Gliadin-Verhältnisses geführt (Hagel et al. 1998, Wieser, 2000b). Dieses Merkmal – welches meistens als genetisch fixiert angesehen wird – wird auch durch N-Düngungspraktiken erheblich beeinflusst, und zwar unabhängig von der Höhe des N-Gehaltes des Korns (Martin et al., 1992). Auch sind Einflüsse der Bodenart zu berücksichtigen (Seilmeier et al., 2001).

Die vorliegende Arbeit (Abb. 8) sowie die Ergebnisse von Kieffer und Wieser (1996, Abb. 11) weisen nun auf einen weiteren Faktor hin, der die Kleberzugfestigkeit beeinflusst, nämlich der N-Ernährungszustand der Pflanze beziehungsweise des Korns. Die verschiedenen Standortverhältnisse und Vegetationsbedingungen scheinen somit von ähnlicher Bedeutung für die Backqualität zu sein wie die Proteinfractionen. Dieser Sachverhalt sollte daher bei zukünftigen Arbeiten zu rheologischen und backtechnologischen Fragen bei Weizenuntersuchungen entsprechend berücksichtigt werden.

Nachfolgend wird die Eignung verschiedener Sorten für den biologisch-dynamischen oder ökologischen Landbau auf Basis der vorliegenden Ergebnisse diskutiert.

In früheren Untersuchungen wurde bereits ausführlich die Problematik niedriger S-Gehalte moderner Weizensorten beschrieben (Hagel, 2000, 2001, 2002, 2005): Diese ergab sich unter anderem aus den höheren Anteilen backtechnologischer bedeutsamer, aber S-ärmerer Proteinfractionen (Glutenin, besonders HMW-Glutenin). Höhere N-Düngung bzw. die Züchtung auf höhere Backqualität durch höhere N-Gehalte erhöht nur den Anteil der S-armen Proteinfractionen Glute-

nin und Gliadin, nicht aber den der S-reichen Fraktion der Albumine und Globuline und führt daher zwangsläufig zu steigenden, d. h. in Richtung eines S-Mangels sich entwickelnden N:S-Verhältnissen. S-Mangel induziert festere Kleber und Teige und damit diejenigen Merkmale, welche die Basis der hohen Backqualität der modernen Sorten bilden. Diese können daher als Ergebnis eines ungewollten züchterisch induzierten S-Mangels angesehen werden (Hagel 2005). Die Selektion solcher physiologischen Extremtypen könnte u.U. eine Erklärung für die heute immer stärker um sich greifenden Nahrungsmittelunverträglichkeiten liefern, da neben Milchprotein der Verzehr von Weizen oftmals der Grund für allergische Reaktionen ist (Husemann & Wolff, 1993). So stieg in Schweden das Auftreten von Coeliakie um 300% nachdem der Klebergehalt von Kindernahrung für unter Zweijährige verdoppelt wurde. Nachdem der Zusatz an Kleber in der Nahrung wieder reduziert worden war, gingen auch die Fälle von Coeliakie auf das normale Maß zurück (Ivarsson et al., 2000). Die Empfindlichkeit auf Kleber beschränkt sich nicht nur auf den Dünndarm (Coeliakie). Weizen kann auch eine Entzündung des Nervensystems hervorrufen mit der Folge einer chronischen Migräne. Diese konnte in 9 von 10 Fällen durch eine strikte Eliminierung von Weizen aus dem Speiseplan geheilt werden (Hadjivassiliou et al., 2002).

Die Beziehungen zwischen S-Gehalt und technologischen Eigenschaften des Weizens (Kleberstruktur) erklären, warum in der vorliegenden Untersuchung das Sortenspektrum der Gruppen S- und DW+ sowie S+ und DW- im Hinblick auf die Backeigenschaften fast identisch ist. Die biologisch-dynamischen Sorten BP-130, B7, C7, FMH-144, F113, Jacoby 2, PGR sowie S1.09.1 der Gruppe DW+ beziehungsweise S- unterscheiden sich mit Blick auf die Beziehung zwischen N-Gehalt des Korns und Dehnwiderstand des Klebers nicht von den modernen und backtechnologisch hochwertigen E- und A-Sorten Batis, Bussard und Tambor (Abb. 1 und 4). Aus den oben genannten Gründen sind diese Sorten jedoch insbesondere für eine Verwendung im biologisch-dynamischen Landbau mit seinen besonderen Ansprüchen an die Nahrungsqualität als fragwürdig zu beurteilen bzw. abzulehnen. Im Vergleich hierzu sind die biologisch-dynamischen Sorten EPG-18, Hafi, Imu, Inntaler, PK54, Rastatter, SDA, S2.27.3 der Gruppe DW- beziehungsweise S+ mit ihren höheren S-Gehalten und weicherem Klebern als günstig zu beurteilen (Abb. 1 und 4).

Hinsichtlich der Abhängigkeit der Kleberzugfestigkeit vom N-Gehalt des Korns bei vergleichbaren Glutenin:Gliadin-Verhältnissen (Abb. 8) ist mit Blick auf eine Sortenempfehlung für den ökologischen Landbau Folgendes in Betracht zu ziehen:

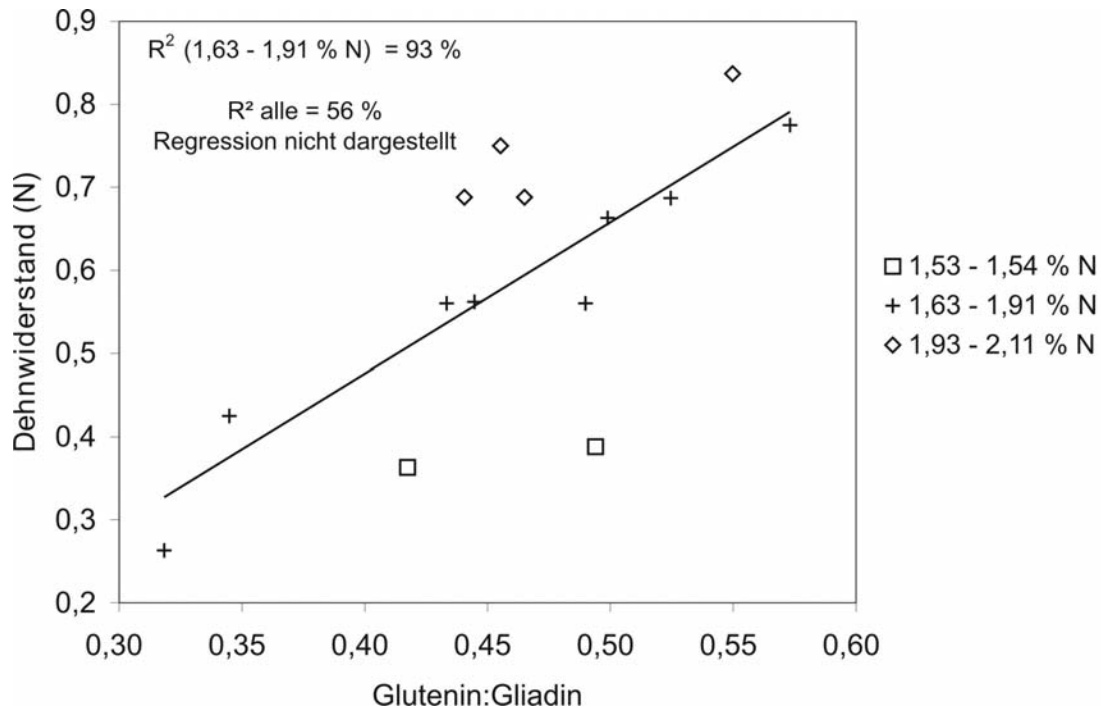


Abb. 11: Beziehungen zwischen Glutenin:Gliadin-Verhältnissen und Dehnwiderständen von Klebern verschiedener Weizensorten aus konventionellem Anbau. (Erläuterungen: Grafik erstellt nach Daten von Kieffer & Wieser, 1996; N = Newton)

Nicht nur Klebermenge, sondern auch -qualität (Festigkeit) sind für die technologische Qualität (Backvolumen) einer Weizensorte ausschlaggebend. Züchterisches Ziel ist die Verbesserung beider Merkmale. Mit steigendem N-Gehalt des Korns (und damit steigender Klebergehalte) sinkt jedoch die Kleberqualität, d.h. die Kleber werden weicher. Die Ergebnisse, dargestellt in den Abb. 3 und 4, bestätigen diese Zusammenhänge. Damit ergibt sich jedoch ein Konflikt zwischen dem Zuchtziel einer höheren Backqualität durch einen höheren Klebergehalt und dem einer höheren Backqualität durch festere Kleber. Bislang wird dieses Problem züchterisch durch die Selektion von Genotypen, die bei höheren Klebergehalten nicht oder in geringerem Maße weichere Kleber bilden und somit ein erhöhtes Backvolumen realisieren, gelöst.

Diese Genotypen bzw. Sorten reagieren auf eine ungenügend hohe N-Versorgung mit einer sehr viel stärkeren Verfestigung des Klebers, da sie einen entsprechend höheren N-Bedarf aufweisen. Bei den Sorten der Gruppe DW- (Abb. 4) war diese züchterische Veränderung noch nicht bzw. in vermindertem Maße feststellbar. Anhand dieser Ergebnisse in kann ferner geschätzt werden, dass die Probengruppe DW- erst bei ca. 1,0 % niedrigeren N-Gehalten eine mit der Gruppe DW+ vergleichbare Verfestigung des Klebers erreichen würde.

Diese Zunahme der Kleberfestigkeit bei sinkendem N-Gehalt vollzieht sich sogar bei vergleichbaren Glutenin:Gliadin-Verhältnissen von > 0,35 (Abb. 8).

Die Ergebnisse zeigen, dass kleberstarke Weizensorten unter den Anbauverhältnissen des ökologischen Landbaus hinsichtlich ihrer Kleberproteinphysiologie als nicht ausreichend mit N ernährt zu betrachten sind und daher als ungünstig für den ökologischen Landbau zu bewerten sind. Hinsichtlich des Aspekts der Kleberqualität sind die biologisch-dynamischen Sorten EPG-18, Hafi, Imu, Inntaler, PK54, Rastatter, SDA, S2.27.3 der Gruppe DW- beziehungsweise S+ mit ihren weicheren Klebern im ökologischen Landbau zu bevorzugen.

Danksagung

Den biologisch-dynamischen Züchtern Dr. B. Heyden, E. Irion, P. Kunz, Dr. K.J. Müller und Dr. H. Spieß danken wir für die Überlassung von Probenmaterial. Der Firma Winopal Forschungsbedarf GmbH, Ahnsbeck, danken wir für die Bereitstellung eines Texture Analyzers.

Literatur

Antes S, Wieser H (2000) Effect of HMW and LMW subunits of glutenin on the rheological dough properties and bread-making quality of wheat. Deutsche Forschungsanstalt für Lebensmittelchemie, Jahresbericht, 180-187

Bolling H (1989) Qualitätsentwicklung bei Weizen und Roggen in den letzten 25 Jahren. Brot und Back-

weizen 9: 314-327

Brümmer JM, Seibel W (1991) Verarbeitungseigenschaften von Weizen aus extensiviertem Anbau. Getreide Mehl Brot 45: 336-341

Doekes GJ, Wennekes LMJ (1982) Effect of nitrogen fertilization on quantity and composition of wheat flour protein. *Cereal Chem* 59: 276-278

Eisenberg B, Steinhart H, Bosselmann A (1994) Berechnungsmodell zur Vorhersage des Backvolumens (RMT) bei Weizen. *Getreide Mehl Brot* 48: 48-52

Field JM, Shewry PR, Mifflin BJ (1983) Solubilisation and characterisation of wheat gluten proteins: Correlations between the amount of aggregated proteins and baking quality. *J Sci Food Agric* 34: 370-377

Gupta RB, Batey IL, MacRitchie F (1992) Relationships between protein composition and functional properties of wheat flours. *Cereal Chem* 69: 125-131

Gupta RB, Khan K, MacRitchie F (1993) Biochemical basis of flour properties in bread wheats. II Effects of variation in the quantity and size distribution of polymeric protein. *J Cereal Sci* 18: 23-41

Hadjivassiliou M, Grünewald RA, Davies GAB (2002) Gluten sensitivity as a neurological illness. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 72, 560-563

Hagel I (2000) Biobrot aus Schwefelmangelweizen? Ein Beitrag zur Qualitätsbeurteilung der festen Proteinstruktur moderner Weizensorten. Institut für Biologisch-Dynamische Forschung, Darmstadt, Schriftenreihe Band 14. zu finden in:

http://www.Umkreis-Institut.de/index_fpub.htm

Hagel I (2001) Unser tägliches Brot aus Schwefelmangelweizen. *Der Merkurstab* 54: 201-205

Hagel I (2002) Weizenzüchtung auf hohe technologische Qualität durch induzierten Schwefelmangel. Deutsche Gesellschaft für Qualitätsforschung e.V., XXXVII. Vortragstagung, 4. - 5. März 2002, Hannover, 307-312

Hagel I (2005) Sulfur and baking-quality of breadmaking wheat. In: Schnug E, De Kok LJ (eds) Proceedings of the 1st Sino-German Workshop on Aspects of Sulphur Nutrition of Plants, 23 - 27 May 2004 in Shenyang, China. *Landbauforsch Völkenrode SH* 283, 23-36

Hagel I, Spiess H, Schnug E (1998) Proteinqualität alter und moderner Winterweizensorten und -zuchtstämme. Deutsche Gesellschaft für Qualitätsforschung (Pflanzliche Nahrungsmittel) XXXIII. Vortragstagung, 23. - 24. März 1998, Dresden, 165-170

Haneklaus S, Evans E, Schnug E (1992) Baking quality and sulphur content of wheat. I. Influence of grain sulphur and protein concentrations on loaf volume. *Sulphur in Agric* 16: 31-34

Husemann F, Wolff O (1993) Das Bild des Menschen als Grundlage der Heilkunst. Verlag Freies Geistesleben, Stuttgart, 533

Ivarsson A, Persson LA, Nyström L, Ascher H, Cavell B, Danielsson L, Dannaeus A, Lindberg T, Lindquist B, Stenhammar L, Hernell O (2000) Epidemic of celiac disease in Swedish children. *Acta Paediatr* 89, 165-171

Jahn-Deesbach W, Weipert D (1967) Über einige durch Spätdüngung verursachte Veränderungen im Getreidekorn. *Z Acker- und Pflanzenbau* 125: 211-218

Jahn-Deesbach W, Dreyer E, Seibel W (1989) Über die Eignung verschiedener Weizensorten mit unterschiedlichem Proteinniveau für die Herstellung von Vollkornbackwaren. *Getreide Mehl Brot* 43: 239-244

Janssen AM, van Vliet T, Vereijken JM (1996) Rheological behaviour of wheat gluten at small and large deformations. Effect of gluten composition. *J Cereal Sci* 23: 33-42

Johansson E, Svensson G (1999) Influences of yearly weather quality in Swedish grown wheats containing HMW glutenin subunits 2 + 12 or 5 + 10 cultivated during the period 1990 - 96. *J Agric Sci* 132: 13-22

Khatkar BS, Bell AE, Schofield JD (1995) The dynamic rheological properties of gluten sub-fractions from wheat of good and poor bread making quality. *J Cereal Sci* 22: 29-44

Kieffer R, Wieser H (1996) Bedeutung einzelner Kleberproteintypen für die im Mikromaßstab bestimmten Verarbeitungseigenschaften von Weizenmehl. Deutsche Forschungsanstalt für Lebensmittelchemie, Garching, Bericht 1996, 151-164

Kieffer R, Kim JJ, Belitz HD (1981) Zugversuche mit Weizenkleber im Mikromaßstab. *Z Lebensm Unters Forsch* 172: 190-192

Kieffer R, Wieser H, Henderson MH, Graveland A (1998) Correlations of the breadmaking performance of wheat flour with rheological measurements on a microscale. *J Cereal Sci* 27: 53-60

Kim J-J, Kieffer R, Belitz HD (1988) Rheologische Eigenschaften von rekonstituierten Weizenklebern mit variierenden Anteilen an Prolaminfraktionen verschiedener Getreidearten. *Z Lebensm Unters Forsch* 186: 16-21

Kunz P, Müller KJ, Spieß H, Heyden B, Irion E (1997) Der Weizen-Ringversuch: biologisch-dynamische Pflanzzüchter schließen sich zusammen. *Lebendige Erde* 2: 110-114

Müller KJ, Irion E, Spieß H, Heyden B, Kunz P (1997) Bericht zum Weizenringversuch (unveröffentlicht)

- Martin RJ, Sutton KH, Moyle TN, Hay RL, Gillespie RN** (1992) Effect of nitrogen fertilizer on the yield and quality of six cultivars of autumn-sown wheat. *New Zealand J Crop Hortic Sci* 20, 273-282
- Münzing K** (2001) Mahl- und Backqualität von Weizenpartien aus dem deutschen Öko-Anbau. Jahresbericht der Bundesanstalt für Getreide-, Kartoffel- und Fettforschung (Veröff. Nr. 7392), 19-21
- Orth RA, Bushuk W** (1972) A comparative study of proteins of wheats of diverse baking qualities. *Cereal Chem* 49: 268-275
- Prieto JA, Kelfkens M, Weegels PL, Hamer RJ** (1992) Variations in the Gliadin pattern of flour and isolated gluten on nitrogen application. *Z Lebensm Unters Forsch* 194: 337-343
- Rychener M, Lanz H, Schärer R, Tieche JD** (1992) Der Glutenindex als Maß für die Proteinqualität: Untersuchung der Weizenernte 1991. *Landwirtschaft Schweiz* 5: 539-543
- Schipper A** (1991) Modifizierbarkeit teigphysikalischer Eigenschaften verschiedener Weizensorten durch Umwelteinflüsse. *Agribiol Res* 44: 114-132
- Schnug E, Haneklaus S** (1994) Sulphur deficiency in brassica napus. *Biochemistry - Symptomatology - Morphogenesis*. Landbauforsch Völkenrode SH 144
- Schnug E, Haneklaus S** (1999) Diagnosis of the Nutritional Status and Quality Assessment of Oilseed Rape by X-Ray Spectroscopy. Proc. 10th Int. Rapeseed Congress, Sept. 26-29, 1999, Canberra, (CD-ROM)
- Schropp P, Wieser H** (1994) Wirkung von HMW-Untereinheiten des Glutenins auf die rheologischen Eigenschaften von Weizenkleber. *Deutsche Forschungsanstalt für Lebensmittelchemie, Jahresbericht*, 136-147
- Seilmeier W, Kieffer R, Belitz HD** (1992) Gluteninfraktionen und rheologische Eigenschaften verschiedener Weizensorten. *Deutsche Forschungsanstalt für Lebensmittelchemie, Garching, Bericht 1992*, 145-151
- Seilmeier W, Wieser H, Gutser R, von Tucher S** (2001) Einfluss der Schwefeldüngung auf die quantitative Zusammensetzung der Kleberproteine in Weizenmehl. *Deutsche Forschungsanstalt für Lebensmittelchemie, Garching, Bericht 2001*, 183-190
- Shewry PR, Halford NG, Tatham AS** (1992) High molecular weight subunits of wheat glutenin. *J Cereal Sci* 15: 105-120
- Uthayakumaran S, Gras PW, Stoddard FL, Bekes F** (1999) Effect of varying protein content and Glutenin:Gliadin ratio on the functional properties of wheat dough. *Cereal Chem* 76: 389-394
- Wieser H** (1996) A turbidimetric determination of gluten protein types in wheat flour. *Deutsche Forschungsanstalt für Lebensmittelchemie, Bericht 1996*, 122-132
- Wieser H** (2000 a) Simple determination of Gluten protein types in wheatflour by turbidimetry. *Cereal Chem* 77: 48-52
- Wieser H** (2000 b) Comparative investigations of gluten proteins from different wheat species. *Eur Food Res Technol* 211: 262-268
- Wieser H, Zimmermann G** (2000) Importance of amounts and proportions of high molecular weight subunits of glutenin for wheat quality. *Eur Food Res Technol* 210: 24-330
- Wieser H, Seilmeier W** (1998) The influence of nitrogen fertilisation on quantities and proportions of different protein types in wheat flour. *J Sci Food Agric* 76: 9-55
- Wieser H, Kieffer R** (2001) Correlations of the amount of gluten proteintypes to the technological properties of wheat flours determined on a microscale. *J Cereal Sci* 34:19-27
- Wieser H, Seilmeier W, Belitz HD** (1994) Use of RP-HPLC for a better understanding of the structure and functionality of wheat gluten proteins. In: Kruger, J.E. and J.A. Bietz (eds) *High-performance liquid chromatography of Cereal and Legume Proteins*. American Association of Cereal Chemists, Inc., St. Paul, Minnesota, USA
- Wirries F-M, Büning-Pfaue H** (1995) Wheat from organic agriculture – An improved analytical description of gluten quality. *Proceedings of the Eighth European Conference on Food Chemistry (EURO FOOF CHEM VIII)*, Vienna, Austria, September 18-20, 1995, Vol. 2, 527-530
- Wrigley CW, du Cros DL, Moss HJ, Randall PJ, Fullington JG, Kasarda DD** (1984) Effect of sulphur deficiency on wheat quality. *Sulphur in Agric* 8: 2-7

Influence of elemental sulphur and nitrogen fertilisation on the concentration of essential micro-nutrients and heavy metals in *Tropaeolum majus* L.

Silvia Haneklaus¹, Elke Bloem¹, Sawsan Hayfa² und Ewald Schnug¹

¹Institute of Plant Nutrition and Soil Science, Federal Agricultural Research Centre (FAL), Bundesallee 50, D-38116 Braunschweig

²Tishreen University, P.O. Box 2250, Lattakia, Syria

Summary

Elemental S fertilisation increased the total S and glucotropaeolin content of *Tropaeolum majus* L. leaves from on average 4.8 to 9.8 mg g⁻¹ (d.w.), and 22.0 to 37.9 µmol g⁻¹ (d.w.), respectively on a sandy loam soil. Similar results were found on a loam soil. N fertilisation caused a significant reduction of the glucotropaeolin content. Leaves showed about three times higher glucotropaeolin contents than stems. Elemental S fertilisation significantly increased the Mn and Cu content of leaves on both soils. Due to an antagonism with S the Mo, B, Se and As content of *T. majus* leaves was significantly reduced, but this effect was not consistent on both sites. On the loam soil, where the actual soil pH was distinctly below the recommended value, the micro-nutrient content and the heavy metal concentrations were distinctly higher than on the loamy sand soil, which had an optimum soil reaction. The Cd concentrations of *T. majus* leaves exceeded the upper recommended value for phytopharmaceuticals of 0.2 µg g⁻¹ (d.w.) on the loam soil and the Cd uptake of *T. majus* leaves was significantly increased by N applications on both soils. The lime requirement and plant available concentration of micro-nutrients and heavy metals in soils should be determined routinely in order to select appropriate cultivation sites and to adapt the fertiliser management to site-specific conditions.

Key words: elemental sulphur, glucotropaeolin, heavy metals, soil acidifying fertilisation, sulphur

Zusammenfassung

Die Düngung mit Elementarschwefel erhöhte auf einem lehmig sandigem Standort den Gesamtschwefelgehalt der Kapuzinerkresse (*Tropaeolum majus* L.) von im Mittel 4.8 auf 9.8 mg g⁻¹ (TM) und den Glucotropaeolingehalt von 22.0 auf 37.9 µmol g⁻¹ (TM). Vergleichbare Ergebnisse wurden auf einem Lehm Boden gefunden. Die Zufuhr von N führte zu einer signifikanten Abnahme der Glucotropaeolingehalte. Die Glucotropaeolingehalte in den Blättern von *T. majus* waren ungefähr drei Mal höher als die in den Stengeln. Die Zufuhr von Elementarschwefel erhöhte auf beiden Standorten den Mn- und Cu-Gehalt in Blättern, wobei diese Änderungen signifikant waren. Aufgrund antagonistischer Wirkungen mit S kam es zu einer signifikanten Abnahme der Mo-, B-, Se- und As-Gehalte in den Blättern von *T. majus*, wobei dieser

Effekt allerdings nicht konsistent auf beiden Versuchstandorten zu beobachten war. Der aktuelle pH-Wert lag auf dem Lehm Boden weit unterhalb des Sollwertes. Hier wurden dann auch im Vergleich zum sandigen Lehm Boden, der eine optimale Bodenreaktion aufwies, für alle Mikronährstoffe und Schwermetalle die deutlich höheren Gehalte gefunden. Der Cd-Gehalt in den Blättern von *T. majus* lag auf dem Lehm Boden deutlich über dem empfohlenen Höchstwert von 0.2 µg g⁻¹ (TM). Die N-Düngung führte auf beiden Standorten zu einem signifikanten Anstieg der Cd-Gehalte in den Blättern von *T. majus*. Bei der Auswahl geeigneter Standorte für den Anbau von *T. majus* sollte in jedem Fall der Kalkbedarf sowie die Gehalte an pflanzenverfügbaren Mikronährstoffen und Schwermetallen prophylaktisch bestimmt werden, um Düngungspraktiken den standortspezifischen Bedingungen anzupassen.

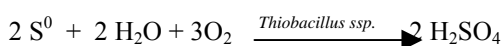
Schlüsselworte: bodenversauernde Düngung, Elementarschwefel, Glucotropaeolin, Schwefel, Schwermetalle

Introduction

Phytopharmaceuticals are old, and nowadays re-discovered remedies for many medical disorders. The knowledge of the action of medicinal plants goes back to the 10th century, when *Hildegard von Bingen* (1098-1183) described the curative effect of 213 trees and plants. The increasing interest in herbal medicine is supposedly associated with side-effects of conventional chemical substances, increasing resistance against antibiotics, carry-over of chemicals such as antibiotics into the food chain and increasing costs for health care.

The method which is used for producing a drug mainly depends on characteristics of the active agent and the form in which the drug is used. Direct use of the plant material for producing tablets without prior extraction has the following advantages: it reduces production costs and avoids losses of intact active agents during extraction (Keller, 1991). Sulphur (S) fertilisation proved to have a strong and significant influence on the formation of S containing secondary metabolites in vegetables and agricultural crops (Schnug et al., 1995; Hoppe et al., 1996; Schnug, 1997; Haneklaus et al., 1999). S fertilisation is also an important measure to increase the glucotropaeolin content of *Tropaeolum majus* (*T. majus*). Under optimum climatic conditions as to be found for instance in

Egypt the concentration of the main bio-active compound is regularly so high that the plant material may be directly used for preparing a phytopharmaceutical (Bloem et al., 2001a, 2001b, 2002). Special attention to plant quality needs to be paid when a fertiliser is not only supplying the nutrient S, but also shows relevant side-effects as for instance elemental S does. Elemental S is approved as a fertiliser in the German decree on fertilisers (Anon, 2003), which is better known for its fungicidal effect and has been widely used for this purpose in agricultural production since the end of the nineteenth century (Hoy, 1987). In the guidelines for the cultivation of medicinal plants it is recommended to "encourage natural pest-control mechanism" and to "limit the use of pesticides to the minimum effective level" (WHO, 2003). Thus, elemental S will not only improve the quality of the plant product, but may also contribute to the natural resistance of *T. majus* against fungal diseases. Besides this, elemental S acidifies the soil and thus increases the availability of essential micro-nutrients. The following principal chemical reaction takes place in the soil:



This acidifying effect can be beneficial, particularly on light soils, which have a too high soil pH as it improves the mobility and uptake of essential heavy metals such as manganese (Mn) and zinc (Zn). But it may also increase the availability of undesired contaminants such as cadmium (Cd), lead (Pb) and nickel (Ni). And a higher uptake of Ni for instance proved to change the composition of relevant secondary compounds in the herbal plant St. John's wort (Murch et al., 2003). Another factor that influenced the concentration of hypericin and pseudohypericin in leaves of St. John's wort proved to be the nitrogen (N) supply (Briskin et al., 2000). With respect to micro-nutrients, acidifying products will promote their uptake (Schnug, 1982). In comparison, the growth promoting effect of N may yield a reduced concentration of minerals.

It was the aim of the presented investigations to determine the influence of elemental S and N applications on the heavy metal concentration in vegetative tissues of *T. majus* in relation to soil characteristics.

Materials and Methods

In 2002, two field experiments with *T. majus* were conducted on a loamy sand soil in Braunschweig (E 10° 27', N 52° 18' E) and a loam soil in Hessisch-Oldendorff (E 9° 16', N 52° 10'). According to the German standards, the actual soil pH was in the optimum range on the loamy sand with a mean value of 5.5, while on the loam the soil pH was distinctly below the recommended value of 5.9 with a mean value of 5.2.

A commercially available seed mixture "Niedrige Mischung" of *T. majus* was used. In each seed hole

five seeds were placed. The intra and inter row distance was on each site 60 cm. Seeds were sown on 22 May 2002.

S and N fertilisation was split into two equal rates of 0, 25 and 50 kg ha⁻¹ with the first dose being applied before sowing; the second rate was fertilised 4 weeks after sowing. S was soil-applied as wettable elemental S (Kumulus®) and N as nitrochalk. Each treatment had four replicates and plots were arranged in a completely randomised block design (Schuster & Lochow, 1979).

Leaf and stem material was collected at the start of flower setting on August 16 and 20, 2002 in Braunschweig and Hessisch-Oldendorff, respectively. The plant material was immediately shock-frozen in liquid N and then freeze-dried. The glucotropaeolin content was determined by HPLC according to the EU method L170/28 for desulphoglucosinolates (Anon, 1990) with minor modifications (Bloem et al., 2001b).

For the determination of N, S and heavy metals the plant material was dried in a ventilated oven at 60° C until constancy of weight. Then the material was fine-ground to a particle size of < 0.12 mm employing an ultra-centrifugal mill (Retsch ZM1). The total N content (d.w.) was determined by using the *Kjeldahl* method. The total S content (d.w.) was determined by X-ray fluorescence spectroscopy according to Schnug & Haneklaus (1999). For the determination of the heavy metal content (d.w.) 0.5g plant material was digested with 4ml HNO₃ + 1ml H₂O₂ in a microwave (CEM/Mars) at 600 Watt for in total 27 minutes. The temperature was raised to 120° C within five minutes, was kept for another two minutes, and then was further raised to 200° C within five minutes and kept at this temperature for another 15 minutes. Then the samples were allowed to cool down for 30 minutes. Afterwards the digest was filled up to 50ml. The iron (Fe), Mn, Zn, copper (Cu) and boron (B) concentration was determined by ICP-OES; molybdenum (Mo), Cd, Pb, chromium (Cr), cobalt (Co), Ni, arsenic (As), selenium (Se) and titanium (Ti) were analysed by ICP-MS.

For data processing the ANOVA procedure was employed; the Tukey-Kramer test of the Cohort software, version 6.0 was used for the comparison between means (Simons, 1995).

Results and discussion

T. majus is used in combination products as a herbal medicine against urinary tract infections because of its anti-microbial activity. Glucotropaeolin is the characteristic, aromatic glucosinolate found in *T. majus*, which has been indicated in the treatment of scurvy, bronchitis, cystitis, pyelitis and as a general tonic and stimulant (Cartheuser, 1765; Cazin, 1868; Dragen-dorf, 1976). In the pharmaceutical industry it has long

been recognised for its antimicrobial action against urethral infections (Braun, 1981; Dannenberg et al., 1956). The active component is benzyliothiocyanate, which is released after enzymatic cleavage of glucotropaeolin by myrosinase. Benzyliothiocyanate derived from *T. majus* may also have the ability to induce the synthesis of protective enzymes which reduce the effects of chemical carcinogens (Fahey et al., 1997) and this gives it a possible role in cancer chemoprevention (Patten & DeLong, 1999). A consistently high glucotropaeolin content in *T. majus* would enable the preparation of a mono drug directly from the plant material so that no extraction procedure would be required. The natural glucotropaeolin content of *T. majus* is usually, however, not high enough to accomplish this target.

So far extracts of *T. majus* have been used in combination products, but a mono drug from the original plant material would be advantageous as it reduces production costs and avoids losses of intact glucosinolate during extraction (Keller, 1991). The problem using *T. majus* in this form is that a minimum content of glucotropaeolin is required in order to provide the prescribed daily intake of glucotropaeolin by an acceptable number of pills (Bloem et al., 2001a). The strongest exogenous factor influencing the glucosinolate content in both, vegetative and generative tissues, proved to be the S supply (Schnug, 1987; Walker & Booth, 1994; Bloem et al., 2001a and 2001b). From all commercially available S fertiliser products only elemental S has a proven fungicidal effect (Hoy, 1987). This makes it a favourable product for the cultivation of medicinal plants such as *T. majus* as it enhances the glucotropaeolin content and

it possibly promotes the natural resistance against certain pathogens (Fig. 1). Fungal pathogens infecting *T. majus* are for instance *Colletotrichum* spp. (Kriz, 1998), *Verticillium dahliae* (Anon, 2004) and *Plasmodiophora brassicae* (Ludwig-Müller et al., 1999), but so far no information is available about the possible health promoting effect of elemental S against these or other diseases. The application of elemental S will reduce the soil pH, which may be relevant with view to infections by soil-borne pathogens, for instance *Streptomyces scabies* infestations of potatoes (Klikocka et al., 2005), and which significantly promotes the availability of essential heavy metals in soils such as Mn and Zn, but also that of undesired contaminants such as Cd and Ni. The upper recommended thresholds for the contamination of phytopharmaceuticals with Pb, Cd and Hg are 5, 0.2 and 0.1 mg kg⁻¹ (Anon, 1991). The acidifying effect of elemental S will be more pronounced on soils with a pH that is sub-optimum than on soils with a soil reaction in the optimum range. These pH dependent mobilisation processes of cations need to be distinguished from antagonistic effects between S and heavy metals, for example for B, Se, As and Mo (Schnug, 1983; Alhendawi et al., 2005; Haneklaus et al., 2006). In case of Mo and Se, this influence may have been further enforced by a reduced availability with decreasing soil pH. A measurement of changes in soil pH after fertilisation was waived as a decrease of the soil pH in mixed sample cores is unlikely (Burns, 1968) and thus was not regularly found in previous experiments (Schnug & Finck, 1980). Schnug & Finck (1980) point out that the acidification concentrates in the nearest vicinity of fertiliser particles.

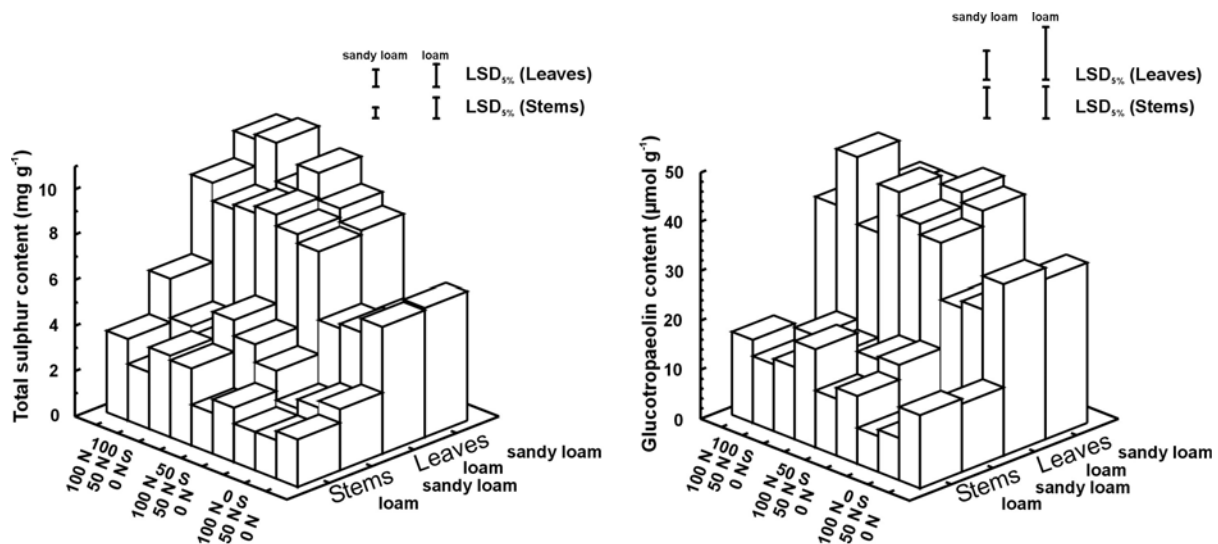


Fig. 1: Influence of increasing S and N rates on the total S and glucotropaeolin content of *T. majus* leaves and stems at the start of flowering on two experimental sites

Yet, changes in the S and glucotropaeolin content of leaves and stems in relation to increasing S and N doses enable an indirect evaluation of the efficacy of the conversion rate of elemental S (Fig.1). Elemental S fertilisation increased significantly the total S content of leaves and stems from on average 4.8 to 9.8 mg g⁻¹ and 2.4 to 4.2 mg g⁻¹, respectively on the sandy loam site. Similar results were obtained on the loam, though the increase was not all that strong. Here, the S concentration increased by 41% in leaves and 47% in stems (Fig. 1). The N rate had no significant influence on the S content at both sites. In contrast, a significantly lower glucotropaeolin content was found in leaves and stems on the sandy loam. In those treatments, which received no S, the total S and glucotropaeolin content decreased from 5.7 to 4.3 mg S g⁻¹ and 32.5 to 13.3 μmol g⁻¹ in leaves, and 2.7 to 2.0 mg S g⁻¹ and 13.9 to 4.2 μmol g⁻¹ in stems after the application of 100 kg ha⁻¹ N. At the same time the N content increased from on average 36 to 54 mg N g⁻¹ in the leaves. These results fit to the findings of Rosa et al. (1997) that N fertilisation decreases the glucosinolate content.

Accordingly, a positive and significant relationship between total S and glucotropaeolin content was found (Fig. 2). For N and the glucotropaeolin content the relationship was negative, however, not significant (Fig. 2).

In total, 43% of the variability of the glucotropaeolin content could be explained by variations in the S nutritional status, which makes the S supply a prominent factor for the cultivation of *T. majus* containing a high level of glucotropaeolin. These results corroborate those from earlier studies with *T. majus* (Bloem et al., 2001a and 2001b).

Recapitulating it can be stated that elemental S applications significantly enhanced the S nutritional status of *T. majus* so that it may be concluded that elemental S was rapidly oxidised and thus plant available on both sites. Particle size and specific surface are besides the count of thiobacilli in the soil, the most important criteria for the oxidation rate (Fox et al., 1964; Schnug & Eckhardt, 1981). Wetable elemental S, which was used for fertilising had a particle size of < 10 μm and thus provides optimum conditions for a rapid conversion (Fox et al., 1964). Additionally, on both soils elemental S has been applied previously so that it may be assumed that the count of thiobacilli was correspondingly high (Schnug & Eckhardt, 1981).

The primary effect of elemental viz to substantially enhance the S nutritional status and concentration of the phytopharmaceutical relevant compound glucotropaeolin was shown above (Fig. 1). Secondary effects viz the mobilisation of heavy metals by acidifying the soil, which yields a correspondingly higher uptake by the plant and antagonistic effects between S and anionic elements such as B, Mo, Se and As will be presented next. The influence of acidifying S and N fertiliser products on the plant availability of heavy metals in soils and their uptake by plants was intensely studied by Schnug (1982), Schnug and Finck (1981), Schnug & Schnier (1982) and Schnug & Schnier (1986).

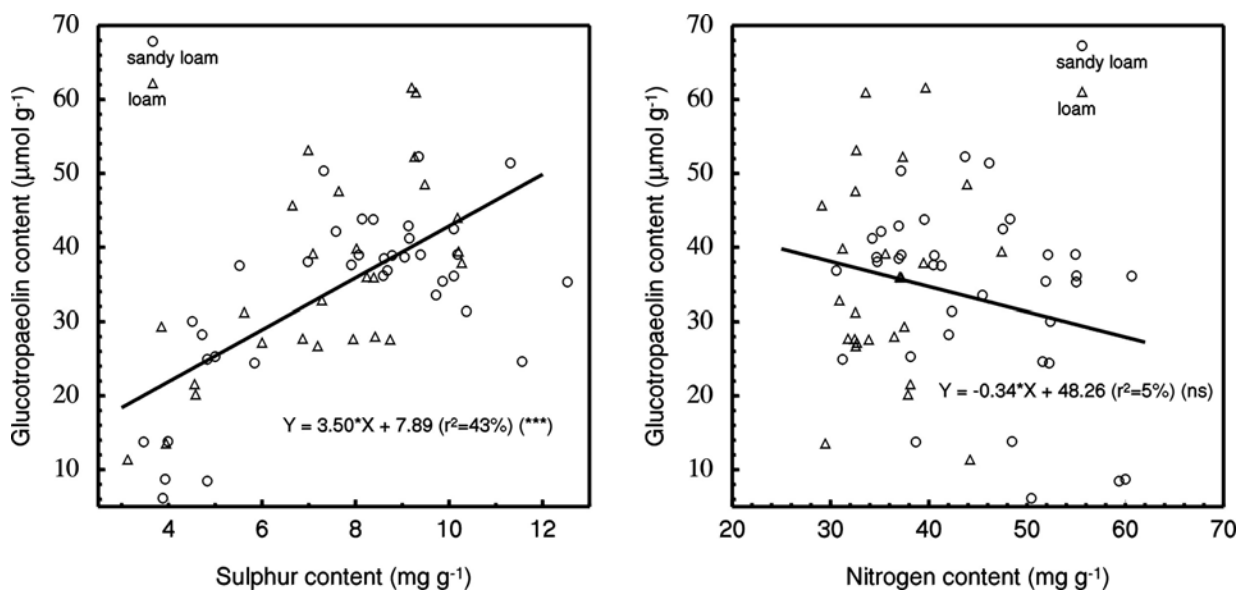


Fig. 2: Relationship between total S (left) and N (right) and glucotropaeolin content of *T. majus* leaves at the start of flowering on two experimental sites

A higher mobility can be beneficial for improving the supply with essential micro-nutrients, particularly on heavy soils with a pH of > 7 , as for instance the supply of winter wheat with Mn is often marginal (Schnug & Finck, 1981). In the presented investigation elemental S acted acidifying, while nitrochalk is rated as neutral in its soil reaction (Finck, 1979). The influence of increasing S and N rates on the essential micro-nutrient content in leaves and stems of *T. majus* is shown in Tab. 1.

On the low-pH loam soil the Fe, Mn, Zn and B content of *T. majus* leaves was 1.2, 2.2, 1.8 and 1.5 times higher than on the loamy sand soil. For Cu similar values were found on both sites and in case of Mo the concentrations were 4.7 times higher on the sandy loam (Tab. 1). This conspicuous increase is most likely the combined effect of an antagonism with S and a limited availability due to the reduction of the soil pH.

Elemental S fertilisation significantly increased the Mn and Cu content and decreased the B concentration in the leaves of *T. majus* on the sandy loam. On the loam soil the Zn content of leaves and stems decreased significantly from on average 107.3 to 81.6 $\mu\text{g g}^{-1}$ and 56.4 to 39.4 $\mu\text{g g}^{-1}$, respectively. A decrease of the Fe and Zn contents on the loam soil after elemental S applications was also found for corn by

Soliman et al. (1992). The increase of the Zn and Cu concentrations on the loamy sand is putatively caused by an antagonistic relationship between Mo and these two elements. Additionally, in case of Zn the acidifying effect of elemental S yielded a higher/lower plant availability (see below) and correspondingly higher/lower Zn/Mo concentrations in *T. majus* leaves. Similar effects were found for spring wheat, tobacco and maize (Cui & Wang, 2005; Wenger et al., 2002).

In case of B the concentration in leaves and stems increased from 18.8 to 23.8 $\mu\text{g g}^{-1}$ and from 13.4 to 14.9 $\mu\text{g g}^{-1}$, respectively on the loam soil (Tab. 1). In comparison, on the loamy sand soil, the B and Mo concentration decreased significantly in leaves and stems of *T. majus*. The decrease of the Fe concentrations in *T. majus* leaves on the loam soil has been observed for maize after application of acidifying S-containing N fertilisers, too (Schnug, 1983). Either a direct effect of sulphate or the stimulation of *T. ferrooxidans* might have yielded this result (Schnug, 1983; Schnug & Eckhardt, 1981). An increasing N rate yielded significantly higher Mn and lower Mo contents in *T. majus* leaves on both sites. Berard et al. (1990) report about similar effects on midribs of stored cabbage.

Tab. 1: Influence of elemental S and N fertilisation (kg ha^{-1}) on the essential micro-element content ($\mu\text{g g}^{-1}$) in leaves and stems of *T. majus* at the start of flowering on two experimental sites

	Micro-nutrient content ($\mu\text{g g}^{-1}$)											
	Fe		Mn		Zn		Cu		B		Mo	
	Leaves	Stems	Leaves	Stems	Leaves	Stems	Leaves	Stems	Leaves	Stems	Leaves	Stems
Soil texture class: loamy sand												
(kg ha⁻¹)												
S												
0	64.0	21.5	77.4	23.8	43.7	46.3	8.4	6.2	16.5	16.7	2.5	0.8
50	64.5	20.4	103.3	31.5	45.6	42.8	10.0	6.3	15.3	13.7	1.1	0.4
100	65.9	21.5	151.0	40.5	56.6	42.4	9.6	6.8	15.3	13.4	0.8	0.3
N												
0	55.2	21.0	84.7	23.0	42.2	41.6	8.1	6.5	15.4	14.4	1.8	0.6
50	63.1	20.1	113.0	32.5	48.6	42.5	8.5	5.4	15.5	14.1	1.3	0.5
100	76.0	22.3	134.0	40.3	55.1	47.4	11.4	7.3	16.2	15.0	1.3	0.5
LSD _{5%}	4.1	4.0	15.2	5.9	16.3	9.2	0.9	1.7	1.0	1.1	0.5	0.1
Soil texture class: loam												
S												
0	85.5	26.8	190.4	23.4	107.3	56.4	8.0	5.5	18.8	13.4	0.3	0.1
50	73.0	23.1	215.2	27.3	79.0	47.5	9.9	5.0	24.8	14.2	0.3	0.2
100	79.4	18.4	299.2	28.8	81.6	39.4	11.5	4.8	23.8	14.9	0.3	0.1
N												
0	76.8	24.1	149.6	23.0	72.1	43.3	10.1	5.4	25.9	14.8	0.6	0.3
50	80.8	21.3	240.4	27.0	91.0	46.4	10.3	5.0	21.8	14.5	0.2	0.1
100	78.3	19.6	310.9	34.0	94.5	48.2	9.8	4.5	21.8	13.3	0.1	0.1
LSD _{5%}	14.8	11.2	91.2	10.9	9.8	8.7	0.8	1.2	3.5	1.0	0.1	0.1

On the sandy loam the Cu concentration was significantly higher, too (Tab. 1). Striking was that the Mn concentration of the leaves increased on average by $74 \mu\text{g g}^{-1}$ because of increasing S rates and $49 \mu\text{g g}^{-1}$ because of increasing N rates on the sandy loam, while on the loam the corresponding values were 109 and $161 \mu\text{g g}^{-1}$, respectively. These findings stress indirectly the strong dependence of the plant available Mn content on soil pH.

A higher concentration of these essential micro-nutrients contributes positively to the mineral human nutrition and thus is beneficial for the quality of the herbal plant product. However, besides the desired heavy metals, the concentration of the undesired and toxic heavy metals such as Cd, Pb, Cr, Ni and As may be elevated. Co and Se are not essential though beneficial for plants and animals (Palit et al., 1994; Aery & Jagetiya, 2000; Rosbrook et al., 1992; Xue et al., 2001) so that an increasing content may be positive by all means. Ti is rated as a beneficial element for plants (Alcaraz-Lopez et al., 2004; Carvajal & Alcaraz, 1998), while the inhalation of Ti compounds may cause stenosis in humans (Zumkley & Kisters, 1990). The plant availability of micro-nutrients and heavy metals increases distinctly in relation to the soil pH when values are lower than 6.5 (Cd, Mn), 6.0 (Zn), 5.5 (Ni, Mo), 4.5 (Cu, As, Cr) and 4.0 (Pb) (Hintermaier-Erhard & Zech, 1997). In contrast the availability of Se and Mo increases when the soil pH exceeds values of 7 and 5, respectively (Hintermaier-Erhard & Zech, 1997). On the acid loam soil the mean heavy metal content of *T. majus* leaves was 2.6, 1.2, 1.2, 2, 3.9, 2.3 and 1.5 times higher for Cd, Pb, Cr, As, Ni, Co and Se than on the loamy sand. Only the Ti concentration was 1.1 times higher on the sandy loam soil (Tab. 2).

On the sandy loam soil, fertilisation with elemental S significantly increased the Cd, Co and Ni content of *T. majus* leaves; in stems the Cd and Co was significantly elevated, while that of Ti was reduced (Tab. 2). In contrast, on the loam soil the Cd content decreased with the S dose, while variations in the Co and Ni content of *T. majus* leaves proved to be statistically not different. N and S fertilisation yielded inverse effects with view to the Cd concentration of *T. majus* leaves on the loam soil with the first increasing the content by on average 40% and the latter decreasing it by 20% (Tab. 2). N fertilisation resulted also in increased Cd concentration of durum wheat (Mitchell et al., 2000). In any case the Cd concentration of *T. majus* leaves on the loam soil proved to be above the upper recommended concentration of $0.2 \mu\text{g g}^{-1}$ in phytopharmaceuticals so that this site is not suitable for cultivating herbal plants irrespective of the fertiliser products used. Interesting in this context is that from nine traditional Chinese medicines six exceeded the upper recommended threshold for Cd (Sun et al., 2002). The tested products in this investigation

showed elevated levels of other heavy metals, too with maximum values of $17.2 \mu\text{g g}^{-1}$ (Ni), $5.0 \mu\text{g g}^{-1}$ (Co), $9.6 \mu\text{g g}^{-1}$ (Cr) and $4.4 \mu\text{g g}^{-1}$ (Pb). Even higher concentrations of heavy metals were found in medicinal plants grown in the Negev desert with $22 \mu\text{g g}^{-1}$ Cd in *Achillea fragrantissima*, $33 \mu\text{g g}^{-1}$ Pb in *Asparagus aphyllus*, $19 \mu\text{g g}^{-1}$ Ni in *Paronychia argentea* (Sathiyamoorthy et al., 1997). Kabelitz (1998) provides an overview of variations in the Pb and Cd concentrations in more than 100 different medicinal and herbal plants.

N fertilisation significantly decreased the Se concentration of *T. majus* leaves on both sites. On the loam soil this effect was even stronger for the N than S treatments (Tab. 2). Such reductions can be explained by the dilution effect caused by an over-proportional increase in biomass.

Usually the heavy metal concentration was equal or higher in leaves than stems of *T. majus* (Tab. 1 and 2). On the sandy loam soil, however, the Pb, Cr, As and Se concentration was on average 47%, 278%, 150% and 218% higher in stems than leaves (Tab. 2). Higher Pb and Cr concentrations in stems than leaves were also found in *Polygonum salicifolium* and wheat, respectively (Dogan & Saygideger, 2004; Sharma et al., 1995). Dwivedi & Dey (2002) found usually higher Pb and Cd concentrations in leaves than in stems of in total 28 medicinal plants, whereby the differentiation was not made for individual plants, but rather with view to the used plant parts.

Further on, the Cr, Ni, and Ti concentration in *T. majus* stems increased significantly in relation to the treatment and experimental site (Tab. 2). Both acidification of elemental S and antagonistic effects between S and anionic trace elements should be reflected in correlative relationships between the total S and individual heavy metal concentrations. Ancillary, the relationships between N and heavy metal concentrations in leaves of *T. majus* were determined (Tab. 3). Close correlations with a regression coefficient of $\geq 50\%$ were found between S and Mn, Mo, Cd, Co, and Ni and between N and Fe and Cu (Tab. 3). So, elemental S increased obviously not only the plant available sulphate concentration, but also available Mn, Cd and Ni concentration in the soil and finally uptake of these elements by *T. majus*. With increasing S supply the uptake of Mo was reduced most explicitly (Tab. 3). A significant inverse relationship between S and B content was found only on the loam soil. Not significant were the relationships between S and As or Se, respectively. As for N, slightly negative correlations were found for Pb, As and Se (Tab. 3).

Tab. 2: Influence of elemental S and N fertilisation (kg ha^{-1}) on the heavy metal content ($\mu\text{g g}^{-1}$) in leaves and stems of *T. majus* at the start of flowering on two experimental sites

		Heavy metal content ($\mu\text{g g}^{-1}$)															
		Cd		Pb		Cr		As		Ni		Co		Se		Ti	
		Leaves	Stems	Leaves	Stems	Leaves	Stems	Leaves	Stems	Leaves	Stems	Leaves	Stems	Leaves	Stems	Leaves	Stems
Soil texture class: loamy sand																	
(kg ha ⁻¹)																	
S	0	0.13	0.13	0.17	0.27	0.22	0.49	0.04	0.09	0.70	0.68	0.14	0.07	0.11	0.26	10.2	9.1
	50	0.13	0.11	0.18	0.22	0.18	0.48	0.04	0.04	0.87	0.63	0.16	0.09	0.12	0.24	9.8	8.2
	100	0.16	0.19	0.17	0.27	0.12	0.52	0.04	0.06	0.80	0.60	0.20	0.10	0.10	0.23	8.7	7.4
N	0	0.12	0.13	0.18	0.30	0.19	0.51	0.05	0.08	0.68	0.62	0.16	0.08	0.15	0.26	9.3	8.5
	50	0.14	0.15	0.17	0.22	0.15	0.44	0.04	0.06	0.79	0.63	0.17	0.09	0.10	0.23	9.0	7.7
	100	0.16	0.15	0.16	0.24	0.19	0.55	0.04	0.06	0.90	0.64	0.17	0.09	0.08	0.24	10.4	8.6
	LSD _{5%}	0.03	0.04	0.04	0.10	0.06	0.20	0.01	0.04	0.12	0.14	0.03	0.01	0.03	0.05	1.5	1.0
Soil texture class: loam																	
S	0	0.46	0.23	0.22	0.19	0.29	0.13	0.11	0.08	2.76	1.13	0.32	0.08	0.20	0.19	9.9	9.1
	50	0.30	0.26	0.21	0.18	0.18	0.16	0.08	0.05	2.85	1.26	0.39	0.08	0.17	0.09	8.0	6.3
	100	0.37	0.23	0.19	0.15	0.21	0.22	0.07	0.05	3.57	1.59	0.45	0.12	0.14	0.12	7.8	6.5
N	0	0.26	0.19	0.20	0.17	0.18	0.20	0.09	0.05	2.38	1.34	0.28	0.08	0.19	0.12	8.6	6.0
	50	0.39	0.26	0.22	0.16	0.22	0.17	0.09	0.06	3.18	1.40	0.38	0.11	0.18	0.11	8.5	7.5
	100	0.43	0.29	0.19	0.18	0.26	0.16	0.07	0.06	3.58	1.39	0.49	0.10	0.13	0.15	8.1	7.1
	LSD _{5%}	0.11	0.11	0.07	0.07	0.1	0.06	0.02	0.02	1.3	0.33	0.13	0.04	0.04	0.05	0.8	1.3

In the presented study vegetative plant material was analysed. Usually, the heavy metal concentration of generative plant material is distinctly lower than in vegetative tissues. Thus it may be favourable on soils, which have geogenically conditioned high concentrations of heavy metals to use seed instead of leaf material for the production of phytopharmaceuticals. Other

advantages of using seeds are the easy and loss-free sampling and storage, which warrants a uniform product with view to the phytopharmaceutical quality. In contrast, losses of glucotropaeolin by the degradation of glucotropaeolin of the leaf material may be as high as 85% in relation to the drying technique (Bloem et al., 2001b).

Tab. 3: Correlations between total S and N concentrations and essential micro-nutrients, and heavy metals in leaves of *T. majus* in relation to the cultivation location (only those correlations are listed that proved to be significant on at least one experimental site)

Soil texture class		Regression equation ($Y = aX + b$)	Coeff. of determination (r^2)	Significance level
X = Sulphur (mg g^{-1})				
Y = ($\mu\text{g g}^{-1}$)				
Fe	IS	$Y = 11.01 \cdot X + 56.17$	$r^2 = 7 \%$	ns
	L	$Y = 2.83 \cdot X + 57.99$	$r^2 = 15 \%$	*
Mn	IS	$Y = 12.00 \cdot X + 16.87$	$r^2 = 49 \%$	***
	L	$Y = 44.16 \cdot X - 82.52$	$r^2 = 59 \%$	***
Zn	IS	$Y = 2.65 \cdot X + 27.92$	$r^2 = 12 \%$	*
	L	$Y = 3.49 \cdot X + 61.69$	$r^2 = 18 \%$	*
B	IS	$Y = -0.18 \cdot X + 17.14$	$r^2 = 10 \%$	ns
	L	$Y = -1.37 \cdot X + 32.97$	$r^2 = 44 \%$	***
Mo	IS	$Y = -0.30 \cdot X + 3.79$	$r^2 = 60 \%$	***
	L	$Y = -0.11 \cdot X + 1.07$	$r^2 = 75 \%$	***
Cd	IS	$Y = 0.006 \cdot X + 0.09$	$r^2 = 13 \%$	*
	L	$Y = 0.05 \cdot X - 0.01$	$r^2 = 60 \%$	***
Cr	IS	$Y = -0.01 \cdot X + 0.27$	$r^2 = 12 \%$	*
	L	$Y = 0.03 \cdot X + 0.03$	$r^2 = 14 \%$	ns
Co	IS	$Y = 0.01 \cdot X + 0.09$	$r^2 = 31 \%$	***
	L	$Y = 0.05 \cdot X + 0.002$	$r^2 = 50 \%$	***
Ni	IS	$Y = 0.03 \cdot X + 0.59$	$r^2 = 13 \%$	*
	L	$Y = 0.46 \cdot X - 0.30$	$r^2 = 54 \%$	***
X = Nitrogen (mg g^{-1})				
Fe	IS	$Y = 1.07 \cdot X + 16.86$	$r^2 = 82 \%$	***
	L	$Y = 0.97 \cdot X + 44.23$	$r^2 = 9 \%$	ns
Mn	IS	$Y = 1.84 \cdot X + 28.51$	$r^2 = 14 \%$	*
	L	$Y = 12.83 \cdot X - 216.99$	$r^2 = 25 \%$	**
Cu	IS	$Y = 0.16 \cdot X + 2.02$	$r^2 = 50 \%$	***
	L	$Y = 0.24 \cdot X + 1.53$	$r^2 = 44 \%$	***
Cd	IS	$Y = 0.002 \cdot X + 0.05$	$r^2 = 18 \%$	**
	L	$Y = 0.01 \cdot X - 0.01$	$r^2 = 13 \%$	ns
Pb	IS	$Y = -0.002 \cdot X + 0.27$	$r^2 = 15 \%$	*
	L	$Y = -0.006 \cdot X + 0.43$	$r^2 = 20 \%$	*
Ni	IS	$Y = 0.009 \cdot X + 0.37$	$r^2 = 20 \%$	**
	L	$Y = 0.17 \cdot X - 2.83$	$r^2 = 34 \%$	**
As	IS	$Y = -7.55 \cdot 10^{-4} \cdot X + 0.08$	$r^2 = 22 \%$	**
	L	$Y = -0.002 \cdot X + 0.16$	$r^2 = 16 \%$	*
Se	IS	$Y = -0.003 \cdot X + 0.25$	$r^2 = 34 \%$	***
	L	$Y = -0.002 \cdot X + 0.21$	$r^2 = 2 \%$	ns
Ti	IS	$Y = 0.09 \cdot X + 5.59$	$r^2 = 15 \%$	*
	L	$Y = -0.11 \cdot X + 12.24$	$r^2 = 18 \%$	*

IS = loamy sand; L = Loam

Conclusions

The selection of a cultivation site for medicinal plants should imply the determination of soil characteristics such as pH and the plant available content of essential micro-nutrients and undesired heavy metals in order to evaluate the transfer into the plant material. Particularly in areas with geogenically conditioned high background values the cultivation of medicinal plants may yield insufficient qualities. This may also be a problem on soils, where the soil reaction is distinctly below the optimum and can be enforced drastically by applying acidifying fertiliser products. The maintenance of an optimum lime status is therefore a major contribution to limit the uptake of contaminants. A favourable method for the precise determination of the lime requirement is that by assessing site-specific buffer curves (Haneklaus & Schnug, 2000). Acidifying fertiliser products should only be used on sites where the supply with essential micro-nutrients is critical because of a limited availability. The advantage of soil-applied acidifying fertilisers proved to be that they were more efficient and independent of climatic conditions than foliar applications (Schnug & Finck, 1980). Additionally, this procedure increases the micro-nutrient content stronger and more constant than soil-applied micro-nutrients (Jungermann, 1962). The harvesting procedure might also contribute to an improved phytopharmaceutical quality: the higher is the proportion of leaves, the higher will be the glucotropaeolin content (Fig. 1) and particularly on light soils the contamination with Pb, Cr, As and Se will be lower (Tab. 2).

References

- Aery NC, Jagetiya BL** (2000) Effect of cobalt treatments on dry matter production of wheat and DTPA extractable cobalt content in soils. *Commun Soil Sci Plant Anal* 31(9-10): 1275-1286
- Alhendawi RA, Kirkby EA, Pilbeam DJ** (2005) Evidence that sulfur deficiency enhances molybdenum transport in xylem sap of tomato plants. *J Plant Nutr* 28: 1347-1353
- Alcaraz-Lopez C, Botia M, Alcaraz CF, Riquelme F** (2004) Effect of foliar sprays containing calcium, magnesium and titanium on peach (*Prunus persica* L.) fruit quality. *J Sci Food Agric* 84 (9): 949-954
- Anon** (1990) EU method Nr. L170/28 Bestimmung des Glucosinolatgehaltes von Oelsaaten durch HPLC.
- Anon** (1991) Arzneimittel-Kontaminanten-Empfehlung-Schwermetalle vom 17. Oktober 1991 – AKEmpfS
- Anon** (2003) Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln. Düngemittelverordnung – DüMV vom 26. November 2003
- Anon** (2004) Verticillium wilt. In: Trees and shrubs – diseases and disorders. Missouri Botanical Garden, January 2004.
www.mobot.org/gardeninghelp/ipm/messages/225.pdf
- Berard LS, Senecal M, Vigier B** (1990) Effects of nitrogen fertilization on stored cabbage. II. Mineral composition in mid-rib and head tissues of two cultivars. *J Hort Sci* 65: 409-416
- Bloem E, Haneklaus S, Köhler T, Sator C, Schnug E** (2001a) Produktionstechnische Maßnahmen zur Erhöhung des Glucotropaeolingehaltes von Kapuzinerkresse (*Tropaeolum majus* L.). Proc. Narossa: 7th Int. Conf. for Renewable Resources, 11th-12th June 2001, Magdeburg, Germany, ÖHMI, 10S
- Bloem E, Haneklaus S, Peplow E, Sator C, Köhler T, Schnug E** (2001b). The effect of sulphur and nitrogen fertilisation on the glucotropaeolin content in *Tropaeolum majus* (L.). XXXVI. DGQ-Vortragstagung, Jena, 185-190
- Bloem E, Haneklaus S, Ahmed SS, Schnug E** (2002) Beitrag der Schwefel-Versorgung zur Qualitätssicherung beim Anbau von Arzneipflanzen in unterschiedlichen Klimaten. *Zeitschrift für Arznei- & Gewürzpflanzen*, 149-155, ISSN 1431-9292
- Braun H** (1981): Medicinal Herbs – a dictionary for physicians and pharmacists. Applications, effects and toxicology. Gustav Fischer Publ, Stuttgart
- Briskin DP, Leroy A, Gawienowski M** (2000) Influence of nitrogen on the production of hypericins by *St. John's wort*. *Plant Physiol Biochem* 38(5): 413-420
- Burns GR** (1968) Oxidation of sulphur in soils. The Sulphur Institute. *Techn Bull* 13, pp 41
- Cartheuser JFB** (1978) in Bardeau, F. (Hrsg.) Die Apotheke Gottes. Heilkräuter einst und jetzt, alphabetisch geordnet. Ullstein Verlag Publishers, Frankfurt
- Carvajal M, Alcaraz CF** (1998) Why titanium is a beneficial element for plants *J Plant Nutr* 21 (4): 655-664
- Cazin JF** (1978): In: Bardeau, F. (Hrsg.) Die Apotheke Gottes: Heilkräuter einst und jetzt. Ullstein Verlag publishers, Frankfurt
- Cui YS, Wang QR** (2005) Interaction effect of zinc and elemental sulfur on their uptake by spring wheat. *J Plant Nutr* 28: 639-649
- Dannenbergh H, Stickl H, Wenzel F** (1956): About the antimicrobial component of *Tropaeolum majus*. *J Physiol Chem* 303: 248–256
- Dogan M, Saygideger S** (2004) Influence of pH on lead accumulation, chlorophyll and nitrogen content of *Polygonum salicifolium* Brouss. ex Willd. *Fresenius Environm Bull* 13(8): 777-782

- Dragendorf M** (1976): In: Madaus, G. (ed) Lehrbuch der biologischen Heilmittel, Band III. George Thieme Verlag, New York
- Dwivedi SK, Dey S** (2002) Medicinal herbs: a potential source of toxic metal exposure for man and animals in India. *Arch. Environm Health* 57: 229-231
- Fahey JW, Zhang Y, Talalay P** (1997): Broccoli sprouts: An exceptionally rich source of inducers of enzymes that protect against chemical carcinogens. *Proc Natl Acad Sci* 94: 10366–10372
- Finck A** (1979) *Dünger und Düngung*. Verlag Chemie, Weinheim
- Fox RL, Atesalp HML, Kampbell DH, Rhoades HF** (1964) Factors influencing the availability of sulfur fertilizers to alfalfa and corn. *Soil Sci Soc Am Proc* 28: 406-408
- Haneklaus S, Paulsen H M, Gupta AK, Bloem E, Schnug E** (1999) Influence of Sulfur Fertilization on Yield and Quality of Oilseed Rape and Mustard. Proc. 10th Int. Rapeseed Congress, Sept. 26-29, 1999, Canberra, (CD-ROM)
- Haneklaus S, Schnug E** (2000) Spatial Variability of Soil Acidity and its Impact on Production Technology. Proc. Int. Sci. Conf. Soil Acidification and Liming: Fundamental and Technological Researches, Klaipeda (Lithuania), 67-73
- Haneklaus S, De Kok LJ, Stulen I, Bloem E, Schnug E** (2006) Sulphur. In: Barker A V and Pilbeam D J (Eds) *Handbook of Plant Nutrition*, CRC Press, Boca Raton, Florida (2006)
- Hintermaier-Erhard G, Zech W** (1997) *Wörterbuch der Bodenkunde*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart
- Hoppe L, Bahadir M, Haneklaus S, Schnug E** (1996) Sulphur supply and alliin content of allium species. XXXI. DGQ-Vortragstagung, Kiel 1996, 189-192
- Hoy MA** (1987) Sulfur as a control agent for pest mites in agriculture. Proc. Int. Symp. Elemental Sulphur in Agriculture, Nice, 1: 51-61
- Jungermann K** (1962) Beiträge zur Mikronährstofffrage (III). *Landw Forsch SH* 16: 93-111
- Kabelitz L** (1998) Zur Schwermetallbelastung von Arznei- und Kräuterdrogen. *Pharm Ind* 60: 444-451
- Keller K** (1991) Legal requirements for the use of phytopharmaceutical drugs in the Federal Republic of Germany. *J Ethnopharmacology* 32: 225-229
- Klikocka H, Haneklaus S, Bloem E, Schnug E** (2005) Influence of sulfur fertilization on infections of potato tubers (*Solanum tuberosum*) with *Rhizoctonia solani* and *Streptomyces scabies*. *J Plant Nutr* 28:819-833
- Kriz RW** (1998) Plant disease and insect clinic. Report on whole year 1997
- <http://www.ces.ncsu.edu/depts/ent/clinic/Annual97/group4.htm>
- Ludwig-Müller J, Bennett RN, Kiddle G, Ihmig S, Ruppel M, Hilgenberg W** (1999) The host range of *Plasmidiophora brassicae* and its relationship to endogenous glucosinolate content. *New Phytologist* 141(3): 443-458
- Mitchell LG, Grant CA, Racz GJ** (2000) Effect of nitrogen application on concentration of cadmium and nutrient ions in soil solution and in durum wheat. *Can J Soil Sci* 80(1): 107-115
- Murch SJ, Haq K, Rupasinghe HPV, Saxena PK** (2003) Nickel contamination affects growth and secondary metabolite composition of St. John's wort (*Hypericum perforatum* L.). *Environm Exp Bot* 49(3): 251-257
- Palit S, Sharma A, Talukder G** (1994) Effects of cobalt on plants. *Bot Rev* 60(2): 141-181
- Patten EJ., DeLong MJ** (1999): Temporal effects of the detoxification enzyme inducer, benzylisothiocyanate: Activation of C–Jun N–terminal kinase prior to the transcription factors AP–1 and NFκB. *Biochem. and Biophys. Res. Commun.* 257, 149–155
- Rosa EAS, Heaney RK, Fenwick GR, Portas CA M** (1997) Glucosinolates in crop plants. *Hortic Rev* 19: 99-215
- Rosbrook PA, Asher CJ, Bell LC** (1992) The cobalt status of Queensland soils in relation to pasture growth and cobalt accumulation. *Tropical Grasslands* 26(2): 130-136
- Sathiyamoorthy P, VanDamme P, Oven M, Golan-Goldhirsch A** (1997) Heavy metals in medicinal and fodder plants of the Negev desert. *J Environm Sci Health A* 32(8): 2111-2123
- Schnug E, Finck A** (1980) Einfluß unterschiedlicher Stickstoffdüngerformen auf die Mobilisierung von Spurennährstoffen. *Landw Forsch SH* 37: 243-253
- Schnug E, Finck A** (1981) Einfluß verschiedener N-Düngemittel auf die Spurennährstoffgehalte von Mais, Raps und Sellerie unter besonderer Berücksichtigung von Bor und Molybdän. *Landw Forsch SH* 38: 187-195
- Schnug E, Eckhardt FEW** (1981) Einfluß von Thio-bacillus thiooxidans auf die Spurenelementversorgung von Lolium multiflorum bei Schwefeldüngung. *Mitt Dt Bodenkd Ges* 32: 491-498
- Schnug E** (1982) Untersuchungen zum Einfluß bodenversauernder Düngung auf die Spurennährstoff-Versorgung von Kulturpflanzen. Diss. Agrarwiss. Fak., Kiel
- Schnug E** (1983) Differenzierung von Primär- und Sekundärwirkung der N-Düngung auf die Spurennährstoff-Versorgung von Getreide und Mais. *Landw Forsch SH* 40: 231-240

- Schnug E, Schnier C** (1982) Influence of sulfur containing fertilizers on trace element concentrations of celery (*Apium grav.*) with special regard to As, B, Br, Mo, Sb and Se. Proc. 21st Intern. Hortic. Congr., Vol. I, Nr. 1495, Hamburg
- Schnug E, Schnier C** (1986) The effect of sulfur-containing nitrogen fertilizers on the elemental composition of celery (*Apium graveolens*) grown on a polluted marsh soil. Plant Soil 91: 273-278
- Schnug E** (1987): Pattern of nutritional elements as a genetic characteristic of species and cultivars of agricultural plants. Trans. XIV. Int. Botanical Congr., Berlin, 134-138
- Schnug E, Haneklaus S, Borchers A, Polle A** (1995) Relations between sulphur supply and glutathione and ascorbate concentrations in *Brassica napus*. Z Pflanzenernähr Bodenkde 158: 67-69
- Schnug E** (1997) Significance of sulphur for the quality of domesticated plants. In: Cram, W J, DeKok L J, Stulen I, Brunold C, Rennenberg H (Eds) Sulphur metabolism in higher plants. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, 109-130
- Schnug E, Haneklaus S** (1999) Diagnosis of the Nutritional Status and Quality Assessment of Oilseed Rape by X-Ray Spectroscopy. Proc. 10th Int. Rape-seed Congress, Sept. 26-29, 1999, Canberra, (CD-ROM)
- Schuster WH, von Lochow J** (1979) Anlage und Auswertung von Feldversuchen. DLG Verlag, Frankfurt (Main)
- Sharma DC, Chatterjee C, Sharma CP** (1995) Chromium accumulation and its effect on wheat (*Triticum aestivum* L. cv HD-2204) metabolism. Plant Sci 111(2): 145-151
- Simons, B** (1995) CoStat / CoPlot / CoDraw. CoHort Software, Minneapolis, USA
- Soliman M F, Kostandi SF, Vanbeusichem ML** (1992) Influence of sulfur and nitrogen-fertilizer on the uptake of iron, manganese, and zinc by corn plants grown in calcareous soils. Commun Soil Sci Plant Anal. 23(11-12): 1289-1300
- Sun RX, Zhou LM, Xue WG, Sun JH** (2002) Determination of trace elements in Chinese traditional medicines by atomic absorption spectrometry. Spectroscopy Spectral Analysis 22(5): 853-855
- Walker KC, Booth EJ** (1994): Sulphur deficiency in Scotland and the effects of sulphur supplementation on yield and quality of oilseed rape. Norwegian J Agric Sci 15: 97-104
- Wenger K, Kayser A, Gupta S K, Furrer G, Schulz R** (2002) Comparison of NTA and elemental sulfur as potential soil amendments in phytoremediation. Soil Sediment Contamination 11(5): 655-672
- WHO** (2003) WHO guidelines on good agricultural and collection practices (GACP) for medicinal plants. Geneva
- Xue TL, Hartikainen H, Piironen V** (2001) Antioxidative and growth-promoting effect of selenium on senescing lettuce. Plant Soil 237(1): 55-61
- Zumkley H, Kisters K** (1990) Spurenelemente – Geschichte, Grundlagen, Physiologie, Klinik. Wiss. Buchgesellschaft, Darmstadt

Schwermetalle in P-Düngern

Sylvia Kratz und Ewald Schnug

Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Bundesallee 50, D-38116 Braunschweig

Zusammenfassung

Beim Eintrag von Schwermetallen in die Nahrungskette spielen Düngemittel eine wesentliche Rolle. Insbesondere mineralische P-Dünger aus sedimentären Rohphosphaten weisen oftmals hohe Schwermetallgehalte auf, aber auch mit Klärschlamm und Wirtschaftsdüngern können erhebliche Schwermetallfrachten auf den Acker gelangen. Der Beitrag gibt einen Überblick über Schwermetallgehalte und -frachten unterschiedlicher mineralischer und organischer Düngemittel bei praxisüblicher P-Düngung und demonstriert am Beispiel von Cd den Ablauf einer Risikoabschätzung anhand von toxikologischen Basisdaten. Abschließend werden Handlungsoptionen zur Begrenzung von Schwermetalleinträgen in landwirtschaftliche Böden diskutiert.

Schlüsselwörter: Klärschlamm, Mineraldünger, Schwermetalle, Risikoabschätzung, Toxikologie, Wirtschaftsdünge,

Summary

Fertilization may play an important role for the input of heavy metals into the food chain. In particular, mineral P fertilizers produced from sedimentary rock phosphates often contain high levels of heavy metals, however, agricultural soils may also receive considerable loads of heavy metal with sewage sludge and farmyard manure. In this paper, the heavy metal con-

tent of different mineral and organic fertilizers and heavy metal loads resulting from standard P-fertilization practice are presented. The procedure of establishing a risk assessment based on toxicological data is outlined exemplary for Cd and options for a reduction of heavy metal inputs into agricultural soils are discussed.

Key words: h farmyard manure, eavy metals, mineral fertilizers, risk assessment, sewage sludge, toxicology

Einleitung

Schwermetalle sind Metalle mit einer Dichte >5g cm⁻³ (Sauerbeck, 1985; Bliefert, 1994; Hintermaier-Erhard & Zech, 1997; Hirner et al., 2000), vereinzelt werden in der Literatur auch 6 g cm⁻³ als Untergrenze genannt (Alloway, 1999). Im weiteren Sinne gehören dazu auch die Metalloide (=Halbmetalle oder Elemente mit nur teilweise metallischem Charakter) mit einer Dichte > 5 g cm⁻³, namentlich Ge, As, Sb, Te und Po. Mehr als die Hälfte aller bekannten Elemente des Periodensystems sind Schwermetalle (Abb. 1). In Biosystemen sind Komplexverbindungen mit organischen Liganden die dominierende Speicherform. Einige Schwermetalle kommen in mehreren unter Umweltbedingungen stabilen Oxidationsstufen vor, so z.B. Fe²⁺/Fe³⁺, Cu⁺/Cu²⁺, Mn²⁺/Mn³⁺/Mn⁴⁺ und As³⁺/As⁵⁺ (Hirner et al., 2000).

Gruppe	IA	IIA		IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB		VIIIB	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA	
Periode	1	2		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																		2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	19 K	20 Ca		21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr		39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	*	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds								
			*	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb		
			*	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No		

Li Metalle H Nicht-Metalle
 B Metalloide F Halogene
 V Ge Metall(oid)e mit Dichte > 5 g/cm³ He Edelgase

Abb. 1. Schwermetalle im Periodensystem

In zu hoher Konzentration sind alle Metalle giftig. Einige sind allerdings zugleich essenzielle Spurenelemente, d.h. sie sind erforderlich für lebensnotwendige Stoffwechselforgänge von Pflanzen, Tieren und/oder Menschen. Zu den für Pflanzen essenziellen Schwermetallen gehören Cu, Fe, Mn, Mo, Zn (und Ni), für Tiere und Menschen sind vor allem Co, (Cr?), Cu, Fe, Mn und Zn zu nennen (Alloway, 1999; Schilling, 2004).

Der Mensch nimmt Schwermetalle zu etwa 75% mit pflanzlicher und zu etwa 20% mit tierischer Nahrung auf, nur etwa 5% der aufgenommenen Schwermetalle stammen aus der Atemluft (Hirner et al., 2000). Daraus wird deutlich, dass der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion eine Schlüsselrolle beim Schutz der menschlichen Gesundheit zukommt. Wichtige Schutzgüter sind selbstverständlich auch die Gesundheit von Tier und Pflanze, die Nahrungs- und Futtermittelqualität sowie die Bodenfruchtbarkeit als Grundlage der Nahrungs- und Futtermittelproduktion.

Toxikologische Relevanz

Pflanzentoxizität

Die toxische Wirkung von Schwermetallen auf Pflanzen beruht darauf, dass sie Wachstum und Entwicklung der Pflanzen beeinträchtigen können. Zu unterscheiden ist dabei zwischen nicht-essenziellen und essenziellen Elementen (Abb. 2). Bei nicht-essenziellen Schwermetallen wird die toxische Wirkung mit zunehmender Konzentration des Elements stärker, bei essenziellen Schwermetallen beeinträchtigt eine zu geringe Konzentration Wachstum und Entwicklung ebenso wie eine zu hohe, beides kann im Extremfall zum Absterben der Pflanze führen (Kabata-Pendias, 2001).

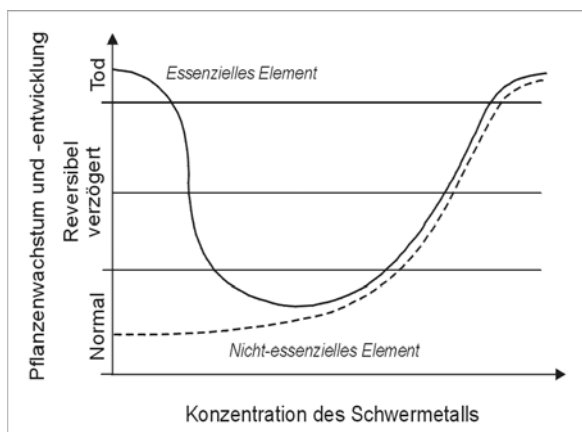


Abb. 2: Wirkung essenzieller und nicht-essenzieller Schwermetalle auf Pflanzenwachstum und -entwicklung in Abhängigkeit von der Konzentration (aus: Kabata-Pendias, 2001)

Ob eine toxische Wirkung überhaupt eintritt, hängt natürlich davon ab, ob und in welchem Ausmaß das Schwermetall von der Pflanze aufgenommen wird.

Pflanzenverfügbarkeit bzw. Mobilität eines Schwermetalls im Boden sind in erster Linie eine Funktion des Boden-pH (Kabata-Pendias, 2001). Die Mobilität ist aber auch elementspezifisch verschieden (Abb. 3). So ist sie besonders hoch bei Cd, Zn und Tl, besonders niedrig bei Pb und Hg (Hintermaier-Erhard & Zech, 1997). Sie kann durch sog. Transferfaktoren beschrieben werden. Der Transferfaktor entspricht dem Quotienten aus der Schwermetallkonzentration in der Pflanze und der Schwermetallkonzentration im Boden. Zu beachten ist hierbei allerdings, dass Transferfaktoren mit der Konzentration des jeweiligen Elements im Boden variieren (Sauerbeck, 1985). Sie werden daher hier lediglich als starke Vereinfachung mit orientierendem Charakter gebraucht und dienen nur der Beschreibung von Tendenzen.

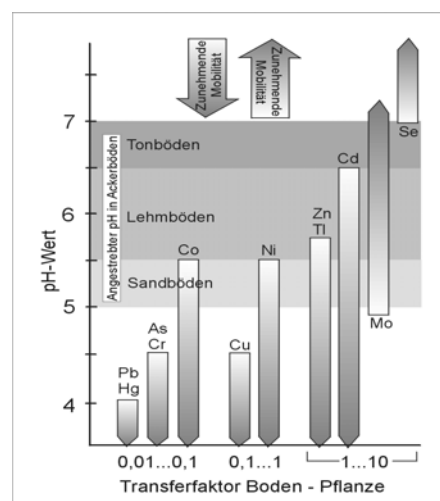


Abb. 3. Mobilität und Transfer von Schwermetallen aus dem Boden in die Pflanze in Abhängigkeit vom pH-Wert (aus: Hintermaier-Erhard & Zech, 1997)

Toxizität für Tiere und Menschen

Bei Tieren und Menschen unterscheidet man zwischen akuter und chronischer Schwermetalltoxizität. Unter akuter Toxizität versteht man eine Schädigung, welche durch die ein- oder mehrmalige Aufnahme einer hohen Dosis innerhalb kurzer Zeit (24 h) ausgelöst wird. Chronische Toxizität dagegen ist eine schädliche Wirkung, welche bei wiederholter Aufnahme kleiner (nicht akut toxischer) Dosen über längere Zeit (Monate, Jahre) durch Anreicherung eines Stoffes im Organismus oder durch Summierung irreversibler toxischer Effekte im Zielorgan hervorgerufen wird (Merian, 1984; von Geldmacher, Mallinckrodt & Schaller, 2004).

Für die Frage der Schädigung von Schwermetallen in Düngemitteln ist in erster Linie die mögliche chronische Toxizität von Interesse, die durch langfristige Aufnahme geringer Dosen von Schwermetallen mit der pflanzlichen Nahrung verbunden sein kann.

Beim Menschen können infolge der Schwermetalltoxizität verschiedene chronische Schäden auftreten (nach Merian, 1984; Merck Index, 2001; Geldmacher von, Mallinckrodt & Schaller, 2004):

- Funktionsstörungen des Magen-Darm-Traktes (generell)
- Funktionsstörungen der Leber: As, Bi, Cr, Cu, Fe, Mn, Sb
- Funktionsstörungen der Niere: Au, Cd, Hg, Pb, U
- Störungen des blutbildenden Systems: As, Pb
- Erkrankungen des Herz-Kreislaufsystems: As, Bi, Pb
- Erkrankungen der Atemwege (bei inhalativer Aufnahme)
- Schäden des zentralen und peripheren Nervensystems: As, Hg, Mn, Pb, Tl, Organozinnverbindungen
- Mutagenität: As, Cr, Hg
- Teratogenität: Hg, Pb
- Kanzerogenität: As, Be, Cd, Cr, Ni, U

Eintragungspfade von Schwermetallen in die Nahrung

Die Eintragungspfade von Schwermetallen in die Nahrungskette sind vielfältig (Abb. 4). Wie Wilcke und Döhler (1995) anhand einer Schwermetallgesamtbilanz der Landwirtschaft für die Bundesrepublik Deutschland zeigten, spielen neben der atmosphärischen Deposition Düngemittel, und zwar nicht nur mineralische, sondern auch Wirtschaftsdünger und Klärschlamm, eine ganz wesentliche Rolle.

Abb. 4 verdeutlicht dies am Beispiel Cadmium. Gezeigt sind hier die relativen Cd-Einträge in das Sy-

stem Boden-Pflanze-Mensch in % des Gesamteintrages. Betrachtet man ausschließlich die Einträge in die landwirtschaftliche Nutzfläche, wird der Beitrag der Düngung sogar noch deutlicher, wie aktuelle Zahlen für Deutschland belegen. So beträgt nach Schütze et al. (2003) der relative Anteil von Mineraldüngern am Cd-Eintrag in die landwirtschaftliche Nutzfläche 71%, Wirtschaftsdünger tragen mit 8%, die atmosphärische Deposition mit 20% zum Cd-Eintrag bei. Der Beitrag von Klärschlamm ist nach Schütze et al. (2003) im bundesweiten Kontext vernachlässigbar gering, ebenfalls nicht berücksichtigt wurden von diesen Autoren der Anteil von Verwitterung und Abwasserverrieselung.

Schwermetalle in P-Düngern

Quellen von Schwermetallen in P-Düngern

Wie bereits gezeigt, spielen Mineraldünger eine hervorragende Rolle beim Eintrag von Schwermetallen in die Nahrungskette, und zwar insbesondere die P-Düngemittel aufgrund ihrer Herstellung aus Rohphosphaten, welche geogen bedingt bereits hohe Schwermetallgehalte mitbringen. Häufigstes gesteinsbildendes Mineral bei Rohphosphaten sind diverse Varietäten des Apatits. Zu unterscheiden ist zwischen sedimentären Rohphosphaten, bestehend aus (Hydroxyl-) Carbonat-Fluor-Apatit, die bei ihrer Entstehung Schwermetalle wie Ag, As, Cd, Mo, Pb, U, V oder Zn durch Adsorption an sekundäre Tonminerale und Fällung von Metallsulfiden unter reduzierenden Bedingungen einlagern, und magmatischen Rohphosphaten (Chlor-, Hydroxyl- oder Fluorapatit), bei deren Kristallisation durch isomorphe Substitution anstelle von Haupt- und Mengenelementen Schwermetalle (vor allem Seltene Erden, Pb und Sr) in den Apatit eingebaut wurden (van Kauwenbergh, 1997; Alloway, 1999).

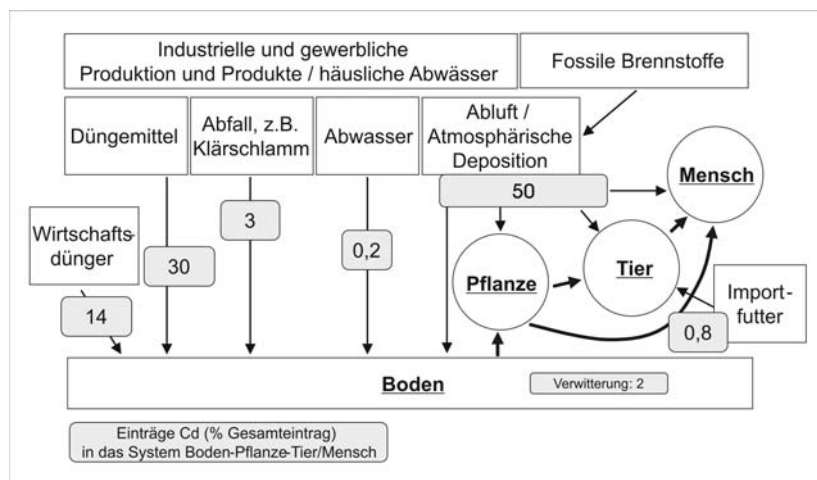


Abb. 4: Relative Bedeutung verschiedener Eintragungspfade von Schwermetallen in das System Boden-Pflanze-Tier/Mensch am Beispiel Cadmium, nach Sauerbeck (1985), verändert, Daten für Cd aus Wilcke und Döhler (1995)

87% der zur P-Düngerproduktion eingesetzten Rohphosphate sind sedimentärer Natur (van Kauwenbergh, 1997). Tab. 1 zeigt Schwermetallgehalte der weltweit am stärksten vertretenen Herkünfte. Zum Vergleich sind Hintergrundwerte für Sand- und Löss-Böden nach LABO (1998) aufgeführt. Unter dem Hintergrundwert wird die Summe aus naturbedingtem, geogenem Grundgehalt und der ubiquitären Stoffverteilung als Folge diffuser anthropogener Einträge in die Böden verstanden (LABO, 1998). Erkennbar ist eine deutlich stärkere Anreicherung der Schwermetalle in sedimentären gegenüber magmatischen Rohphosphaten. Auffällig ist außerdem, dass Cd und U in allen Herkünften eine durchgängig hohe Anreicherung zeigen, während hinsichtlich der anderen aufgeführten Elemente jeweils auch Herkünfte mit vergleichsweise niedrigen Gehalten zur Verfügung stehen. Hoch angereichert ist auch Zn, dieses ist aber ein essenzielles Element und von deutlich geringerer Toxizität als Cd und U und gibt daher ungleich weniger Anlass zur Besorgnis.

Beim Produktionsprozess von P-Mineraldüngern aus Rohphosphaten werden die im Rohstoff vorhandenen Schwermetalle zu mindestens 60 - 70% in das Produkt transferiert (Mortvedt & Beaton, 1995).

Lokal kann auch Klärschlamm einen bedeutenden Beitrag zum Schwermetalleintrag leisten. In häusliche und industrielle Abwässer gelangen die Metalle z.B.

durch Korrosion von Wasserleitungen (Cu, Zn) oder über Medikamente und Hygieneprodukte (Ag, As, Cu, Hg, Zn), ein wichtiger Zuleiter ist vor allem auch die metallver- und bearbeitende Industrie (Ag, Cd, Cr, Cu, Ni, Tl, Pb, V, Zn, u.v.m.) (Alloway, 1999; Thomé-Kozmiensky, 2001).

Schwermetalle wie Cu, Zn oder As werden insbesondere auch über Wirtschaftsdünger in die landwirtschaftliche Nutzfläche eingebracht, wobei die wesentliche Eintragsquelle hier Futtermittelzusätze sind, die zur Leistungssteigerung in der Tierfütterung eingesetzt werden. Daneben können über das Trinkwasser der Tiere, Trägersubstanzen für Tiermedikamente, Stroheinstreu sowie Abrieb von metallischen Stalleinrichtungen weitere Schwermetalle (z.B. Pb und Ni) in die Wirtschaftsdünger gelangen (Schultheiss et al., 2003; Schultheiss, persönliche Mitteilung, 2003).

Schwermetallzufuhr mit der P-Düngung

Der Einsatz von Phosphordüngern zu einer Acker- oder Grünlandkultur erfolgt im Allgemeinen in Anpassung an den P-Bedarf der jeweiligen Kultur. Je kg zugeführtem P wird jeweils auch eine bestimmte Fracht an Schwermetallen unvermeidbar mit in den Boden eingebracht. In Tab. 2 ist der Schwermetallgehalt von P-Düngern daher auf deren Phosphat-Gehalt bezogen.

Tab. 1.: Schwermetallgehalte von Rohphosphaten unterschiedlicher Herkunft (nach Mortvedt & Beaton, 1995; van Kauwenbergh, 1997; Raven & Loeppert, 1997; Kharikov & Smetana, 2000; Gupta & Singh, 2003) und Hintergrundwerte für Böden nach LABO (1998)

mg kg ⁻¹	Rohphosphate										Hintergrundwerte für Böden (LABO)	
	----- sedimentär -----										--- magmatisch ---	
	USA		Marokko		China		Mittlerer Osten		Russland (Kola)		Sand	Löss
	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis		
As	7	24	9,2	13	9	26	2,1	35	1	10	2	8
Cd	6,1	92	15	38	<2	2,5	1,5	35	0,1	1,3	<0,3	<0,3
Cr	60	637	75	279	18	33	25	230	13		17	120
Cu	9,6	23	1	22			5	31	15	30	7	18
Hg	0,05	0,29	0,04	0,86	0,005	0,21	0,002	0,02	0,004	0,01	0,05	0,12
Ni	17	37		26			20	80	2	15	4	28
Pb	4,6	17	7	14	1,5	6	1	33	1,8	33	20	43
V	23	769	87	200	8	80	59	303	100		23	69
Zn	204	382		261			29	630	19	23	25	73
U	65	180	75	155	23	31	40	170	10	28	Böden weltweit 0,8-11	

Anzumerken ist, das hier zwecks Darstellung von generellen Trends lediglich mittlere Gehalte gezeigt sind und nicht die bisweilen enormen Spannweiten, die bedingt durch Herkunft des Rohstoffes, Typ des Abwassers bzw. Zusammensetzung des Futters auftreten können. Die Daten verdeutlichen, dass die Schwermetallzufuhr je nach Wahl des Düngemittels sehr unterschiedlich sein kann. Mineraldünger bringen in der Regel eine besonders hohe Menge an Cd sowie auch an U mit in den Boden ein. Klärschlämme weisen relativ hohe Gehalte an allen betrachteten Schwermetallen auf. Tierische Wirtschaftsdünger bringen besonders viel Zn und Cu in den Boden ein (Schweinegülle auch As), wobei diese Metalle allerdings als essenzielle Spurenelemente anders zu bewerten sind als hochtoxische Elemente wie Cd oder U

(siehe dazu VDLUFA, 2002). Aber auch Ni- und Pb-Gehalte sind bezogen auf den P₂O₅-Gehalt bei Wirtschaftsdüngern vergleichsweise hoch. Aus der Tabelle lassen sich leicht potenzielle Schwermetallfrachten ermitteln, die bei einer Düngung von 50 kg P₂O₅ je ha und Jahr dem Boden zugeführt werden (Tab. 3). Zum Vergleich sind in Tab. 3 gewichtete mittlere Schwermetallentzüge für alle in Deutschland angebauten Fruchtarten dargestellt.

Risikoabschätzung

Im Hinblick auf die eingangs erwähnten Schutzgüter ist eine Schwermetallzufuhr über Düngemittel vor allem dann risikobehaftet, wenn diese von Pflanzen und Tieren aufgenommen werden und so in die menschliche Nahrung gelangen.

Tab. 2: Zufuhr von Schwermetallen mit der P-Düngung bei verschiedenen P-Düngemitteln

	P ₂ O ₅ %TM	As	Cd	Cr	Cu	Hg mg kg ⁻¹ P ₂ O ₅	Ni	Pb	Tl	Zn	U
Superphosphat	18	k.D.	33	1006	125	k.D.	81	<6	k.D.	767	313
TSP	46	12	67	652	50	0,09	67	<2	5	974	504
Weicherdiges RP	28,5	k.D.	40	561	56	k.D.	54	6	k.D.	751	316
NP (MAP)	46	7	26	307	48	<0,02	55	<2	2,1	439	430
Klärschlamm	4,4	30	25	868	8820	19	560	1089	33	18450	k.D.
Schweinegülle	5,2	63	7	113	5499	0,5	185	140	0,4	18998	k.D.
Hühnerfestmist	5	7	6	192	1536	5	202	79	k.D.	8204	k.D.
Hühnertrockenkot	3,6	k.D.	6	157	2210	1	133	72	k.D.	10553	k.D.
Rindergülle	1,9	29	16	259	2533	2	275	291	2	12286	k.D.

Daten für Mineraldünger aus Boysen, 1992, Heiland, 1986, Raven & Loeppert, 1997, Severin et al., 1990, UBA-Texte 59/01;

P-Gehalte in Mineraldüngern nach Schilling, 2000;

Daten für organische Dünger aus Datenbank FAL/PB (zahlreiche Quellen)

k.D. = keine Daten verfügbar

Tab. 3: Schwermetallfrachten bei einer Düngung von 50 kg P₂O₅ je ha und Jahr (abgeleitet aus Tab. 2) für unterschiedliche P-Düngemittel und nach Anbaufläche gewichtete mittlere Schwermetallentzüge über alle Fruchtarten nach BMU / BMVEL (unveröffentlicht)

	As	Cd	Cr	Cu	Hg (g ha ⁻¹ a ⁻¹)	Ni	Pb	Tl	Zn	U
Superphosphat	k.D.	1,65	50,3	6,25	k.D.	4,05	<0,3	k.D.	38,4	15,7
TSP	0,6	3,35	32,6	2,5	0,005	3,35	<0,1	0,25	48,7	25,2
Weicherdiges RP	k.D.	2	28,1	2,8	k.D.	2,7	0,3	k.D.	37,6	15,8
NP (MAP)	0,35	1,3	15,4	2,4	<0,001	2,75	<0,1	0,11	22	21,5
Klärschlamm	1,5	1,25	43,4	441	0,95	28	54,5	1,65	923	k.D.
Schweinegülle	2,5	0,35	5,65	275	0,025	9,25	7	0,02	950	k.D.
Hühnerfestmist	0,35	0,3	9,6	76,8	0,25	10,1	3,95	k.D.	410	k.D.
Hühnertrockenkot	k.D.	0,3	7,85	111	0,05	6,65	3,6	k.D.	528	k.D.
Rindergülle	1,45	0,8	13	127	0,1	13,8	14,6	0,1	614	k.D.
Gewichteter mittlerer Schwermetallentzug über alle Fruchtarten		0,75	11	37	0,15	9	11		260	

Die LABO-Arbeitsgruppe „Schwermetalltransfer Boden/Pflanze“ (Delschen & Rück, 1997; Delschen et al., 1998) hat vor diesem Hintergrund die Elemente As, Pb, Cd, Hg und Tl als „vorrangig relevant“ für die Nahrungspflanzenqualität identifiziert.

Hinsichtlich der Qualität von Futterpflanzen (Eintrag in die menschliche Nahrungskette über tierische Nahrungsmittel) wurden von den Autoren weiterhin Cu und Ni hervorgehoben. Ertragsrelevante und damit für die Sicherung menschlicher Nahrung bedeutsame phytotoxische Wirkungen schließlich seien bei As, Cu, Ni und Zn zu besorgen.

Eine ganz ähnliche Auflistung findet sich bei Alloway (1999), der As, Cd, Hg, Pb, Tl und U als diejenigen Schwermetalle nennt, die hinsichtlich der menschlichen Gesundheit, Landwirtschaft und Ökotoxikologie am meisten Anlass zur Besorgnis gäben. Mit Bezug auf die Sicherung der Bodenfruchtbarkeit werden hier außerdem Zn und Cu genannt, da diese toxisch für einige Bodenmikroorganismen, z.B. Rhizobia (symbiotische N-Fixierer) seien. In einer US-amerikanischen Studie zur Bewertung des Gesundheitsrisikos ausgewählter Metalle in Mineraldüngern nach der Applikation wurden die Elemente As, Cd, Cr, Co, Cu, Pb, Hg, Mo, Ni, Se, V, Zn und Ra-226 als „potenziell Besorgnis erregende Metalle“ bezeichnet, wobei als Auswahlkriterien hier die relative Toxizität (Reference Dose RfD nach USEPA, d.h. Schwellenwert, oberhalb dessen toxische Wirkungen eintreten können, basiert auf NOAEL, s.u.), die relative Produktkonzentration und der Bewertungsvorrang genannt wurden (The Weinberg Group Inc., 2000).

Zwischen der Einstufung als potenziell Besorgnis erregendes Element und der Feststellung eines tatsächlich bestehenden Risikos ist allerdings klar zu

unterscheiden. Dies soll im Folgenden anhand einer von der FAL durchgeführten „Risikoabschätzung der Cadmium-Belastung für Mensch und Umwelt infolge der Anwendung von cadmiumhaltigen Düngemitteln“ (Schütze et al., 2003) verdeutlicht werden. In der Literatur besteht Einigkeit darüber, dass es sich bei Cadmium um ein hochtoxisches Element handelt (Delschen et al., 1998, Alloway, 1999; The Weinberg Group Inc., 2000; Schütze et al., 2003). Aus den vorangegangenen Ausführungen geht außerdem hervor, dass P-Düngemittel Cd in vergleichsweise hohen Konzentrationen enthalten können. Wie ist nun das Risiko für Mensch und Umwelt einzustufen, wenn Kulturpflanzen entsprechend der guten fachlichen Praxis mit P-Düngern versorgt werden?

Die Risikoabschätzung für Cadmium nach Schütze et al. (2003) (Abb. 5) arbeitet mit Toxizitätsschwellenwerten, d.h. Schwellenkonzentrationen, unterhalb derer nach heutigem Stand des Wissens schädliche Wirkungen auf den Zielorganismus ausgeschlossen werden können. In der Ökotoxikologie heißen diese PNEC, oder „predicted no effect concentration“. PNECs werden aus quantitativen ökotoxikologischen Wirkungsdaten über Schwermetalle abgeleitet. In einem zweiten Schritt werden PNECs mit der aktuell messbaren bzw. für die Zukunft prognostizierten Umweltkonzentration (PEC oder „predicted environmental concentration“) verglichen, um das tatsächliche Risiko abzuschätzen. Per Definition ist ein ökotoxikologisches Risiko dann vorhanden, wenn $PEC > PNEC$. Für die Zukunft werden Umweltkonzentrationen über ein Akkumulationsmodell berechnet, welches Düngungsstrategie, atmosphärische Deposition, Auswaschung und Pflanzenentzug berücksichtigt.

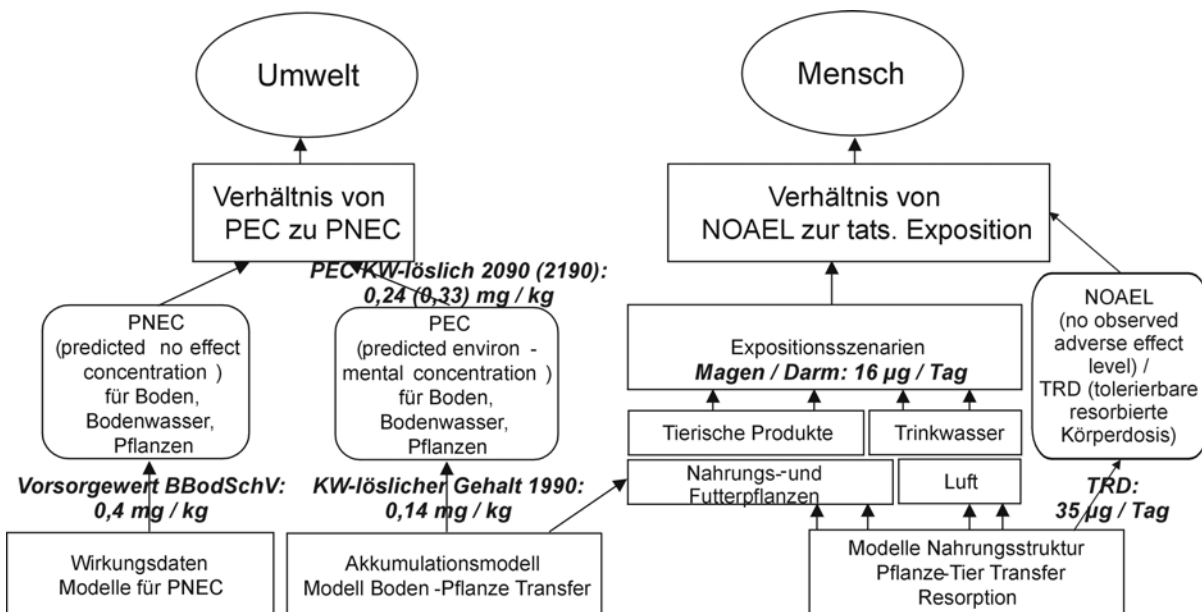


Abb. 5: Ablaufschema einer Risikoabschätzung für Cd nach Schütze et al. (2003)

In der Humantoxikologie wird mit sog. NOALs oder „no observed adverse effect levels“ gearbeitet. Das sind in der Regel im Tierversuch abgeleitete Schwellenkonzentrationen, bei denen kein toxischer Effekt eintritt. Aus diesen werden „tolerierbare täglich resorbierte Körperdosen“ (TRD) abgeleitet. Zur Kompensation der Hochrechnung von subchronischer auf chronische Expositionsdauer, der Übertragung von Tierexperimenten auf den Menschen und zum Schutz empfindlicher Personengruppen kalkuliert man hierbei mit einem Sicherheitsfaktor, der zwischen 1 und 10000 liegen kann (UBA, 1993). Parallel wird die tatsächliche Exposition des Menschen über Modelle und gemessene Stoffkonzentrationen in Lebensmitteln, Wasser und Luft ermittelt. Ein humantoxikologisches Risiko ist vorhanden, wenn die tatsächliche Exposition größer oder gleich der TRD ist.

Die ökotoxikologische Betrachtung erfolgt in dem gezeigten Beispiel bezogen auf die Cd-Gehalte im Boden, als aktuelle PEC wurden daher die Hintergrundgehalte für Böden nach LABO (1998) eingesetzt, als PNEC die Vorsorgewerte nach BBodSchV. Für die Umwelt kommen die Autoren zu folgendem Fazit: Für Böden, Pflanzen und Sickerwasser werden langfristig erhöhte Gehalte prognostiziert, damit erhöht sich auch die Belastung der Bodenlebewesen und der Nahrungspflanzen. Zwar werden die Vorsorgewerte beim Durchschnittsszenario derzeit noch nicht überschritten. Im Sinne nachhaltiger Wirtschaftsweisen ist aber auch die verzögerte Akkumulation bis hin zum Erreichen kritischer Gehalte zu vermeiden.

Das Fazit für den Menschen wird wie folgt formuliert: Ein akutes Risiko besteht nicht. Bereits heute liegt allerdings die Cd-Belastung oftmals in gleicher Größenordnung wie die Toxizitätsschwellenwerte, für Risikogruppen wie Raucher, Vegetarier, Gourmets oder Personen mit Eisenmangel werden sogar aktuell schon Belastungen oberhalb der TRD ermittelt. Es ist daher keine weitere Belastung tolerierbar.

Um ein Einfrieren heutiger Gehalte und eine ausgewogene Cd-Bilanz auf der landwirtschaftlichen Nutzfläche zu erreichen, ist, so Schütze et al. (2003), eine Minderung der Cd-Gehalte in Düngemitteln ebenso wie der Cd-Belastung durch atmosphärische Einträge dringend geboten. Wenn nicht akut, so besteht doch zumindest im Zuge des vorbeugenden Verbraucherschutzes (gesetzlicher) Handlungsbedarf.

Handlungsoptionen zur Begrenzung von Schadstoffeinträgen

Nachdem das Gefährdungspotenzial identifiziert, eine Expositionsabschätzung durchgeführt und eine quantitative Charakterisierung des Risikos vorgenommen wurde, muss im Prozess der Risikoregulierung als nächster Schritt die Suche nach Handlungsoptionen folgen (Bericht der Risikokommission, 2002). Zur Begrenzung von Schadstoffeinträgen in Böden lassen sich in Anlehnung an Bachmann et al.

sich in Anlehnung an Bachmann et al. (1995) drei grundsätzliche Handlungsoptionen formulieren:

1. **Vermeidung** von Schadstoffeinträgen („**Null-Option**“)
2. Erhaltung des **Status quo**
 - a) systemorientiert („**Eintrag gleich Austrag**“): Begrenzung der Schadstoffeinträge auf ein Gleichgewicht mit tolerierbaren Austrägen
 - b) produktorientiert („**Gleiches zu Gleichem**“): Begrenzung der Schadstoffeinträge auf ein Gehaltsniveau, das dem des Aufbringungsstandortes entspricht
3. Aufstellung von Konventionen über vorläufig **tolerierbare Anreicherungen** und Schadstoffeinträge unter definierten Randbedingungen.

Im Zuge der Risikobewertung haben sich die deutschen Agrar- und Umweltminister auf politischer Ebene bereits am 13. Juni 2001 in Potsdam klar für eine der Handlungsoptionen entschieden, indem sie auf ihrer gemeinsamen Konferenz den Beschluss fassten, dass „wegen der besonderen Bedeutung der landwirtschaftlichen Böden für die Produktion gesunder Nahrungsmittel **aus Vorsorgegründen** sicher zu stellen (ist), dass es durch Bewirtschaftungsmaßnahmen (insbesondere durch Aufbringung von Klärschlamm, Gülle und anderen Wirtschaftsdüngern, mineralischem Dünger und Kompost) zu **keiner Anreicherung von Schadstoffen** im Boden kommt.“

Schlussfolgerungen

Von der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (Brundtland-Report, 1987) wurde der Begriff der „nachhaltigen Entwicklung“ geprägt: „Sustainable development meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.“ Das bedeutet: Nachhaltig ist eine Entwicklung, „die den **Bedürfnissen der heutigen Generation** entspricht, ohne die **Möglichkeiten künftiger Generationen** zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen.“ (übersetzt nach

<http://www.nachhaltigkeit.aachener-stiftung.de>).

In diesem Sinne kann eine konsequente Umsetzung des Vorsorgeprinzips im Bestreben nach einer nachhaltigen landwirtschaftlichen Praxis nur darin liegen, die bereits heute von jedem Landwirt zu erstellenden betriebliche Nährstoff- um **Schadstoffbilanzen** zu erweitern und, darauf aufbauend, das Düngemanagement künftig qualitativ (Wahl des Düngemittels) wie quantitativ (Aufbringungsmengen) an die **Handlungsoption „Erhaltung des Status quo“** anzupassen.

Literatur

- Alloway BJ** (1999) Schwermetalle in Böden. Analytik, Konzentration, Wechselwirkungen. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag, 540 p, ISBN 3-540-62086-9
- Bachmann G, König W, Kohl R** (1995) Handlungskonzept des Bodenschutzes zur Begrenzung von Stoffeinträgen in den Boden. Unveröffentlicht, zitiert in: Bannick C G und Autorenkollektiv (2001) Grundsätze und Maßnahmen für eine vorsorgeorientierte Begrenzung von Schadstoffeinträgen in landbaulich genutzten Böden. Berlin: UBA, , Texte 59/01, 126 p
- Briefert C** (1994) Umweltchemie. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 453 p, ISBN 3-527-28692-6
- BMU/BMVEL** (2003) Vorschlag für die Festlegung von Schadstoffgrenzwerten in einer Artikelverordnung zur „Bewertung von Düngemitteln“. Bericht des UBA an BMU vom 24.06.2003 (unveröffentlicht)
- Delschen T und Autorenkollektiv** (1998) Eckpunkte zur Gefahrenbeurteilung des Wirkungspfades Bodenverunreinigungen/Altlasten-Pflanze. In: Einsele DG, Harreß H-M (eds) Rosenkranz Bodenschutz. Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser., Loseblattsammlung. Berlin: Erich Schmidt Verlag, Band 3, 28. Lfg XII/98, Rn 9009, ISBN 3-503-02718-1
- Delschen T, Rück F** (1997) Eckpunkte zur Gefahrenbeurteilung von schwermetallbelasteten Böden im Hinblick auf den Pfad Boden/Pflanze. Bodenschutz 4: 114-121
- Von Geldmacher, Mallinckrodt M, Schaller K-H** (2004) Acute and Chronic Toxicity of Metals and Metal Compounds for Man. In: Merian E, Anke M, Ihnat M, Stoeppeler M (eds) Elements and Their Compounds in the Environment. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, pp 415-432, ISBN 3-527-30459-2
- Gupta CK, Singh H** (2003) Uranium Resource Processing. Secondary Resources. Berlin: Springer Verlag, 519 p, ISBN 3-540-67966-9
- Hintermaier-Erhard G, Zech W** (1997) Wörterbuch der Bodenkunde. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 338 p, ISBN 3-432-29971-0
- Hirner AV, Rehage H, Sulkowski M** (2000) Umweltgeochemie. Herkunft, Mobilität und Analyse von Schadstoffen in der Geosphäre. Darmstadt: Steinkopff Verlag, 836 p, ISBN 3-7985-1232-9
- Kabata-Pendias A** (2001) Trace Elements in Soils and Plants. Boca Raton, Florida: CRC Press, 413 p, ISBN 0-8493-1575-1
- Kharikov AM, Smetana VV** (2000) Heavy metals and radioactivity in phosphate fertilizers: short term detrimental effects. Zu finden in <http://www.fertilizer.org/ifa/publicat/pdf/2000_biblio_126.pdf>
- LABO** (1998) Länderübergreifende Hintergrundwerte für Böden. In: Rosenkranz D, Einsele G, Harreß H-M (eds) Bodenschutz. Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser. Loseblattsammlung. Berlin: E. Schmidt Verlag, Band 3, 28. Lfg XII/98, Rn 9006, ISBN 3-503-02718-1
- Merian E** (1984) Metalle in der Umwelt. Verteilung, Analytik und biologische Relevanz. Weinheim: Verlag Chemie, 722 p, ISBN 3-527-25817-5
- Mortvedt JJ, Beaton JD** (1995) Heavy Metal and Radionuclide Contaminants in Phosphate Fertilizers. In: SCOPE 54 – Phosphorus in the Global Environment – Transfers, Cycles and Management, chapter 6, zu finden in <<http://www.icsu-scope.org/downloadpubs/scope54/6mortvedt.htm>>
- O'Neil MJ** (ed) (2001) The Merck Index: An Encyclopedia of Chemicals, Drugs and Biologicals. Whitehouse Station, NY: Merck, ISBN 0-911910-13-1
- Raven KP, Loeppert RH** (1997) Trace element composition of fertilizers and soil amendments. Journal of Environmental Quality 26: 551-557
- Sauerbeck D** (1985) Funktionen, Güte und Belastbarkeit des Bodens aus agrikulturchemischer Sicht. Materialien zur Umweltforschung. Stuttgart und Mainz: Verlag W. Kohlhammer, 259 p, ISBN 3-17-003312-3
- Schilling G** (2004) Pflanzenernährung und Düngung. Stuttgart: Eugen Ulmer Verlag, 464 p, ISBN 3-8252-8189-2
- Schultheiss U, Goldbach H, Wicke W, Uihlein A, Steffens G** (2003) Heavy metal balances in livestock farming. In: KTBL (ed) Assessment and Reduction of Heavy Metal Inputs into Agro-Ecosystems. Concerted Action AROMIS, Workshop in Kloster Banz, Germany, November 24 to 25, 2003, Abstracts, pp 33-36
- Schütze G, Dämmgen U, Schlutow A, Becker R, Nagel H-D, Weigel H-J** (2003) Risikoabschätzung der Cadmium-Belastung für Mensch und Umwelt infolge der Anwendung von cadmiumhaltigen Düngemitteln. Landbauforsch Völkenrode 53 2/3: 63-170
- The Weinberg Group Inc.** (2000) Health Risk Evaluation of Select Metals in Inorganic Fertilizers Post Application. Prepared for: The Fertilizer Institute (TFI), January 16, 2000. Washington. Zu finden in <<http://www.aapfco.org/tfiRiskStd.pdf>>
- Thomé-Kozmiensky KJ** (2001) Verantwortungsbewusster Umgang mit dem Boden. In: Thomé-Kozmiensky K (ed) Verantwortungsbewusste Klärschlamm Entsorgung. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, pp 3-202, ISBN3-935317-02-6
- UBA** (1993) Basisdaten Toxikologie für umweltrelevante Stoffe zur Gefahrenbeurteilung bei Altlasten. Berlin: UBA, Texte 4/93, 213 p
- Van Kauwenbergh SJ** (1997) Cadmium and other

minor elements in world resources of phosphate rock. The Fertilizer Society, Proceedings No. 400, ISBN 0-85310-034-9

VDLUFA (ed) (2002) Stellungnahme des VDLUFA zur Konzeption von BMVEL und BMU vom Juni 2002 „Gute Qualität und sichere Erträge. Wie sichern wir die langfristige Nutzbarkeit unserer landwirtschaftlichen Böden?“, Dezember 2002, Bonn

Eignung spektraler Signaturen zur Lokalisierung von Schwefelmangel in Raps mit Hilfe der Fernerkundung

Holger Lilienthal und Ewald Schnug

Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Bundesallee 50, D-38116 Braunschweig

Zusammenfassung

Die bedeutendste Quelle für die Versorgung von Kulturpflanzen mit Schwefel war bis Anfang der 80er Jahre des letzten Jahrhunderts der Eintrag aus der Atmosphäre. Infolge umfangreicher Maßnahmen zur Rauchgasentschwefelung wird heute jedoch der Entzug durchschnittlicher Raps- und Getreideernten durch natürliche Schwefeleinträge nicht mehr gedeckt. Sofern keine schwefelhaltigen Düngemittel eingesetzt werden, können akute Mangelerscheinungen in den Pflanzenbeständen auftreten.

Raps hat einen hohen Bedarf an Schwefel und zeigt bei unzureichender Schwefelversorgung Mangelsymptome, die in allen Wachstumsstadien und an allen Teilen der Pflanze auftreten können. Charakteristisch für Schwefelmangel in Raps ist unter anderem das Auftreten weißer Blüten im Gegensatz zu gelben Blüten gut versorgter Bestände. Diese einfache visuelle Diagnose von Schwefelmangel erlaubt es, prinzipiell auch Mangelstandorte mit Techniken der Fernerkundung zu lokalisieren.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen werden die spektralen Signaturen von Raps vorgestellt und analysiert, und die Eignung der Spektralinformation zur Identifizierung von Schwefelmangel mit Hilfe der Fernerkundung diskutiert.

Schlüsselwörter: *Fernerkundung, Raps, Schwefelmangel, Spektrometrie*

Summary

Since decreasing atmospheric sulphur inputs and changes in fertiliser practices towards low or no sulphur containing sources for nitrogen and phosphorous, sulphur has become a major limiting factor for plant production in industrialised as well as remote rural areas.

The most important indication of an insufficient sulphur supply of oilseed rape are deficiency symptoms, which can occur at all growth stages and all parts of the plant. Symptoms of sulphur deficiency increase with elevated nitrogen levels, so that after nitrogen fertilization crop canopies reveal site-specific patches. In oilseed rape sulphur deficiency is characteristic during flowering since the colour of the flowers is changing from a bright yellow to pale yellow or white.

Optical remote sensing can be utilised to detect and map sulphur deficiency in oilseed rape. It also delivers valuable input information for modelling the

risk potential of sulphur deficiency (e.g. crop rotations, site specific heterogeneity structures) and it allows a view into the past by using available archive data. Spectral signatures of oilseed rape are presented and the suitability of spectral signatures for the detection of sulphur deficiency in oilseed rape with remote sensing is discussed.

Key words: *oilseed rape, remote sensing, sulphur deficiency, spectroradiometry*

Einleitung

Schwefel zählt zu den pflanzlichen Hauptnährstoffen und findet sich in Eiweißbausteinen, Enzymen und Vitaminen, sowie sekundären Inhaltsstoffen in den Pflanzen wieder.

Als Folge der vor 20 Jahren begonnenen Einführung von Rauchgasentschwefelungen in Kraftwerken sowie der Verwendung von schwefelarmen Treibstoffen, ist Schwefelmangel in Nordeuropa zur häufigsten Ernährungsstörung von Kulturpflanzen geworden (Schnug & Haneklaus, 1998).

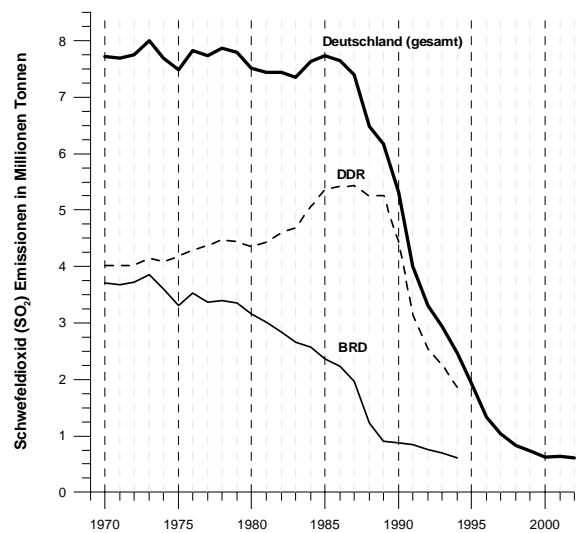


Abb. 1: Jährliche Schwefeldioxid-Emissionen in Deutschland) von 1970 bis 2002 (vor 1994 Summen der Werte für die Gebiete der BRD und DDR). (Daten: Umweltbundesamt 2004)

Abbildung 1 zeigt die jährlichen Schwefeldioxid-Emissionen von 1970 bis 2002. Die Schwefeldioxid-Emissionen waren Anfang der siebziger Jahre mit fast 8 Mio. Tonnen am höchsten und sind seither um mehr

als 92% auf ca. 0,6 Mio. Tonnen im Jahr 2002 gesunken (Umweltbundesamt, 2001).

Seit 1987 ist ein besonders starker Rückgang zu erkennen, der auf das Wirken der Verordnung über Großfeuerungsanlagen (13. BImSchV, 1983) in den westlichen Bundesländern zurückzuführen ist. Ab 1989 führte die Stilllegung vieler Betriebe in den östlichen Bundesländern sowie der Einsatz von Rauchgasentschwefelungsanlagen auch auf dem Gebiet der ehemaligen DDR zu einem weiteren Rückgang der Schwefeldioxid-Emissionen.

Raps hat wegen seines hohen Gehaltes an Eiweiß und Senfölen einen besonders hohen Bedarf an Schwefel. Der Anbau spielte jedoch in Deutschland lange Zeit kaum eine Rolle, da das Rapsöl Erucasäure enthielt, die einen bitteren Beigeschmack lieferte. Durch züchterische Erfolge standen zu Beginn der siebziger Jahre erucasäure-freie Sorten (0-Raps) zur Verfügung. Die Verwertung des eiweißreichen Presskuchens aus der Ölgewinnung als Viehfutter wurde aber durch den hohen Gehalt an Senfölen (Glucosinolate) beeinträchtigt, da Metabolite der Glucosinolate zu Stoffwechselstörungen führen können (Biosicherheit, 2004). Weitere Züchtungserfolge lieferten Mitte der achtziger Jahre erucasäure-freie und glucosinolat-arme Sorten (00-Raps). Damit wurde der Rapsanbau wirtschaftlich interessant und die Anbaufläche stieg deutlich an (Abb. 2).

Neben der Lebensmittelindustrie wird Raps verstärkt auch für die Treibstoffproduktion (Bio-Diesel) angebaut. Da Raps als nachwachsender Rohstoff gilt, darf er auch auf Stilllegungsflächen angebaut werden. Der Anreiz wird durch gezahlte Prämien sogar noch erhöht, so dass in den Jahren 1999-2001 ca. 350.000

ha Stilllegungsflächen mit Raps bestellt wurden. Das entspricht ca. 30% der gesamten Rapsflächen (Biosicherheit, 2004).

Die Bedeutung des Rapsanbaus zeigt sich darin, dass bezogen auf die gesamte Ackerfläche in Deutschland auf mehr als 10% der Fläche Raps angebaut wird (Statistisches Bundesamt: Agrarstrukturerhebung, 2003).

Der verminderte atmosphärische Schwefeleintrag einerseits und die Ausweitung des Rapsanbaus sowie die höheren Ansprüche an die Schwefelversorgung von 00-Sorten (Schnug & Haneklaus, 2005) andererseits führen seitdem verstärkt zu Mangelsymptomen in Rapsbeständen. Die Schwefelmangelsymptome sind in Raps sehr ausgeprägt und können in allen Wachstumsstadien und an allen Teilen der Pflanze auftreten (Schnug & Haneklaus, 2005). Bei Schwefelmangel wird Stickstoff entsprechend geringer verwertet, so dass sich das Risiko unerwünschter Stickstoffausträge in die Umwelt erhöht. Schwefelmangelsymptome verstärken sich mit steigendem Stickstoffniveau, so dass Bestände nach einer Stickstoffdüngung häufig fleckig erscheinen (Schnug & Haneklaus, 1994).

Ein besonders ausgeprägtes Merkmal für Schwefelmangel in Raps ist die Ausbildung von kleineren weißen Blüten (Abb. 3 rechts) im Gegensatz zu gut versorgten gelben Blüten.

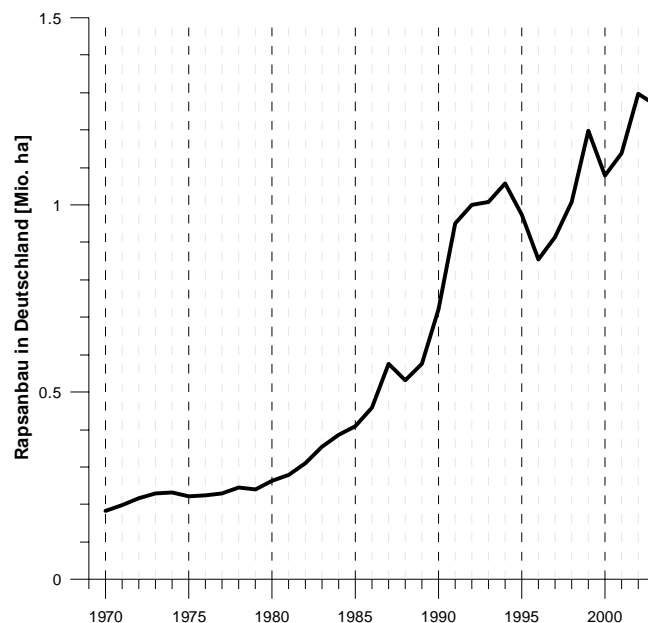


Abb. 2: Raps-Anbauflächen in Deutschland von 1970 bis 2003. (Quelle: FAOSTAT, 2004)



Abb. 3: Vergleich von Rapsblüten ohne (links) und mit makroskopischem S-Mangelsymptomen (rechts). (Quelle: Schnug & Haneklaus, 1994)

Auf der Maßstabsebene eines Feldes erscheinen Rapsschläge mit S-Mangel zur Blütezeit uneinheitlich, da aufgrund der kleineren Blüten die grünen Blätter und Stängel durchscheinen (Abb. 4). Das Erkennen von Schwefelmangel erfordert ein hohes Maß an Erfahrung vom Kartierer, ferner kann Schwefelmangel derzeit nur lokal durch Feldbegehungen erfasst werden. Der Einsatz von Fernerkundung zur Kartierung von S-Mangel in Raps auf regionalem Maßstab wäre jedoch eine kostengünstige Alternative. Dazu müssen zunächst die spektralen Eigenschaften von Rapsblüten mit unterschiedlicher Schwefelversorgung untersucht werden.

Material und Methoden

Im Feldversuch wurden Rapspflanzen kultiviert, die (a) optimal mit Schwefel versorgt waren oder (b) nicht mit Schwefel gedüngt wurden. Eine detaillierte Beschreibung des Versuchsaufbaus ist bei Salac (2004) zu finden.

Zur Blüte wurden jeweils insgesamt drei Blüten (12 Kronblätter) spektral mit einem ASD Fieldspec[®] Pro JR Spektrometer mit *Plant probe* Aufsatz vermessen. Neben den Kronblättern wurde auch Blatt-, Stengel- und Schotenmaterial spektral erfasst.



Abb. 4: Vordergrund: Mit Schwefel gedüngtes Rapsfeld. Hintergrund: nicht S gedüngtes Rapsfeld. (Quelle: Schnug & Haneklaus, 1994)



Abb. 5: Messaufbau zur spektralen Vermessung gelber und weißer Rapsblüten mit einem ASD-Fieldspec® Pro JR Spektrometer mit *plant probe* Messkopf

Die Verwendung des *Plant Probe* Messkopfes garantiert einen konstanten Abstand zwischen Mess-Sensor und Probe, sowie einheitliche Beleuchtungsbedingungen. Jede Probe wurde in 4 Parallelen gemessen, jede Parallele bestand aus dem Mittelwert von 40 Wiederholungsmessungen. Vor und nach jeder Probe wurde das Spektrometer auf ein Spektralon® – Panel als Weißreferenz kalibriert (s. Abb. 5)

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Spektralanvermessung für unterschiedlich mit Schwefel versorgte Rapsblüten sind in Abbildung 6 dargestellt. Zusätzlich wurde zum Vergleich das Spektrum eines grünen Rapsblattes abgebildet.

Auffällig sind die unterschiedlichen Amplituden der Reflexionsspektren der weißen und gelben Blütenblätter. Der Verlauf der beiden Kurven ist ab 500 nm nahezu identisch, nur die absolute Reflexion liegt bei den gelben Kronblättern ungefähr um 20%

höher als bei den weißen Blütenblättern. Ab 750 nm verlaufen die Spektralsignaturen der Kronblätter identisch mit der Reflexionssignatur von grünem Pflanzenmaterial.

Charakteristische Unterschiede zwischen gelben und weißen Kronblättern finden sich vor allem im kurzwelligeren Spektralbereich. Insbesondere im ultravioletten Licht (350–380 nm) zeigen sich die größten Unterschiede. Abbildung 7 zeigt den Ausschnitt des Gesamtspektrums von 350–440 nm.

Die gut versorgten, gelben Blütenblätter der Rapspflanzen reflektieren ca. 25% des einfallenden UV-Lichtes (350 nm) und damit fast doppelt soviel wie die schlecht mit Schwefel versorgten weißen Blätter (12,5%). Die Unterschiede nehmen dann zum sichtbaren blauen Licht hin ab, bei 420 nm bestehen dann keine Reflexionsunterschiede mehr.

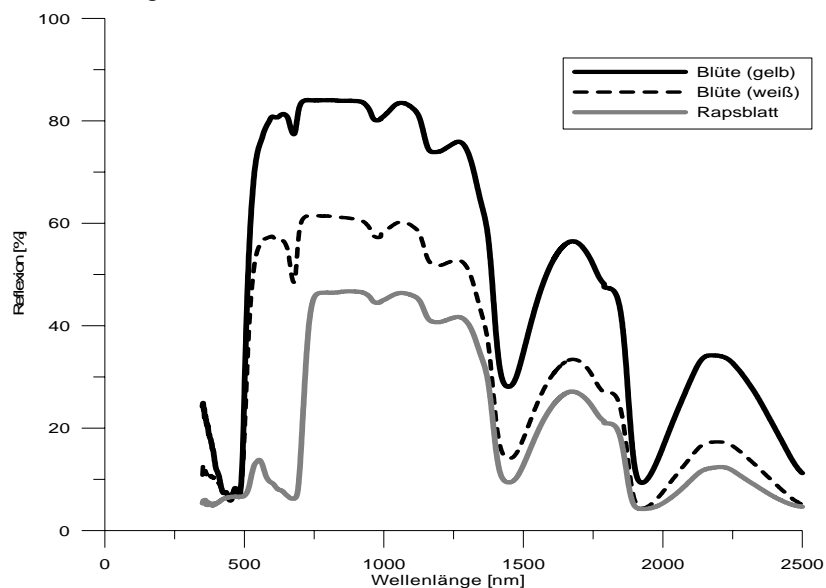


Abb. 6: Spektralkurven von gelben und weißen Blütenblättern von Raps, sowie eines grünen Rapsblattes

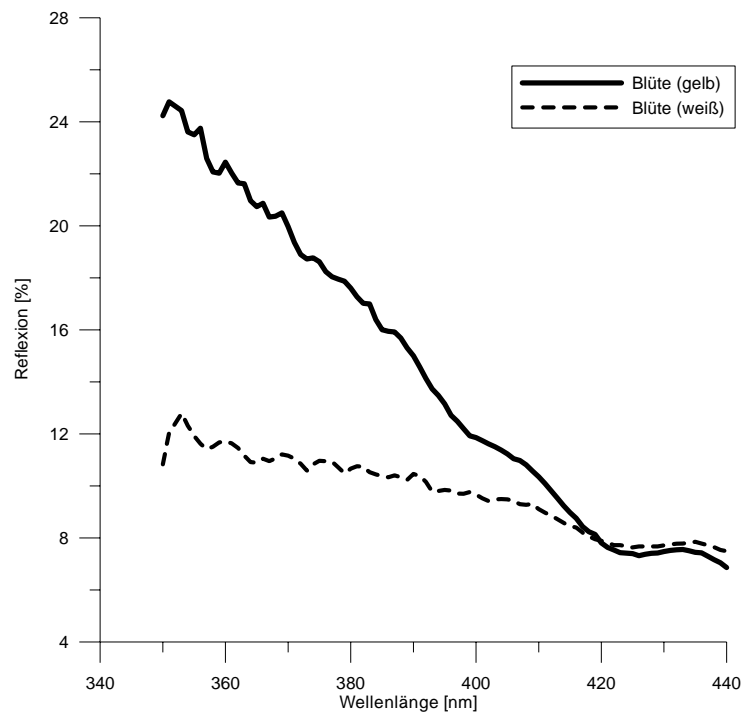


Abb. 7: Ultraviolette Spektralsignaturen eines gelben und eines weißen Blütenblattes von unterschiedlich mit Schwefel versorgten Rapspflanzen

Im sichtbaren Wellenlängenbereich zwischen 400 und 700 nm (Abb. 8) zeigen sich hauptsächlich Unterschiede in der Reflexionshöhe. Der auffälligste Unterschied zeigt sich in der Absorptionstiefe um

680 nm. Hier absorbiert das schlechter mit Schwefel versorgte weiße Blatt deutlich stärker, als das gut mit Schwefel versorgte gelbe Blatt.

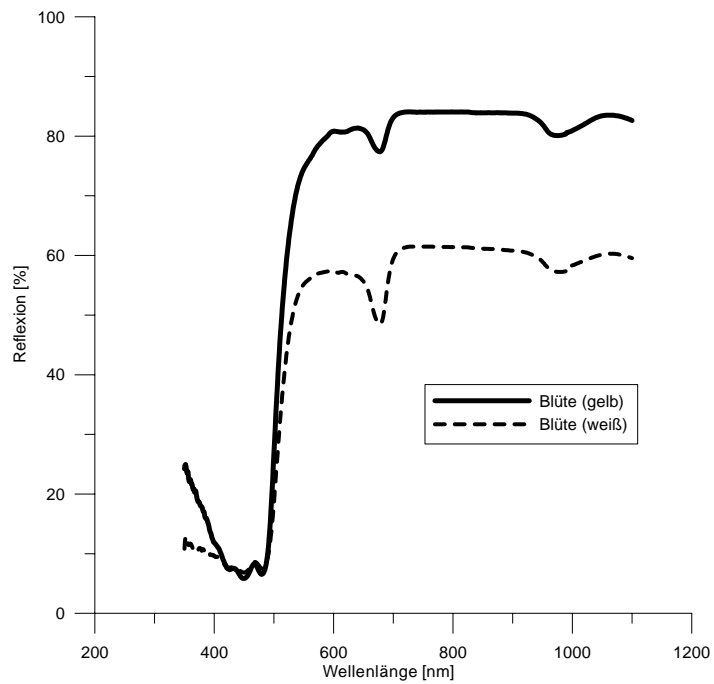


Abb. 8: Spektralsignaturen eines gelben und eines weißen Blütenblattes von unterschiedlich mit Schwefel versorgten Rapspflanzen im sichtbaren Wellenlängenbereich

Diskussion

Die spektralen Unterschiede von gelben und weißen Rapskronblättern sind am deutlichsten im kurzwelligen Spektralbereich zu finden. Rapspflanzen mit Schwefelmangel reflektieren weniger ultraviolettes Licht als gut versorgte Pflanzen. Die geringere UV-Reflexion der schlecht mit Schwefel versorgten Pflanzen kann somit einen Einfluss auf die Attraktivität der Blüten auf die bestäubenden Insekten haben, da diese gut im UV-Bereich sehen können (Burkhardt, 1988). Faktoren, die eine geringe Attraktivität von Schwefelmangel in Raps für Bienen bedingen, werden von Haneklaus et al. (2005) diskutiert.

Für den Einsatz der Fernerkundung ist dieser Spektralbereich aber wegen der starken Absorption der Atmosphäre nicht geeignet.

Im sichtbaren Wellenlängenbereich zeigt sich ein deutliches Absorptionsmaximum von 676–679 nm. Hier wird das Licht von der Pflanze mit Schwefelmangel deutlich stärker absorbiert. Der Bereich von 680 nm wird bei grünen Pflanzen durch die Absorption von Chlorophyll a+b erklärt. Billings und Morris (1951) haben bereits gezeigt, dass eine deutliche Absorption auch bei chlorophyllfreien Blättern in diesem Wellenlängenbereich auftritt. Erklären lässt sich diese Absorption durch weitere Pigmente, wie Karotinoide, Xanthophylle und Anthocyane. In grünen Blättern sind die Konzentrationen dieser Pigmente 10-mal kleiner als die von Chlorophyll, das dann durch seine starke Absorption andere Pigmente überlagert (Verdebout et al., 1994). Die gelbe Farbe von Blütenblättern wird durch Flavone und Flavonole hervorgerufen (Herzmann, 1962). Über die genauen spektralen Eigenschaften dieser Pflanzenfarbstoffe gibt es jedoch

nur wenige Informationen. Haneklaus et al. (2005) berichten von einem hypsochromatischen Effekt von Flavonolen, der zu einer Reflexionszunahme im kurzwelligen Bereich führt. Fehlen die Flavonole z. B. in Folge von Schwefelmangel, kommt es zu einer Abnahme der Reflexionsstärke. Dieser Effekt wird im ultravioletten Bereich durch diese Untersuchung bestätigt (Abb. 7).

Um Unterschiede in der Absorptionstiefe zwischen weißen und gelben Rapsblüten bestimmen zu können, eignen sich mathematische Verfahren (Lilienthal et al., 2000). Kokaly und Clark (1999) haben die Methode der "band-depth analysis" oder "Continuum removal" entwickelt. Mit diesem Verfahren können auch sehr geringe Absorptionsunterschiede bestimmt werden (Abb. 9).

Als Kontinuum wird in diesem Falle eine mathematische Funktion zur Isolierung einzelner Absorptionsbereiche bezeichnet, um anschließend die Stärke der Absorption bestimmen zu können.

Dieses Verfahren eignet sich bei Spektralmessungen mit hochauflösenden Spektrometern sowie Hyperspektralsensoren. Der nahe und mittlere Infrarotbereich unterscheidet sich bei gelben und weißen Rapsblüten nur durch die Höhe der Reflexion, nicht aber in der Form. Das Reflexionsverhalten von Pflanzen in diesem Wellenlängenbereich wird durch die Zellstruktur und den Wassergehalt bestimmt. Hier bestehen keine großen Unterschiede zwischen den Blütenblättern. Die Unterschiede in der Amplitude der Reflexion lassen sich mit der Biomasse erklären. Die Blütenblätter von Schwefelmangelpflanzen sind kleiner ausgebildet als die Blätter gut versorgter Pflanzen.

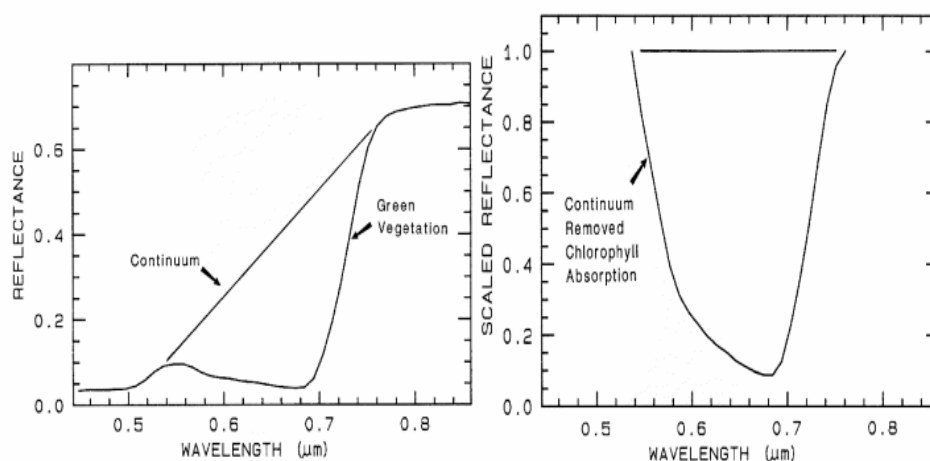


Abb. 9: Original Vegetationsspektrum und Spektrum nach Modellierung mit "Continuum removal" für die Chlorophyll-Absorption (Clark, 1999)

Damit ergibt sich für gut versorgte Pflanzen auch eine höhere Biomasse bei den Kronblättern (Haneklaus et al., 2005). Eine Zunahme der Biomasse führt gleichzeitig auch zu einer erhöhten Reflexion im infraroten Spektralbereich (Clevers, 1986; Schellberg, 1990).

Der infrarote Wellenlängenbereich allein reicht nicht, um die unterschiedlichen Blütenfarben zu charakterisieren. Bezieht man aber die starke Absorption um 680 nm mit ein, so lässt sich durch die Berechnung des Wendepunktes des Spektrums zwischen 680 und 726 nm ein Maß, ähnlich des „Red Edge Inflection Point“ (REIP) berechnen.

Die direkte Bestimmung von spektralen Merkmalen, die durch Schwefelmangel in der Reflexionssignatur von Rapsblüten hervorgerufen werden, erfordert hochauflösende Spektralmessungen, die in der Praxis sehr selten verfügbar sind.

Betrachtet man Rapsfelder mit Schwefelmangel, so erscheinen diese fleckig und aufgrund der kleineren Blütenblätter scheint viel unterliegendes grünes Blattmaterial hindurch (Abb. 4). Dieses Erscheinungsbild kann man sich fernerkundlich zu nutze machen:

Das Konzept der spektralen Entmischung auch *spectral mixture analysis* (SMA), (Adams et al., 1989), geht davon aus, dass das Reflexionssignal eines Pixels in einem Satellitenbild nie aus einem reinen Material, sondern immer aus der Mischung mehrerer Komponenten, wie zum Beispiel Boden, Blatt- und Blütenmaterial zusammengesetzt ist. Wenn die Einzelbestandteile (endmember) der Reflexionssignatur bekannt sind, lassen sich die prozentualen Anteile der endmember bestimmen und so Aussagen über den Anteil von Blüten- und Blattmaterial für jedes Pixel bestimmen. Gut mit Schwefel versorgte Bestände werden zur Blüte einheitlich 'Gelb' erscheinen (Abb. 4), schlecht versorgte Bestände werden sich spektral dagegen als Mischung von Blatt- und Blütenmaterial darstellen.

Erste Versuche mit diesem Verfahren zeigen gute Ergebnisse, allerdings ist zu berücksichtigen, dass eine ausreichende Anzahl von Bildern innerhalb der Vegetationsperiode zur Verfügung steht. Bei einer Aufnahme zum Ende der Rapsblüte kann es zu Fehlinterpretationen kommen, da nach der Blüte wieder mehr grünes Blattmaterial sichtbar wird.

Die Analyse der Spektralsignaturen zeigt, dass es prinzipiell möglich ist, Schwefelmangel anhand der Blütenfarbe zu diagnostizieren. Für eine regionale Anwendung fehlen aber derzeit noch die geeigneten operationell verfügbaren Sensoren.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei dem Institut für Geographie der Universität Göttingen, Abteilung Kartographie, GIS & Fernerkundung, insbesondere bei Dr. Stefan Erasmi für die Unterstützung bei den Spektralmessungen.

Literatur

- Adams JB, Smith MO, Gillespie AR** (1989) Simple models for complex natural surfaces. A strategy for the hyperspectral era of remote sensing. Proceedings of the IGARSS Symposium 10-14 July 1989, Vancouver, Canada pp 16-21
- Billings WD, Morris RJ** (1951) Reflection of visible and infrared radiation from leaves of different ecological groups. *Am J of Botany* 38:327-331
- Biosicherheit** (2002) Rapsanbau in Deutschland - Schub durch Null-null-Raps [online]. zu finden in: <<http://www.biosicherheit.de/raps/47.doku.html>>, 21.03.2002 [zitiert 21.06.2004]
- Burkhardt D** (1988) Die Welt mit anderen Augen. - *Aus Forschung und Medizin*. Vol. 2/88: 49-62
- Clevers JPGW** (1986) Application of remote sensing to agricultural field trials. Wageningen, Niederlande, Univ., Diss. 227 p
- Faostat** (2004) FAOSTAT database collection [online], zu finden in <<http://faostat.fao.org/faostat/collections?subset=agriculture>>, 24.05.2004 [zitiert 21.06.2004]
- Haneklaus S, Brauer A, Bloem E, Schnug E** (2005) Relationship between sulphur deficiency in oilseed rape (*Brassica napus* L.) and its attractiveness for honey bees. - *FAL – Agricultural Research* 283: 37-43
- Herzmann H** (1962) Pflanzenfarbstoffe. Westarp Wissenschaften, 52 p
- Kokaly RF, Clark RN** (1999) Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression. *Remote sensing of environment*. 67: 267-287
- Lilienthal H, Haneklaus S, Schnug E, Haveresch E** (2000) Utilisation of hyperspectral data for the evaluation of the spatial variability of the nitrogen status of wheat. *Asp Appl Biology* 60,: 189-194
- Salac I** (2004) Influence of the sulphur and nitrogen supply on S metabolites involved in Sulphur Induced Resistance (SIR) of *Brassica napus* L. PhD thesis, University Braunschweig
- Schellberg J** (1990) Die spektrale Reflexion von Weizen. Ein Beitrag zur Zustandsbeschreibung landwirtschaftlicher Kulturpflanzenbestände durch Fernerkundung. Bonn, Univ., Diss. 160 p
- Schnug E, Haneklaus S** (1994) Sulphur deficiency in *Brassica napus*: biochemistry, symptomatology morphogenesis. - *Landbauforsch Völkenrode* : SH Vol.144, 31 p
- Schnug E, Haneklaus S** (1998) Diagnosis of sulphur nutrition. In: Schnug E, Beringer H (ed) Sulphur in Agro-Ecosystems. Vol. 2 of the series 'Mineral

Nutrition in Ecosystems', Kluwer Academic Publ. Dordrecht, 1998, 1-38

Schnug E, Haneklaus S (2005) Sulphur deficiency symptoms in oilseed rape (*Brassica napus* L.) - the aesthetics of starvation. *Phyton* 45: 79-96

Statistisches Bundesamt (2003) Bodennutzungshaupterhebung 2003

Umweltbundesamt (2001) Luft kennt keine Grenzen

Umweltbundesamt (2004) SO₂ Emissionen in Deutschland [online]. Deutschland, zu finden in http://www.umweltbundesamt.de/luft/emissionen/bericht/aktuelle_daten/schadstoffe/_svgdata/so2.html [zitiert 21.06.2004]

Verdebout J, Jacquemoud, Schmuck G (1994) Optical properties of leaves: Modeling and experimental studies. In: Hill J, Mégier J (eds) *Imaging spectrometry – a new tool for environmental observations*, Dordrecht, Bosten, London: Kluwer, pp 169-193, ISBN 0-7923-2965-1

15 years of precision farming in Europe – lessons to be learned for Malaysia

M. F. Mohd Noor¹, Anja Gassner¹ and Ewald Schnug²

¹School of Science and Technology, Universiti Malaysia Sabah, Locked Bag No. 2073, 88999 Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia

²Institute of Plant Nutrition and Soil Science, Federal Agricultural Research Centre (FAL), Bundesallee 50, D-38116 Braunschweig, Germany

Summary

Due to recent developments in the Malaysian agricultural sector, which emphasises on Precision Agriculture (PA) as one of the strategies to strengthen the industry, the present paper critically examines the potential and limitations of PA for Malaysia based on the experience of 15 years of research and implementation of PA in Europe and the USA. As the Malaysian agricultural sector is divided into large scale plantations and smallholders, technical aspects of PA, such as yield limiting factors and applicability of remote sensing as well as social and infrastructural requirements and economic suitability are discussed for both, the Malaysian rice and the oil palm industry.

Despite the high attractiveness of the PA concept to both scientist and policy makers it has to be evaluated carefully for its suitability to a specific agricultural sector. Whereas technical aspects can be generalized for the entire sector, social, infrastructural and economic requirements are very different when considering either large commercial estates or private smallholders. Technical aspects of PA that need to be considered are firstly the assessment of the crop specific yield limiting factors as PA is based on the assumption that inherent small-scale within-field variability is limiting crop productivity. Secondly, given the climatic conditions optical remote sensing is not suitable for Malaysia, thus alternative ways of assessing within-field variation are needed. Whereas the oil palm industry is supported by a strong governmental framework of R&D, extension services and economic attractiveness and thus is ready to adopt a knowledge-intensive technology such as PA, for smallholders in rice production the lack of bare essentials, literacy, social and physical capital, physical infrastructure and the access to governmental extension services will require major governmental interventions prior to any PA implementation.

Key words: agricultural sector, oil palm, Malaysia, precision agriculture, rice, smallholders

Zusammenfassung

Die derzeitige landwirtschaftliche Ausrichtung Malaysias setzt auf Precision Agriculture (PA) als Strategie zur Stärkung des primären Sektors. In diesem Artikel werden das Potential und die Limitationen des Konzeptes PA für Malaysia, vor dem Hintergrund von 15 Jahren Forschung und Einsatz von PA Technolo-

gien in Europa und den USA, diskutiert. Die Landwirtschaft Malaysias ist gekennzeichnet von großflächiger Plantagenwirtschaft auf der einen, und kleinbäuerlichen Strukturen auf der anderen Seite. Die technischen Aspekte von PA, wie ertragslimitierende Faktoren und Anwendung von Fernerkundung sowie die sozialen und infrastrukturellen Voraussetzungen und die ökonomischen Rahmenbedingungen werden für die malaysische Reis- und Ölpalmenindustrie erläutert.

Trotz der hohen Attraktivität von PA für Politik und Forschung muss die Eignung dieses Ansatzes für jeden einzelnen Bereich der Landbewirtschaftung Malaysias genau überprüft werden. Während die technischen Voraussetzungen für die unterschiedlichen landwirtschaftlichen Bereiche gleich sind, sind die sozialen, infrastrukturellen und ökonomischen Voraussetzungen sehr unterschiedlich, wenn man Großbetriebe mit der kleinbäuerlichen Struktur vergleicht.

Als technische Voraussetzung müssen zunächst die ertragslimitierenden Faktoren für unterschiedliche Anbaufrüchte bewertet werden, da PA auf der Grundannahme basiert, dass die kleinräumige Variabilität agronomischer Parameter einen Einfluss auf die zu erwartenden Erträge hat. Zweitens begrenzen die klimatischen Bedingungen Malaysias den Einsatz optischer Fernerkundung zur großräumigen Erfassung der teilflächenspezifischen Variabilität in der Landwirtschaft. Alternative Technologien zur Bestimmung der Heterogenität müssen daher zukünftig entwickelt werden.

Während die Ölpalmenindustrie aufgrund der wirtschaftlichen Attraktivität des Palmöls über hohe staatliche Unterstützung in Form von Forschungsprogrammen und Dienstleistungen verfügt und somit durchaus in der Lage ist anspruchsvolle Technologien wie PA einzusetzen, fehlen in den kleinbäuerlichen Strukturen des Reisanbaus jegliche Grundlagen dazu. Hier mangelt es an Basiswissen, sozialem und finanziellem Kapital und technischer Infrastruktur, sowie dem Zugang zu staatlichen Beratern. Grundvoraussetzung einer Einführung und Anwendung von PA sind in diesem Bereich massive staatliche Eingriffe.

Schlüsselwörter: Kleinbauern, Malaysia, Ölpalmen, Precision Agriculture, primärer Sektor

Introduction

In the early 1990's "Precision Agriculture" (PA) emerged as a new farming technology, which promised to aid both farmers and society by improving production efficiency and/or environmental stewardship (Schnug et al., 1993a, 1993b). In a nutshell PA represents a re-orientation of conventional farming to a farm management system that takes the variability of natural resources into account in order to protect the environment and to increase the profitability for farmers. Whereas research and political interest in PA is high in both Europe and the USA (Haneklaus & Schnug, 2003; Lowenberg-DeBoer, 2003) adoption of PA by farmers has been modest at best and tends to concentrate in "hot spots", such as the Midwest (heartland) region in the United States and the Eastern parts of Germany (Daberkow & McBride, 2000; Lowenberg-DeBoer, 2003). Despite the growing European and American disillusionment with PA, Asian agriculture is now focusing on PA to curb issues on food security, water scarcity, bio-production and environmental sustainability in the 21st century. Malaysia, which proudly hosted the first Asian Conference in Precision Farming last year specifically highlights the importance of PA in the Third National Agricultural Policy (NAP3, Ministry of Agriculture Malaysia, 1998).

The agricultural sector plays a major but declining role in the Malaysian economy. The contribution of the agricultural sector to the Gross Domestic Product (GDP) is expected to decline from 13% in 1995 to 7.1% in 2010 (Ong Khun Way, 2002). After the economic crisis in 1997 the volatility and resultant decline in the exchange rate of the local currency, the Ringgit, in relation to major currencies negatively affected the stability and security of the country's food supply. Thus, with the NAP3 (1998-2010) the government re-emphasized the importance of the agricultural sector, whereby the overriding objective of NAP3 is the maximization of income through the optimal utilization of agricultural resources. This includes maximizing agriculture's contribution to national income and export profits as well as maximizing income of producers. The strategies employed comprise moderate expansion of land and further intensification of land use, encouraging oil palm, fruit and vegetable cultivation as well as adoption of modern farming technologies (Ministry of Agriculture Malaysia, 1998).

The main objective of this paper is to critically examine the potential and limitations of PA for Malaysia based on the experience of 15 years of research and implementation of PA in Europe and the USA. The Malaysian agricultural sector is divided into large scale plantations basically consisting of three crops (rubber, oil palm and cocoa) and smallholdings, which constitute of about 60% of the agricultural farmland (Ong Khun Way, 2002). The question of

whether PA can be used to modernize and strengthen the agricultural sector in Malaysia is discussed separately for the agribusiness on big farms and agricultural production on small farms, exemplary for rice (*Oryza sativa*) and oil palm (*Elaeis guineensis*) production. The paper is divided into different sections, whereby each section addresses one of the inherent problems, which were highlighted in recent reviews concerning the successful propagation and implementation of PA (Batte & Arnhold, 2003; Haneklaus & Schnug, 2003; Lowenberg-DeBoer, 2003; Schnug et al., 2003; Godwin et al., 2003a).

Identifying yield limiting factors

Conventional farming is based on the risk adverse 'null hypothesis that given uncertainty in space and time, uniform within-field treatment is an optimal strategy' (McBratney & Whelan, 1999). In contrast, PA recognizes the inherent heterogeneity of agricultural fields and aims at transferring the resulting site-specific crop demands into variable management practices (Haneklaus & Schnug, 2002). In the early days of PA the ultimate goal was to depict the within-field variability of soil and plant parameters and to adjust tailor-made management recommendations (e.g. Schueller, 1997). After 15 years of practical experience a number of scientists come to the conclusion that it is more fruitful to identify the main processes that limit yield production rather than addressing every small field heterogeneity (e.g. Lark, 2001; Dobermann et al., 2002). Thus, the basis for any economic sound PA strategy is to define basic site-specific limiting factors.

Oil palm appears indeed to be the "golden crop" of Malaysia, with a steady and constant increase in production over the last 10 years. Since the beginning of commercial oil palm planting in 1917, Malaysia advanced to be the leading producer of crude oil palm oil (CPO). However, average yield records of around 3.2 – 3.4 tons CPO ha⁻¹ yr⁻¹ since 1980 indicate that the impressive growth of palm oil production is mainly a result of area expansions, and not because of an increase in yield (Tab. 1). It is beyond the scope of this paper to give a precise answer as to why the Malaysian fresh fruit bunch (FFB) yield has not improved over the last 20 years, however the authors would like to suggest two aspects of oil palm management that might hamper optimal yield production. The first one is optimal fertilization, the second optimal timing for fruit bunch harvesting. Although, most oil palm estates are practicing some kind of site-specific nutrient management (SSNM), the common practice is to divide fields into management blocks of usually about 20 to 50 hectares with on average 130 oil palms ha⁻¹. Each block is inspected at least annually to assess the nutrient requirement and to provide fertilizer recommendations (Razman Abdul Raof et al., 1999), whereby the average foliar concentration of

a mixed sample consisting of about 1 sample per ha⁻¹ will represent the entire block. Although the optimal sampling distance varies in different landscapes and for different nutrients it is generally accepted that the observed spatial variability is proportional to the mobility of the nutrient (Cahn et al., 1994). Haneklaus et al. (1997) suggested an optimal sampling distance of at least 100 m for foliar samples and a minimum of 50 m for soil parameters. This means that oil palm plantations are missing the optimal sampling distance by at least one order of magnitude, resulting in “site-unspecific” and thus most likely unbalanced fertilizer applications. In addition, the area and the size of a management block are usually determined by already existing boundaries such as roads or rivers (Razman Abdul Raof et al., 1999). It is unlikely that these blocks represent homogenous management units, as soil variability is a function of localized soil forming factors (Haneklaus & Schnug, 2003). Management units therefore should preferably follow the landscape and not already existing infrastructures.

The second problem is the optimal timing for fruit bunch harvesting. The CPO yield is not only a function of the site-specific yield potential of the palm tree, but also of the right timing of harvesting the fruit bunches. At present there are no scientific sound procedures to test for the optimal harvesting time. As palm trees are producing fruit throughout the year, the optimal harvesting time is different for individual palm trees. At present plantation manager rely strongly on field experience using the color of the fruit bunches and number of fruit droppings as an indication. Suffice to say that this method is flawed by misjudgment and leading to a substantial loss in yield. Both of the above yield limiting factors can be attributed to the inherent variability of the fields, thus in principle they could be improved by appropriate PA technology. Additionally, genotypical differences and age of the trees contribute to different ripening processes and need to be integrated in a prognosis scheme for the optimal harvesting date.

For tropical rice production the situation is different. In temperate cereal production SSNM has shown to be the component widely adopted by farmers (Haneklaus & Schnug, 2003; Lowenberg-DeBoer, 2003). Real time ground sensors provide rapid assessment of

within-field variability of canopy reflectance, which often can be related to the nutrient status of the crop (Mohd Noor et al., 2002). PA research in Malaysia appears to follow this trend with launching its first ride-on agricultural tractor in 2004 (Azmi Yahaya et al., 2004). But is SSNM the answer to increase rice production? For irrigated rice Doberman et al. (2002), summarizing on-farm experiments at 179 sites in eight key domains in Asia, concludes that SSNM has a promising agronomic and economic potential, but only if other crop management constraints to nutrient use efficiency are alleviated. Of all cereal crops, lowland rice is probably the one most vulnerable to pest and disease. With 500 – 600 different diseases, numbers reported for tropical rice are an order of magnitude higher than rice production in temperate zones (Swaminathan & Sinha, 1986).

In addition to pests and diseases unfavorable climate conditions pose a serious risk to rice production. (Doberman et al., 2002). About 50% of the total rice area in Malaysia is rain-fed and thus left to the good will of nature. Tab. 2 presents historical data on rice loss in Malaysia due to the occurrence of flood, drought and pest. Although, the Malaysian government invested a substantial amount of money for the implementation and upgrading of irrigation schemes, irrigation efficiency at present is estimated at about 45%, bringing about a conflict between domestic, industrial and agricultural water demand.

Since rice irrigation consumes about three quarter of the available surface water, irrigation water management is becoming a key factor in sustainable yield production (Deepak & Amin, 2002).

The production of high rice yields is further hampered by the wide distribution of traditional planting methods with low yielding local varieties, especially in East Malaysia. For the period 1996 to 1999, 20% of the total rice area was located in Sarawak, where yields only achieved 30-40% of the nations' average (DOA, 2004). It appears that yield limiting factors in Malaysian rice production are external factors that cannot be tackled by addressing within-field variability.

Tab. 1: Malaysia, oil palm, development of harvested area, fresh fruit bunch (FFB) yield and CPO production 1980-2003

		Year				
		1981-85*	1986-90*	1991-95*	1996-2000*	2001-03**
Area harvested	(100 ha)	10042	15366	20234	26488	31808
Fruit yield	(ton FFB ha ⁻¹)	17.7	17.2	18.3	18.7	18.1
Oil production	(1000 ton CPO)	17720	26560	37080	49428	57705

(Source: FAO Agriculture Statistics Database, 2004, *5 year average, **3 year average)

Tab. 2: Percentage of acreage loss due to the occurrence of flood, drought and pest for the 3 main rice producing states in West-Malaysia (1968-1979) (Source: MARDI, 1981)

Year	Kedah	Kelantan	Perak
1968	3.8	6.6	0.3
1969	0.3	0.4	0.0
1970	1.7	4.0	1.7
1971	0.0	2.1	0.1
1972	0.1	3.2	2.1
1973	0.6	2.3	0.0
1974	0.2	17.2	3.5
1975	0.4	4.7	0.2
1976	0.1	2.5	2.8
1977	1.2	2.6	0.3
1978	21.4	0.8	1.1
1979	0.1	1.3	1.0
Mean	2.5	4.0	1.1

Remote sensing and precision farming

Once inherent natural within-field variability has been identified to be the yield limiting factor, this variability has to be assessed and mapped in order to develop site-specific management strategies (Haneklaus & Schnug, 2003). While impressive advances of the agricultural machinery industry resulted in the development of ride-on tractors that are able to perform site-specific weeding, ploughing and fertilization at almost any operational scale wanted, the technology to assess the variability of crop and soil parameters lacked behind. To embrace the entire variation of the field in order to obtain a 'true' image, a high sampling density is needed, which in most cases is not economically feasible or sustainable for farmers (Lowenberg-DeBour & Boehlje, 1996). In the early days of PA remote sensing, either by satellite, airplane or ground sensors promised to be the solution to the problem. Numerous studies were carried out to relate canopy reflectance data to crop fertility (e.g. Curran, 1989) and although laboratory studies showed promising results the use of remotely sensed images in agriculture never really had a breakthrough, as it contains primarily thematic information, but agricultural operations require quantitative values of biological, physical and chemical properties (Haneklaus & Schnug, 2003). Moran (2000) summarized the agronomic demands towards remotely sensed images by preference: image delivery within 24 hours; geo-reference with an accuracy of one pixel; information accuracy of the measured crop or soil conditions of 70–75%; repeat coverage ranging from twice per week to biweekly; spatial resolution of 10–20m; maps providing quantitative information of measured features; fair product prices.

In Malaysia the use of optical remote sensing for agricultural planning is very limited due to unfavorable climate conditions such as heavy rain and thick clouds (Abu Bakar & Shaari, 1997). Radar remote

sensing could be a potential alternative to acquire information of within and between field variation. Studies investigating backscatter response of wetland rice concluded a high potential of this technique for rice monitoring (e.g. Ugsang et al., 2002). For tree crops the application was found to be more restricted as the signal is not only affected by the trees but also by the undergrowth (Hoekman, 1995). In general, the application of radar remote sensing for real time crop management is at present rather limited as it involves long time spans of data pre-processing (Zillmann et al., 2004). As labor shortage is one of the problems, the Malaysian agricultural sector is facing the need to develop effective methods to assess within field variation under tropical conditions.

Social requirements of PA

Tailoring soil and crop management to match local within-field variation is not entirely new to Asian farmers. The growers traditionally noted yield variability both in space and time, and adjusted farm practices according to local site conditions (Srinivasan, 1998). In Malaysia this is reflected in small farm and field sizes of traditional agricultural communities (Ong Khun Way, 2002; Ngidang et al., 2003). However, PA is based on the application of technologies such as Global Positioning Systems (GPS), Geographic Information Systems (GIS), remote sensing, yield monitors and Variable Rate Technology. Implementation of PA means that higher education levels of farmers are required to conduct and follow up the more complicated decision making, and extended knowledge and skills are needed to operate the sophisticated technology (Haneklaus & Schnug, 2002). The Department of Agriculture 1990 statistics for Peninsular Malaysia indicated that the majority of farmers were more than 55 years old. 25% had no schooling and less than 13% went beyond primary school (DOA, 1990). Although the statistics is more than 10 years old the educational situation, especially among smallholders has not changed much. Dimbab Ngidang et al. (2003) describe a typical rural community in East-Malaysia which consisted of 67.7% of smallholder farmers, the majority (45.6%) of whom had only primary school education, while 30.3% had never been to school at all. In contrast, the Malaysian oil palm industry employs educated people on the plantation management level, while the actual field workers are often from foreign countries and regularly only have primary level education (Chee et al., 1996). Malek Mansoor et al. (1997) reported insufficient human skill as one important factor inhibiting mechanization in oil palm plantations.

Changing from conventional farming to PA the farmer is not only facing high costs for investments that must be incurred up-front, but he is also faced with a large amount of new and complex data. Either the farmer has to adopt knowledge in information and

communication technology (ICT) himself or it is outsourced to an agricultural consultant. An European survey assessing the factors limiting the use of ICT by German farmers showed that different appraisals of the factors are made by scientists and farmers. While the scientists saw the cost of technology and the lack of user friendliness as the main problems, the participants of this study thought that lack of training and failure to understand the possible benefits were the greatest impediments (Roskopf & Wagner, 2003). Dobermann et al. (2001) summarizing the results of on-farm experiments to evaluate SSNM in key irrigated rice domains in Asia stresses that the most important factor for adopting the new technology is how easy it is for farmers to implement without a major commitment of time. An alternative would be to take advantage of the "Local knowledge" (LK), which reflects information, which is available on a farm, either in form of amateurish maps, field files and any other materialized form of store (Haneklaus & Schnug, 2003). But LK comprises also knowledge from personal education, experience or inheritance from former generations. Making efficient use of LK is a great challenge to operate SSNM on all scales. The farmer himself becomes the biological interface between his field and crops and hard- and software components, respectively (Haneklaus & Schnug, 2003). In any case, however, it would be necessary to educate farmers to apply their LK and transform it accordingly into variable rate applications.

Whereas most oil palm estates are practicing some kind of SSNM, the majority of rice farmers do not even employ soil or plant testing to adjust fertilizer applications. In fact, fertilizer practices are mainly driven by the governmental subsidy politics (Fujimoto, 1996; Pingali et al., 1998), so that most of the fields receive less fertilizer than the governmental recommendation (Tab. 3).

Tab. 3: Fertilizer recommendation and subsidies for Malaysian rice production (Source: DOA, 1999)

Growth stages	Fertilizer	Nutrient rates (kg ha ⁻¹)		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
< 3 leaves vegetative	Mixed*	44	39	25
	Urea*	46		
	Urea	16		
	MOP			60
Stem elongation	Compound	30-33	30-33	43-53
	Urea	16		
Grain formation	Compound	18-20		26-32

* subsidized

For rice farmers the willingness to increase the input into the field, be it money wise or time wise is further

hampered by the age structure of the sector as well as the land ownership. It appears that the younger generations are no longer interested in taking farming as their occupation. A migration of school leavers to town centers is commonplace. The blame is put on the lack of employment in rural areas and social policy failure, which is urban-biased (Dimbab Ngidang et al., 2003). There are success stories of entrepreneurial farmers, who have mechanized their operations and grouped small farms together into units large enough to take advantage of economies of scale (Fujimoto, 1996), but the overall picture is a decline of rice farming throughout the country (Fig. 1).

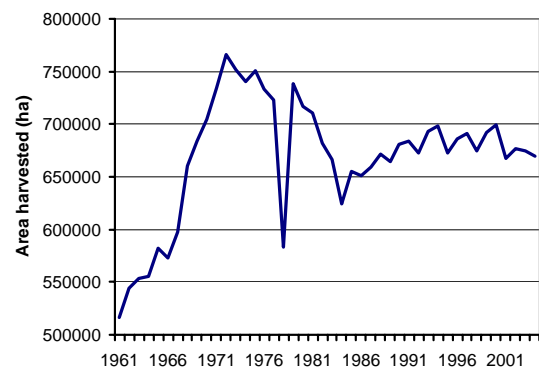


Fig. 1: Trend of Malaysian rice production based on area harvested since 1960's. (Source: FAO Agriculture Statistics Database, 2004)

Profitability of PA

Profitability of PA has been identified as one of the key factors that determine its implementation (Atherton et al., 1999; Swinton & Lowenberg-DeBoer, 1998; Lambert & Lowenberg-DeBoer, 2000; Godwin et al., 2002b). The potential benefits of managing crops using precision farming techniques can be summarized as: (1) the economic benefit of an increase in crop yield, and/or a reduction in inputs, i.e. seed, fertilizer and agrochemicals, and (2) the environmental benefit from a more precise targeting of agricultural chemicals (Godwin et al., 2002b). These benefits have to be offset against the costs of assessing the variability in soil and crop parameters and special equipment to implement variable applications. Most economic studies on PA have been done on SSNM and show a clear link between crop value and profitability of the practice (Lowenberg-DeBoer, 2003). The profitability of SSNM is clearly linked to the cost of fertilizer (Haneklaus & Schnug, 2003) as well as farm size and inherent within-field variability of nutrients (Godwin et al., 2002a).

The Malaysian rice industry is strongly supported by the government via subsidies. A survey conducted by the Department of Agriculture in Sabah revealed that in the main producing rice area, labor was the most expensive input for farmers (Tab. 4). In comparison, the bulk expenses for oil palm estates is led by the

cost for fertilizers and their application (Mohd Noor, 2003). Thus, the relative cost of fertilizers is much higher in the oil palm industry than in the rice industry. This implies that reduction of fertilizer input will not be the driving force for Malaysian rice farmers to adopt PA.

Tab. 4: Cost of rice production (RM) per hectare for Kota Marudu, Sabah (Source: Abd. Azaziz Hj. Abd Latif, 1998)

	Year				
	91/92	92/93	93/94	94/95	95/96
Fertilizer	138	117	128	119	138
Pesticides	52	34	71	84	132
Termite	47	32	50	27	32
Poisoning					
Labor cost	543	641	477	430	339
Ploughing	247	247	247	247	247
Seeds	28	32	39	44	52
Total cost	1056	1102	1013	952	941

Schnug et al. (2003) conclude that in a situation where the share of fertilizer and pesticides in the total crop production costs are constantly declining substantial benefits from managing the variability of soils can only be expected if either the implementation costs for PA, or the labor cost can be reduced. For Malaysian rice farmers the main factor that exalts production cost is farm size. DOA (1999) estimates that 65% of all rice farms in Malaysia are less than 1 hectare in size while only 4% are larger than 3 hectares. It is suffice to say, that for the majority of rice farmers implementation costs for PA will not be economical. However, an agricultural reform which would lead to the consolidation of farms is actually contradictory to the basic concept of PA, whereby farms should be managed as small homogeneous units (Schnug et al., 1993a). Land consolidation, with the aim of increasing average farm and field sizes will definitely increase the spatial variability of fertility parameters since land use has persistent, multi-decadal effects on the spatial heterogeneity of soil resources (Fraterrigo et al., 2004).

To reduce production costs transborder farming (Auernhammer, 2001) could be a potential concept for the Malaysian rice industry as it is designed to make PA applicable in regions with small-scale farming. Neighboring small farms are treated as one large farm, whereby ownership structures remain unchanged (virtual land consolidation). Tillage, cultivation and harvesting are organized in larger units disregarding existing boundaries. Model calculations for Bavaria showed that the size of headland was reduced between 15 and 25% and effective working time by 20 to 30% (Auernhammer et al., 2000).

It is important to note that although PA aims at the entire crop production cycle, starting from ploughing,

seedling, fertilizer and pesticide application to harvesting, European and North-American farmers only implemented "some stand alone precision farming technologies" such as Yield Monitors and Variable Rate Fertilizers so far (Batte & Arnholt, 2002; Haneklaus & Schnug, 2003; Lowenberg-DeBoer, 2003; Schnug et al., 2003). At present there are no truly integrated precision farming systems (Lowenberg-DeBoer, 2003). Malaysia seems to be following this trend as for oil palm and rice both assigned research institutes, the Malaysian Palm Oil Board (MPOB) and the Malaysian Agricultural Research and Development Institute (MARDI) have incorporated PA as one of their strategic research areas but until now research is mainly focusing on the development of variable rate technologies (for example Azleen et al., 2002; Wahid et al., 2004; Chan, 2002; Chan, 2004).

According to Lowenberg-DeBoer (2003) PA is not economical if only applied to one aspect of the crop production cycle. He gives the example that "the interaction of the right corn hybrid at the best population for that hybrid with the profit maximizing nitrogen rate for that hybrid and population, can yield better and may be more profitable than if each input were optimized separately".

Important in this context is the concept of the site-specific yield potential (Rogasik et al., 2002). Even for the interaction of the right oil palm hybrid at the best population for that hybrid with the profit maximizing fertilization rate for that hybrid and population, no increase in yield can be expected if the field chosen for planting is not suitable for the growth of the oil palm. Jalani et al. (2002) already states extension of palm areas to Class 3 (marginal) and 4 (unsuitable) soils as one of the reason why Malaysians oil palm yields are stagnant.

Infrastructural Requirements

In general, technological innovations are likely to be more knowledge-intensive when compared to traditional farming practices. Technological innovations are based on more efficient use of inputs with recommendations tailored to specific groups of farmers and narrowly defined production environments (Alex et al., 2002). Apart from profitability the main reasons for the slow adoption of PA techniques by farmers have been identified as: lack of willingness to commit management time (Lowenberg-DeBoer, 2003), lack of training (Rossenkopf & Wagner, 2003) and frustration with the hardware, software and procedures of the system (Batte & Arnholt, 2003). Thus it appears that knowledgeable intermediaries are essential before PA techniques can be implemented on a larger scale. It is generally accepted that the use of intermediaries to disseminate important agricultural information to farmers has been for years an integral part of agricultural development strategies as well as agricultural research (Winrock, 2003).

Whereas most oil palm estates have their own R&D units, which are closely linked to the Malaysian Palm Oil Board, one of the leading international research institutes for oil palm, rice farmers depend strongly on the extension services provided by the Malaysian Department of Agriculture. Apart from the rice industries the Department of Agriculture is also responsible for fruits, vegetables, herbs, coconut and flowers. Over the last couple of decades, attention on rice has taken a backseat, which is reflected in low numbers of rice experts in the country. At present the Department of Agriculture lists only six in-house rice experts (DOA, 2005).

According to Rahim M. Sail et al. (2004) agricultural extension services in Malaysia have been focusing more on transfer of technology than on human resource development. Following a centralized top down approach farmers are seen mainly as recipients of technology rather than trained as individuals who should be capable of using knowledge (or technology) to achieve their goals. However, only educated and empowered farmers are able to verify the suitability of technologies coming from sources outside their environment. They have the capability for generating and developing technologies suitable for and directly applicable in their local specific agro-ecosystem and for maximizing the productivity of their farming system (Padmanagara, 2004).

Extension services to support PA implementations by smallholder farmers need experts with knowledge of both agriculture as well as PA techniques. Although a variety of tertiary educational institutes offer courses related to agriculture, postgraduate spatial information education is only offered at one university in Malaysia and here not by the agriculture, but the engineering faculty. According to Abdul Rashid Mohamed Shariff & Zulhaidi Mohd Shafri (2005) Malaysia is facing a lack of professional manpower with essential qualifications in GIS and remote sensing to take a leading role in the universities as lecturers and researchers.

Conclusions

To strengthen its agricultural sector Malaysia is challenged by a very heterogeneous agricultural industry. Despite the high attractiveness of the PA concept to both scientist and policy makers it has to be evaluated carefully for its suitability to a specific agricultural sector. Whereas technical aspects can be generalized for the entire sector, social, infrastructural and economic requirements are very different when considering either large commercial estates or private smallholders.

Technical aspects of PA that need to be considered are firstly the assessment of the crop-specific yield limiting factors as PA is based on the assumption that inherent within-field variability is the yield limiting factor. Secondly, given the climatic conditions optical

remote sensing is not suitable for Malaysia, thus alternative ways of assessing within-field variation are needed.

As for the non-technical aspects of PA the oil palm industry is supported by a strong governmental framework of R&D, extension services and economic attractiveness and thus is ready to adopt a knowledge intensive technology such as PA, whereas for smallholders in rice production the lack of bare essentials, literacy, social and physical capital, physical infrastructure and the access to governmental extension services will require major governmental interventions prior to any PA implementation. Without these interventions, especially regarding the build-up of human capacity, PA by itself will not be the key to modernize and strengthen the agricultural sector in Malaysia, but it will widen the social division within the sector and marginalize the smallholders even more.

Acknowledgements

We would like to thank Datuk Jurij Hj. Ag. Yaccob and Mr Raphael Gondipon from the Sabah State Agricultural Department for their kind assistance to locate and assess data on paddy production, Walter Kollert and Fadzillah Majid Cooke for their fruitful discussion and critical input as well as Holger Lilienthal for assisting with the German part of this paper.

References

- Abd. Aziz Hj. Abd Latif** (1998) Laporan Kajian Buku Rekod Penanaman PADI: Milai Tahun 1991 Hingga Tahun 1996, Jabatan Pertanian Sabah, Malaysia
- Abdul Rashid Mohamed Shariff, Helmi Zulhaidi Mohd Shafri** (2005) GIS education in Malaysia [online] In: GIS@development, 9(1), zu finden in <http://www.gisdevelopment.net/magazine/years/2005/jan/giseduc.htm> [zitiert am 28.06.2005]
- Abu Bakar SB, Shaari AT** (1997) SAR Backscatter Response of Various Growth Stages of Wetland Rice Paddy in Malaysia [online]. In: Proceedings of the 18th Asian Conference on Remote Sensing, October 20-24, Kuala Lumpur, Malaysia, zu finden in <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1997/ts1/ts1001pf.htm> [zitiert am 20.06.2005]
- Alex G, Zijp W, Byerlee D** (2002) Rural Extension and Advisory Services: New Directions. [online], Rural Development Strategy Background Paper #9. Washington, D.C.: Agriculture & Rural Development Department, World Bank, zu finden in http://www-wds.worldbank.org/servlet/WDSContentServer/WDS/IB/2002/12/06/000094946_02112104065677/Rendored/PDF/multi0page.pdf [zitiert am 20.08.2005]

- Arif Simeh, Tengku Mohd Ariff Tengku Ahmad** (2001) The Case Study on the Malaysian Palm Oil. [online], In: Proceedings of the regional workshop on commodity export diversification and poverty reduction in south and south-east Asia, Bangkok, 03-05 April, 2001, zu finden in <http://r0.unctad.org/infocomm/Diversification/bangkok/palmoil.pdf> [zitiert am 28.06.2005]
- Atherton BC, Morgan MT, Shearer SA, Stombaugh TS, Ward AD** (1999) Site-specific farming: a perspective on information needs, benefits and limitations. *Journal of Water and Soil Conservation*, 54 (2): 455-460
- Auernhammer H** (2001) Precision farming — the environmental challenge. *Computers and Electronics in Agriculture*, 30: 31–43
- Auernhammer H, Mayer M, Demmel M** (2000) Micro-precision-farming In: Preagro Projekt Zwischenbericht 2000, Schwaiberger, R.; Sommer, C., Werner, A, et al. Sonderveröffentlichung 32 des KTBL, pp 31-44
- Azleen A, Tarmizi AM, Wahid OB** (2002) Assessment of foliar-nitrogen content in oil palm using remote sensing techniques. Paper presented at the Seminar on Applications of Remote Sensing, GIS, and related technologies for precision farming, 9-11 September 2002, Kuala Lumpur, Malaysia
- Azmi Yahaya, Mohd Zohadie, Kheiralla AF, Gew SK** (2004) Field performance testing and evaluation facility for ride-on agricultural tractor-implement at UPM. *The Planter*, Kuala Lumpur, 80 (935): 87-100
- Babu M, Chatuporn S, Kongchum M, Sun Q, Fu R, Simbahan GC, Adviento MAA** (2002) Site-specific nutrient management for intensive rice cropping systems in Asia. *Field Crops Res* 74: 37–66
- Batte MT, Arnholt MW** (2003) Precision farming adoption and use in Ohio: case studies of six leading-edge adopters. *Computers and Electronics in Agriculture* 38: 125-139
- Cahn MD, Hummel JW, Brouer BH** (1994) Spatial analysis of soil fertility for site-specific crop management. *Soil Sci Soc Am J* 58: 1240-1248
- Chan CW** (2002) Suitability of 2 DGPS Machine Navigation Systems for Variable Rate Application in Precision Farming. In: Mohd Amin Mohd Som, Azmi Yahya, ibni Hajar Rukunudin (eds), Proceedings of the 2nd World Engineering Congress, Sarawak, Malaysia, 22-25 July 2002, pp 335-341
- Chan CW** (2004) Application of GNSS in the agricultural sector. [online], Malaysia, zu finden in http://www.malaysiagis.com/gis_in_malaysia/articles/article38.cfm [zitiert am 20.06.2005]
- Chee SS, Zawiah H, Ismail MN, Ng KK** (1996) Anthropometry, dietary patterns and nutrient intakes of Malaysian estate workers. *Mal J Nutr* 2: 112-126
- Curran PJ** (1989) Remote sensing of foliar chemistry. *Remote sensing of the environment*, 30:271-278
- Daberkow SG, McBride WD** (2000) Adoption of precision agriculture technologies by U.S. farmers. Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture. Madison, WI, USA: ASA-CSSA-SSSA
- Deepak TJ, Amin MSM** (2002) Using visual basic for water management of Tanjung Karang rice irrigation scheme. In: Mohd Amin Mohd Som, Azmi Yahya, ibni Hajar Rukunudin (eds) Proceedings of the 2nd World Engineering Congress, Sarawak, Malaysia, 22-25 July 2002, pp 57-62
- Department of Agriculture** 1990. Perangkaan Asas Petani (Farmers' Basic Statistics), Peninsular Malaysia
- Dimbab Ngidang, Abdul Rashid Abdullah, Gabriel Tonga Noweg** (2003) Land use and farming systems at the periphery of the Crocker Range National Park Sabah, Malaysia [online]. In: ASEAN Review of Biodiversity and Environmental Conservation (ARBEC) January-March 2003, Malaysia, zu finden in <http://www.arbec.com.my/pdf/art4janmar03.pdf> [zitiert am 20.06.2005]
- DOA** (1999) Pakej Teknologi Padi, Department of Agriculture: Malaysia, Kod : JP/Bk 01.01/9-99/1.2R, ISBN 983-047-054-7
- DOA** (2004) Overall planted area, average yield, production of paddy by state, Malaysia 1995-1999 [online]. In: Crop hectareage statistics, Department of Agriculture, Malaysia, zu finden in http://agrolink.moa.my/da/Bi/Statistics/padi_negeri_1.html [zitiert am 20.06.2005]
- DOA** (2005) List of Paddy Experts [online], Malaysia, zu finden in <http://agrolink.moa.my/da/bdc/rice/expert.html> [zitiert am 20.06.2005]
- Dobermann A, Witt C, Dawe D, Gines GC, Nagarajan R, Satawathananont S, Son TT, Tan Fountas S** (2001) Farmers' attitude to precision farming. Proceedings of the Third European Conference on Precision Agriculture, Montpellier, France: ENSA-Montpellier, pp 515-519
- Dobermann A, Witt C, Dawe D, Gines GC, Nagarajan R, Satawathananont S, Son TT, Tan PS, Wang GH, Chien NV, Thoa VTK, Phung CV, Stalin P, Muthukrishnan P, Ravi V, Babu M, Chatuporn S, Kongchum M, Sun Q, Fu R, Simbahan GC, Adviento MAA** (2002) Site-specific nutrient management for intensive rice cropping systems in Asia. *Field Crops Res*. 74: 37-66
- FAO** (2004) AGROSTAT Database. Experts [online], Malaysia, zu finden in <http://faostat.fao.org/faostat/collections?version=ext&>

hasbulk=0&subset=agriculture> [zitiert am 20. 12. 2004]

Fraterrigo JM , Turner G, Scott M, Pearson B, Dixonc P (2004) Effects of past land use on spatial heterogeneity of soil nutrients in southern appalachian Forests. *Ecological Monographs*, 75(2): 215–230

Fujimoto A (1996) Rice land ownership and tenancy systems in Southeast Asia: Facts and issues based on ten village studies. *The Developing Economics*, 34(3): 281-315

Godwin RJ, Richards TE, Wood GA, Welsh JP Knight SM (2003b) An Economic Analysis of the Potential for Precision Farming in UK Cereal Production. *Biosystems Engineering*, 84(4): 533–545

Godwin RJ, Wood GA, Taylor JC, Knight SM, Welsh JP (2003a) Precision Farming of Cereal Crops: a Review of a Six Year Experiment to develop Management Guidelines. *Biosystems Engineering* 84 (4): 375–391

Haneklaus S, Ruehling I, Schroeder D, Schnug E (1997) Studies on the variability of soil and crop fertility parameters and yields in different landscapes of Northern Germany. In: *Proceedings 1st European Conf. on Precision Agriculture*, Stafford JV (ed) Warwick, UK, Vol. 2, pp 785-792

Haneklaus S, Schnug E (2003). Site-specific nutrient management objectives, current status and future needs. In: Srinivasan A (ed) *Precision Farming: A global perspective*, Marcel Dekker, New York (in press)

Hoekman DH, van der Linden M, van der Sanden JJ (1995) Application of ERS-1 in forest management. In: Nieuwenhuis GJA, van Rooij WWL (eds) *Application of ERS-1 SAR data in agriculture and forestry*, Rep. 94-34, Delft, The Netherlands: BCRS, 105-121

Jalani B, Yusof Basiron, Ariffin Darus, Chan, KW, Rajanaidu N (2002) Prospects of Elevating National Oil Palm Productivity: a Malaysian Perspective. *Oil Palm Industry Economic Journal*, 2(2): 1-9

Lambert D, Lowenberg-DeBoer J (2000) Precision Agriculture Profitability Review [online], Site Specific Management Centre, Purdue University, zu finden in <http://www.agriculture.purdue.edu/ssmc/> [zitiert am 28.01.2005]

Lark RM (2001) Some tools for parsimonious modelling and interpretation of within-field variation of soil and crop systems. *Soil Tillage Res.* 58: 99-111

Lowenberg-DeBoer J, Boehlje M (1996) Revolution, evolution, or dead-end: economic perspectives on precision agriculture. *Proceedings of the 3rd international conference*, June 23-26, Minneapolis, MN, p 923-944. ASA/CSSA/SSSA

Lowenberg-DeBoer J (2003) Precision Farming or Convenience Agriculture. [online]. In: *Proceedings of the Australian Agronomy Conference*, Australian Society of Agronomy, zu finden in <http://www.regional.org.au/au/asa/2003/i/6/lowenberg.htm> [zitiert am 20.06.2005]

Malek Mansoor, Abd Rahim Shuib, M Nasir Amiruddin, (1997) Factors inhibiting rate of mechanisation in oil palm estates. *PORIM Bulletin* No. 34

MARDI (1981) A Special Report on Rice Production in Malaysia

McBratney AB, Whelan BM (1999) The “null hypothesis” of precision agriculture. In: Stafford JV (ed) *Precision Agriculture '99, Part 2; Proceedings of the 2nd European conference on precision agriculture*, Odense, 11-15 July 1999. Sheffield, pp 947-957. ISBN 1-84127-042-3

Ministry of Agriculture Malaysia (1998) The Third National Policy (1998-2010), Kuala Lumpur

Mohd Noor MF, Rogasik J, Kleemola J, Peltonen J, Schnug E (2002) The coincidental Spatial Pattern of Nitrogen Fertilization Requirement of Winter Wheat. in: *proceedings of the 6th International Conference on precision agriculture and other precision Resource Management*, July 16-18, 2002. Minneapolis, USA.

Mohd Noor M, Mohd Arif Simeh, Azman Ismail, Jusoh Latif (2003) Analysis of Palm Oil Cost of Production Survey, 2002. *Oil Palm Industry Economic Journal*, 3(2): 32-40

Moran MS (2000) New imaging technologies suitable for agricultural management. *Asp Appl Biol* 60: 1-10

Ong Khun Way (2002) National study Malaysia. [online] In: Report of the regional workshop on "exploring the potential of organic agriculture for rural poverty alleviation in Asia and the Pacific", Chiang Mai, Thailand, 26-29 November 2001, p 98-118, zu finden in <http://www.unescap.org/rural/doc/OA/OA%20Workshop%20report.pdf> [zitiert am 20.06.2005]

Padmanagara S (2004) Farmer-Driven Transportation of Agricultural Extension. [online] In: *Proceeding of the Training Workshop on Agricultural Technology*, Bandung, Indonesia 18-22 July, 2004, p 84-98, zu finden in ftp://203.127.220.112/.../working_groups/agricultural_technical.downloadlinks.0006.LinkURL.Download.ver5.1.9 [zitiert am 20.06.2005]

Pingali PL, Mahabub Hossain, Pandey S, Price LL (1998) Economics of nutrient management in Asian rice systems: Towards increasing knowledge intensity. *Field Crops Research* 56: 157-176

Rahim M. Sail, Azahari Ismail, Azizan Asmuni (2004) Forging ahead: Extension education and ser-

vices for industrialized Malaysia. [online], paper presented at the National Seminar on Extension Education and Services, 12–13 December, 2004, Selangor, Malaysia, zu finden in <http://www.pekka.upm.edu.my/malay/paper_prof.pdf> [zitiert am 28.06.2005]

Razman Abdul Raof, Mohd Hashim Tajudin, Ooi LH, Tang MK (1999) Fertilizer requirements and practices of the plantation industry in Malaysia. [online], In: IFA Bibliography 1999, IFA Information Service: Paris, zu finden in <http://www.fertilizer.org/ifa/publicat/pdf/1999_biblio_25.pdf> [zitiert am 28.06.2005]

Rogasik J, Panten K, Schroetter S, Schnug E (2002) Relations between soil fertility and plant yield influencing variable rate fertilization. In: Proceeding of the International Conference on Long-term Experiments, Sustainable Agriculture and Rural Development, June 6-8, 2002 in Debrecen, Hungary, Vol. 1, 65-70. ISBN 963-472-654-2 (963-472-655-0)

Roskopf K, Wagner P (2003) Requirements for agricultural software and reasons for adoption constraints - Results of empirical studies -. Proceedings of the EFITA 2003 Conference 5-9. July 2003, Debrecen, Hungary, pp 651-657

Schnug E, Haneklaus S, Murphy D (1994) Equifer-tilles - an innovative concept for efficient sampling in the local resource management of agricultural soils. *Asp Appl Biol* 37: 63-72

Schnug E, Lilienthal H, Panten K, Haneklaus S (2003) Smart Navigation – Salvation for Precision Agriculture? Proceeding of 11th IAIN World Congress, October 21-24, 2003, Berlin Germany, 12 p, CD-ROM

Schnug E, Murphy D, Evans E, Haneklaus S (1993a) Local Resource-Management in computer aided farming: A new approach for sustainable agriculture. In: Fragoso MAC, van Beusichem ML (eds) Optimization of Plant Nutrition, Dordrecht: Kluwer Acad. Publ. pp 657-663

Schnug E, Murphy D, Evans E, Haneklaus S, Lamp J (1993b). Yield mapping and application of yield maps to computer aided local resource management. In: Robert PC, Rust RH, Larson WE (eds) Proceedings Workshop Soil Specific Crop Management, ASA-CSSA-SSSA Madison, pp 87-93

Schueller JK (1997) Technology for Precision Agriculture. Vol. I: Spatial Variability in Soil and Crop. Precision Agriculture'97. BIOS Scientific Publishers, Oxford, pp 33-44

Sidhu S, Baanante C (1984) Agricultural production, fertilizer and equity considerations. Joint Report of the Bangladesh Agricultural Research Council and the International Fertilizer Development Center, Mussel Shoals, AL

Srinivasan A (1998) Precision Farming in Asia: Progress and Prospects. Paper presented at the 4th International Conference on Precision Agriculture, 19-22 July 1998, St. Paul, USA

Swaminathan MS, Sinha SK (1986). Global Aspects of Food Production, Tycooly International: Oxford, 417-449

Swinton SM, Lowneberg-DeBoer J (1998) Evaluating the profitability of site-specific farming. *Journal of Production Agriculture* 11(4): 439-446

Ugsang DM, Honda K, Saito G (2002) C-band/HH Backscattering Characteristics of Paddy Fields: Implications for Rice-growth Monitoring. [online]. In: Proceedings of the 23rd Asian Conference on Remote Sensing, Kathmandu, zu finden in <www.gisdevelopment.net/aars/acrs/2002/sol/045.pdf> [zitiert am 20.06.2005]

Wahid BO, Rahim AS, Tarmizi AM, Basri MW (2004) Variable-Rate Fertilizer Application for Oil Palm. MPOB Information Series, June 2004, MPOB TT No. 216

Winrock (2003) Future Directions in Agriculture and Information and Communication Technologies (ICTs) at USAID [online], USA, zu finden in <http://www.dot-com-alliance.org/documents/AG ICT_USAID.pdf> [zitiert am 20.06.2005]

Zillman E, Lilienthal H, Schrage T, Schnug E (2004) Significance of radar remote sensed imagery for agricultural applications. *Landbauforsch Völknerode* 54(4): 199-210

Predicting sugar beet yield variability using yield maps of combinable crops and the 'monitor pedo cell' approach

Kerstin Panten^{1,2}, Silvia Haneklaus¹, Jutta Rogasik¹ and Ewald Schnug¹

¹ Institute of Plant Nutrition and Soil Science, Federal Agricultural Research Centre (FAL), Bundesallee 50, 38116 Braunschweig, Germany

² Current address: CSIRO Sustainable Ecosystems, PMB No. 2, Glen Osmond, SA 5064, Australia

Summary

Yield maps of combinable crops are often used to gather spatial variable data for Precision Agriculture. Yield mapping systems for root crops are under construction, but until now they are not commercially available. Aim of the presented field experiment was to determine if existing yield maps of combinable crops can be used to predict sugar beet yield and therefore can also be used as a base for variable field operations. Four yield maps (1995-1998) were available for an experimental field (7.9 ha) in Mariensee (Northern Germany) which were used to create a combined yield map. Sampling locations for collecting plant, soil and root samples were chosen by following the 'directed sampling' strategy. Sugar beet yield was determined manually at 33 sampling locations. 49% of the sugar beet yield variability and 57% of the sugar yield variability could be explained by the grain and legume yield variability of former years. For further investigations on yield influencing parameters, a reduction of the 33 locations to 16 'monitor pedo cells' (MPC) was accomplished. A soil texture analysis result of the reduced number of deep soil samples showed a high relationship with grain and sugar beet yield and indicates that water availability is the main yield limiting factor. Considering the results it can be concluded that the discovered reason for yield variability will be valid for all crops in the crop rotation and can therefore used to develop fertiliser strategies, especially for nitrogen.

Key words: *Precision Agriculture, sugar beet, yield mapping, yield variability*

Zusammenfassung

Ertragskarten von Mähdruschfrüchten bilden seit vielen Jahren die Basis für die Erfassung von räumlicher Variabilität in Precision Agriculture. Ertragskartierungssysteme für Hackfrüchte stehen in der Entwicklung, sind aber zur Zeit auf dem Markt noch nicht erhältlich. Aus diesem Grund wurden in einem Versuch die Möglichkeiten zur Prognose der Ertragsvariabilität von Zuckerrüben anhand vorhandener Karten von Mähdruschfrüchten geprüft. Für eine Versuchsfläche (7,9 ha) des Instituts für Tierzucht der FAL in Mariensee lagen Ertragskarten der Jahre 1995-1998 vor, die in relative Ertragskarten umgewandelt wurden. Nach dem Verfahren des 'directed sampling' wurden zur Zuckerrübenerte 1999 33 Messungen der Zuckerrübenenerträge durchgeführt, sowie Boden- und

Pflanzenproben genommen. 49% der Variabilität der Zuckerrübenenerträge und 57% der Zuckererträge konnten durch die Variabilität der Getreide- und Leguminosenerträge in den Vorjahren erklärt werden. Für weitere Untersuchungen zur Ursache der Ertragsunterschiede wurden die 33 Probenpunkte nach dem 'monitor pedo cell' (MPC) Verfahren auf 16 reduziert. Texturanalysen der auf 16 reduzierten Bodenproben zeigten einen starken Zusammenhang zu Getreide- sowie Zuckerrübenenerträgen. Aus den Ergebnissen lässt sich schliessen, dass die Wasserverfügbarkeit der wesentlich ertragslimitierende Faktor ist. Somit kann in diesem Fall die relative Ertragskarte von Mähdruschfrüchten auch zur Ertragsabschätzung von Zuckerrüben und damit als Grundlage für die Düngplanung eingesetzt werden.

Schlüsselwörter: *Ertragskartierung, Ertragsvariabilität, Precision Agriculture, Zuckerrübe*

Introduction

Despite all critical aspects of yield mapping, like the correct allocation of GPS coordinates to the actual yield data or the internal grain flow in combines (Blackmore & Marshall, 1996; Panten et al., 2002a), yield maps are usually the first and most common tool to determine in field variability. But recording variability is only the first step of Precision Agriculture management strategies which further imply spatial data analysis and finally variable field management actions (Schnug et al., 1993). Especially nitrogen (N) fertiliser applications are often based on yield expectations. Most advisory service guidelines are calculating optimum fertiliser rates in their codes of practice using the expected crop productivity and soil analysis data (Fruechtenicht et al., 1993). If yield maps of more than one year are available, these maps can be combined into an average yield map after the transformation from absolute into relative maps. Combined grain yield maps offer a good base for decision making processes by reflecting good, medium and bad performing areas in the field. Variable yield expectations can be derived using these maps assuming average climatic conditions. Combinable crop yield monitors are commercially available in contrast to yield monitors for sugar beet (*Beta vulgaris* L.), a highly intensively managed and economically beneficial crop for farmers. Yield monitors for sugar beets are under construction and some prototypes are already running under test conditions (Walter & Backer, 2003; Hall et

al., 2003; Isensee, 2003). For farmers collecting grain yield maps since several years the question arises how to take advantage of these yield maps not only for the variable application of fertilisers to grain crops, but also for sugar beet.

Combined yield maps may be used for the determination of yield variability and thus the spatial variation of nutrient off-takes, but also proved to be an efficient source for identifying in field heterogeneity by applying sophisticated sampling strategies. Many approaches for effective sampling strategies in Precision Agriculture were published during the last years. Some examples are 'self-surveying' (Haneklaus et al., 1998), 'directed sampling' (Schnug, et al., 1994; Pocknee et al., 1996; Mulla et al., 2000), 'variance quad-tree-sampling' (McBratney et al., 1999) or 'Monitor Peds Cells (MPCs)' (Panten et al., 2002b). Based on the 'directed sampling' method, MPCs are derived using so-called 'equifertiles' representing areas with similar crop productivity to define sampling positions which reflect the whole range of variation of soil and plant parameters in the field. For the definition of the final MPCs the number of directed sampled points in the field will be reduced over time until a minimum set of representative sample locations remains. These positions will be used to monitor soil parameter changes over long periods by regular sampling campaigns. Combined yield maps of combinable crops may be used for establishing 'equifertiles' as they are the sum of all factors influencing the yield heterogeneity (Schnug, et al., 1994). The analysis of soil and plant samples can then be used to identify factors controlling yield. This might be an iterative process, starting with standard analysis followed by further investigations on more parameters if necessary. For the decision process about sensible parameters for analysis, local knowledge of farmers will be essential as in most cases fundamental ideas about yield limiting factors exist.

Materials and Methods

Precision Agriculture was introduced on the experimental farm of the Institute of Animal Breeding of the FAL in Mariensee in 1994. Geo-coded yield mapping of combinable crops has been carried out since then by a flow meter sensor mounted on a Massey Ferguson combine harvester equipped with a DGPS system. After harvest in summer 1998, 4 yield maps were available for the field 'Grosser Fuchsberg' (9.4717° E; 52.5765° N; Tab. 1). All erroneous yield data were extracted employing the routines described by Haneklaus et al. (2000a). These data sets were transformed into relative yield maps using the mean yield of the year. Then the 4 maps from 1995 to 1998 were combined (Fig. 1) and 5 yield classes, < 80%, 80-90%, 90-100 %, 100-110 % and > 110 % established.

Tab. 1: Descriptive statistics for yield data of the field 'Grosser Fuchsberg' (1995-1999)

Year	Crop	Yield t ha ⁻¹			
		Min.	Max.	Mean	CV%
94/95	Oats	3.0	6.2	5.0	14.5
95/96	W-barley	3.4	8.0	6.5	15.2
96/97	Peas	2.0	6.5	5.0	19.6
97/98	W-barley	5.5	9.5	8.3	9.6
98/99	S-beet	29.8	92.0	59.1	28.3

In order to evaluate the suitability of yield maps of combinable crops to predict sugar beet yield, 33 sampling locations were allocated on basis of the combined yield map (Fig. 1) employing the directed sampling approach. At sugar beet harvest in October 1999 2 m² of sugar beets (*Beta vulgaris*, var. Helix) were harvested and topsoil samples were taken on each location.

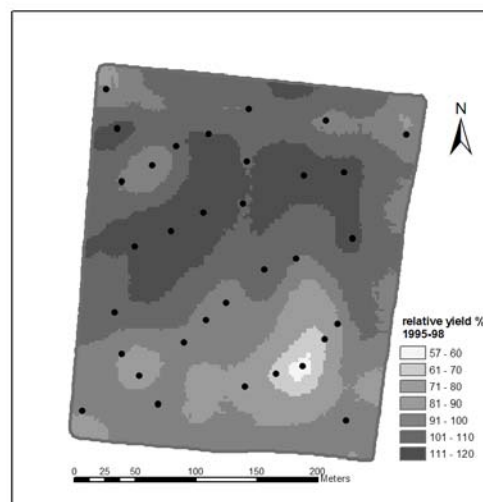


Fig. 1: Relative yield map of combinable crops (1995-1998) of field 'Grosser Fuchsberg' in Mariensee including 33 directed sampling points for the sugar beet harvest in 1999

After the evaluation of the plant and soil analysis results of 1999 the number of sampling locations was reduced from 33 to 16 following the procedure of Haneklaus et al. (2000b). The remaining 16 locations, so-called MPCs, were used for further investigations into the cause of the yield variability. After harvest of oats in August 2000, top- and subsoil samples (0-30, 30-60, 60-90 cm) were taken at exactly these 16 locations.

Soil samples of both sampling campaigns were air-dried and sieved to a particle size ≤ 2 mm. Soil pH was determined potentiometrically in a 0.01M CaCl₂ soil suspension (1:10) according to Schlichting and Blume (1966). The total carbon (C) content was determined by dry combustion using a LECO (EC-12,

model 725-100) analyser. Plant available phosphorous (P) and potassium (K) contents were determined in the CAL extract according to Schueller (1969). Plant available magnesium (Mg) was extracted in 0.05 M CaCl₂ solution according to Schachtschabel (1954). Soil texture was analysed according to de Leenhear et al. (1955).

The determination of the sugar content was performed in fresh sugar beet samples in the laboratory of a sugar refinery using a polarimeter (Zuckerinstitut, 2001).

For statistical analysis of variance (F-test) the ANOVA procedure of the JMP software package was used. Geostatistical analysis was performed using the Variowin software (Pannatier, 1996).

Results and Discussion

In 1999, root sampling of sugar beet at harvest was carried out at the 33 sampling locations defined by directed sampling. Fig. 2 shows the variation of sugar beet yield superimposed on the combined yield map of combinable crops.

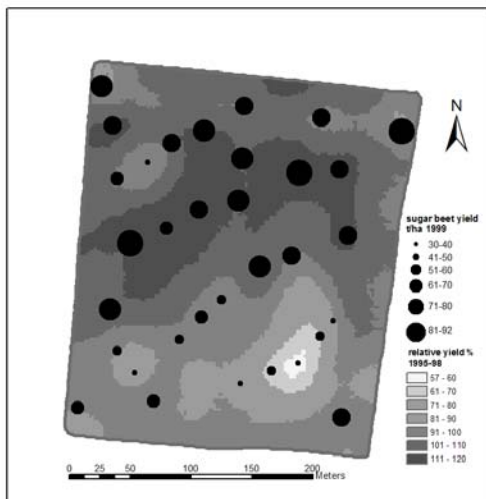


Fig. 2: Combined yield map of combinable crops (1995-1998) for field 'Grosser Fuchsberg' in Mariensee superimposed by sugar beet yield of 1999

A close relationship between sugar beet yield and relative yield classes of combinable crops is evident (Fig. 2). Regression analysis confirmed these results as 49% of the variation of sugar beet yield could be explained by variations of yields from combinable crops (Fig. 3).

One of the most important factors influencing the profitability of sugar beet cropping is the sugar content of the beets. Sugar beet prices are calculated under consideration of sugar, potassium, sodium and nitrogen content of the beet. Fig. 4 reveals the correlation between relative yield and sugar content of the beet roots.

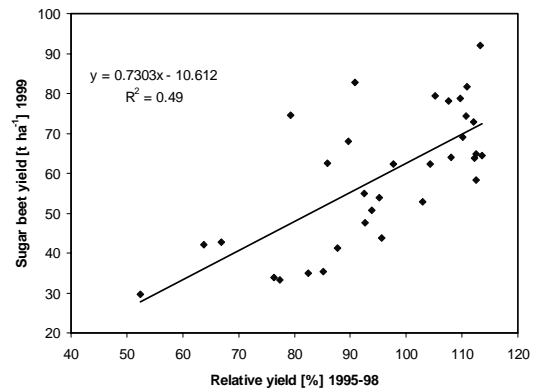


Fig. 3: Relationship between sugar beet yield (1999) and relative yield of combinable crops (1995-98) at 'Grosser Fuchsberg' in Mariensee

A coefficient of determination of 57% demonstrates that even a higher percentage of the variation of the sugar content could be explained by the variations of the relative yield of combinable crops than it was the case for sugar beet yield.

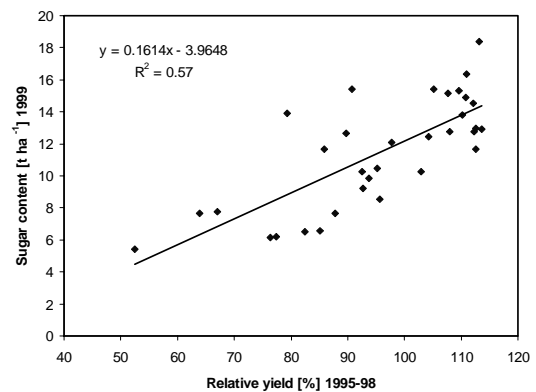


Fig. 4: Relationship between sugar content (1999) and relative yield of combinable crops (1995-1998) at 'Grosser Fuchsberg' in Mariensee

Further investigations focused on the main factors causing yield variability. In a first step standard soil analysis was carried out for the 33 topsoil samples (Tab. 2).

Tab. 2: Descriptive statistics for soil characteristics of top-soil samples (0-10 cm) of 33 sample points collected in October 1999 and results from ANOVA statistics for relative yield classes

Soil parameter	Descriptive statistics				ANOVA	
	Min.	Max.	Mean	CV %	P value	Sign.
pH	5.7	6.2	6.0	2.3	0.675	ns
C (%)	1.3	2.1	1.6	13.0	0.016	*
P (mg kg ⁻¹)	67.0	133.2	106.0	14.9	0.726	ns
K (mg kg ⁻¹)	93.2	299.8	151.1	28.6	0.819	ns
Mg (mg kg ⁻¹)	43.6	71.3	55.4	10.0	0.319	ns

Note: probability levels: <0.05 (*); <0.01 (**); <0.001 (***); not significant (ns)

Tab. 2 represents an overview about the descriptive statistics of the analysed parameters. The ANOVA procedure was applied in order to attribute variation in soil characteristics to individual yield classes. Significant differences were proved only for differences in the soil organic carbon content for individual yield classes.

The results reveal that all analysed soil parameters were above critical threshold values for producing maximum yield and therefore not yield limiting. After a first classification of samples based on sensory analysis of soil texture (Haneklaus & Schnug, 1999), laboratory soil texture analysis was performed at the final 16 MPC's. This is an efficient way to gather crucial information about the variation of this parameter and its significance for yield, which would otherwise be denied due to high costs. Next to the texture analysis for the MPCs, standard soil analysis was conducted to allow comparisons between the results of directed sampling points and MPCs. As can be seen in Tab. 2 and 3, MPCs reflect the variation of soil properties adequately. Soil texture analysis revealed a high variation in all horizons (Tab. 3). For example, in the topsoil layer sand contents varied between 46-87%, silt 10-48% and clay 3-6%.

The ANOVA procedure for the results from soil texture analysis showed strong and significant differences for this parameter between yield classes in relation to the sand, silt and clay content in all soil horizons (Tab. 4). As soil texture is directly linked to the soil water regime, and thus the water holding capacity of soils, it can be concluded that the access to

plant available water was the main yield limiting factor on this field.

This finding can be transferred to all other crops under consideration of evapotranspiration rates during growth. The combined yield map can therefore be used to create a spatially variable yield expectation map resulting for instance into variable rate nitrogen fertiliser applications depending on the variable demand of the crop due to restricted plant growth caused by limited water availability. Further analysis of precipitation data during the vegetation periods of 1998 and 1999 (Fig. 5) confirmed the assumption that access to plant available water in relation to soil texture differences was the major yield limiting factor and explains the wide range of sugar beet yield of 29.8-92.0 t ha⁻¹ in 1999. Fig. 5 also reveals that the annual rainfall from November 1998 to October 1999 (sugar beet harvest) with 591mm was more than 100 mm lower than the long term average precipitation in the region (699 mm).

The lack of rainfall particularly during May and June 1999 hampered, especially on the lighter, sandier areas of the field with correspondingly lower water holding capacities, the development of the crop.

During the sampling campaigns on 'Grosser Fuchsberg' relief changes in the field were mapped, too. Sensory analysis of soil texture showed distinct differences for this parameter with a higher sand content on elevated areas. Fig. 6 reflects variations of geomorphology in relation to yield distribution patterns in the field.

Tab. 3: Soil sampling results (0-90 cm) of August 2000 at MPCs

	Soil parameter	Depth [cm]	Unit	Minimum	Maximum	Mean	CV %
Texture	Sand (63-2000µm)	0-30	%	46.1	87.0	59.1	16.0
	Silt (2-63µm)	0-30	%	10.1	47.8	35.9	24.7
	Clay (< 2µm)	0-30	%	2.9	6.1	5.0	14.2
	Sand (63-2000µm)	30-60	%	41.8	96.4	64.4	23.6
	Silt (2-63µm)	30-60	%	1.8	52.8	31.8	45.0
	Clay (< 2µm)	30-60	%	1.6	5.5	3.9	27.8
	Sand (63-2000µm)	60-90	%	42.0	98.4	74.4	23.1
	Silt (2-63µm)	60-90	%	1.0	53.0	22.6	71.4
	Clay (< 2µm)	60-90	%	0.6	5.2	3.0	47.4
Soil chemistry	pH	0-30		5.9	6.4	6.2	2.0
	C	0-30	%	0.6	2.1	1.5	20.1
	P	0-30	mg kg ⁻¹	67.2	129.7	105.7	15.0
	K	0-30	mg kg ⁻¹	110.8	277.4	180.9	22.4
	Mg	0-30	mg kg ⁻¹	36.8	81.4	63.1	25.7

Tab. 4: Results from ANOVA procedure for soil texture analysis at MPCs and yield classes

Texture	ANOVA	
	P value	Significance
Sand 0-30 cm	0.0098	**
Silt 0-30 cm	0.0123	*
Clay 0-30 cm	0.0039	**
Sand 30-60 cm	0.0002	***
Silt 30-60 cm	0.0003	***
Clay 30-60 cm	0.0066	**
Sand 60-90 cm	0.0003	***
Silt 60-90 cm	0.0004	***
Clay 60-90 cm	0.0033	**

Note: probability levels: <0.05 (*); <0.01 (**); <0.001 (***); not significant (ns)

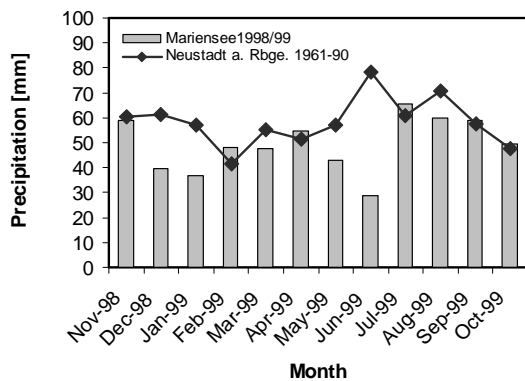


Fig. 5: Precipitation in Mariensee (Nov. 1998 – Oct. 1999) in comparison to the long-term data (1961-1990) for Neustadt a. Rbge. (9.4667° E; 52.5000° N)

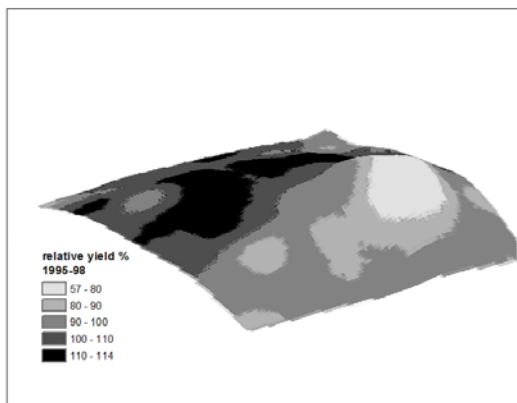


Fig. 6: Relative yield (1995-98) of combinable crops in relation to elevation changes at 'Grosser Fuchsberg' in Mariensee

Changes in geomorphology together with the spatial variation of soil texture are the main driving factors for water flow, soil moisture and nutrient availability in the field and thus highly relevant factors for crop yield. Haneklaus et al. (1996) demonstrates how knowledge about geomorphology can be integrated in

the decision making process for variable N fertilisation algorithms. Digital elevation models (DEM) can be ordered from ordinary survey offices or derived from ordinary survey maps as well as kinematic GPS systems with the ability to gather DEMs on the go whilst running other field operations. Knowledge of the spatial variation of geomorphology as one of the major factors for crop productivity is essential for decision making processes in Precision Agriculture (Reuter et al., 2005).

Conclusions

In a case study yield maps of combinable crops showed a high potential as an aid for variable management decisions, for combinable as well as non combinable crops. Yield limiting factors need, however, to be verified before general conclusions for variable management strategies can be made as water availability may restrict growth of all crops in relation to soil and climatic conditions. Though sugar beet has a high demand for essential plant nutrients such as K, this parameter was not yield limiting in the presented investigation. Provided that yield limiting factor(s) could be determined, variable management applications can be designed accordingly. The used sampling strategies 'directed sampling' followed by the 'MPC' approach demonstrated successfully their fully satisfactory suitability to identify main yield limiting factors and thus proved to be an efficient tool to address causal factors of soil and plant variability.

Acknowledgements

The authors are most grateful to the Nordzucker AG particularly the staff of the sugar refinery in Wierthe for the excellent and ongoing support analysing the sugar content on fresh sugar beet samples. The authors also wish to thank their colleagues from the experimental station of the Institute of Animal Breeding (FAL) in Mariensee most cordially for their cooperation and unrestricted assistance for many years.

References

Blackmore BS, Marshall CJ (1996) Yield mapping; errors and algorithms. In: Robert PC, Rust RH, Larson WE (eds) Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture, June 23-26, 1996 in Minneapolis, Madison, Wis.: ASA; CSSA; SSSA, pp 403-415, ISBN 0-89118-123-6

De Leenhear L, van Ruymbeke M, Maes L (1955) Die Kettenaraeometer Methode fuer die mechanische Bodenanalyse. Z Pflanzenernaehrung, Duengung, Bodenkunde 68, 113, 1: 10-19

Fruechtenicht K, Heyn J, Kuhlmann H, Laurenz L, Mueller S (1993) Pflanzenernaehrung und Duengung. In: Hydro Agri Duermen GmbH (ed) Faustzahlen fuer Landwirtschaft und Gartenbau, Verlagsunion Agrar, Muenster-Hiltrup, pp 254-295

- Hall TL, Backer LF, Hofman VL, Smith LJ** (2003) Sugarbeet Yield Monitoring for Site-Specific Farming Part II – Field Testing. *Precision Agriculture* 4: 433-444
- Haneklaus S, Schröder D, Schnug E** (1996) Strategies for fertilizer recommendations based on digital agro resource maps. In: Robert PC, Rust RH, Larson WE (eds) *Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture*, June 23-26, 1996 in Minneapolis, Madison, Wis.: ASA; CSSA; SSSA, pp 361-368, ISBN 0-89118-123-6
- Haneklaus S, Paulsen HM, Schroeder D, Leopold U, Schnug E** (1998) Self-Surveying – A strategy for efficient mapping of the spatial variability of time constant soil parameters. *Commun Soil Sci Plant Anal* 29 (11-14): 1593-1601
- Haneklaus S, Schnug E** (1999) Self-surveying & variable N rates. *Agroprecise* 1 (2): 4-6
- Haneklaus S, Lilienthal H, Panten K, Haveresch K, Schnug E** (2000a) Routines for efficient yield mapping. In: Robert PC, Rust RH, Larson WE (eds) *Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture*, Minneapolis, 16-19 of July 2000 [CD-ROM]
- Haneklaus S, Schnug E, Panten K** (2000b) Evaluation of structural coincidences of patterns in remote sensing images and yield maps for the identification of sampling locations. *Asp Appl Biology-Remote Sensing in Agriculture* 60: 37-44
- Isensee E** (2003) Ertragskartierung in der Rübenernte. *Landtechnik* 58 (6): 386-387
- McBratney AB, Whelan BM, Walvoort DJJ, Minasny B** (1999) A purposive sampling scheme for precision agriculture. In: Stafford JV (ed) *Proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture*, Part 1, 11-15 of July 1999, Odense, Denmark, pp 101-110
- Mulla DJ, Sekely AC, Beatty M** (2000) Evaluation of Remote Sensing and Targeted Soil Sampling for Variable Rate Application of Lime. In: Robert PC, Rust RH, Larson WE (eds) *Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture*, Minneapolis, 16-19 of July 2000 [CD-ROM]
- Pannatier Y** (1996) *VARIOWIN: Software for Spatial Data Analysis in 2D*. Springer-Verlag, New York
- Panten K, Haneklaus S, Schnug E** (2002a) Spatial accuracy of online yield mapping. *Landbauforsch Völkenrode* 52 (4): 205-209
- Panten K, Haneklaus S, Schnug E** (2002b) Monitor pedo cells derived from remote sensing images and yield maps in northern Germany. In: Robert PC, Rust RH, Larson WE (eds) *Proceedings of the 6th International Conference on Precision Agriculture*, Minneapolis, 14-17 of July 2002 [CD-ROM]
- Pocknee S, Boydell BC, Green HM, Waters DJ, Kvien CK** (1996) Directed Soil Sampling. In: Robert PC, Rust RH, Larson WE (eds) *Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture*, Minneapolis, 23-26 of June 1996 Madison, Wis.: ASA; CSSA; SSSA, pp 159-168, ISBN 0-89118-132-6
- Reuter HI, Kersebaum KC, Wendroth O** (2005) Spatial and Temporal Variability of Soil Properties with Respect to Relief Information. In: Stafford JV (ed) *Proceedings of the 5th European Conference on Precision Agriculture*, 9-12 of June 2005, Uppsala, Sweden, pp 434-441
- Schachtschabel P** (1954) Das pflanzenverfügbare Magnesium im Boden und seine Bestimmung. *Z Pflanzenernaehr Bodenkd* 67: 9-23
- Schlichting E, Blume HP** (1966) *Bodenkundliches Praktikum*. Verlag Paul Parey, Berlin, Hamburg
- Schnug E, Murphy D, Evans E, Haneklaus S, Lamp J** (1993) Yield mapping and application of yield maps to computer aided local resource management. *Proc. Workshop Soil Specific Crop Management 1993*, Madison, Wis.: ASA; CSSA; SSSA, pp 87-93
- Schnug E, Haneklaus S, Murphy D** (1994) Equifer-tiles – an innovative concept of efficient sampling in the local resource management of agricultural soils. *Aspects of Applied Biology* 37: 63-72
- Schueller H** (1969) Die CAL-Methode, eine neue Methode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphates in Boeden. *Z Pflanzenernaehr Bodenkd* 123: 48-63
- Walter JD, Backer LF** (2003) Sugarbeet Yield Monitoring for Site-Specific Farming Part I – Laboratory Tests and Preliminary Field Tests. *Precision Agriculture* 4: 421-431
- Zuckerinstitut** (2001) *IMS-Analysenvorschrift, ZIBS-AnaV-SAC.01, Institutsmethode zur Bestimmung der Polarisation von technischen Zuckerprodukten mit bleifreien Klaermitteln*

Kalkung und Bodenfruchtbarkeit

Jutta Rogasik¹, Paul Kurtinecz², Kerstin Panten¹, Ute Funder¹, Helmut Rogasik³,
Susanne Schroetter¹ und Ewald Schnug¹

¹Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig (FAL), Bundesallee 50, D-38116 Braunschweig

²Forschungsstation (ARS) Livada, Rumänische Akademie der Landwirtschaftswissenschaften, 3913 Livada, Rumänien

³Institut für Bodenlandschaftsforschung, Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V., Eberswalder Straße 84, D-15374 Müncheberg

**Wir werden nur das schützen,
was wir lieben,
aber wir werden nur das lieben,
was wir verstehen,
und wir werden nur das verstehen,
was wir gelernt haben.**

Baba Dinum, Senegal

Zusammenfassung

An Hand von Dauerversuchen in Müncheberg, Braunschweig und Livada (Rumänien) wird der langfristige Einfluss von Kalkung und Düngungsmaßnahmen auf Basensättigung, Bodenreaktion, Gehalt der Böden an organischer Substanz und verwandte Eigenschaften dargestellt.

Kalkung, pH-Wert und Basensättigung

Nach Untersuchungen im Kalkdüngungsversuch in Livada besteht zwischen Kalkdüngereinsatz, pH-Wert und Basensättigung ein enger korrelativer Zusammenhang. Die für den Standort optimale Basensättigung von 70-80% wird mit einer Kalkmenge von 0,8 t ha⁻¹ a⁻¹ CaCO₃ gewährleistet. Der pH-Wert stellt sich dann bei ca. 6,5 ein. Auf sandigen Ackerstandorten mit geringer Pufferkapazität wird mit dem pH-Wert nicht immer die Belegung des Austauschers mit Ca und Mg wiedergegeben. Neben der in der Praxis üblichen Überprüfung der pH-Werte zur Einschätzung des Kalkbedarfes sind Untersuchungen der Kationenbelegung des Sorptionskomplexes notwendig.

Kalkzustand, Nährstoffverfügbarkeit und Ertragshöhe
Niedrige pH-Werte im Boden sind häufig mit eingeschränktem Pflanzenwachstum und dem damit einhergehenden geringen Ertragsniveau verbunden. Die pH-Wirkungen sind allerdings sehr komplex und wirken direkt, aber auch indirekt auf die Verfügbarkeit der Nährstoffe und somit auf die Ertragsbildung. Ein optimaler pH-Wert muss die Verfügbarkeit von Makro- und Mikronährstoffen gewährleisten, aber auch toxische Wirkungen von Al und Mn ausschließen sowie die Mobilität der Schwermetalle berücksichtigen.

Kalkzustand, organische Bodensubstanz und Bodenstruktur

Unzureichende Kalkzufuhr vermindert die Basensättigung, die Bodenaggregate zerfallen in Grundbe-

standteile mit den Konsequenzen der Verdichtung und Verschlammung des Bodens sowie reduzierter Wasserinfiltration. Anhand langfristiger Beobachtungsreihen wurde auch ein maßgeblicher Einfluss des Humusgehaltes auf die Wasserinfiltration in den Boden nachgewiesen. In der Versuchsvariante „NPK+Kalk+Stalldung“ wurden im Vergleich zur Behandlung „NPK+Kalk“ deutlich höhere Infiltrationsraten gemessen.

Schlüsselwörter: *Basensättigung, Bodenfruchtbarkeit, Dauerversuch, Ertrag, Kalkung, pH*

Summary

Long-term effects of liming and fertilization on base saturation, pH, soil organic matter content and related properties are shown by means of field experiments in Müncheberg, Braunschweig and Livada (Romania).

Liming, pH, and base saturation

According to investigations in the Livada liming experiment a close correlation exists between liming, pH and base saturation. The site-specific base saturation of 70-80 % is achieved by a lime rate of 0.8 t ha⁻¹ a⁻¹ CaCO₃. Under these conditions the pH value was adjusted to 6.5. On sandy soils with a low buffer capacity the pH reflects not always the base saturation with Ca and Mg. In addition to the common estimation of liming requirements by pH measurements, investigations of the cation exchange are necessary to assess the lime demand of soils.

Liming, nutrient availability, and yield

Restricted plant growth and therewith decreasing yield are frequently associated with low pH values of soils. But, the effects of pH on plant growth are very complex with a direct and indirect influence on nutrient availability and yield formation. An optimum pH value should consider the availability of macro

and micro nutrients, but also possible toxic effects of Al and Mn, or the mobility of heavy metals.

Liming, soil organic matter, and soil structure
Insufficient lime rates reduce the base saturation; soil aggregates are breaking down to single-grained structure with the consequence of soil compaction, sealing and reduced water infiltration into the soil. On the basis of long-term observations a relevant influence of soil organic matter on the water infiltration was proved. In the treatment „NPK+lime+farmyard manure“ significantly higher infiltration rates were measured compared to the treatment „NPK+lime“.

Key words: base saturation, liming, long-term experiment, pH, soil fertility, yield

Einleitung

Die Erhaltung der Fruchtbarkeit der Böden auf lange Sicht ist die Hauptaufgabe einer nachhaltigen landwirtschaftlichen Bodennutzung, denn *SOLUM DIVITIARUM SOCIETATIS*.

Diesem Gedanken widmete sich ALBRECHT DANIEL THAER schon 1821. In seinen „Grundsätzen der rationellen Landwirtschaft“ hob er die Bedeutung des Kalkes für Boden und Pflanze hervor: „...Der Kalk im Boden hat auf die physische Beschaffenheit desselben, wie in der Lehre von der Agronomie gesagt worden ist, einen beträchtlichen Einfluß. Die chemische oder eigentlich düngende Wirkung des Kalkes scheint wieder von zweierlei Art zu sein. Eines Theils wirkt er als ein bloß zersetzendes Mittel auf den Humus, den er auflöst. Anderen Theils aber ist es höchst wahrscheinlich, daß der Kalk auch durch seine Kohlensäure etwas wirke, und durch selbige den Pflanzen wirkliche Nahrung gebe. ...“

Als Hauptnährstoff für Pflanzen ist Calcium unentbehrlich zur Aufrechterhaltung der Bodenfruchtbarkeit. Es wirkt einer Bodenversauerung, Strukturverschlechterung und Verarmung des Bodenlebens entgegen.

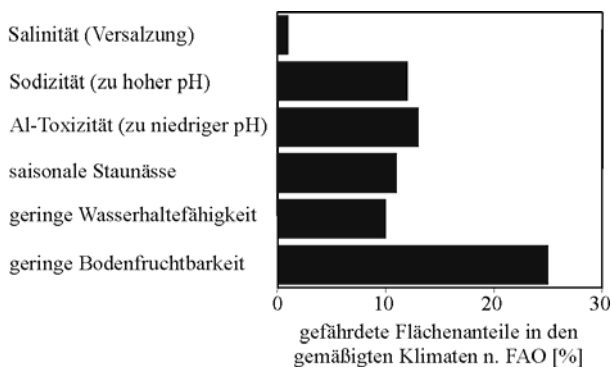


Abb.1: Abschätzung des Anteils gefährdeter Flächen in den gemäßigten Klimaten (Zusammenstellung nach FAO, 1993)

Der Beitrag zur Bodenfruchtbarkeit ist damit außerordentlich komplex. Unter- bzw. Überversorgung mit Ca sind die Ursache dafür, dass das Ertragspotential auf wesentlichen Flächenanteilen in den gemäßigten Klimaten nicht ausgeschöpft werden kann (Abb. 1). Als integraler Bestandteil der Bodenfruchtbarkeit beeinflussen Bodenreaktion und Kalkung das Transformations- und Speichervermögen und damit die Nährstoffverfügbarkeit, den Nährstoffvorrat im durchwurzelten Bodenraum, die Nachlieferungsrate und die mikrobiologische Aktivität. Außerdem werden wichtige Gefügeeigenschaften wie die Wasser- und Luftleitfähigkeit sowie Durchwurzelbarkeit des Bodens verändert.

Ziel dieses Beitrages ist es, an Hand von Dauerversuchen in Müncheberg, Braunschweig und Livada (Rumänien), den langfristigen Einfluss von Kalkung und Düngungsmaßnahmen auf Kationenbelegung bzw. Basensättigung, Bodenreaktion, Gehalt der Böden an organischer Substanz und verwandte Eigenschaften darzustellen.

Material und Methoden

Versuchsstandorte und Versuchsbeschreibung

Der Versuchsstandort Müncheberg liegt im kontinental beeinflussten ostdeutschen Binnenlandklima, geprägt durch ausgesprochene Trockenperioden im Frühsommer. Im langjährigen Mittel betragen die durchschnittliche Niederschlagsmenge 511 mm und die mittlere Jahrestemperatur 8,4°C. Der Versuchsstandort Braunschweig liegt im maritim und kontinental beeinflussten Übergangsklima mit 618 mm Niederschlag im langjährigen Mittel und einer mittleren Jahrestemperatur von 8,8°C. Die landwirtschaftliche Forschungsanstalt Livada befindet sich im Nordwesten Rumäniens und wird geomorphologisch der Teiss-Ebene zugeordnet mit 737 mm Jahresniederschlag und einer mittleren Jahrestemperatur von 9,5°C (Tab. 1).

Tab. 1: Beschreibung der Versuchsstandorte

Parameter	Müncheberg	Braunschweig	Livada
Geogra-	52° 30' N;	52° 18' N;	47° 53' N;
phische Lage	14° 8' E	10° 27' E	23° 7' E
FAO-Boden-	Leptic Podzol,	Dystric	Albic
Klassifikation	Luvic und Cambic	Cambisol,	Luvisol
	Arenosol	Orthic Luvisol	
Körnungsart	Su2, Sl2	Slu	Ut4
Mittl. Jahres-	8,4°C	8,8°C	9,5°C
temperatur			
Mittl. Jahres-	511 mm	618 mm	737 mm
niederschlag			

Körnungsart entsprechend KA4 (Anonymous, 1995)

Der **Braunschweiger** Nährstoffsteigerungsversuch wurde 1952 auf einer ehemaligen Waldfläche angelegt. Seit 1980 läuft der Versuch mit geringen Änderungen in der jetzigen Form. Der Versuch wird in einer Hackfrucht-Getreide-Rotation ohne Landwechsel geführt. Die organische Düngung erfolgt zu Hackfrüchten. Getreide erhält nur mineralische Düngung (Tab. 2).

Der **Müncheberger** Nährstoffsteigerungsversuch wurde 1962 angelegt. Der Versuch läuft in einer Hackfrucht-Getreide-Rotation ohne Landwechsel. Auch hier wird zu Hackfrüchten organisch gedüngt, Getreide erhält nur mineralische Düngung (Tab. 2).

In **Livada** läuft seit 1961 ein **Dauerkalkungsversuch** ohne Landwechsel in einer Hackfrucht-Getreide-Rotation. Die Kalkung variiert in der Menge und zeitlichen Abfolge (Tab. 3).

Die experimentelle Prüfung der Kalkung erfolgt in Kombination mit unterschiedlichen Düngungsintensitäten.

Bemerkenswert an allen drei Dauerversuchen ist, dass über fast ein halbes Jahrhundert hinweg die Bewirtschaftungskombinationen nahezu unverändert beibehalten wurden. Zusätzlich zu den beschriebenen Dauerversuchen werden Sekundärauswertungen von Versuchs-ergebnissen aus einer Serie von Einzelversuchen zur Beurteilung des Einflusses der Kalkung auf die Bodenfruchtbarkeit genutzt. Mit Hilfe eines mehrstufigen Stichprobenverfahrens, bei dem die Stichprobenelemente stufenweise aus einer Grundgesamtheit entnommen werden, erhält man erwartungstreue Schätzungen.

Tab. 2: Versuchsdesign in Müncheberg und Braunschweig

Prüffaktoren	organische Düngung ^a [t ha ⁻¹ a ⁻¹ TM]	Müncheberg					Braunschweig		
		mineralische N-Düngung ^b [kg ha ⁻¹ a ⁻¹]					N1	N2	N3
		N1	N2	N3	N4	N5			
ungedüngt									
NPK	0	50	86	115	153	189	65	130	165
NPK + Stm 1	1,2	32	68	114	138	169	0	65	130
NPK + Stm 2	3,2	8	50	75	115	147	(0) ^c	0	65
NPK + Stroh	2,0	60	96	132	157	187	65	130	

^a zur Hackfrucht; ^b Mittel der Fruchtfolge; ^c ausschließlich organische Düngung; Stm = Stallmist

Tab. 3: Versuchsdesign in Livada

Prüffaktoren	organische Düngung ^a [t ha ⁻¹ a ⁻¹ Stm]	Livada							
		NPK Düngung [kg ha ⁻¹ a ⁻¹]			Kalkung [t ha ⁻¹ CaCO ₃] ^b				
		N	P	K	Ca1	Ca2	Ca3	Ca4	Ca5
ungedüngt	0	0	0	0	0	10	20	30	60
N	0	100	0	0	0	10	20	30	60
P	0	0	30	0	0	10	20	30	60
NP	0	100	30	0	0	10	20	30	60
NPK	0	100	30	50	0	10	20	30	60
NPK	0	150	45	75	0	10	20	30	60
Stm	20	0	0	0	0	10	20	30	60
NPK + Stm	20	100	30	50	0	10	20	30	60

^a Stallmist (Stm) zur Hackfrucht; ^b kumulative Ca-Düngung als CaCO₃ (1961-2002)
Ca2: 2 x 5 t ha⁻¹, Ca3: 2 x 10 t ha⁻¹, Ca4: 6 x 5 t ha⁻¹, Ca5: 6 x 10 t ha⁻¹

Ergebnisse und Diskussion

Kalkung, pH-Wert und Basensättigung

Nach Untersuchungen im Kalkdüngungsversuch in Livada besteht zwischen Kalkdüngereinsatz, pH-Wert und Basensättigung ein enger korrelativer Zusammenhang.

Die für den Standort optimale Basensättigung von 70-80% wird mit einer Kalkmenge von 0,8 t ha⁻¹ a⁻¹

CaCO₃ gewährleistet. Der pH-Wert stellt sich dann bei ca. 6,5 ein (Abb. 2). Hinzuweisen ist in diesem Zusammenhang auf den Umstand, dass die pH-Werte in Livada in Wasser gemessen wurden und damit im Mittel um 0,5 Einheiten höher liegen als die pH-Werte, die auf den Standorten in Braunschweig und Müncheberg in 0,01M CaCl₂-Lösung gemessen wurden (Finck, 1978). Die Ergebnisse bestätigen die

von zahlreichen Autoren dokumentierte chemische Wirkung des Kalkes. Diese wird durch den Zusammenhang zwischen dem pH-Wert als Maß für den Kalkversorgungszustand und der Verfügbarkeit der Nährstoffe dokumentiert (Schaffer, 1969; Huettl & Zoettl, 1993; Goulding & Blake, 1998; Blake et al., 1999; Matula & Pechova, 2002). Neben der in der Praxis seit Jahrzehnten üblichen Überprüfung der pH-Werte zur Einschätzung des Kalkbedarfes sind Untersuchungen der Kationenbelegung des

Sorptionskomplexes notwendig. Das ist wichtig, da der pH-Wert nicht immer mit einer optimalen Belegung des Austauschers mit Ca und Mg übereinstimmt. Das trifft vor allem für sandige Ackerstandorte mit geringer Pufferkapazität zu. Die deutliche Differenzierung in der Ca^{2+} -Belegung am Austauscher wird im Dauerversuch Müncheberg, wie hier ausgewählte Proben zeigen, durch die pH-Werte nur unzureichend repräsentiert (Tab. 4).

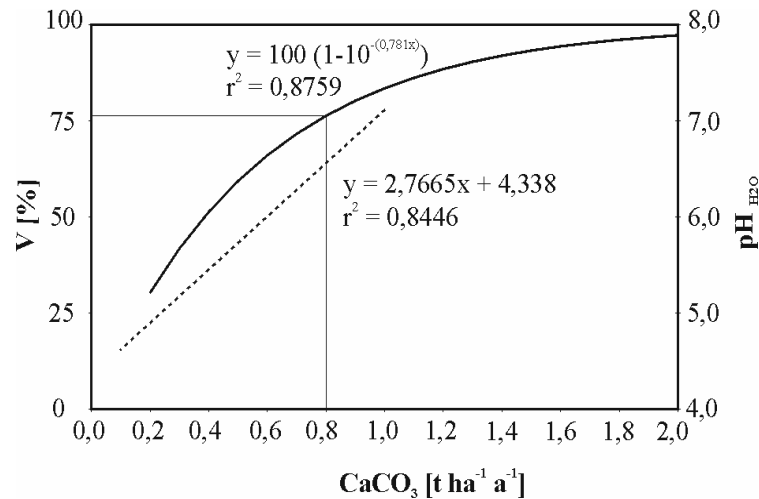


Abb. 2: Einfluss der Höhe der Kalkdüngung auf pH-Wert (.....) und Basensättigung (V) (—) im Dauerkalkungsversuch Livada (1961-2001, n = 138)

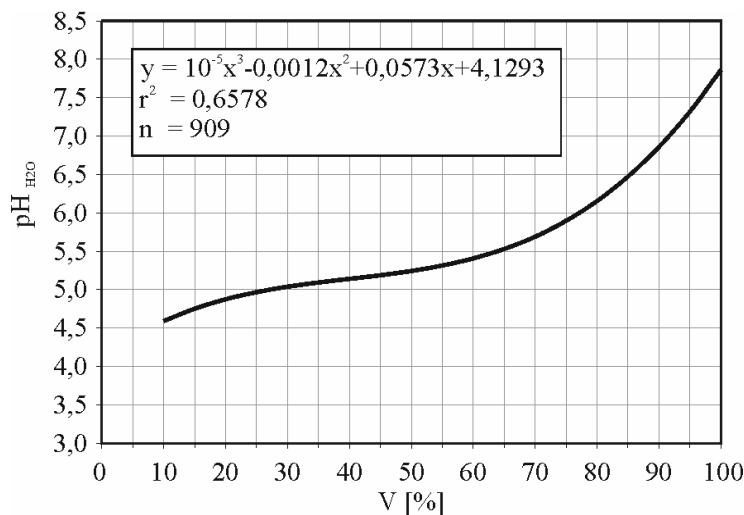


Abb. 3: Beziehungen zwischen Basensättigung und pH-Wert (Dauerkalkungsversuch Livada)

Die Funktionalität zwischen Basensättigung der Böden und dem pH-Wert ist im Bereich < 70 % für die Basensättigung auf dem Standort Livada sehr gering ausgeprägt, während bei Werten > 75 % eine

starke, nahezu lineare Abhängigkeit zum pH-Wert besteht (Abb. 3).

Tab. 4: Kationenbelegung und pH-Wert im Dauerversuch Müncheberg

Probe	H ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	pH
[meq kg ⁻¹ Boden]						
1	0,1	32,4	3,1	3,5	1,3	6,0
2	0,1	22,9	2,6	3,2	9,3	5,6
3	0,1	44,8	4,8	4,6	0,1	5,8
4	14,0	26,2	2,9	3,8	0,1	5,7
5	0,1	25,7	3,1	3,4	0,1	6,0

Die Ergebnisse des Dauerkalkungsversuches in Livada belegen eindeutig, dass Kationen-Nährstoffbilanzen notwendig sind. Sie gewährleisten, dass die nachfolgend aufgeführten Schwerpunkte bei der Düngerbemessung Berücksichtigung finden:

- Ersatz ausgewaschener Kationen (Ca, Mg), d. h. Ausgleich von bis zu 300 kg ha⁻¹ a⁻¹ Ca durch regelmäßige Kalkung!
- Erkennung von induziertem Mg-Mangel bei K-Überschuss (Weidetetanie!)
- Behinderung der Ca²⁺-Aufnahme bei hoher K⁺, Na⁺- bzw. NH₄⁺-Sättigung - Beeinträchtigung des Wurzelwachstums vor Sichtbarwerden der Ca-Mangelsymptome
- Reduzierung der Ca-induzierten Resistenz von Pflanzen gegenüber Krankheiten bei hoher K⁺-Sättigung (Ca aktiviert Abwehrgene und die Biosynthese von Phytoalexin und β -Thujaplicin)
- Zerstörung der Bodengare bei Σ Kationen (K⁺, Na⁺, NH₄⁺) > 15% am Bodenaustauscher.

Kationenbilanzen sind immer standortspezifisch zu bewerten, da sie eine Funktion von Bodenart und angebauter Fruchtart sind. Eine grobe Einschätzung der Kationenbelegung für sandige Ackerstandorte mit einer KAK < 50 meq kg⁻¹ sowie für lehmige mit einer KAK > 100 meq kg⁻¹ kann aus zahlreichen Literaturangaben abgeleitet werden (Tab. 5).

Tab. 5: Häufige Kationenbelegung der Bodenaustauscher

Substrat	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	H ⁺	KAK
[%]						[meq kg ⁻¹]
sandig	60-	15-	6-	< 3	10-	< 50
	65	20	8		15	
lehmig	70-	10-	2-	< 1	10-	> 100
	80	15	5		15	

Quellen:

<http://www.vabf.org/soilre1.php>; <http://www.vabf.org/soilre2.php>;
http://www.umassvegetable.org/soil_crop_pest_mgt/soil_nutrient

Kalkzustand, Nährstoffverfügbarkeit und Ertragshöhe

Der optimale Kalkzustand aus der Sicht der Nährstoffverfügbarkeit erfordert, neben der

Beurteilung der Kationenbelegung, die Einstellung optimaler pH-Werte. Niedrige pH-Werte im Boden sind häufig mit eingeschränktem Pflanzenwachstum und geringem Ertragsniveau verbunden. Die pH-Wirkungen sind allerdings sehr komplex und wirken direkt, aber auch indirekt auf die Verfügbarkeit der Nährstoffe und somit auf die Ertragsbildung (Haby, 2002; Makela-Kurto & Sippola, 2002; Schnug, 1982). Schlechtes Wurzelwachstum und verminderte Aufnahme der Kationen (besonders Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺) werden oft beobachtet (Magdorff & Barlett, 1980; Kopec & Mazur, 1999; Brauer et al., 2002; Meiwes et al., 2002; Mora et al., 2002; Summer & Yamada, 2002).

Untersuchungen im Braunschweiger und Müncheberger Nährstoffsteigerungsversuch zeigen deutlich den Einfluss des Düngungsmanagements auf Ertragshöhe, pH-Wert und C_{org}-Gehalt im Boden (Abb. 4 und 5). Die mineralische N-Düngung wirkt signifikant ertragssteigernd auf die Ertragshöhe bis zum N-Optimum. Organische Düngung erhöht primär den Humusgehalt des Bodens, während die Kombinationswirkung eine gegenläufige Tendenz für den pH-Wert erkennen lässt. Ansteigende Humusgehalte sind oft mit sinkenden pH-Werten verbunden. Besonders deutlich wird dieser Effekt auf dem sandigen Versuchsstandort Müncheberg mit geringer Pufferkapazität. Eine Gruppierung des Datenmaterials aus langjährigen Nährstoffsteigerungsversuchen nach vorgegebenen Klassengrenzen der Bodenmerkmale zeigt, dass Nährstoffmangel im Boden erhebliche Ertragsminderungen zur Folge haben kann (Abb. 6 und 7). Wie die Ergebnisse in Müncheberg zeigen, führt eine pH-Anhebung bis zum Optimum (pH 5,8-6,3) auf sandigen Ackerstandorten zu einem sichtbaren Ertragsanstieg. Versuchspartellen mit niedrigen pH-Werten (pH < 5,0) wiesen in dieser Versuchsauswertung außerdem minimale Humusgehalte sowie geringe Ton- und Schluffgehalte auf.

In einem Polarkoordinatendiagramm (Abb. 7) werden die multiplen Beziehungen zwischen Bodenparametern und Ertragshöhe von Winterweizen demonstriert. Die dargestellten Ergebnisse belegen, dass komplexe Wirkungsmechanismen die Ertragshöhe beeinflussen. Geringe Nährstoffdefizite im Boden können kompensiert werden, „nutrient mining“ führt allerdings zu drastischen Ertragsseinbußen infolge der Abnahme der Bodenfruchtbarkeit. Erst durch ein optimales Zusammenwirken der Bodenparameter werden hohe Erträge realisiert.

Die Verfügbarkeit von Makro- und Mikronährstoffen, Änderungen der Mobilität von Schwermetallen und dadurch auftretende toxische Effekte, insbesondere

von Al und Mn, müssen bei der Optimierung des Boden-pH-Wertes berücksichtigt werden.

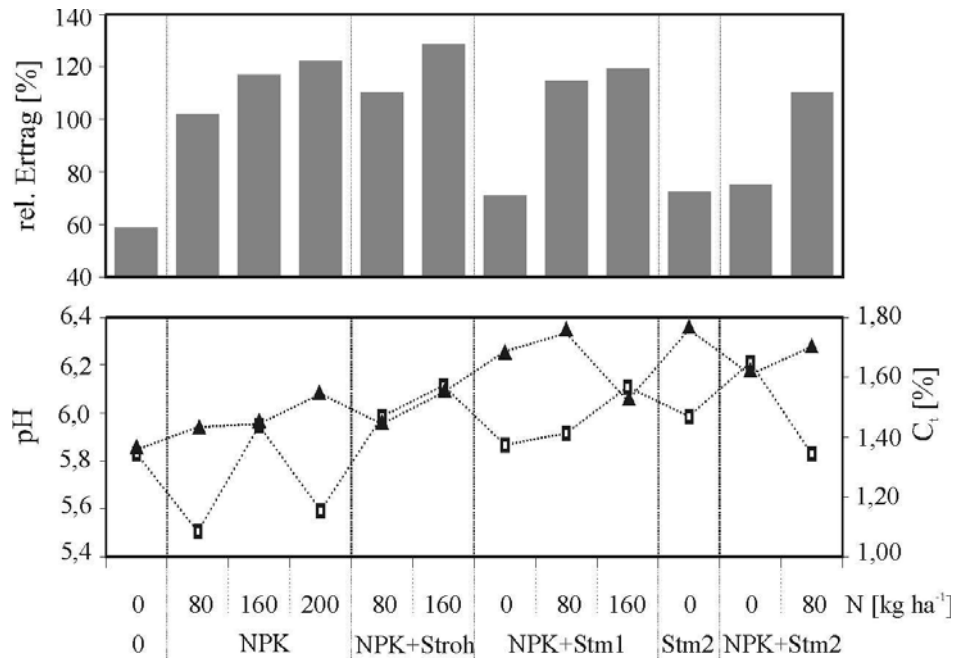


Abb. 4: C₁-Gehalte (▲) und pH-Werte (□) im Oberboden sowie relative Ertragshöhe (Mittel 2002-2004) im Dauerdüngungsversuch Braunschweig (Bodenprobenahme 2003)

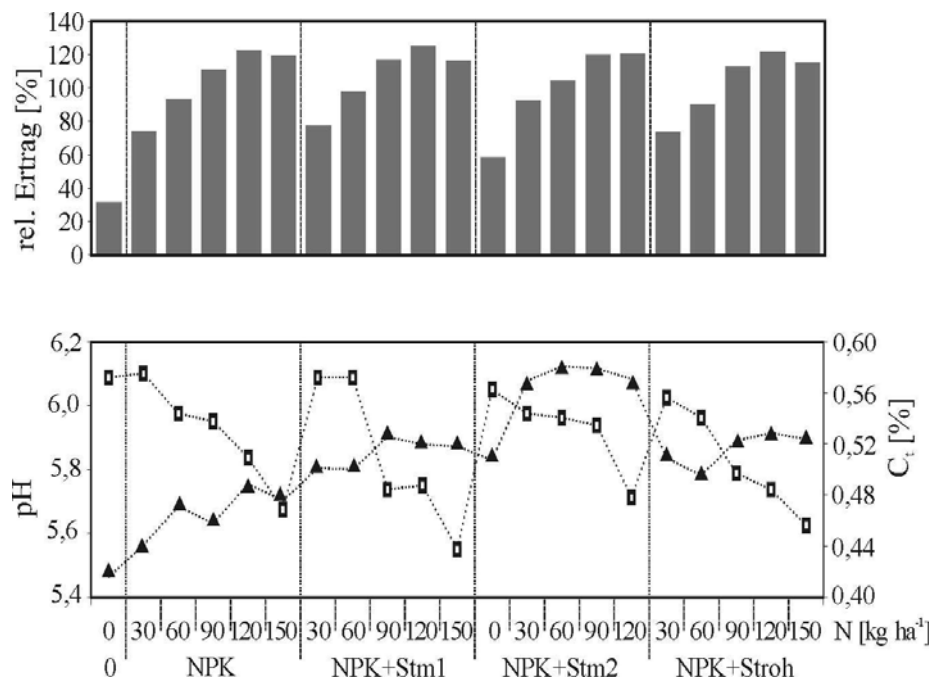


Abb. 5: C₁-Gehalte (▲) und pH-Werte (□) im Oberboden sowie relative Ertragshöhe (Mittel 1996-1998) im Dauerdüngungsversuch Müncheberg (Bodenprobenahme 1998)

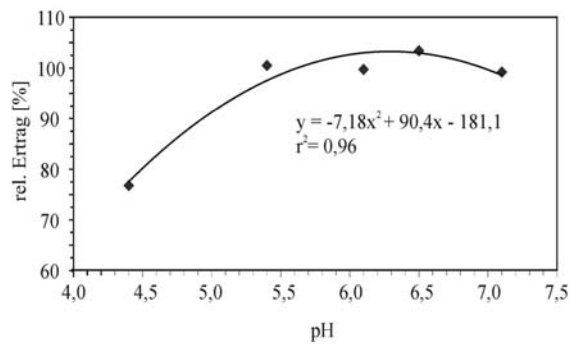


Abb. 6: Beziehungen zwischen pH-Wert und relativem Ertragsniveau bei Getreide (Sekundärauswertung von Dauerversuchen in Müncheberg, Klassifizierung des Datenmaterials mit n = 1229)

Nach mehr als 40 Versuchsjahren ist im Dauerkalkungsversuch Livada der Einfluss der Kalkung auf die P- und Mo-Konzentration in Winterweizen deutlich sichtbar.

Die Verfügbarkeit von P und Mo für ein optimales Pflanzenwachstum ist eine Funktion von verabreichter Kalkmenge und Boden-pH (Tab. 6).

Für die ökologischen Auswirkungen von Schwermetallgehalten in Böden sind pH-Wert sowie Konzentration und Spezifizierung der Schwermetalle in der Bodenlösung von Bedeutung, da damit sowohl die Mobilität als auch die Pflanzenverfügbarkeit eng korrelieren.

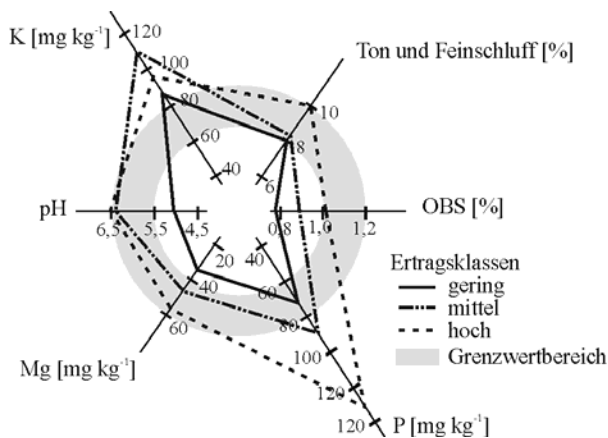


Abb. 7: Konstellation von Bodenfruchtbarkeitskennziffern innerhalb von Ertragsklassen für Winterweizen auf Braunerde (Nährstoffsteigerungsversuch Müncheberg)

Zum gleichen Ergebnis kamen auch Edmeades et al. (1983) in Kalkungsversuchen auf Grünland. Die beginnende Mobilisierung verschiedener Metalle wird wie folgt angegeben (zusammengefasst nach Schimming, 1990; Blake & Goulding, 2002):

Element	Cd	Mn, Zn	Ni, Co	Cu	As, Cr ^{III}	Pb, Hg
pH	6,5	6 - 5,5	5,5	4,5	4,5 - 4	4

Kalke sind aber auch Quellen für Schwermetalle, wie Untersuchungen von Kurtinecz (2004) belegen (Abb. 8). Steigende Zufuhr von Kalk (CaCO₃) erhöhte im Untersuchungszeitraum nicht nur die Ca-Gehalte und pH-Werte im Boden, sondern auch die Strontium (Sr)-Gehalte.

Tab. 6: Einfluss langjähriger Kalkung auf Boden-pH sowie P- und Mo-Gehalte von Winterweizen (Albic Luvisol, Livada, 2001 zur Bestockung)

	Kalkdüngung [t ha ⁻¹ a ⁻¹ CaCO ₃]				
	0	0,25	0,50	0,75	1,50
pH	4,6	5,6	6,5	6,8	7,4
P [%]	0,27	0,39	0,45	0,47	0,52
Mo [ppm]	0,14	0,28	0,61	0,63	0,77

Kalkzustand, organische Bodensubstanz und Bodenstruktur

Kalkung ist, neben der ausreichenden Versorgung der Böden mit organischer Substanz, eine der Schlüsselmaßnahmen landwirtschaftlicher Produktion zum Schutz der Bodenstruktur.

Bei unzureichender Kalkzufuhr vermindert sich die Basensättigung, Ca²⁺ und Mg²⁺ werden am Bodenaustauscher durch H⁺ und Al³⁺ ersetzt (Schachtschabel et al., 1989). Durch die Peptisation zerfallen die Strukturelemente (Aggregate) in ihre Grundbestandteile, d.h. Aggregatgefügeformen gehen in Einzelkornstruktur über. Konsequenzen sind Verdichtung und Verschlämzung des Bodens. Die durch Kalkung verbesserte Belegung der Bodenaustauscher mit Ca²⁺ und Mg²⁺ (Basensättigung) führt zur Erhöhung der Stabilität der Bodenaggregate (Bohne, 1991). Dichtlagernde Bodenteilchen flocken bei Kalkdüngergaben aus und tragen so zur Erhöhung der Wasserinfiltration bei (Schnug & Haneklaus, 2002; Schnug et al., 2004). Die Strukturverbesserung des Bodens bewirkt, dass die Ackerflächen im Frühjahr schneller abtrocknen und der Boden sich auf Grund des vergrößerten Porenvolumens schneller erwärmt. Für die Ausbildung einer guten Bodenstruktur sind komplexe Wirkungsmechanismen verantwortlich, die nur im Rahmen nachhaltiger Landnutzungs- und Bodenbewirtschaftungssysteme realisiert werden können. Nur ein Bodengefüge mit optimalen Regulationsfunktionen (Transport, Transformation, Speicherung) wird der Forderung nach Erhaltung der Ackerflächen in einem guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand gerecht.

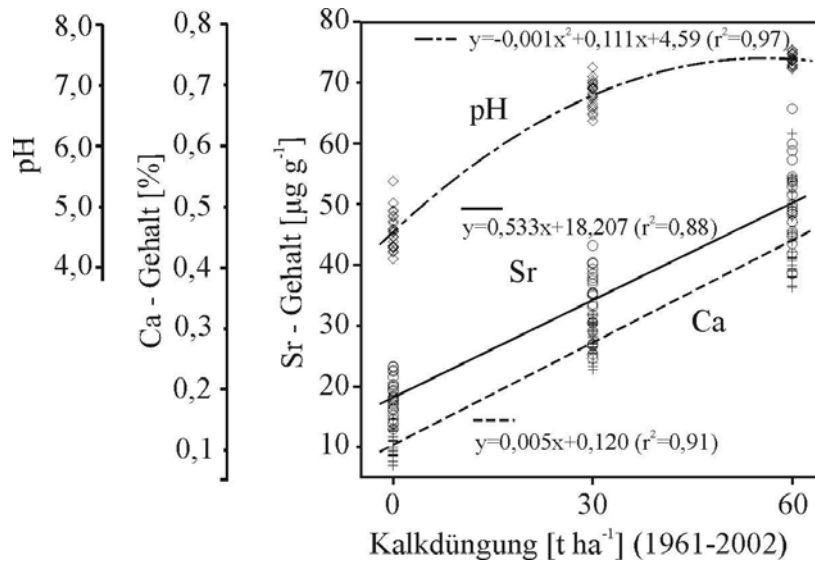


Abb. 8: Einfluss der Kalkung (kumulativ 1961-2002) auf pH-Wert sowie Sr- und Ca-Gehalte im Oberboden (Dauerkalkungsversuch Livada, Albic Luvisol)

Röntgen-computertomographische Untersuchungen einer mit dem Standort Müncheberg vergleichbaren Sand-Braunerde (SI3) (Abb. 9a) zeigen ein relativ dicht gelagertes Bodengefüge; die mittlere Lagerungsdichte beträgt $1,58 \text{ g cm}^{-3}$. Die Bodenprobe ist durch einen hohen Skelettgehalt (Steine, Kieskörner) gekennzeichnet, erkennbar als weiße Objekte in den Röntgenschnittbildern. Das Bodengefüge ist durch eine intensive Regenwurmtätigkeit geprägt; die Regenwurmgänge

sind dominierend vertikal ausgeprägt und als schwarze Strukturen in den Röntgenschnittbildern sowie in der 3D-Visualisation zu erkennen. Parallele Untersuchungen auf Löß-Parabraunerde (Ut3) (Abb. 9b) zeigen ein locker gelagertes Polyedergefüge mit einer mittleren Lagerungsdichte von $1,27 \text{ g cm}^{-3}$. Deutlich sind Aggregate unterschiedlicher Größenordnung, verantwortlich für die Stabilität des Bodengefüges, zu identifizieren (hellere Graustufen im Röntgenschnittbild).

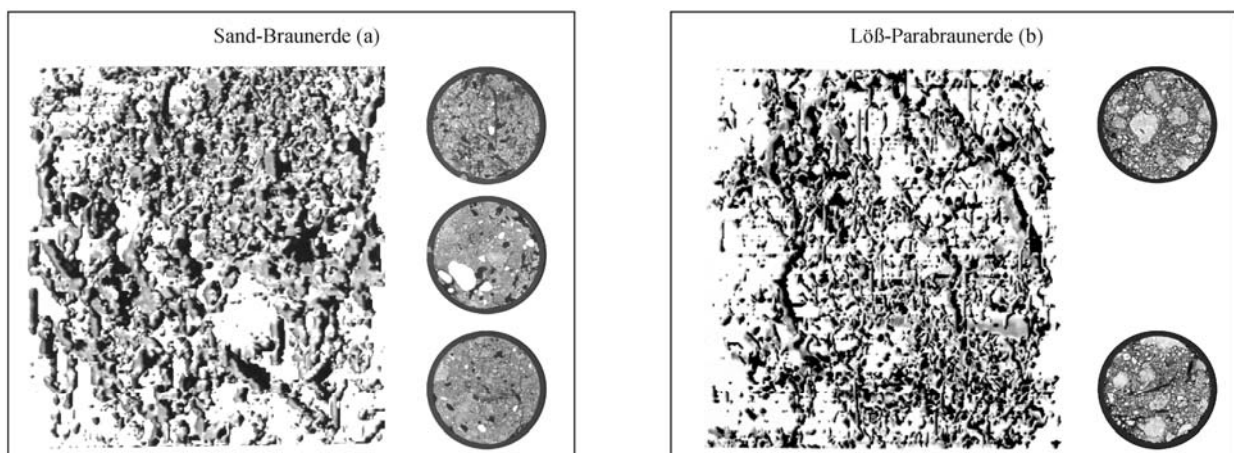


Abb. 9: 3D-Visualisation des Makroporensystems im Ap-Horizont einer Sand-Braunerde (a) und Löß-Parabraunerde (b), ergänzt durch ausgewählte Horizontalscheiben (Röntgenschnittbilder) zur Gefügebeurteilung (stehende Bodensäulen)

Das vertikal-kontinuierliche Makroporensystem, erkennbar in der 3D-Visualisation, ist eine Folge intensiver Regenwurmtätigkeit (Rogasik et al., 1994). Aufgrund der hohen Kontinuität und Konnektivität

des vertikalen Porensystems (Bioporen) ist ein hohes Infiltrationspotential gegeben.

Dem Wechselspiel von mikrobieller Biomasse, Humusgehalt, Aggregatbildung und Kalkung kommt

bei der Ausbildung optimaler Regulationsfunktionen im Boden eine entscheidende Bedeutung zu (Motta et al., 2002; Nohrstedt, 2002; Jongmans et al., 2003; Balabane, 2004). Es ist hinreichend bekannt, dass Kalkung die Netto-Mineralisation (Umsetzung von organischer Bodensubstanz) erhöht, aber auch wichtige Aggregatbildungsprozesse fördert. Anhand langfristiger Beobachtungsreihen in Livada konnte nachgewiesen werden, dass die Wasser-

infiltration in den Boden maßgeblich vom Gehalt des Bodens an organischer Substanz beeinflusst wird (Schnug & Haneklaus, 2002; Rogasik et al., 2001, 2004; Schnug et al., 2004). In der Versuchsvariante „NPK+Kalk+Stalldung“ wurden im Vergleich zu „NPK+Kalk“ deutlich höhere Infiltrationsraten gemessen (Abb. 10).

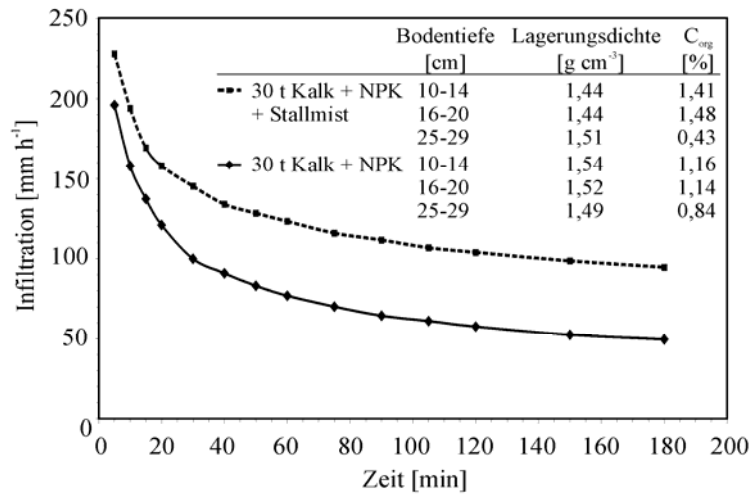


Abb. 10: Einfluss unterschiedlicher Düngungsmaßnahmen auf die Wasserinfiltration in das Bodenprofil (Dauerkalkungsversuch Livada, Albic Luvisol, September 2003)

Die anhand von Stechzylindern gemessenen geringeren Lagerungsdichten und höheren C_{org}-Gehalte im Versuchsprüfglied mit zusätzlicher Stalldungdüngung lassen darauf schließen, dass

aktivierte physiko-chemische Prozesse sowie eine hohe Regenwurmpopulation Porensysteme mit hoher Wegsamkeit in diesem Versuchsglied garantieren.

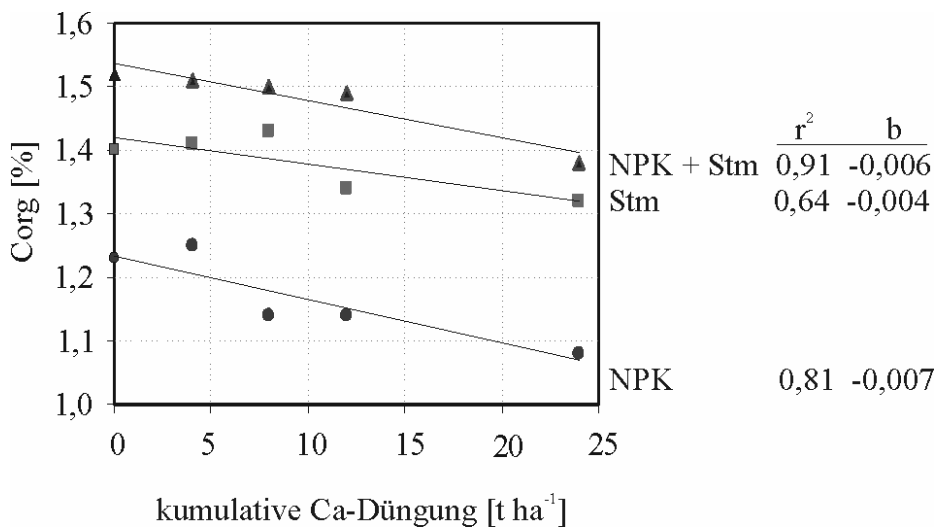


Abb. 11: Einfluß der Kalkung (kumulativ 1961-2002) auf den Gehalt des Bodens an organischem Kohlenstoff (Dauerkalkungsversuch Livada)

Die Untersuchungen zur Dynamik der C_{org} -Entwicklung in Abhängigkeit von der Kalkdüngung zeigen, dass besonders bei ausschließlicher NPK-Düngung hohe Kalkdüngergaben ein Absinken der Humusvorräte verursachen (Abb. 11).

Das agronomische Management muss diesen Sachverhalt unbedingt berücksichtigen. Im Vergleich zu alleiniger Mineraldüngung werden in Versuchspartzen mit Stalldungdüngung ansteigende Kalkmengen gemäß Thaer „als ein zersetzendes Mittel auf den Humus“ - deutlich besser abgepuffert.

Schlussfolgerungen

- Als Transformator und Speicher für Pflanzennährstoffe kommt dem Boden große Bedeutung zu. Mit dem Einstellen und der Gewährleistung von optimalen Bedingungen für Nährstoffe und Bodenazidität werden wichtige Forderungen zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit erfüllt und wesentliche Voraussetzungen für hohe Erträge geschaffen.
- Der Nährstoff „Ca“ ist von entscheidender Bedeutung für Pflanzenernährung und Bodenfruchtbarkeit. Ausgewaschene Ca-Ionen müssen ersetzt werden, deshalb sind Kationen-Nährstoffbilanzen zukünftig dringend notwendig. Dennoch ist der pH-Wert einer der wichtigsten und am häufigsten verfügbaren Kenngrößen des Bodens.
- Kalkung ist ein wesentlicher Faktor zur Erhaltung und Verbesserung der Bodenstruktur. Über die Infiltration geht die Bedeutung der Bodenstruktur weit über landwirtschaftliche Bereiche hinaus (schleichende Versiegelung der Ackerflächen).
- Die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit durch sachgerechte Kalkung ist eine Hauptaufgabe nachhaltiger landwirtschaftlicher Bodennutzung, aber auch ein wichtiger gesellschaftlicher Beitrag, denn „*Solum Divitiae Societatis*“.

Literatur

- Anonymous** (1995) Bodenkundliche Kartieranleitung, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Geologische Landesämter. 4. Auflage. 392 Seiten, ISBN 3-510-95804-7
- Balabane M, Plante AF** (2004) Aggregation and carbon storage in silty soil using physical fractionation techniques. *European Journal of Soil Science* 55: 415-427
- Blake L, Goulding KWT** (2002) Effects of atmospheric deposition, soil pH and acidification on heavy metal contents in soils and vegetation of semi-natural ecosystems at Rothamsted Experimental Station, UK. *Plant Soil* 240: 235-251
- Blake L, Goulding KWT, Mott CJB, Johnston AE** (1999) Changes in soil chemistry accompanying over

more than 100 years under woodland and grass in Rothamsted Experimental Station, UK. *Eur J Soil Sci* 50: 401-412

Bohne H (1991) Stabilität des Bodengefüges unter Einfluss der Bodennutzung -Voraussetzungen, Anforderungen, Möglichkeiten. *Berichte über Landwirtschaft, Sonderheft 204, Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit, Band 2 Bodengefüge*, 43-54.

Brauer D, Ritchey D, Belesky D (2002) Effects of lime and calcium on root development and nodulation of clovers. *Crop Sci* 42: 1640-1646

Edmeades DC, Smart CE, Wheeler DM, Rys G (1983) Effects of lime on the chemical composition of ryegrass. *New Zealand J of Agric Res* 26: 473-481

FAO (1993) World soil resources – an explanatory note on the FAO world soil resources map. *World soil resources reports*, 66 rev.1, 64 pp

Finck A (1978) Pflanzenernährung in Stichworten. Hirt Verlag, Kiel

Goulding KWT, Blake L (1998) Land use, liming and the mobilization of potentially toxic metals. *Agric Ecosyst Environ* 67: 135-144

Haby VA (2002) Soil fertility and management of acid Coastal Plain soils for crop production. *Commun Soil Sci Plant Anal* 33: 2497-2520

Howell J (2002) Soil Basics: Part II, Chemical Properties of Soil: http://www.umassvegetable.org/soil_crop_pest_mgt/soil_nutrient_mgt/soil_basics/index2.html

Huettl RF, Zoettl HW (1993) Liming as a mitigation tool in Germany declining forests. *For Ecol Manage* 61: 325-338

Jongmans AG, Pulleman MM, Balabane M, Oort F van, Marinissen JCV (2003) Soil structure and characteristics of organic matter in two orchards differing in earthworm activity. *Applied Soil Ecology* 24: 219-232

Kopec M, Mazur K (1999) The effect of fertilization and liming on the element composition in meadow sward. *Rostl Vyroba* 45: 101-106

Kurtinecz (2004) unveröffentlichtes Arbeitsmaterial

Magdoff FR, Bartlett RJ (1980) Effect of liming acid soils on potassium availability. *Soil Sci* 129, 1: 12-14

Makela-Kurtto R, Sippola J (2002) Monitoring of Finish arable land: changes in soil quality between 1987 and 1998. *Agricultural and Food Science in Finland* 11: 273-284

Matula J, Pechova M (2002) A simplified approach to liming and its evaluation. *Commun Soil Sci Plant Anal* 33: 2989-3006

Meiwes KJ, Mindrup M, Khanna PK (2002) Retention of Ca and Mg in the forest floor of a spruce

stand after application of various liming materials. For Ecol Manage 159: 27-36

Mora ML, Cartes P, Demanet R, Cronforth IS (2002) Effects of lime and gypsum on pasture growth and composition on an acid Andisol in Chile, South America. Commun Soil Sci Plant Anal 33: 2069-2081

Motta ACV, Reeves DW, Thoughton JT (2002) Tillage intensity effects on chemical indicators of soil quality in two coastal plain soil. Commun Soil Sci Plant Anal 33: 913-932

Nohrstedt HO (2002) Effects of liming and fertilization (N, PK) on chemistry and nitrogen turnover acid forest soils in SW Sweden. Water Air and Soil Pollut 139: 343-354

Rogasik H, Joschko M, Brunotte J (1994) Nutzung der Röntgencomputertomographie zum Nachweis von Gefügeveränderungen durch Mulchsaat. Mitt Dtsch Bodenkundl Ges 73: 111-114

Rogasik J, Panten K, Schnug E, Rogasik H (2004) Infiltration Management Factors. Encyclopedia of Soil Science
<http://www.dekker.com/servlet/product/productid/E-ESS>

Rogasik J, Schroetter S, Schnug E, Kundler P (2001) Langzeiteffekte ackerbaulicher Maßnahmen auf die Bodenfruchtbarkeit. Arch. Acker- Pfl. Boden., 47: 3-17

Schachtschabel P, Blume HP, Brümmer G, Hartge KH, Schwertmann U (1989) Lehrbuch der Bodenkunde, 12. bearbeitete Auflage, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 491 pp

Schaffer G (1969) Einfluß der Kalkung auf verschiedene Bodeneigenschaften. Z Kulturtechn u Flurberei 10: 301-312

Schimming CG (1990) Belastung mit Metallen. In: Blume HP (ed.) Handbuch des Bodenschutzes. 258-298

Schnug E (1982) Untersuchungen zum Einfluss bodenversauernder Düngung auf die Spurennährstoff-Versorgung von Kulturpflanzen. Diss. Agrarwiss. Fak., Univ. Kiel.

Schnug E, Haneklaus S (2002) Landwirtschaftliche Produktionstechniken und Infiltration von Böden: Beitrag des ökologischen Landbaus zum vorbeugenden Hochwasserschutz. Landbauforsch Völkenrode 52, 4: 197-203

Schnug E, Rogasik J, Panten K, Paulsen HM, Haneklaus S (2004) Vorbeugender Hochwasserschutz – Ökologischer Landbau erhöht die Versickerungsleistung von Böden. Ökologie & Landbau 132, 4: 53-55

Schonbeck M (2002) Soil cation nutrient balancing in sustainable agriculture.

<http://www.vabf.org/soilre1.php>

Schonbeck M (2002) Does my soil need cation nutrient balancing?

<http://www.vabf.org/soilre2.php>

Sumner ME, Yamada T (2002) Farming with acidity. Commun Soil Sci Plant Anal 33: 2467-2496

Research Aspects for Crop Salt Tolerance under Irrigation with Special Reference to Root Environment

Uwe Schleiff

International Office for Irrigation & Salinity – Fertilizers & Crops – Soils & Environment; D-38289 Wolfenbüttel; PO Box 1934

Dedicated to my dear colleague Prof. Dr. Dr. Ewald Schnug on the occasion of his 50th birthday

Summary

Due to the lack of good quality water for human consumption and industry, in many countries irrigated agriculture is exposed to increasing pressure to expand the use of brackish and even high-saline waters for crop production. The application of lower quality waters requires special management practices, which are not yet fully understood with respect to optimization of plant growth on saline soils. Generally, the evaluation of crop salt tolerance and the calculation of irrigation water requirement for brackish water is based on crop yields related to the average salinity of the rooted soil layer (FAO and USDA). However, this concept often fails when brackish water is often applied frequently (e.g. drip irrigation). The approach presented in this paper considers not only the effect of water applications on the vertical salt movement (salt leaching), but also reflects the effect of lateral water and salt movement of saline soil solutions induced by roots, which differ in their root morphology. This lateral flow of water is caused by the transpiration of plants, which results in a flow of distant saline soil solution directed to the water absorbing root surface. As most salts are excluded from root uptake, they usually accumulate in the rhizospheric soil (soil in direct contact with the root surface including the cylinder formed by root hairs). A concentration gradient between distant and rhizospheric soil solution develops, the rhizospheric soil solution may become several times more saline than the average or distant soil solution (bulk soil). The effects of dynamic processes between bulk and rhizospheric soil under irrigation and with respect to root morphology are not yet understood. It is postulated that roots forming a large rhizocylinder (deeply rooting, high rooting density, long root hairs) are contributing to a higher salt tolerance as roots forming a smaller rhizocylinder. It can be expected that a more profound understanding of these processes may essentially contribute to optimize brackish water irrigation and to define goals for breeding more salt tolerant crops.

Keywords: *brackish water, irrigation, rhizosphere, root morphology, root water uptake, saline soils, salt tolerance, soil salinity, soil water availability*

Zusammenfassung

In vielen Ländern der Trockengebiete führt der zunehmende Mangel an Wasser guter Qualität für den

menschlichen Konsum und die Industrie zu verstärktem Druck auf die Bewässerungslandwirtschaft, auch Wasser minderer Qualität wie Brackwasser und salzhaltige Abwässer in der Pflanzenproduktion einzusetzen. Der Einsatz von Bewässerungswasser minderer Qualität erfordert spezielle Managementpraktiken, die unter anderem auch dem Pflanzenwasserbedarf, der Wasserqualität, Bodeneigenschaften und der Salztoleranz der Pflanze Rechnung tragen. Nach FAO und USDA wird die Abschätzung des Wasserbedarfes bei Bewässerung mit Brackwasser im Wesentlichen auf Grund der Beziehung zwischen Ertragsverlusten (Relativerträge) und der durchschnittlichen Versalzung der Wurzelzone eines Bodens ermittelt. Dieses Konzept ergibt jedoch in vielen Fällen unbefriedigende Resultate, insbesondere wenn in häufigen kleineren Gaben bewässert wird (drip irrigation). Das hier vorgestellte Konzept berücksichtigt dagegen nicht nur die Wirkung von Bewässerung auf die vertikale Wasserbewegung im Boden (Salzauswaschung), sondern analysiert darüber hinaus auch die Bedeutung der lateralen Bewegung salzhaltiger Bodenlösung, wie sie durch den Wasserentzug von Wurzeln unterschiedlicher Morphologie erfolgt. Antrieb dieser lateralen Wasserbewegung ist die Transpiration, die einen Fluss salzhaltiger Bodenlösung aus dem wurzelfernen Boden in Richtung auf Wasser aufnehmende Wurzeloberflächen auslöst. Da der überwiegende Teil der Salze von der Aufnahme durch die Wurzel ausgeschlossen wird, reichern sie sich im wurzelnahen Boden ('Rhizoboden': Boden in unmittelbarem Wurzelkontakt und innerhalb des Wurzelhaarzylinders) an, so dass ein Konzentrationsgradient zwischen wurzelnaher und wurzelferner Bodenlösung entsteht. Die Salzkonzentration wurzelnaher Bodenlösungen kann daher im Vergleich zur wurzelfernen Bodenlösung um ein Vielfaches höher liegen. Die Bedeutung dieser dynamischen Prozesse zwischen wurzelnahem und wurzelfernem Boden unter dem Einfluss von Bewässerung und unter Berücksichtigung wurzelmorphologischer Eigenschaften wird bis heute nur ansatzweise verstanden. Es wird postuliert, dass Eigenschaften wie Wurzelbehaarung, Durchwurzelungstiefe und -dichte, die die Ausbildung des Rhizozylinders bestimmen, auch wesentlich zur Salztoleranz von Pflanzen beitragen. Ein vertieftes Verständnis von Wechselwirkungen zwischen Wurzeln und Boden

wird wesentlich zur Optimierung der Bewässerung mit Brackwasser und zur Festlegung von Züchtungszielen für salztolerantere Pflanzen beitragen.

Schlagwörter: *Bewässerung, Bodenversalzung, Brackwasser, Rhizoboden, Salztoleranz, Wasseraufnahme, Wasserverfügbarkeit, Wurzelmorphologie*

Introduction

Worldwide, but especially in most of the developing countries, irrigated agriculture plays an increasing role for the food supply of a growing population. According to FAO it is assumed that a share of about 30% of the irrigated area suffers from salinity problems, which corresponds to an area of more than 100 million ha worldwide. For some countries the percentage of salt-affected land is even higher: for Egypt, Pakistan and Iraq 35 to 50% of the irrigated land is considered as saline. It is estimated that annually 10 million ha of irrigated land are abandoned because of salinity problems (Hamdy, 1999). A land resource of 1 billion ha (saline deserts, coastal soils) can be developed for food production, when more salt-tolerant plants such as halophytic species could be cultivated (Boer & Ghais, 1999).

In the near future the share of low quality brackish/saline waters and saline soils in irrigated agriculture will strongly increase, as in many developing countries there is a strong pressure on good quality water sources. This pressure comes from competing users demanding a high water quality such as growing industries and increasing number of households due to population growth. The competition for fresh water between nations may even cause military threats as e.g. between India and Bangladesh for water of the Ganges River, Farakka Barrage (Schleiff, 1999; Shiva, 2002).

Several countries, where the fresh water supply of a growing population became already critical, follow the strategy to replace good quality waters by marginal waters (brackish as well as treated waste water) for agriculture (Kuck, 1999). So, plant growth under saline soil conditions and salt tolerance of irrigated crops is not just as an academic exercise, but this research is of high practical relevance for agriculture and environment of many developing countries.

Research in recent decades already achieved distinct progress in the application of saline waters for crop irrigation. One significant indicator for the growing experience is the adjustment of critical ranges for the evaluation of irrigation water quality (Tab. 1). In 1954

EC-values of waters in the range of 0.75-2.25 dS m⁻¹ were considered as highly saline, whereas almost 50 years later in 1992 water of 10-25 dS m⁻¹ is classified as highly saline.

Tab.1: Evaluation of irrigation water salinity changing within time

Classification	EC of water in dS m ⁻¹ (=mS cm ⁻¹)		
	USDA 1954	FAO 1976	FAO 1992
non-saline	<0.25	<0.75	<0.7
slightly saline			0.7 - 2.0
moderately saline	0.25 - 0.75	0.75 - 3.0	2 - 10
highly saline	0.75 - 2.25	>3.0	10 - 25
very highly saline	2.25 - 5.0		25 - 45
sea water:	>45 dS m ⁻¹		

Aspects of salinity management in irrigated agriculture

The safe use of saline waters for sustainable crop production is a challenge that has to consider besides technical aspects economic, climatic, social and hydro-geological conditions (Hamdy, 1995). Consequently there is no single way to combat damages by salinity at field level as well as at project and regional level.

In Fig. 1 the most important technical and environmental aspects that may contribute to affect saline agriculture are summarized. It may serve as a useful tool to identify possible causes of detrimental effects of salinity under defined field conditions. Based on the results of such a complex analysis, a bundle or single measures to improve the present situation can be elaborated.

Additionally, Fig. 1 demonstrates the complexity of the problem of salinity, which can not be addressed in total in the presented contribution. Nevertheless, Fig. 1 reflects innovative ideas and research activities in this field of research and summarizes strategies to improve management of crop growth under saline conditions.

The main emphasis of current research activities with respect to crop salt tolerance focuses on the rhizosphere (rhizospheric soils), the contact zone between plant and soil, at the soil/root-interface. Based on the presented research concept for further progress in the management of saline soil breeding programmes for crop salt tolerance (root morphology) might be initiated.

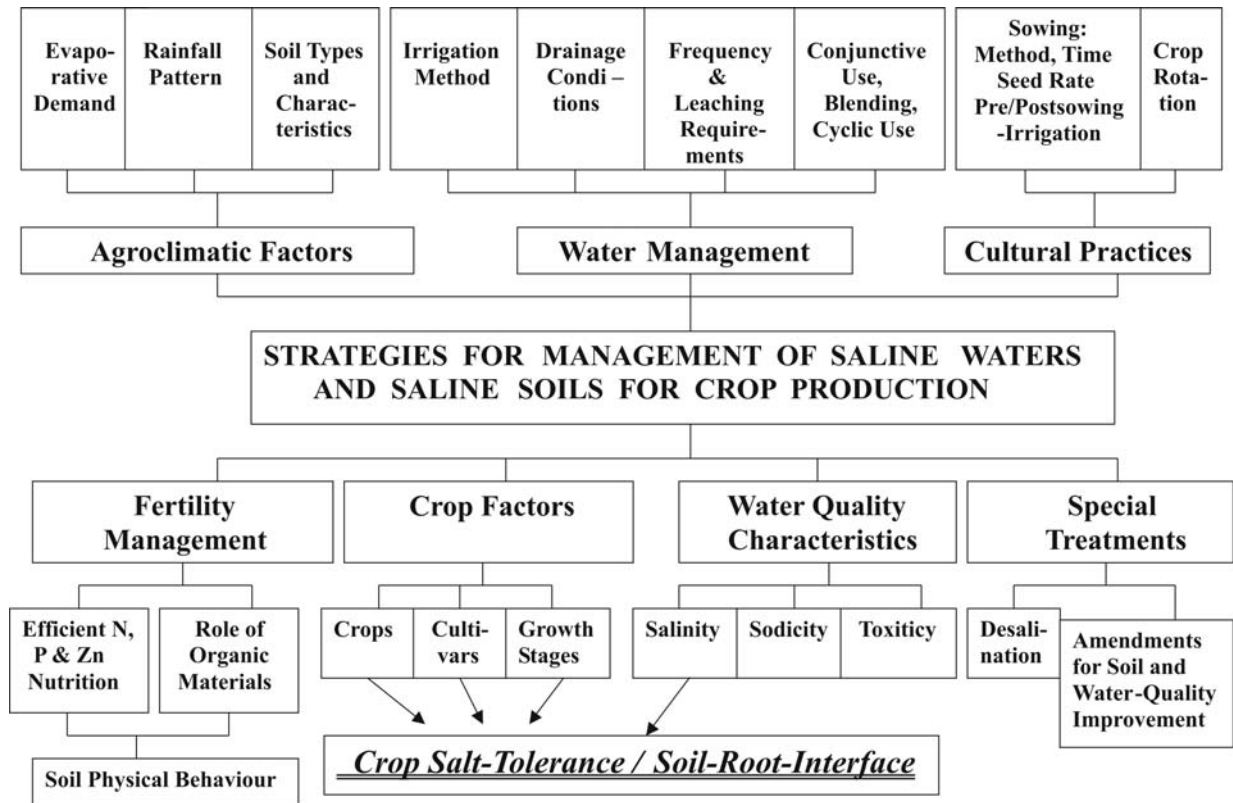


Fig. 1: Management strategies for saline agriculture (Hamdy, 1995; modified after Schleiff)

Rootzone salinity for the evaluation of salt tolerance of crops

The presented evaluation of crop salt tolerance for irrigated agriculture considers the mean root zone salinity expressed as EC_{se} (electrical conductivity of the soil saturation extract in dS m⁻¹) as a key parameter for plant growth. The classification of salinity presented in Tab. 2 summarizes the results gained from systematic field data analysis worldwide (Hoffman, 1981).

In agronomic terms, the salt tolerance of crops is appraised on basis of the relative yield on a saline soil compared with its yield on a non-saline soil under otherwise comparable growth conditions (van Hoorn & van Alphen, 1994). The relative crop yield (Y in %) at a given average soil salinity (EC_{se}) for a spe-

cific crop can be calculated according to the following equation (Maas & Hoffman, 1977):

$$(1) Y = 100 - b (EC_{se} - a)$$

with:

‘b’ = the yield loss in % per unit increase of soil salinity EC_{se} (1 dS m⁻¹)

‘a’ = soil salinity threshold value: EC_{se}, where yield decrease starts

Both values ‘a’ and ‘b’ are crop specific and were published by Maas & Hoffman (1977) and Ayers & Westcot (1985). This approach can be helpful to compare the relative advantage of crops or cropping patterns with respect to yield and economic value.

Tab. 2: The threshold of average rootzone critical salinity values for plant growth of different species (Rhoades et al., 1992; modified after Schleiff)

Crop sensitivity against salinity	Critical EC _{se} value (dS m ⁻¹)	Crop plant
sensitive	0 - 1.5	bean, pea, onion, carrot, orange, peach, clover
moderately sensitive	1.5 - 3.0	maize, broad bean, alfalfa, tomato, grape
moderately tolerant	3.0 - 6.0	sorghum, soybean, wheat, red beet
tolerant	6.0 - 10.0	barley, cotton, sugar beet, date palm
very tolerant	>10	Atriplex, Agropyron, Kochia, Salsola species
no plant growth	>30 - 40	estimated values

As crops differ significantly in their salt tolerance, they endure different levels of soil salinity. If these crop specific levels are exceeded e.g. due to salt import by saline irrigation water, yield losses or even crop failure may occur. Consequently, the permanent control of soil salinity and avoiding excessive values is a key activity and prerequisite for sustainable use of saline soils and brackish waters.

Leaching of salts from the rooted soil layer by excessive soil water percolating into deep and non-rooted sub-soil is the main activity to manage saline crop production. It is the objective of a professional irrigation management to determine the amount of water required for an economic crop yield (crop water requirement, CWR in mm) and to control soil salinity at a crop and yield specific level.

There is a basic need for the quantitative determination of the water requirement for salt leaching from the root-zone (LR = leaching requirement), which is expressed as a fraction (LF = leaching fraction: LF = water leached [mm]/water applied [mm]) of the crop water requirement (CWR in mm) determined for non-saline conditions and which follows the following equation:

$$(2) \text{ LR} = \text{LF} = \text{EC}_i / \text{EC}_{dw} = \text{W}_{dr} / \text{W}_i$$

with:

$$\begin{aligned} \text{EC}_i &= \text{EC of irrigation water in } \text{dS m}^{-1} \\ \text{EC}_{dw} &= \text{EC of drainage (=percolation) water} \\ &\quad \text{in } \text{dS m}^{-1} \\ \text{W}_i &= \text{applied irrigation water in mm} \\ \text{W}_{dr} &= \text{percolated drainage water in mm} \end{aligned}$$

The presented approach takes the EC_i of the applied irrigation water into consideration, a value, which needs to be available, and the EC_{dw} of the drainage water, which can be accepted according to the salt-tolerance of the crop and which can be assessed from Tab. 3.

Tab. 3: Tolerated salt concentrations of drainage waters (EC_{dw} of soil solution below rootzone) for crops of different salt-tolerance

Salt-tolerance of crop	tolerated EC_{dw} (dS m^{-1})
sensitive	4 - 8
moderately tolerant	8 - 16
tolerant	16 - 24
halophytes	24 - 50

Example: the LF for a maize crop (moderately tolerant: $\text{EC}_{dw} = 10 \text{ dS m}^{-1}$) under irrigation with slightly saline irrigation water ($\text{EC}_i = 2.0 \text{ dS m}^{-1}$) is 0.2 (2/10) resp. LR = 20% of the crop water requirement for non-saline conditions. When the CWR is 600 mm per season, an LR of 120 mm has to be applied to control soil salinity, which sums up to a total of 720 mm per season.

Soil salinity under controlled irrigation with saline water is, however, never homogeneous within the rooted soil layer as assumed in Tab. 2. When irrigation follows the rules to cover the CWR and the LR, a gradient of soil salinity develops, which increases from the surface versus the bottom layer of the rooted soil. This gradient is the result of leaching processes, which differ in the various soil layers of the profile and can be calculated according to an approach presented more detailed by Ayers & Westcot (1985).

This approach does not take into account the root-zone as a 1-layered profile, but as a 4-layered profile, where the root water uptake follows a pattern reflecting rooting density. The top one-quarter is expected to contribute 40%, the lowest quarter only 10% of the total CWR:

- 40% from the top one-quarter
- 30% from the second quarter
- 20% from the third quarter
- 10% from the lowest quarter

The gradient of soil water salinity ($\text{EC}_{fc} = \sim \text{EC}_{dw}$) for each quarter of the rootzone can be calculated, when the effect of soil water extraction from the different soil layers on the LF from each layer is considered quantitatively.

The consequences of a stepwise calculation of salt-leaching on soil water salinity for a given situation are demonstrated in Fig. 3. On average soil water salinity in the whole rooted soil is about 6 dS m^{-1} in both cases as calculated from EC_{dw} of the relevant layers:

(3) 1-layer-profile:

$$(\text{EC}_i + \text{EC}_{dw})/2 = (2 + 10)/2 = \underline{6.0 \text{ dS m}^{-1}}$$

4-layer-profile:

$$(\text{EC}_{dw0} + \text{EC}_{dw1} + \text{EC}_{dw2} + \text{EC}_{dw3} + \text{EC}_{dw4})/5 =$$

$$(2 + 3 + 4.8 + 8 + 12)/5 = \underline{5.96 \text{ dS m}^{-1}}$$

When the evaluation of salinity is done for the 4-layered profile, it is obvious that the salinity of the upper 3 layers will be significantly lower than for the 1-layer profile. This means that salinity stress to crops tends to be overestimated when soil water salinity evaluation is based on a 1-layered profile.

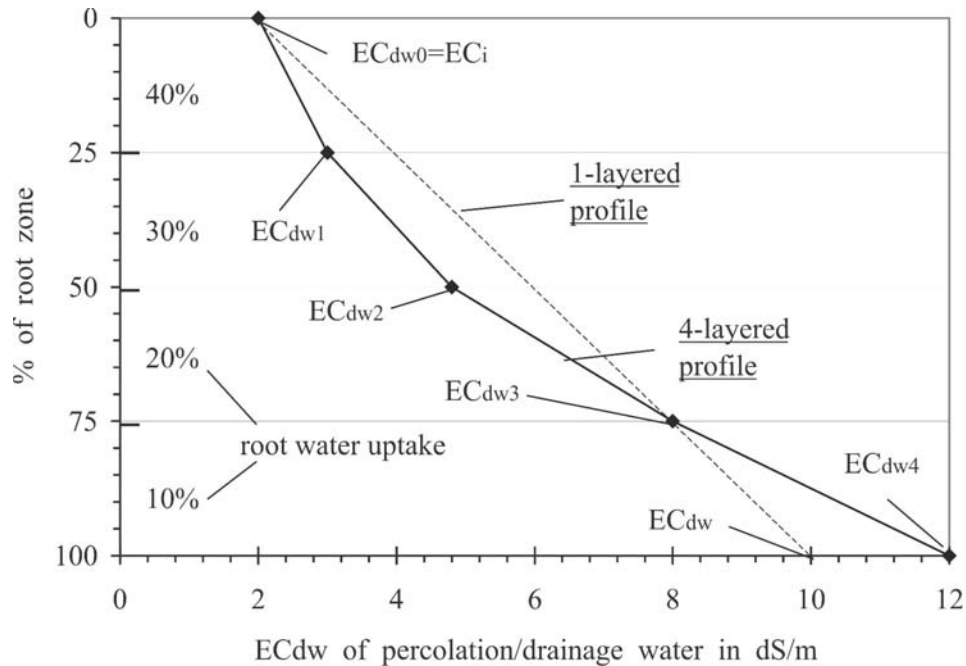


Fig. 2: Soil salinity developing after long-term use of saline irrigation water ($EC_i = 2 \text{ dS m}^{-1}$) in a 4-layered soil profile root zone as compared to a 1-layered profile

When the salinity of soil water (EC_{dw}) in a soil layer is known, soil salinity (EC_{se}) can be calculated by dividing EC_{dw} by 2 for medium textured soils and by dividing EC_{dw} by 4 with sandy soils:

- (4) Loamy soil: $EC_{se} = EC_{dw}/2 = 6/2 = 3 \text{ dS m}^{-1}$
 Sandy soil: $EC_{se} = EC_{dw}/4 = 6/4 = 1.5 \text{ dS m}^{-1}$

Under practical field conditions salinity values of the percolating soil water often deviates from the calculated concentrations. This deviation reveals that not all soil water, which percolates through a profile also participates in salt leaching. The reduced leaching efficiency comes from the fact that part of the soil water entering a soil layer does not mix with the soil solution. The leaching efficiency coefficient (f_l) was introduced to take leaching inefficiency into consideration. Here, f_l tends to affect water requirement for salt leaching more on heavy soils (soil water bypassing in large pores and cracks, when dry: e.g. f_l 0.5 to 0.8) than on medium or sandy textured soils under frequent irrigation (e.g. f_l 0.9 to 1.0). More details are presented by van Hoorn & van Alphen (1994).

Doubtless the 4-layers-concept simulates the actual vertical salt distribution under controlled irrigation better than the simpler 1-layer-concept and thus contributes to improve the calculation of the amount of water required for effective leaching.

The water requirement to keep soil salinity at a crop specific level is also affected by the irrigation technique. Experience shows that LF is often lower under high-frequency drip irrigation (daily or more) than

under low-frequency irrigation according to the following equation:

$$(5) \quad LF = EC_i / (2 * \max EC_{se})$$

whereby $\max EC_{se}$ defines the theoretical maximal EC_{se} when the yield potential is zero, which means that the crop ceases. This value is high ($\sim 25\text{-}30 \text{ dS m}^{-1}$) for salt tolerant plants (barley, sugar beet, cotton, date palm) and low ($5\text{-}10 \text{ dS m}^{-1}$) for salt sensitive plants (groundnut, phaseolus beans, pepper, orange, strawberry; Ayers & Westcot, 1985).

Basically, the concept of high frequency irrigation at smaller application rates assumes a lower salinity stress to plants as changes in soil osmotic and matrix water potential between irrigation intervals are smaller. However, there are cases where this concept failed. Pasternak et al. (1986) reported from field experiments with tomatoes drip irrigated with water of 10 dS m^{-1} that tomato yields were 20% lower when daily irrigated as compared to an irrigation cycle of 2 days with the same total water quantity.

Similar results were found in pot experiments with maize irrigated with water of 5.3 dS m^{-1} (Schleiff, 1983a). Yields were 25% higher when water was applied every 3 days than on a daily basis. Higher chloride contents of leaves under the daily irrigation cycle indicated that plants were exposed to higher soil salinity stress. The results reveal that the concept to reduce salinity stress of plants by frequent irrigations is not generally valid. This further shows that not all mechanisms of water acquisition from saline soils are fully understood.

Horizontal salt distribution around plant roots

The presented overview has shown so far that there exists a theoretically clear and generally accepted concept for saline crop irrigation and its effects on bulk soil salinity, plant growth and crop yield. The concept even considers the effects of salinity on root water uptake rates following changes in rooting density, which usually decreases with soil depth and which affects the leaching of salts.

This concept only considers the vertical movement of soil water and dissolved salts, which predominates at soil water contents exceeding field capacity and being the key process for salt leaching. It does not take into account the lateral movement of soil water and salts, which predominates during periods of soil water uptake by plant roots following irrigation. Leaf transpiration is the driving force that initiates the lateral flow of water from a distance into the rhizosphere. Water and nutrients are taken up by roots, whereas most salts are excluded from uptake. Consequently during periods of water depletion, salts accumulate in the soil solution of the rhizosphere. The effect of this basic process within irrigation cycles on shoot water supply has been discussed earlier (Schleiff, 1982a).

Riley & Barber (1970) and Sinha & Singh (1976) first observed an accumulation of easily soluble salts around the roots of soybeans and maize. From field experiments with onions in Saudi Arabia using drainage waters of different salinities (2.4 to 8 dS m⁻¹) Schleiff (1979, 1980, 1981a) concluded that salt accumulation in the rhizosphere is not unlimited. In pot experiments with maize, barley and sugar beets it was shown that the degree of salt accumulation in the rhizospheric soil solution might be plant specific. For young maize plants representing a less salt-tolerant species a maximum osmotic potential of about -0.8 to -0.9 MPa cannot be exceeded (Schleiff, 1981b). Using micro suction cups, Vetterlein & Jahn (2002) confirmed this critical value for the rhizospheric soil solution of young maize roots. Using a specific vegetation technique Schleiff (1987a) determined for more salt-tolerant crops such as barley and sugar beet maximum values of around -3.0 MPa that were found after an adaptation of shoots to saline conditions (Schleiff, 1982b, 1982c, 1982d, 1983b). For young

sugar beet a close relationship between the osmotic water potential of weakly wilting leaves and the rhizospheric soil solution was reported (Schleiff, 1982b). This observation principally opens the possibility to estimate the maximum salt concentration around roots (where root water uptake and transfer of salts from the bulk soil into the rhizosphere is close to zero) from the shoot osmotic potential at wilting.

The presented results clearly indicate that the osmotic potential in soil solutions contacting the root surface is one key factor for root water uptake and plant water supply and that there are big differences between plants. But there are further factors involved in the complex process of root water acquisition under saline soil conditions.

From field observations it is also known that salinity stress may alter root morphology. Shoots and roots of 5- to 6-months old sweet potatoes growing on saline soils showed no visible symptoms, but no tubers were produced (Schleiff, 1989). The reason is that plants adapt to saline soils by improving the efficiency of their root system for water uptake and that no tubers were produced, because all assimilates were transferred to the roots, where they were required for the acquisition of soil water.

From experience with perennial crops it is well-known that roots are involved in plant salt-tolerance. Rootstocks of grape, citrus and avocado affect the salt-tolerance of the shoot significantly (Rhoades et al., 1992, p.39). It is not always clear, which root property is effective. The exclusion of damaging ions (Cl, Na) from the shoot is often mentioned as one decisive factor.

Fig. 3 outlines required research to significantly improve knowledge about salt tolerance and for optimizing irrigation procedures with saline waters. The graph is combining the effect of the already well-known approach (vertical profile of soil salinity) to evaluate crop salt tolerance with interactions between root and soil properties at the soil-root interface (horizontal salinity profile). Basically, the research concept follows selected aspects of root and soil properties in order to acquire a better understanding of factors affecting nutrient acquisition in the rhizosphere (Jungk, 2002).

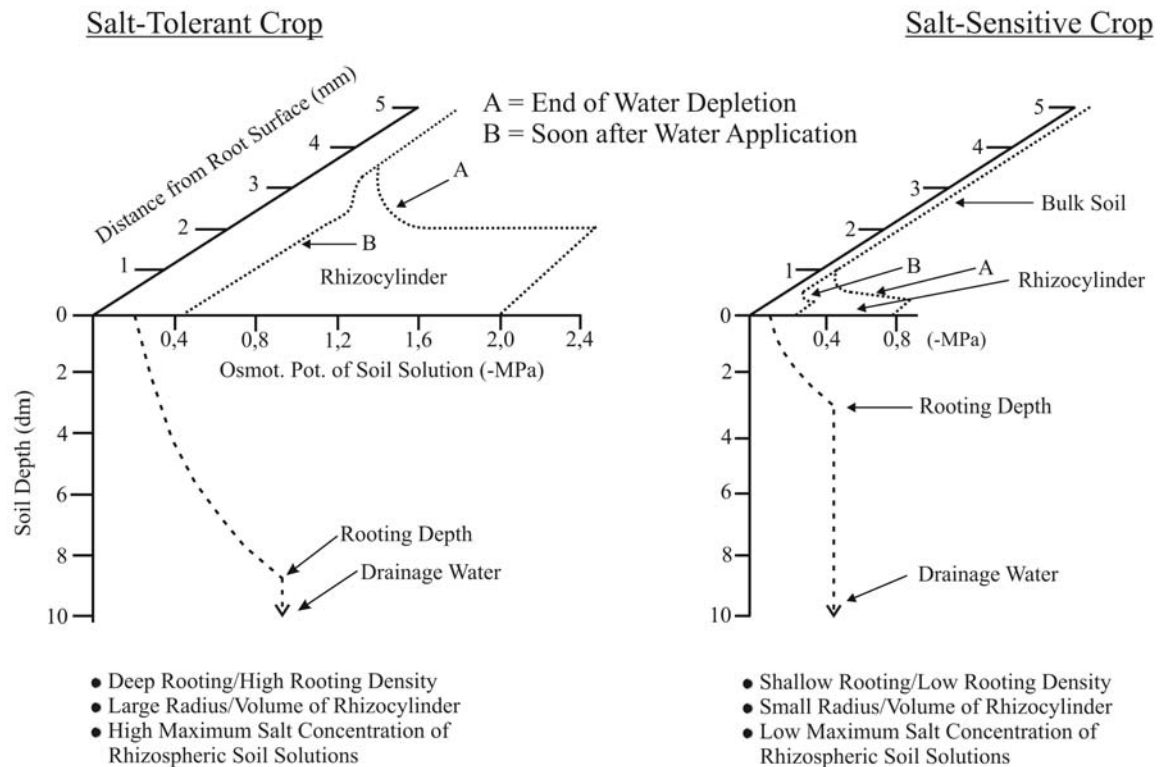


Fig. 3: Salt dynamic processes in the rhizosphere of crops under irrigation with saline water and the effect on crop salt-tolerance (after Schleiff, 2003)

The three following factors play an important role for crop salt tolerance and water acquisition by roots under saline soil conditions (see Fig. 3):

- Rooting depth and density
- Maximum rhizospheric salt concentration that ceases root water uptake
- Effect of root hairs on water uptake by roots

The vertical salinity profile under controlled irrigation as shown in Fig. 3 reflects the depth and density of the root system (see above). However it is not just the relative rooting depth as shown schematically in Fig. 2 that affects crop salt tolerance, but it is the absolute rooting depth that determines the rooted soil volume. The right half of Fig. 3 indicates that a shallow root system is expected to support the sensitivity of plants to soil salinity, whereas a deep root system (left half of Fig. 3) tends to improve the crop salt tolerance as the access to a larger volume of easily available soil water is facilitated. Principally there is no further increase in the salinity of the soil water, when the water is leached from the rooted soil layer (drainage water) and effects of percolating water and saline groundwater can be excluded.

Especially under (semi)arid climates (high transpiration rates) water depletion by roots is expected to create horizontal salinity profiles around roots within irrigation cycles. However, the development of salinity profiles between bulk and rhizospheric soil is expected to vary between plants and soil moisture conditions. Fig. 3 addresses this aspect of different salt-tolerance for plants in relation to time: curve B, which is the salinity profile at the beginning of a period of water depletion (soon after irrigation) and curve A, which shows the salinity profile at the end of a period of water depletion (before the next irrigation).

Curve B in Fig. 3 shows for both crops that there is just a small gradient between soil salinity of the bulk and the rhizospheric soil soon after a water application. This gradient will be principally affected by the water application rate. Higher application rates will reduce this gradient stronger than lower application rates. Only very high application rates would result in the disappearance of the salinity gradient. During the following period of soil water depletion a continuous flow of saline soil solution from the bulk soil to the root surface will initiate a salt accumulation in the rhizospheric soil. As reported earlier in this paper, the

continuously increasing salinity of the rhizospheric soil decreases root water uptake and consequently affects plant growth. The 'maximum salt concentration of the rhizospheric soil solution' (expressed as the osmotic potential in -MPa) as outlined in Fig. 3 indicates the plant specific salinity level, which ceases root water uptake. This salinity level is principally lower for salt-sensitive crops, and higher for salt-tolerant crops. It may vary between -0.6 MPa for very salt-sensitive crops (e.g. *phaseolus vulgaris*), around -2.0 to -3.0 MPa for salt-tolerant crops and up to -4.0 MPa for halophytes.

The principal effect of root hairs on crop salt-tolerance is shown in Fig. 3. There are large differences in the volume of the rhizospheric cylinders among plants (Jungk, 2002). Length of root hairs, their density and life span are relevant factors for

nutrient uptake, which may also interfere with plant water supply under saline soil conditions. This is concluded from the fact that the transpiration-induced salt accumulation close to the roots may occur in the rhizospheric soil volumes or water volumes that differ significantly. When a definite amount of saline soil solution is transferred from the bulk soil into a small rhizocylinder to cover the transpiration demand, there will occur a sharp increase of salinity (=strong decrease of soil osmotic water potential). In case the same amount of saline soil solution is transferred into a larger rhizocylinder, a significantly lower increase of rhizospheric salinity is expected. It is concluded that root hairs may be very efficient with respect to improve plant water supply from saline soils and crop salt-tolerance.

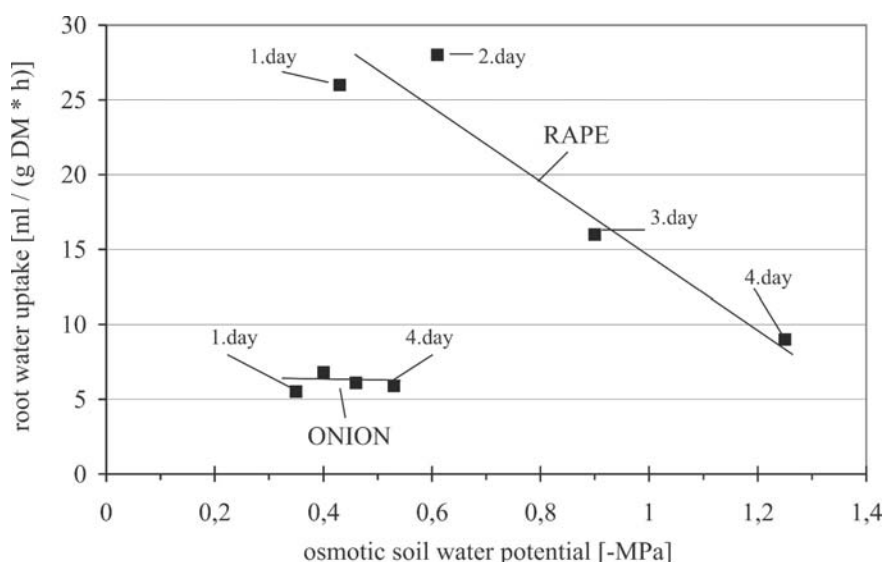


Fig. 4: Water uptake rates by roots of onions and oilseed rape [based on root dry matter] from saline soil solutions following a water application with 50 meq l⁻¹ NaCl (Schleiff, 1983, unpublished data)

Empirical support of the hypothesis that root morphology may be relevant for water uptake from saline soils is rare, but a primary result obtained from a pot experiment with onions (very short root hairs, small rhizocylinder) and oilseed rape (long root hairs, large rhizocylinder) confirms this hypothesis (Schleiff, 1983). In this experiment oilseed rape and onion were chosen as their root systems are known to differ significantly in their morphology, but shoots of both plants may adapt to saline conditions to a similar degree. From experiments with nutrients (P, K) it was concluded earlier that roots of oilseed rape form a rhizocylindrical soil volume that is about 20- to 30-fold larger than the volume of onion roots (Jungk, 2002). This factor explained significant differences in the

efficiency of nutrient uptake, especially when relatively immobile nutrients are considered.

Comparable results were obtained when water uptake rates by roots of onion and oilseed rape from saline soils were analyzed as presented in Fig. 4. Water uptake rates of oilseed rape roots (25 - 30 ml g⁻¹ root-DM h⁻¹) were 5 to 6-fold higher than for onion roots (5 - 7 ml g⁻¹ root-DM h⁻¹) at a rooting density of 0.3 to 0.4 g l⁻¹ root-DM for both plants, when the soil osmotic water potential varied between -0.35 and -0.6 MPa and the soil matrix water potential was about field capacity, or slightly lower (Schleiff, 1983c). Similar results were obtained, when water uptake rates by roots of leek and oilseed rape were compared (Schleiff, 1986, unpublished data). Even when the presented results have to be discussed from other

aspects than root morphology such as stomatal characteristics, there is circumstantial evidence that root morphology plays an important role for crop salt tolerance and water acquisition from saline soils. In the past decades, the aspect of root morphology was neglected, due to the lack of appropriate analytical techniques. However further research in this field is required for a better understanding of the influence of salinity at the soil-root interface. This field of research is a lot more promising for optimizing irrigation than to further deepen research in the already comprehensively addressed aspect of K/Na- and other mineral element ratios.

Effects of soil osmotic and matrix water potential on plant water supply

There is no doubt that the crop water supply is good when the soil moisture is close to field capacity and soil salinity is low. Decreasing soil water contents reduce water uptake by roots. This reduction of root water uptake is even higher when soil salinity is involved. Since Wadleigh & Ayers (1945) and Ayers & Westcot (1985) it is postulated for saline soils that the plant water supply and plant available soil water are closely related to the total soil water potential (Ψ_T), which is the sum of the soil matrix (Ψ_M) and soil osmotic (Ψ_O) water potential ($\Psi_T = \Psi_M + \Psi_O$). Both types of soil water potentials usually (with the exception of some halophytes) tend to reduce water uptake rates by roots, but it is doubted that both components of Ψ_T will affect root water uptake to the same degree, at least when root water uptake from the rhizospheric soil is evaluated.

Root water uptake of young wheat from a loamy soil dropped drastically, when the Ψ_T -value of the non-saline rhizospheric soil ranged between -0.2 and -0.3

MPa ($\Psi_T = \Psi_M$), but was just slightly affected when salinity (Ψ_O) was involved (Schleiff & Schaffer, 1984). Differences between soil osmotic and matrix potentials on root water uptake seem to be even more distinct in sandy soils. Water uptake by barley roots from a non-saline sandy loam ceased at -0.2 MPa, but was still high at around -1.0 MPa, when Ψ_O dominated (Schleiff, 1986). Same results were obtained with young oilseed rape plants cultivated in a sandy soil under well controlled conditions in a growth chamber as presented in Fig. 5 (Schleiff, 1987). Under non-saline conditions root water uptake nearly ceased when Ψ_T dropped to -0.2 MPa, but decreased at the same Ψ_T only by 30-40% of the optimum, when salinity was involved. Working with a saline silt soil, Schmidhalter & Oertli (1991) confirmed for young carrots that decreasing Ψ_M affected plant growth much stronger than decreasing Ψ_O .

Using more sophisticated instruments such as micro-tensiometers for measuring soil matrix water potentials in the rhizosphere (Vetterlein et al., 1993) and micro-cups to determine the osmotic water potential of the soil solution, Vetterlein & Jahn (2004) only recently checked the classical concept, too. The authors doubt that 'soil solution osmotic and matrix potential are really additive in respect to plant water availability'. However, there is one major shortcoming in their experimental approach, which is the fact that the measuring range ceases at relatively high matrix potentials (-0.07 to -0.08 MPa). This means that data from the range of -0.08 to -0.5 MPa, where water uptake by roots is still significant, are completely missing. Due to current technical limitations it is not expected that this approach will not give a full and clear picture on water availability from saline soils.

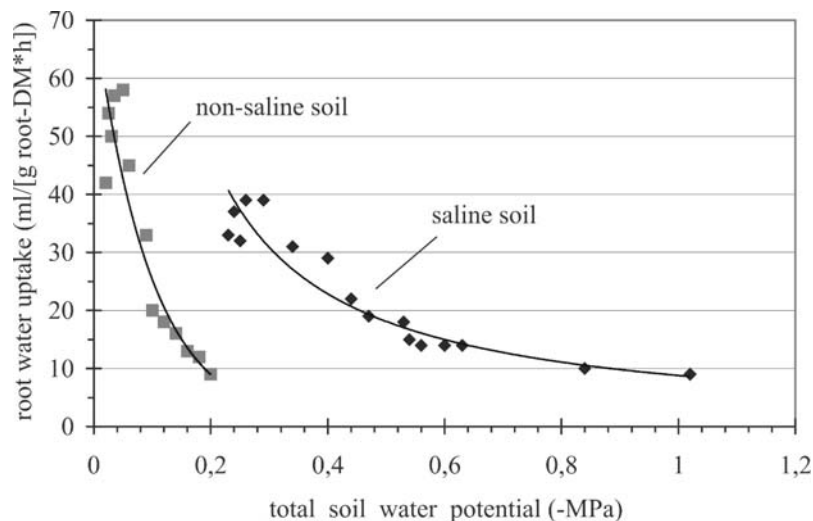


Fig. 5: Root water uptake rate ($\text{ml g}^{-1} \text{root-DM h}^{-1}$) of young oilseed rape plants in relation to the total soil water potential of sandy soil

Conclusions

There are certainly many cases where salt-induced lack of various nutrients (Ca, K, N, P and micro-nutrients) limit plant growth as reported by Schleiff & Finck (1976) and recently summarized by Bernstein & Kafkafi (2002). Fortunately, technical tools to identify (soil chemical analysis combined with plant tissue analysis) and to compensate nutrient deficiencies by fertilization are available. So it is not expected that further research in this particular field will bring new insights which will improve the management of saline irrigation on production fields.

In comparison, knowledge about processes in the contact zone between soil and plant under saline irrigation is very limited. Without doubt the analysis of rapidly changing processes in the root environment will be extremely complex and research will face severe problems with appropriate experimental set-ups, the direct measurement of important parameters (ions, soil water potential, root properties) and their evaluation with respect to crop salt tolerance. Nevertheless, research is expected to yield significant knowledge about crop salt tolerance, and finally contribute to improve practical recommendations for saline irrigation and breeding of salt tolerant crops (Lieth et al., 1997).

As long as direct measurements of basic parameters such as matrix and osmotic water potentials at decreasing soil water contents ($\Psi_M < \sim -0.07$ MPa) of the rhizospheric soil are not possible, indirect investigation methods such as the vegetation technique developed by Schleiff (1987a) seem most promising to improve the knowledge about processes and effects in the rhizosphere. The potential of this technique quantifying the effect of soil matrix and soil osmotic water potential on root water uptake and plant growth has been outlined (Fig. 4). Additionally, it is expected that the applied vegetation technique may also give other quantitative data on root properties that are supposed to be relevant for crop salt tolerance. Modifications of the vegetation technique supposedly provide answers to questions about interactions between the rhizospheric and non-rhizospheric soil volume on root water uptake. Following Helal et al. (1996) the dynamic turnover of developing root systems, which affects nutrient uptake, should not be neglected for root water uptake from saline soils either.

The practical relevance of the concept of horizontal salt distribution around roots for saline crop production, especially under high frequency irrigation, was clearly shown in the experiments of Pasternak and Malach (1986) with tomatoes. Yield of tomatoes under drip irrigation with water of 10 dS m^{-1} were 20% higher in the 2-days irrigation cycle than in the daily cycle. This result is only surprising, when the average salinity of a soil profile is considered in the 1-

layer and 4-layer concept as presented earlier in this paper (equation 3 and 5). Following this concept yields should be highest under daily irrigation, as frequent irrigations are generally expected to lower salinity stress to roots.

Obviously concepts based on the vertical salt distribution under saline irrigation are not appropriate to explain the higher salinity stress under frequent irrigation. In pot experiments with maize irrigated with water of 5.3 dS m^{-1} daily, in a 2- and 3-days cycle Schleiff (1983a) found similar results. The higher salinity stress for plants under daily irrigation was even confirmed by the corresponding change of the chloride contents in older and younger leaves, which were always highest under daily irrigation.

This opens the question why salinity stress seems to be higher under frequent irrigation, which is usually not the case at lower soil salinity. The explanation is supposedly that the lower water application rates given under frequent intervals are probably less effective to leach very high salinity from the rhizospheric soil, while higher application rates at longer intervals are more effective in this respect.

There is no doubt that root environment under saline irrigation is complex and rapidly changing. Research in this field causes difficulties in experimental set-ups, measurement of parameters, diagnosis and prediction of consequences. However, it promises a better understanding of plant growth under saline conditions, an improve of irrigation management and new targets for breeding plants with a higher salt tolerance.

References

- Abrol IP, Yadav JSP, Massoud FI** (1988) Salt-affected soils and their management. FAO Soils Bulletin 39, Rome
- Ayers RS, Westcot DW** (1985) Water quality for agriculture. Irrigation and drainage paper 29, FAO, Rome
- Bernstein N, Kafkafi U** (2002) Root growth under salinity stress. In: Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U (eds) Plant roots - the hidden half. 3rd edition, Marcel Dekker, N.Y. – Basel - Hongkong
- Boer B, Al Ghais S** (1999) A contribution towards the successful propagation of halophytes in harsh environmental conditions. In: UNESCO/CIHEAM-IAMB (ed) Proceedings 'Saline irrigation: halophyte production and utilization'; Agadir, Morocco
- Dichtl N** 2002: Wiederverwertung von Abwasser. ATV-DVWK-Bundestagung 2002; ISBN 3-936514-06-2; 239-253
- Hamdy A** (1995) Saline water use and management for sustainable agriculture in the Mediterranean Region. In: INAT, CIHEAM/IAM-B, CRGR (ed) Work-

shop 'on farm sustainable use of saline water in irrigation: Mediterranean experience'; Hammamet, Tunisia

Hamdy A (1999) Saline irrigation assessment and management for a sustainable use. In: Hamdy A, Lieth H, (eds) Saline irrigation: halophyte production and utilization. Agadir, Morocco

Helal HM, Ragab AS, Monem MA, Schnug E (1996) Evaluation of root mortality by biochemical analysis. *Commun Soil Sci Plant Anal* 27, 5-8: 1169-1175

Hoffman GJ (1981) Alleviating salinity stress. In: *Modifying the root environment to reduce crop stress*. Am Soc Agric Eng, Michigan, USA

van Hoorn JW, van Alphen JG (1994) Salinity control. In: Ritzema HP (ed) *Drainage Principles and Applications*; ILRI Publication 16

Jaradat AA (1999) Plant genetic resources for salt tolerance in the Mediterranean region. In: Al-Abed N (ed) *Irrigation management and saline conditions; proceedings of the regional symposium, JUST, Irbid, Jordan*

Jungk AO (2002) Dynamics of nutrient movement at the soil-root interface. In: Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U (eds) *Plant roots –the hidden half*. 3rd edition, Marcel Dekker, N.Y. – Basel - Hongkong

Kuck AJ (1999) Integration of marginal water resources into a strategy for irrigation water supply in the Jordan Valley. In: Al-Abed N, (eds) *Irrigation management and saline conditions; proceedings of the regional symposium, JUST, Irbid, Jordan*

Kuhn K, Vetterlein D, Jahn R (2003) Einfluss genotypischer Unterschiede in der Na-Aufnahme auf das osmotische Potential in der Rhizosphäre – Bedeutung für den Wasserhaushalt der Pflanzen. *DBG-Mitteilungen* 102: 357-358

Lieth H, Moschenko M, Menzel U (1997) Sustainable halophyte utilization in the Medi-terranean and subtropical dry regions. In: *International conference on 'Water management, salinity and pollution control towards sustainable irrigation in the Mediterranean region', CIHEAM/MAI-B, Bari, Italy*

Maas EV, Hoffman GJ (1977) Crop salt tolerance – current assessment. *Journal of the irrigation and drainage division*. Vol. 103, no. IR 2, 115-134 *Network Biosaline Research, 2004: <http://www.biosalinity.org>*

Pasternak D, De Malach Y, Borovic I (1986) Irrigation with brackish water under desert conditions. VII. Effect of time of application of brackish water on production of processing tomatoes. *J Agric Water Manage* 12: 149-158

Rhoades JD, Kandiah A, Mashali AM (1992) The use of saline waters for crop production. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 48, Rome

Riley D, Barber SA (1970) Salt accumulation at the soybean (*Glycin max.* L. Merr.) root-soil interface.

Soil Sci Soc Amer Proc 34: 154-155

Schleiff U, Finck A (1976) Significance of the nutrient supply of crops for their salt tolerance. *Z Pflanzenernähr Bodenk*, 3: 281-292

Schleiff U (1979) Salt contents in the rhizosphere and in soil solution outside the rhizosphere under controlled irrigation. In: *Soils in Mediterranean type climates and their yield potential*. Proc. 14th colloq. Int. Potash Institute, Bern, 93-98

Schleiff U (1980) Chloride content of onion roots and their adhering soil under irrigation with saline drainage water. *Z Pflanzenernaehr Bodenk* 143: 638-644

Schleiff U (1981a) Osmotic potentials of roots of onions and their rhizospheric soil solutions when irrigated with saline drainage water. *Agricultural Water Management* 3: 317-323

Schleiff U (1981b) Determination of maximum salt concentration in the rhizospheric soil solution due to transpiration of young maize plants. *Mitt Dtsch Bodenkundl Gesellsch* 32: 1981 (in German)

Schleiff U (1982a) Dynamics of salts in the rooted soil and its significance for the water supply of crops - an overview. *Z Kulturtechnik u. Flurbereinigung* 23: 38-49

Schleiff U (1982b) Maximum salt concentration in the rhizospheric soil solution of young sugar beets in dependence from the salt adaptation of their shoots. *Plant and Soil* 66: 397-404

Schleiff U (1982c) Water uptake of young sugar beets in relation to the salt concentration of the rhizospheric soil solution. *Z Pflanzenernähr Bodenk* 145: 436-447

Schleiff U (1982d) Maximum salt concentration in the rhizospheric soil solution of young sugar beets. *Plant and Soil* 64 (3): 307-314

Schleiff U (1983a) Effect of different water application intervals with saline water on the salt tolerance of maize. *Z. Acker- und Pflanzenbau* 152: 9-18 (in German)

Schleiff U (1983b) Water uptake of barley roots from rhizospheric soil solution of different salt concentrations. *Irrigation Science* 4: 177-189

Schleiff U (1983c) Salt-tolerance of crops with special reference to the salinity of the rhizospheric soil. unpublished paper, p 63 and 101

Schleiff U, Schaffer G (1984) The effect of decreasing soil osmotic and soil matric water potential in the rhizosphere of a loamy and a sandy soil on the water uptake rate of wheat roots. *Z Acker- und Pflanzenbau* 153: 373-384

Schleiff U (1986) Water uptake by barley roots as affected by the osmotic and matric potential in the rhizosphere. *Plant and Soil* 94: 143-147

Schleiff U (1987a) A vegetation technique to study the water uptake by roots from salinized rhizospheric

soils. *Z Pflanzenernähr Bodenk* 150: 139-146 (in German)

Schleiff U (1987b) A comparison of transpiration rates of young rape plants from salinized soils of different texture. *Z Pflanzenernähr Bodenk* 150: 403-405

Schleiff U (1989) Melioration of salt-affected soils at the Lac Horo/Mali by surface desalinization. Unpublished GTZ report, Braunschweig

Schleiff U (1999) Soil testing, management and development of SRDI project Bangladesh – coastal soil salinity component, unpublished report for DANIDA/KAMPSAX

Schleiff U (2003) Handbook 'Salinity&Soil Fertility Kit' – a portable field lab for soil, water and plant analysis. <http://salinity.schleiff.net>; self-published, Wolfenbüttel

Schmidhalter U, Oertli JJ (1991) Germination and seedling growth of carrots under salinity and moisture stress. *Plant and Soil* 132: 243-251

Shiva V (2002) *Water wars: privatization, pollution and profit*. South End Press, Cambridge, USA

Sinha BK, Singh NT (1976) Chloride accumulation near corn roots under different transpiration, soil moisture, and soil salinity regimes. *Agron J* 68: 346-348

Sperry JS, Stiller V, Hacke UG (2002) Soil water uptake and water transport through root systems. In: Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U (eds) *Plant roots – the hidden half*. , Marcel Dekker, 3rd edition, N.Y. – Basel - Hongkong

Vetterlein D, Marschner H, Horn R (1993) Microtensiometer technique for in situ measurement of soil matric potential and root water extraction from a sandy soil. *Plant and Soil* 149: 263-273

Vetterlein D, Jahn R (2002) Einfluss der Bodenart auf die Ausbildung osmotischer Potentialgradienten zwischen Gesamtboden und Rhizosphäre. In: Merbach W, Hütsch BW, Wittenmayer L, Augustin J (eds) *Durchwurzelung, Rhizodeposition und Pflanzenverfügbarkeit von Nährstoffen und Schwermetallen*, 61-74 p; B.G. Teubner, Stuttgart-Leipzig-Wiesbaden

Vetterlein D, Jahn R (2003) Gradients in soil solution composition between bulk soil and rhizosphere in situ measurement with changing soil water content. *Plant and Soil* (in press)

Wadleigh CH, Ayers RS (1946) Growth and biochemical composition of bean plants as conditioned by soil moisture tension and salt concentration. *Plant Physiol* 20: 106-132

Einfluss von Parametern der Bodenfruchtbarkeit und Düngung auf den Uran-Transfer Boden-Pflanze

Susanne Schroetter, Maria Rivas, Maria Lamas, Ewald Schnug und Jürgen Fleckenstein

Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Bundesallee 50, D-38116 Braunschweig

Zusammenfassung

Uran ist ein toxisches Schwermetall, das als natürlicher Bestandteil von Gesteinen ubiquitär vorkommt. Daher enthalten nahezu alle Böden Uran in unterschiedlichen, meist jedoch sehr geringen Mengen. Uran wird vornehmlich in den A-Horizonten der Böden akkumuliert; seine Pflanzenverfügbarkeit wird zum einen von den vorherrschenden Bodeneigenschaften bestimmt, zum anderen spielen anthropogene Einflüsse eine nachhaltige Rolle. Bekannte Ursachen für überproportionale Anreicherungen von Uran in Böden sind Bergbau und erzverarbeitende Industrie. Des Weiteren wurde erst kürzlich der Beitrag der P-Düngung bei der Anreicherung von Uran in Böden erkannt.

Eine neue, nicht zu unterschätzende Gefährdung des Ökosystems Boden-Pflanze geht von militärischen Operationen aus, bei denen Munition, die unter Verwendung von „Depleted Uranium“ (DU) hergestellt wurde, zum Einsatz kam. In den betroffenen Krisengebieten sind nachweislich weite Regionen durch fehlgeschlagene Geschosse, die sich in unterschiedlichen Tiefen im Boden befinden, kontaminiert. Sie sind langfristig eine potentielle Quelle für toxische, pflanzenaufnehmbare Uranverbindungen. Ein Teil des von den Wurzeln absorbierten Urans wird im Verlauf des Pflanzenwachstums in die oberirdischen Organe verlagert. Gelangen uranbelastete Pflanzen oder Pflanzenteile in die Nahrungskette, geht von ihnen neben der Schwermetalltoxizität auch eine radiologische Gefahr durch α -Strahlung aus. Anhand von zwei mehrfaktoriellen Gefäßversuchen mit verschiedenen landwirtschaftlichen Nutzpflanzen, die unter kontrollierten Bedingungen im Gewächshaus durchgeführt wurden, wurden Faktoren evaluiert, die den Uran-Transfer_{Boden-Pflanze} beeinflussen können. Der Urangehalt im Spross von *Lolium perenne*, *Helianthus annuus*, *Zea mays* und *Vicia faba* wurde maßgeblich von der Bodenfruchtbarkeit, dem pH-Wert und dem Phosphorgehalt des Kultursubstrates beeinflusst. Die Versorgung der Pflanzen mit Stickstoff und Schwefel hatte mittelbaren Einfluss über die Wachstumsförderung.

Schlüsselwörter: *Bodenkontamination, Düngung, Helianthus annuus L., Lolium perenne L., Uran, Uranaufnahme, Vicia faba L., Zea mays L.*

Summary

Uranium (U) is a toxic heavy metal. It is a natural component of rocks. Therefore, more or less all soils

contain U in different amounts. The background values of natural soils differ between 0.8 and 11 mg kg⁻¹ U. U is accumulated in the A horizons of soils and its plant availability is influenced by both natural soil properties and anthropogenic activities. Mining and ore processing industry are well known for causing over-proportional enrichments of U in soils. Recently, the use of phosphorus fertilizers in agriculture has been identified as a key factor for the accumulation of U in soils. An alien source of environmental pollution results from military operations. In the operational zones large areas are contaminated by DU containing penetrators, which did not hit a target and are distributed in the soil in different depths. Uranium incorporated into the soil by industrial wastes, fertilization, or use of uranium containing ammunition is potentially plant available. Uranyl ions will be released over longer periods by decomposition and conversion processes with the soil solution, organic soil compounds, plant roots, and microorganisms. Plants are able to absorb uranyl ions by their roots, to translocate them into assimilation and storage organs. The result is that U finally enters the food chain. The risk for human's health consists in the strong heavy metal toxicity of U, but there are also risks from radiation. Factors affecting the soil/plant transfer of U were evaluated in pot experiments with different crops. The soil content of plant available U depended on the soil fertility status. The phosphorus content of the soil proved to be a relevant parameter influencing the plant available U content. The U content of the aboveground parts of *Lolium perenne*, *Helianthus annuus*, *Zea mays*, and *Vicia faba* was related to both factors, soil fertility and phosphorus level. The soil pH value and a sufficient nutrient supply (nitrogen and sulfur) yielded a dilution effect by growth promotion.

Keywords: *fertilization, Helianthus annuus L., Lolium perenne L., soil contamination, uranium, uranium uptake, Vicia faba L., Zea mays L.*

Einleitung

Uran (U) ist ein natürlicher Bestandteil von Gesteinen der Erdkruste und infolge von Bodenbildungsprozessen durch Verwitterung in den meisten Böden enthalten. Die natürlichen Hintergrundwerte liegen in Abhängigkeit vom Ausgangsgestein im Bereich von 0,8 bis 11 mg kg⁻¹ U (Kabata-Pendias & Pendias, 2001). Uran wird vornehmlich im A-Horizont der Böden angereichert, d.h. genau in den

oberen 25 Zentimetern, die am intensivsten durchwurzelt sind (Schroetter et al., 2005). Die Pflanzenverfügbarkeit von Uran wird sowohl durch natürliche Bodeneigenschaften, als auch ackerbauliche Maßnahmen beeinflusst.

Zu dem seit langem bekannten Problem der hohen Urangelhalte von Böden im Bereich von Uranabbaugebieten und Erzaufbereitungsstätten kamen neue, nicht zu unterschätzende Kontaminationsquellen. Verstärktes Augenmerk wird auf die Landwirtschaft selbst gelegt: die Versorgung der Pflanzenbestände mit Phosphordüngern, die aus uranhaltigen Rohphosphaten hergestellt werden, kann langfristig zu einer Uran-Anreicherung auf intensiv bewirtschafteten Böden führen.

In der jüngsten Vergangenheit tritt eine zwar regional begrenzte, aber ungleich ernstere Gefährdung des Ökosystems Boden auf: seit mehr als zehn Jahren wird bei militärischen Auseinandersetzungen (Irak, Kosovo, Afghanistan) Munition eingesetzt, deren Penetratoren unter Verwendung von abgereicherten Uranabfällen aus der Kernspaltung hergestellt wurden. Das sogenannte „Depleted Uranium“ (DU) ist ein Abfallprodukt der Uran-Anreicherung zur Kernkraftgewinnung. Es ist wie natürliches Uran ein instabiles Element, das noch bis zu 0,3 % des spaltbaren Isotops ^{235}U enthält, hoch giftig ist und α -Strahlung abgibt.

Berichten des UNEP (2001) zufolge wurden z.B. während der Gefechte im Kosovo mehr als 30.000 DU-haltige Geschosse abgefeuert. Der weitaus größte Teil verfehlte nachweislich sein Ziel und drang in den Boden ein. Die Projektile liegen nahezu unauffindbar, umgeben von Pflanzenwurzeln, Bodenwasser und Bodentieren in unterschiedlichen Bodenschichten. In unmittelbarer Umgebung dieser Geschosse wurden Bodengehalte von bis zu $400 \text{ mg kg}^{-1} \text{ U}$ festgestellt (UNEP, 2001). Sie sind deshalb als permanente Quelle für unkontrollierbare Schwermetallkontamination anzusehen. Infolge fortschreitender Korrosion werden toxische Uranverbindungen freigesetzt, die von den Pflanzenwurzeln aufgenommen werden können.

Uran ist im Hinblick auf seine physiologische Wirkung als ein für Pflanzen nicht essenzielles Element einzustufen. Nicht-essenzielle Elemente beeinflussen schon beim Vorhandensein in geringsten Mengen den normalen Ablauf von Stoffwechselprozessen in der Pflanze. Für die tatsächliche toxische Wirkung eines Elements in der Umwelt spielt sein chemisches Verhalten, das heißt seine Löslichkeit und die seiner Verbindungen eine entscheidende Rolle (Bliefert, 1994). Hier ist bei der Einschätzung der Gefahren, die von DU ausgehen, schwerpunktmäßig anzusetzen: Uran ist ein toxisches Schwermetall. Gefahr für die menschliche Gesundheit entsteht, wenn dieses Schwermetall in den Nahrungskreislauf gelangt. Das kann direkt über Trinkwasser, Gemüse und Obst erfolgen oder auf indirektem Weg mit dem Verzehr von

belastetem Fleisch, Milch oder Eiern. Das toxische Uranyl-Ion (UO_2^{2+}) lagert sich an körpereigene Proteine an. Der Urantransport innerhalb des menschlichen Körpers erfolgt mit dem Blut; vornehmlich in Leber und Nieren wird Uran akkumuliert (Cothorn & Lappenbusch, 1983; Milvy & Cothorn, 1990).

Da Uran ubiquitär in der Umwelt vorkommt, ist es in Spuren auch in Pflanzen enthalten. Daher ist die Aufnahme kleinster Mengen mit der Nahrung unvermeidlich. Diese Mengen richten sich nach den regionalen Ernährungsgewohnheiten der Menschen: bis zu $2,7 \mu\text{g U}$ werden in Deutschland täglich mit der festen Nahrung aufgenommen (Anke et al., 2003). Hinzu kommt Uran, das mit dem Trinkwasser, insbesondere mit Mineralwasser, aufgenommen wird (Schnug et al., 2005).

Die Aufnahme von Schwermetallen durch die Pflanze hängt von der Löslichkeit der im Boden vorliegenden Verbindungen ab und ist als Funktion von Interaktionen der Metall-Ionen der flüssigen und festen Phase im Bodensystem zu verstehen (Wallnöfer & Engelhardt, 1988). Das Prinzip der Dynamik von Schwermetallen im Boden wird in Abb. 1 vereinfacht dargestellt.

Schwermetallodynamik
im System Boden -Pflanze
(in Anlehnung an Schilling, 2000)

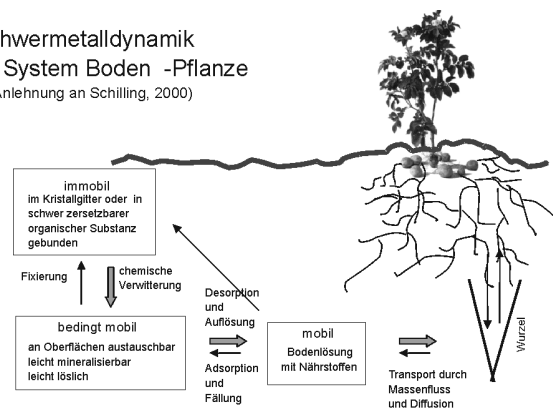


Abb. 1: Schwermetallodynamik im System Boden – Pflanze
(in Anlehnung an Schilling, 2000)

Die Menge an freien, pflanzenaufnehmbaren Schwermetallen in der Bodenlösung wird durch Adsorptions- und Desorptionsvorgänge an Bodenkolloiden bestimmt, wobei Größe und Ladung der Ionen sowie die Austauschkapazität des Bodens entscheidend sind. In der Bodenlösung vorhandene Anionen und der pH-Wert sind maßgeblich für die Ausfällung stabiler Metallkomplexe. Die Pflanze trägt aktiv durch Wurzelexsudate zu chemischen Veränderungen im Bereich der Rhizosphäre bei, diese können die Konzentration pflanzenaufnehmbarer Schwermetall-Ionen im Wurzelbereich erhöhen. Gleiche Effekte sind durch bodenlebende Mikroorganismen und deren Stoffwechsel zu erwarten. Die ausgeschiedenen organischen Verbindungen, wie Phenol- und Aminosäuren, bilden mit Kationen (hier auch UO_2^{2+}) aus

schwerlöslichen Verbindungen Chelate (metallorganische Komplexe), die über einen weiten pH-Bereich wasserlöslich und damit pflanzenaufnehmbar sind (Finck, 1991). Die solchermaßen gebundenen UO_2^{2+} -Ionen können direkt durch die Wurzelrinde in die Pflanze diffundieren oder mit Hilfe von pflanzenbürtigen Enzymen aus den organischen Komplexen gelöst und als Kationen von der Wurzel aufgenommen werden. Die Verteilung des Urans aus den Wurzeln in den Stängel- und Blattapparat, in Blüten und Speicherorgane erfolgt über das Xylem (Richter, 1988). Uran wird vorwiegend in Zellmembranen und Vakuolen eingelagert. Pflanzliche Chelatkomplexe, die eine hohe Affinität zu Schwermetall-Ionen haben, sind z.B. Cytochrome und Chlorophyll.

In der deutschen Bundesbodenschutzverordnung (1999) werden bodenartenabhängige maximal tolerierbare Gesamtgehalte für bedenkliche Schwermetalle wie Cadmium, Blei, Quecksilber oder Nickel in ackerbaulich genutzten Böden angegeben. Einen aktuellen Vorsorgewert für Uran gibt es bislang nicht. Von Cramer et al. (1981) wurde für Kulturböden ein bodenartenunabhängiger tolerierbarer Urangehalt von höchstens 5 mg kg^{-1} vorgeschlagen.

Material und Methoden

Die Untersuchungen zur Pflanzenverfügbarkeit von Uran in Abhängigkeit von Bodenfruchtbarkeit und Düngung wurden in zwei mehrfaktoriellen Gefäßversuchen unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt. Geprüft wurden drei Urankontaminationsstufen in Bodensubstraten unterschiedlicher Herkunft, die Wirkung von Phosphorversorgung, Kalkung, sowie Stickstoff- und Schwefeldüngung auf den pflanzenverfügbaren Urangehalt (U_{PV}) im Boden und die Urankonzentration im oberirdischen Pflanzengewebe von vier landwirtschaftlichen Nutzpflanzenarten. Die Abstufungen in der Bodenfruchtbarkeit der Prüfsubstrate wurden durch Entnahme von Bodensubstraten aus einem extensiv bewirtschafteten Wiesenstandort bzw. aus einem Waldstandort, jeweils aus dem Oberboden (0 bis 25 cm) und dem darunter liegenden Horizont (25 bis 50 cm), erreicht. Vor Entnahme des Bodensubstrates wurden Grasnarbe bzw. Waldstreu entfernt. Die qualitätsbestimmenden Bodeneigenschaften wurden nach standardisierten Analyseverfahren bestimmt: pH-Wert - potentiometrisch in 1:2,5 Suspension mit 0,01 M CaCl_2 -Lösung; Gesamtkohlenstoff (C_t) - trockene Verbrennung, Kohlenstoffanalysator LECO EC 12; Gesamtstickstoff (N_t) - nach *Kjeldahl*; pflanzenverfügbares P und K (P_{CAL} , K_{CAL}) - Calcium-Acetat-Lactat-Extraktion (nach

Schüller, 1969); pflanzenverfügbares Uran (U_{PV}) - AAAC-EDTA-Extraktion (Lamas et al., 2002; modifiziert nach Silanpää, 1982).

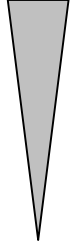
Die Urankontamination der Bodensubstrate erfolgte vor Versuchsbeginn mit einer speziell für dieses Experiment aus Uranylнитrat nach dem Verfahren von Fleckenstein (1972) hergestellten grünen Modifikation von U_3O_8 . Entsprechend der Urankontaminationsstufen (Tab. 1) wurde das pulverisierte U_3O_8 portioniert und separat für jedes Gefäß mit dem Bodensubstrat vermischt. In gleicher Weise erfolgte die Zugabe der meliorativen P-Düngung. Im ersten Experiment (Tab. 1) wurde ein langsamwüchsiges, ausdauerndes und krankheitsresistentes Weidelgras (Sorte „Lisuna“) untersucht, das trotz der limitierenden Bedingungen (geringes Gefäßvolumen: Fassungsvermögen 1,5 kg lufttrockener Boden, Überwintern im Gewächshaus) mehrere Ernten gewährleistete.

Im darauffolgenden zweiten Experiment wurden die obengenannten Bodensubstrate, getrennt nach den beiden P-Versorgungsstufen und den Urankontaminationsstufen, erneut gemischt, um ein Substrat von einheitlicher Qualität zu erhalten. Mais, Sonnenblumen und Ackerbohnen wurden bis zum BBCH-Stadium 32 (Streckungsphase) (Meier, 2001) mit differenzierter Stickstoff- und Schwefelversorgung in Gefäßen mit einem Fassungsvermögen von 800 g lufttrockenem Boden herangezogen und vor Eintritt in die generative Phase geerntet (Tab. 2). Alle anderen essenziellen Nährstoffe sowie die Wasserversorgung der Pflanzen wurden in beiden Versuchen durch entsprechende Zufuhr im Optimum gehalten.

Nach der Ertragsermittlung auf Trockensubstanzbasis wurden die Pflanzen fein vermahlen und anschließend mit Salpetersäure/Wasserstoffperoxid in der Mikrowelle aufgeschlossen. Die Urangelte wurden mittels ICP-QMS (induktiv gekoppelte Quadrupol Plasma Massenspektrometrie, experimentelle Nachweisgrenze: 15 ng L^{-1} (Sparovek et al., 2001)) gemessen.

Nach der Ernte der Pflanzen wurden in beiden Versuchen die Gesamt-U- (U_t) und -P-Gehalte (P_t) und die jeweiligen pflanzenaufnehmbaren Fraktionen U_{PV} und P_{PV} in den Bodensubstraten bestimmt. U_t und P_t wurden mit Aqua regia, U_{PV} und P_{PV} mit AAAC-EDTA-Lösung extrahiert. Die Messung selbst erfolgte mit der ICP-QMS.

Tab. 1: Zusammenstellung der Prüffaktoren und ihrer Abstufungen für Gefäßversuch 1, Braunschweig, 2000 bis 2002 (detaillierte Versuchsbeschreibung bei Lamas, 2005)

Gefäßversuch 1: <i>Lolium perenne</i> L.; Dauer: 2 Jahre								
Bodenfruchtbarkeit 	hoch	Grünland Oberboden	U-Kontamination mit U ₃ O ₈ [mg kg ⁻¹ U]	ohne	P-Düngung mit CaHPO ₄ [mg kg ⁻¹ P]	1.500	Kalkung mit CaCO ₃ [mg kg ⁻¹ Ca]	2.000
		Grünland Unterboden		250				
		Wald Oberboden		500				
	gering	Wald Unterboden		1.000				

Tab. 2: Zusammenstellung der Prüffaktoren und ihrer Abstufungen für Gefäßversuch 2, Braunschweig, 2003 (detaillierte Versuchsbeschreibung bei Rivas, 2005)

Gefäßversuch 2: <i>Zea mays</i> L., <i>Helianthus annuus</i> L., <i>Vicia faba</i> L.; Dauer: 6 Wochen								
P _t im Boden [mg kg ⁻¹ P]	334	U-Kontamination [mg kg ⁻¹ U]	auf niedrigem P _t -Level	auf hohem P _t -Level	N-Düngung [mg kg ⁻¹ N]	250	S-Düngung [mg kg ⁻¹ S]	ohne
			ohne	ohne				
	166		173					
	329		385					
	660		644					
1.558					500		50	

Für *Vicia faba* L. entfällt der Prüffaktor „N-Düngung“

Ergebnisse und Diskussion

Einfluss von Bodenfruchtbarkeit, P-Düngung und Kalkung auf den Gehalt an pflanzenverfügbarem Uran im Boden

Die vier untersuchten Bodensubstrate unterschieden sich entsprechend ihrer Herkunft deutlich in der natürlichen Bodenfruchtbarkeit. Die qualitätsbestimmenden Eigenschaften sind in Tab. 3 beschrieben.

Die pH-Werte aller Ausgangssubstrate lagen im sauren bis stark sauren Bereich, wobei der Waldboden mit pH 3,5 und 3,8 erwartungsgemäß niedriger lag als der Wiesenboden (5,9 und 4,8). Beide Oberbodensubstrate (Grünlandoberboden, Waldoberboden) wiesen, verglichen mit den jeweiligen Unterbodensubstraten (Grünlandunterboden, Waldunterboden), höhere C- und N-Gehalte auf. Der Oberboden (0 bis 25 cm) des Grünlandstandorts enthielt mit 108 mg kg⁻¹ P_{CAL} doppelt soviel pflanzenverfügbares P wie der Waldober-

boden. Die 25 bis 50 cm-Bodenschicht enthielt auf beiden Standorten mit 20 mg kg⁻¹ P_{CAL} weniger als ein Fünftel bzw. die Hälfte des Gehaltes des Oberbodens. Der Gehalt an K_{CAL} in den Grünlandsubstraten lag weit über dem des Waldbodens.

Die Menge an pflanzenverfügbarem U lag bei Werten um 0,03 mg kg⁻¹ U_{PV} und unterschied sich für die einzelnen Bodensubstrate nur geringfügig (Tab. 3). Im Gefäßversuch mit *Lolium perenne*, der insgesamt 58 Wochen dauerte, wurde in den Varianten ohne P-Düngung und Kalkung für alle geprüften Bodensubstrate ein mit steigender Ausgangskontamination nahezu proportional ansteigender U_{PV}-Gehalt im Boden nachgewiesen (Tab. 4).

Der Vergleich der Bodensubstrate auf gleicher Kontaminationsstufe zeigt, dass im Grünlandoberboden stets signifikant weniger pflanzenverfügbares U vorlag als in den Substraten mit geringerer Bodenfruchtbarkeit.

Tab. 3: Bodenkundliche Merkmale der Versuchsböden

Standort	Bodenart	FAO-Boden- klassifikation	Bodentiefe		pH	C _t [%]	N _t [mg g ⁻¹]	P _{CAL} [mg kg ⁻¹]	K _{CAL} [mg kg ⁻¹]	U _{PV} [mg kg ⁻¹]
			[cm]							
Grünland	schluffig- lehmiger Sand	Dystric Cambi- sol/ Orthic Lu- visol	Ober- boden	0-25	5,9	1,2	1,0	108	261	0,02
			Unter- boden	25-50	4,8	0,5	0,4	20	246	0,03
Wald	anlehmiger Sand	Leptic Podzol	Ober- boden	0-25	3,5	2,0	1,1	48	25	0,04
			Unter- boden	25-50	3,8	0,6	0,4	20	5	0,04

Tab. 4: Einfluss der Bodenfruchtbarkeit auf den pflanzenverfügbaren Urangelgehalt (U_{PV}) [mg kg⁻¹] im Boden. Gefäßversuch 1; *Lolium perenne*, ungedüngt, 58 Wochen nach der Kontamination mit U₃O₈

Bodensubstrat ungedüngt	Uran-Kontamination [mg kg ⁻¹ U]			
	0	250	500	1.000
	U _{PV} [mg kg ⁻¹]			
Grünland Oberboden	0,02	25	54	117
Grünland Unterboden	0,03	79	130	309
Wald Oberboden	0,04	78	160	297
Wald Unterboden	0,04	86	148	317
Mittelwert (GD _{0,05} : 32,2)	0,03	67	123	260

Im Mittel wurden etwa dreifach höhere U_{PV}-Gehalte in diesen Bodensubstraten (Grünlandunterboden, Waldober- und -unterboden) gemessen.

Die Ursache dafür ist zuerst in der unzureichenden P-Versorgung in Verbindung mit der sauren Bodenreaktion zu sehen. Bei den beiden Substraten aus den unteren Bodenschichten kommt der nur geringe Gehalt an organischer Substanz verstärkend hinzu (Tab. 3). Die Untersuchungen von Schönbuchner (2002) an Haldenböden zeigten ebenfalls eine deutliche Bindungs-Präferenz von U an die organische Substanz.

Die meliorative P-Düngung (1.500 mg kg⁻¹) in Form von CaHPO₄ zu Versuchsbeginn führte zu erheblich niedrigeren U_{PV}-Gehalten in allen Substraten (Tab. 5). Im Grünlandoberboden wurden für alle Kontaminationsstufen um etwa die Hälfte geringere U-Gehalte im Boden gemessen. Der reduzierende Effekt der P-Zugabe war in den weniger fruchtbaren Substraten sehr ausgeprägt: bis zu 89% niedrigere U_{PV}-Gehalte wurden hier ermittelt. Die Zugabe von CaCO₃ im 2. Versuchsjahr bewirkte nur im Grünlandoberboden-Substrat eine deutliche Senkung des U_{PV}-Gehaltes um 20% bei allen Uran-Kontaminationsstufen (Tab. 6).

Sowohl im Grünlandunterboden- als auch im Wald-oberboden-Substrat war lediglich für die niedrigste Kontaminationsstufe (250 mg kg⁻¹ U) ein geringer Effekt zu verzeichnen. In den anderen Varianten stieg nach der Kalkung der Gehalt an U_{PV} im Substrat an. Dieser Effekt ist auf den Anstieg der Ca²⁺-Ionen in den Bodensubstraten zurückzuführen. Metall-Ionen (hier UO₂²⁺-Ionen), die an die Bodenkolloide gebunden sind, werden durch freie Ca²⁺-Ionen ersetzt und gehen in die Bodenlösung über (Schroeder, 1992). Sie liegen somit in pflanzenaufnehmbarer Form vor.

Tab. 5: Einfluss der P-Düngung auf den pflanzenverfügbaren Urangehalt (U_{PV}) [mg kg^{-1}] in unterschiedlichen Bodensubstraten, Gefäßversuch 1, *Lolium perenne*, 58 Wochen nach der Kontamination mit U_3O_8

Bodensubstrat mit P-Düngung	U-Kontamination [mg kg^{-1} U]			
	0	250	500	1.000
	U_{PV} [mg kg^{-1}]			
Grünland Oberboden	0,01	12	27	55
Grünland Unterboden	0,01	15	27	77
Wald Oberboden	0,02	29	18	78
Wald Unterboden	0,03	13	33	61
Mittelwert (GD _{0,05} : 9,7)	0,02	18	26	68

Tab. 6: Einfluss der Kalkung auf den pflanzenverfügbaren Urangehalt (U_{PV}) [mg kg^{-1}] in unterschiedlichen Bodensubstraten, Gefäßversuch 1, *Lolium perenne*, 58 Wochen nach der Kontamination mit U_3O_8

Bodensubstrat mit Kalkung	U-Kontamination [mg kg^{-1} U]			
	0	250	500	1.000
	U_{PV} [mg kg^{-1}]			
Grünland Oberboden	0,01	21	42	92
Grünland Unterboden	0,03	69	145	260
Wald Oberboden	0,02	70	159	307
Wald Unterboden	0,03	87	172	313
Mittelwert (GD _{0,05} : 13,0)	0,03	62	130	243

Einfluss von Bodenfruchtbarkeit, P-Düngung und Kalkung auf den Urangehalt in Pflanzen

Das Wachstum der Graspflanzen wurde maßgeblich durch die natürliche Bodenfruchtbarkeit beeinflusst. Erhöhte U-Kontaminationen der Bodensubstrate wirkten sich negativ auf die Blattmasseentwicklung aus. Dieser Effekt der Wachstumshemmung war auf dem Waldunterboden-Substrat am stärksten ausgeprägt (Abb. 2).

Der U-Gehalt in den Blättern von *Lolium perenne* stieg mit zunehmender U-Kontamination der Bodensubstrate deutlich an. Besonders ausgeprägt war das

bei den Pflanzen, die auf den Substraten mit der geringsten Bodenfruchtbarkeit wuchsen (Abb. 3). Zum Zeitpunkt des intensivsten Wachstums, im Juni des 2. Versuchsjahres (4. Schnitt), wurden auf dem mit 1.000 mg kg^{-1} U kontaminierten Waldunterboden-Substrat in den Blättern von *Lolium perenne* bis zu 44 mg kg^{-1} U (TM) bestimmt. Die Qualität der Bodensubstrate selbst hatte nachhaltigen Einfluss auf die U-Gehalte der Pflanzen. Je höher die natürliche Fruchtbarkeit der Substrate war, desto geringere U-Konzentrationen waren im Gras nachweisbar.

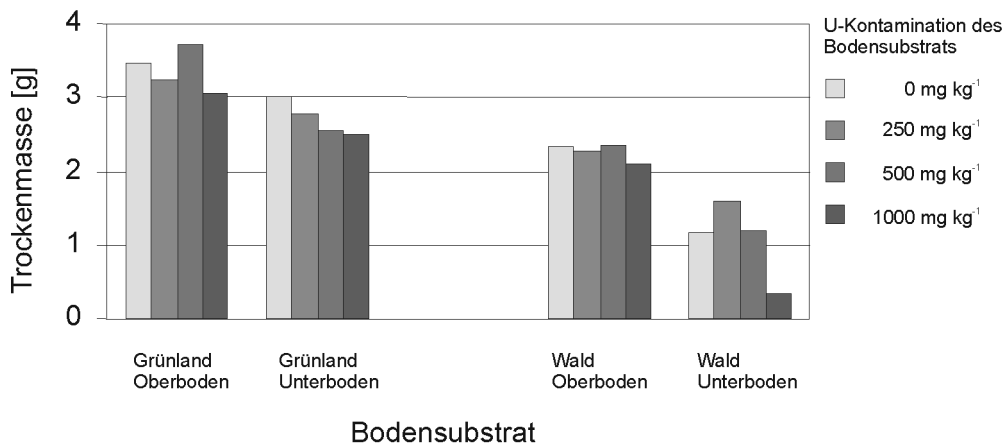


Abb. 2: Einfluss von Bodenfruchtbarkeit und Urankontamination des Bodens auf den Trockenmasseertrag [g] von *Lolium perenne*. Gefäßversuch 1, 40 Wochen nach der Kontamination mit U₃O₈, 4. Schnitt

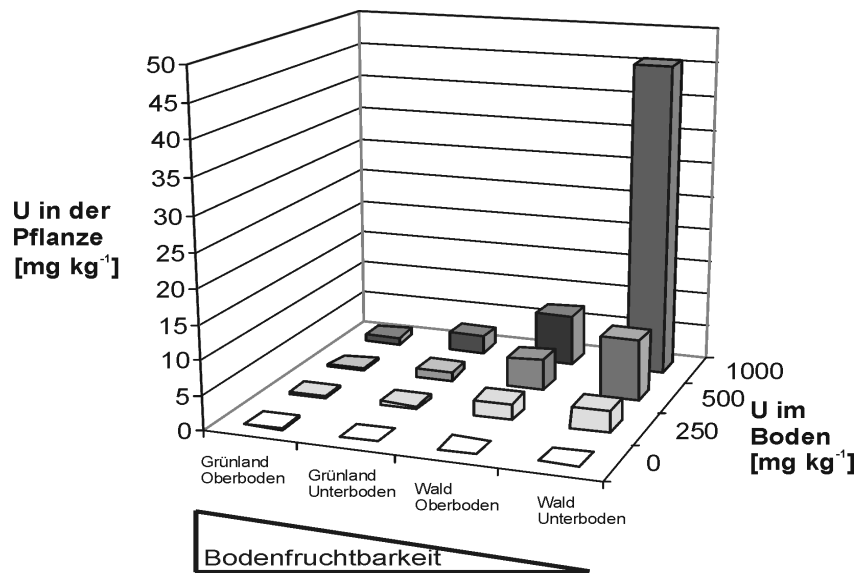


Abb. 3: Einfluss der Bodenfruchtbarkeit auf den Uragehalt [mg kg⁻¹] in *Lolium perenne*. Gefäßversuch 1, 40 Wochen nach der Kontamination mit U₃O₈, 4. Schnitt

In Tab. 7 sind die in den Blättern von *Lolium perenne* gemessenen U-Gehalte in Abhängigkeit von P-Zufuhr und Kalkung als Mittelwerte über alle U-Kontaminationsstufen zusammengestellt.

Die meliorative P-Düngung führte auf allen Bodensubstraten und U-Kontaminationsstufen zu einer vergleichbaren Senkung der U-Gehalte in der Pflanzensubstanz. Ursache sind die in den P-gedüngten Varianten weitaus niedrigeren U_{PV}-Gehalte im Bodensubstrat (Tab. 5), da pflanzenaufnehmbare Uranyl-Ionen wahrscheinlich an Phosphatkomplexe gebunden wurden.

Die Kalkung in Form von CaCO₃ ging mit einer Anhebung der pH-Werte in den jeweiligen Bodensubstraten einher (Tab. 7). Die Kalkzufuhr bewirkte vor

allem in den Varianten mit weniger fruchtbaren Bodensubstraten und hoher U-Kontamination eine Senkung der U-Gehalte in *Lolium perenne* im Vergleich zu den ungedüngten Varianten. Das Gras reagierte hier auf die Kalkung mit nachweislich besserem Wachstum, die nachfolgenden Schnitte lieferten im Mittel zweifach höhere Trockenmasseerträge. Die verminderten U-Konzentrationen in den Pflanzen sind daher als Verdünnungseffekt zu interpretieren.

Die höchsten U-Blattgehalte wurden auf Waldunterboden ohne P-Düngung und Kalkung gemessen.

Die Kombination von P-Düngung und Kalkung reduzierte die U-Gehalte in der Blattschicht in allen Kontaminationsstufen auf Werte, die als tolerabel gelten (< 0,4 mg kg⁻¹; nach Dreesen & Marple, 1979).

Pulhani (2005) fand ebenfalls eine Reduzierung der U-Aufnahme nach mineralischer bzw. organischer Düngung; der U-Gehalt in Getreidekörnern wurde durch Düngung um mehr als zwei Drittel reduziert.

Ein zweiter Gefäßversuch mit Mais (*Zea mays* L.), Sonnenblumen (*Helianthus annuus* L.) und Ackerbohnen (*Vicia faba* L.) dokumentierte, dass Unterschiede im U-Aufnahmevermögen zwischen diesen Fruchtarten im vegetativen Stadium bestehen (Tab. 8).

Die Untersuchungen erfolgten ebenfalls an den oberirdischen Pflanzenteilen: Stängel und Blätter. Nach sechs Wochen wiesen Sonnenblume und Ackerbohne in der höchsten U-Kontaminationsstufe höhere U-Gehalte in der Pflanzensubstanz auf als Mais, obwohl die U_{PV} -Gehalte der durchwurzelteten Bodensubstrate relativ ausgeglichen waren. Bei den relativ hohen Temperaturen während der Versuchsdurchführung (mittlere Temperatur 20,1° C, bei Tagesmaxima bis zu 34° C und bis zu 14 Stunden Sonnenscheindauer) zeigte die C₄-Pflanze Mais gegenüber den C₃-Pflanzen Sonnenblume und Ackerbohne deutliche Wachstumsvorteile (von Sengbusch, 1989). Die im Vergleich erhöhte Nettosyntheserate der Maispflanzen hatte einen gesteigerten Zuwachs an Biomasse zur Folge, was zu geringeren U-Konzentrationen im Pflanzengewebe führte. Ein weiterer Grund für die höheren U-Gehalte im Spross von Sonnenblumen und

Ackerbohnen ist darin zu sehen, dass blattreiche, dikotyle Pflanzen in der Regel mehr Mineralstoffe einlagern als monokotyle Pflanzen (Bargagli, 1998) Auch Entry et al. (1996) beschreiben für Sonnenblumen ein starkes U-Aneignungsvermögen.

Erhöhte P-Gehalte im Boden gingen auch in diesem Versuch mit der Senkung des U_{PV} -Gehaltes im Substrat einher. In der Folge war auch im Pflanzengewebe weniger U enthalten. Bei erhöhtem N-Angebot wurden höhere U-Gehalte in Mais und Sonnenblumen gemessen. Die in diesen Varianten geringeren U_{PV} -Gehalte in den Substraten weisen darauf hin, dass bei höherem N-Angebot durch Anregung des pflanzlichen Stoffwechsels der Stofffluss aus dem Boden in die Pflanze ansteigt und auf diesem Wege die Uranyl-Ionen verstärkt aufgenommen werden.

Die bedarfsgerechte S-Ernährung der Pflanzen wirkte sich positiv auf das Pflanzenwachstum aller Fruchtarten aus. Die U-Konzentrationen, die im Pflanzengewebe gemessen wurden, waren deutlich niedriger als in den Varianten ohne zusätzliche S-Düngung, was auch in diesem Fall als Verdünnungseffekt infolge einer geförderten Biomasseentwicklung interpretiert werden kann. Eine andere mögliche Ursache ist nach McLaughlin (2002) auch in der Bindung von Uran an Sulfatkomplexe im Bodensubstrat zu sehen.

Tab. 7: Einfluss von Bodenfruchtbarkeit, P-Düngung, Kalkung und pH-Wert auf den U-Gehalt [mg kg^{-1}] von *Lolium perenne*, Gefäßversuch 1, 50 Wochen nach der Kontamination mit U_3O_8 , 6. Schnitt

U-Gehalt von <i>Lolium perenne</i> , Prüfgliedmittelwerte [mg kg^{-1} U]				pH-Wert im Bodensubstrat	
Bodensubstrat	P-Düngung		Kalkung		
Grünland Oberboden 0,27	ohne	0,35	ohne	0,44	6,3
			mit	0,25	6,9
	mit	0,18	ohne	0,20	6,5
			mit	0,16	6,8
Grünland Unterboden 0,90	ohne	1,63	ohne	1,72	5,0
			mit	1,55	6,7
	mit	0,18	ohne	0,14	5,6
			mit	0,21	6,6
Wald Oberboden 1,19	ohne	2,22	ohne	3,72	3,6
			mit	0,71	5,6
	mit	0,16	ohne	0,17	4,4
			mit	0,15	6,1
Wald Unterboden 1,64	ohne	3,17	ohne	4,89	4,2
			mit	1,45	5,6
	mit	0,11	ohne	0,11	4,9
			mit	0,11	6,3

Auf der Grundlage der Gesamt-U-Gehalte (U_t) des Bodens bzw. dem pflanzenverfügbaren Anteil (U_{PV}) und den in den Pflanzen gemessenen U-Gehalten wurden die Transferfaktoren (CF) für U aus dem Boden in die Pflanze nach folgenden Formeln berechnet:

$$CF = \frac{\text{mg kg}^{-1} U_{\text{Pflanze}}}{\text{mg kg}^{-1} U_t \text{ Boden}} \quad \text{bzw.}$$

$$CF = \frac{\text{mg kg}^{-1} U_{\text{Pflanze}}}{\text{mg kg}^{-1} U_{PV} \text{ Boden}}$$

Tab 8: Einfluss der U-Kontamination des Bodens und der P-, N- und S-Ernährung auf den verfügbaren U-Gehalt im Boden (U_{PV}) und die U-Gehalte [mg kg^{-1}] von *Zea mays*, *Helianthus annuus* und *Vicia faba*, Gefäßversuch 2, 6 Wochen nach der Aussaat

Prüffaktoren	[mg kg^{-1}]	U _{PV} -Gehalt im Bodensubstrat [mg kg^{-1} U]			U-Gehalt in den Pflanzen [mg kg^{-1} U]		
		Mais	Sonnenblume	Ackerbohne	Mais	Sonnenblume	Ackerbohne
U-Wirkung	166/173	39,1	37,6	33,5	1,21	0,95	1,82
	329/385	78,1	76,6	74,6	1,66	2,31	1,60
	660/664	180	176	178	3,72	4,34	5,28
P-Wirkung	334	156	154	154	2,27	3,02	2,92
	1.558	41,6	39,2	37	2,00	2,04	2,89
N-Wirkung	250	101	98,1	95,3	1,71	2,01	2,90
	500	97,3	95,6		2,59	3,05	
S-Wirkung	0	99,6	98,2	92,8	3,10	3,02	3,31
	50	98,5	95,4	97,9	1,25	2,04	2,50
fruchtartsspezifische Wirkung		99,1	96,8	95,3	2,13	2,53	2,90

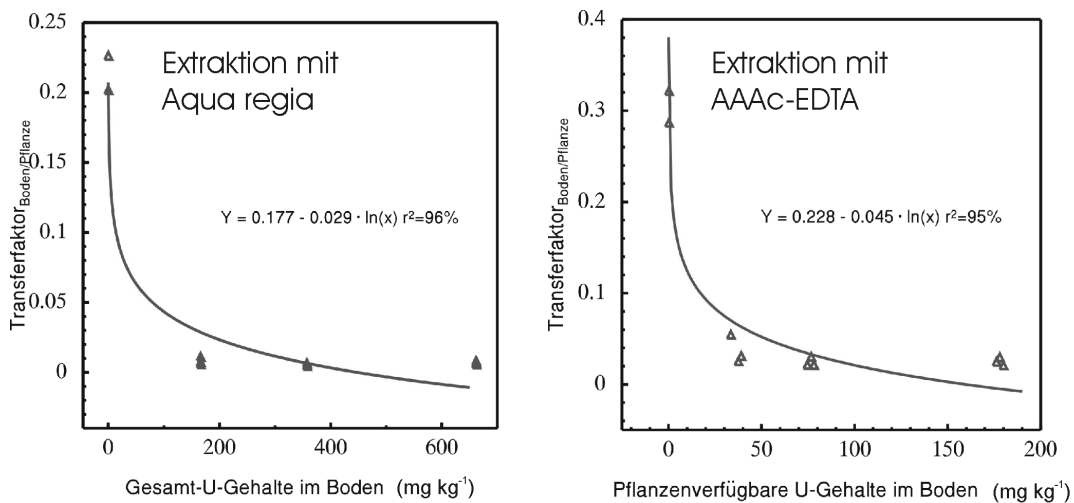


Abb 4: Höhe des U-Transferfaktors Boden/Pflanze in Abhängigkeit vom Gesamt-U-Gehalt bzw. vom pflanzenverfügbaren U-Gehalt im Bodensubstrat

In Abb. 4 sind die errechneten Transferfaktoren gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass der U-Transfer vom Boden in die Pflanze grundsätzlich von der den Berechnungen zugrundeliegenden U-Fraktion im Boden abhängt. Bezogen auf U_{PV} ist die anteilige Aufnahme durch die Pflanzen höher als bezogen auf U_t .

Beide Berechnungen zeigen, dass mit steigenden U-Gehalten im Boden die Transferfaktoren kleiner werden, was darauf hinweist, dass die im Experiment untersuchten Pflanzenarten kein unbegrenztes Aufnahmevermögen für U hatten. Zu gleichen Ergebnissen kamen Meyer et al. (2004), die den U-Transfer aus DU-kontaminiertem Boden in verschiedene Grasarten untersuchten. Die Autoren stellten außerdem eine Beziehung zum Wasserangebot fest. Geringe Boden-Pflanze-Transfer-Faktoren trotz hoher U-Kontamination des Bodensubstrates werden auch von Mortvedt (1994) und Lakshmanan und Venkateswarlu (1988) beschrieben.

Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse zeigen, dass U, einmal in den Boden gelangt, unter entsprechenden Bedingungen mobilisiert wird und dann offenbar in pflanzenaufnehmbarer Form vorliegt.

Die Aufnahme von U durch die Pflanze wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst:

Die Gesamtmenge an U, die ein Boden enthält, und deren potenziell pflanzenverfügbarer Teil sind von grundlegender Bedeutung. Wie hoch der Anteil des pflanzenverfügbaren U letztendlich ist, wird sowohl von standorttypischen Bodeneigenschaften wie der natürlichen Bodenfruchtbarkeit, als auch von Bewirtschaftungsmaßnahmen bestimmt.

Das Redoxpotential eines Bodens beeinflusst die Ionenwertigkeit von Metallen. Unter oxidierenden Bedingungen ändern sich dadurch die Bindungen zu Tonmineralen und organischen Komplexen, instabile und lösliche Metallverbindungen entstehen. Unter reduzierenden Verhältnissen gehen Schwermetall-Ionen u.a. Bindungen mit nicht löslichen Sulfidkomplexen ein. Auch Änderungen in der Bodenreaktion verändern die Löslichkeit von Metallverbindungen (McLaughlin, 2002). Durch Austausch von UO_2^{2+} -Ionen durch Ca^{2+} -Ionen an der Oberfläche von Bodenkolloiden nach einer Kalkung gehen die pflanzenaufnehmbaren Uranyl-Ionen in die Bodenlösung über. Gleiches geschieht infolge von Bodenversauerung, in diesem Fall werden die UO_2^{2+} -Ionen durch H^+ -Ionen ersetzt.

Die Textur, der Humusgehalt, Nährstoffversorgung und Wasserangebot sowie die biologische Aktivität eines Bodens sind weitere fruchtbarkeitsbestimmende Eigenschaften, von denen die Verfügbarkeit des U für Pflanzen abhängt (Schroetter et al., 2005).

Pflanzenspezifische Eigenschaften wie genotypisch determiniertes Absorptionsvermögen für Schwerme-

talle, Transport und Einlagerung derselben innerhalb der Pflanze sowie physiologische Unterschiede z.B. bei der Photosynthese oder im Wasserhaushalt entscheiden über die Aufnahme von U durch die Pflanze. Von Durchwurzelungsintensität und Wurzeltiefgang ist abhängig, wie groß die theoretische U-Menge ist, die eine Pflanze im Bodengefüge tatsächlich erreichen kann. Auch Rhizosphäreneffekte spielen bei Veränderungen der kleinräumigen Bodenchemie eine nicht zu vernachlässigende Rolle.

Die Untersuchungen zeigen, dass Pflanzenwurzeln zugleich mit Nährstoffen und Wasser auch giftige Uranverbindungen aus der Bodenlösung aufnehmen und dass das aufgenommene U in die oberirdischen Pflanzenorgane eingelagert wird. Ein möglicher Transfer derartiger Substanzen aus dem Boden über die Pflanze in die Nahrungskette muss unterbunden werden. Der Bodenfruchtbarkeitszustand ist offenbar ausschlaggebend für die Menge an pflanzenaufnehmbarem U im Boden und die U-Konzentration im Gewebe der darauf wachsenden Pflanzen. Eine hohe Phosphatkonzentration im Boden sowie die ausreichende Schwefelversorgung der Pflanzen scheinen Möglichkeiten zu sein, den Boden-Pflanze-Transfer von U zu begrenzen. Zu beachten ist hier jedoch, wie bereits eingangs erwähnt, dass über die P-Zufuhr auch U in den Boden eingetragen werden kann.

Literatur

- Anke M, Seeber O, Schäfer U** (2003) Uran in der Nahrungskette des Menschen, Verzehr, scheinbare Absorption und Bilanz. In: 19. GMS Jahrestagung, 6.-8. Nov. 2003 in Berlin, Zusammenfassung der Vorträge: p 30
- Bargagli R** (1998) Trace elements in terrestrial plants: an ecophysiological approach to biomonitoring and biorecovery. Springer-Verlag, New York: 324 pp
- BbodSchV** (1999) Anhang 2, BGBI I 1999, 1554
- Briefert C** (1994) Umweltchemie. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim: 453 pp ISBN 3-527-28692-6
- Cothorn CR, Lappenbusch WL** (1983) Occurrence of Uranium in Drinking Water in the U.S. Health Physics: (45) 89-99
- Cramer HH, Kloke A, Jarczyk HJ, Kick H** (1981) Bodenkontamination. In: Uhlmanns Enzyklopädie der technischen Chemie. 4. Aufl., Bd. 6, VCH Weinheim: 506-517
- Dreesen DR, Marple ML** (1979) Uptake of Trace Elements and Radionuclides from Uranium Mill Tailings by Four-wing Saltbrush (*Atriplex canescens*) and Alkali Sacaton (*Sporobolus airoides*). Symposium on Uranium Mill Tailings Management. Colorado State University, Fort Collins, Colorado: 127-143

- Entry JA, Vance NC, Hamilton MA, Zabowski D, Watrud LS** (1996) Phytoremediation of soil contaminated with low concentrations of radionuclides. *Water Air Soil Pollut* 88: 167-176
- Finck A** (1991) Pflanzenernährung in Stichworten. 5. Aufl., Kiel, Hirth-Verlag: 200 pp ISBN 3-443-03100-5
- Fleckenstein J** (1972) Untersuchungen an Alkali-oxofluoruranaten. Dissertation. Universität Tübingen
- Kabata-Pendias A, Pendias H** (2001) Trace elements in soils and plants. Boca Raton, London, New York: CRC Press: 413 pp
- Lakshmanan AR, Venkateswarlu KS** (1988) Uptake of uranium by vegetables and rice. *Water Air Soil Pollut* 38: 151-155
- Lamas M** (2005) Factors affecting the availability of uranium in soils. *Landbauforschung Völkenrode, SH* 278: 102 pp ISBN 3-86576-002-3
- Lamas M, Fleckenstein J, Schroetter S, Sparovek RM, Schnug E** (2002) Determination of Uranium by Means of ICP-QMS. *Comm Soil Sci Plant Anal* 15-18(33): 3469-3479
- McLaughlin MJ** (2002) Heavy Metals. In: Lal, R. (Hrsg.) *Encyclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker, New York, Basel: 650-653 ISBN 0-8243-0634-X
- Meier U** (2001) Entwicklungsstadien mono- und dykotyler Pflanzen, BBCH Monografie, 2. Auflage, Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft
- Meyer M, McLendon T, Price D, Fleckenstein J, Schnug E** (2004) Uptake of Munitions-Derived Depleted Uranium by Three Grass Species. *J Plant Nutrition* 27/8: 1415-1429
- Milvy P, Cothorn CR** (1990) Scientific Background for the Development of Regulations for Radionuclides in Drinking Water. In: Cothorn, C. R.; Rebers, P. (Hrsg.) *Radon, Radium and Uranium in Drinking Water*. Lewis Publishers, Chelsea, Michigan: 1-16
- Mortvedt JJ** (1994) Plant and soil relationships of uranium and thorium decay series radionuclides – a review. *J Environ Qual* 23: 643-650
- Pulhany VA** (2005) Uptake and distribution of natural radioactivity in wheat plants from soil. *J Environ Radioactivity* 79/3: 331 pp
- Richter G** (1988) Stoffwechselphysiologie der Pflanzen. 5. überarb. Aufl., Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York: 639 pp ISBN 3-13-442005-8
- Rivas M** (2005) Interactions between Soil Uranium Contamination and Fertilization with N, P and S on the Uranium Content and Uptake of Corn, Sunflower and Beans, and Soil Microbiological Parameters. *Landbauforschung Völkenrode, SH*: im Druck
- Schilling G** (2000) *Pflanzenernährung und Düngung*. Ulmer, Stuttgart (Hohenheim): 464 pp ISBN 3-8252-8189-2
- Schnug E, Sparovek RBM, Lamas M, Kratz S, Fleckenstein J, Schroetter S** (2005) Uranium Contamination. In: Lal, R. (Hrsg.) *Encyclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker Inc.; New York, Basel: im Druck
- Schönbuchner H** (2002) Untersuchungen zu Mobilität und Boden-Pflanze-Transfer von Schwermetallen auf/in uranhaltigen Haldenböden. Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena, 168 pp
- Schroetter S, Rivas M, Lamas M, Fleckenstein J, Schnug E** (2005) Factors affecting the plant availability of uranium in soils. In: Merkel, B.; Hascheberger, A. (Hrsg.) *Uranium in the Environment. Mining Impact and Consequences*. Springer Berlin, Heidelberg: 885-894 ISBN 10-3-540-28363-3
- Schroetter S, Rogasik J, Schnug E** (2005) Root growth and agricultural management. In: Lal, R. (Hrsg.) *Encyclopedia of Soil Science – Soil Fertility and Plant Nutrients*. Marcel Dekker Inc.; New York, Basel: im Druck
- Sillanpää M** (1982) Micronutrients and the nutrient status of soils: a global study. *FAO Soils Bulletin* 48, Rome, 444 pp
- Sparovek RBM, Fleckenstein J, Schnug E** (2001) Issues of Uranium and Radioactivity in natural waters. *Landbauforschung Völkenrode* 4(51): 149-157
- UNEP** (2001) *Depleted Uranium in Kosovo. Post-Conflict Environmental Assessment*. Genf: SRO-KUNDIG: 186 pp
- von Sengbusch P** (1989) *Botanik*. McGraw-Hill, Hamburg, New York: 864 pp ISBN 3-89028-217-2
- Wallnöfer PR, Engelhardt G** (1988) Schadstoffe, die aus dem Boden aufgenommen werden. In: Hock, B.; Elstner, E.F. (Hrsg.) *Schadwirkungen auf Pflanzen. Lehrbuch der Pflanzentoxikologie*. 2. überarb. Aufl., BI-Wiss.-Verl. Mannheim, Wien, Zürich: 95-117 ISBN 3-411-03181-6

Genotypical differences in callus induction and regeneration of plantlets produced from asparagus (*Asparagus officinalis* L.) anther cultures

Tarek Shalaby¹, Silvia Haneklaus² and Ewald Schnug²

¹Horticulture Department, Faculty of Agriculture, Tanta University, Kafer El-Sheikh, 33516 Egypt

²Institute of Plant Nutrition and Soil Science, Federal Agricultural Research Centre (FAL), Bundesallee 50, D-38116 Braunschweig, Germany

Summary

It was the aim of this study to determine genotypical differences for callus induction and differentiation of asparagus (*Asparagus officinalis* L.) anther cultures. At the uninucleate stage, anthers of three asparagus cultivars, „Huchels Alpha“, „Record“ and „Schwetzinger Meisterschuss“, were cultured on Murashige and Skoog medium (MS) supplemented with 3% sucrose, 0.1 mg L⁻¹ naphthalene acetic acid (NAA), 0.5 mg L⁻¹ benzyladenine (BA) and 0.5 mg L⁻¹ 2,4-Dichloro-phenoxyacetic acid (2,4-D). The percentage of responding anthers ranged from 40% to 66%. The cultivar „Record“ showed the highest percentage of responding anthers, „Huchels Alpha“ the lowest. The calli were transferred to the following media for differentiation: MS medium supplemented with 3% sucrose, 0.3 mg L⁻¹ BA and 0.2 mg L⁻¹ NAA (medium A) and MS medium supplemented with 3% sucrose, 0.1 mg L⁻¹ NAA, 0.1 mg L⁻¹ kinetin and 0.65 mg L⁻¹ ancymidol (medium B). The cultivar 'Record' produced the highest number of embryogenic calli on medium A. This cultivar showed in both growth media the highest number of embryos per dish, embryos per callus, plantlets per dish and number of plantlets per callus.

Key words: *androgenesis*, *anther culture*, *Asparagus officinalis* L., *embryogenic callus*

Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Untersuchungen war es, genotypische Unterschiede hinsichtlich der Induktion von Kalli und der Differenzierung von Antherenkulturen von Spargel (*Asparagus officinalis* L.) zu bestimmen. Im einkernigen Stadium wurden Antheren der drei Spargelsorten „Huchels Alpha“, „Record“ und „Schwetzinger Meisterschuss“ auf Murashige und Skoog Nährmedium (MS), zusammen mit 3% Saccharose, 0,1 mg L⁻¹ Naphtalen-Essigsäure (NAA), 0,5 mg L⁻¹ 6-Benzyladenin (BA) und 0,5 mg L⁻¹ 2,4-Dichlorophenoxyessigsäure (2,4-D), kultiviert. Die Anzahl reagierender Antheren variierte zwischen 40% und 66%. Hierbei zeigte die Sorte „Record“ die höchste und die Sorte „Huchels Alpha“ den niedrigsten Anteil reagierender Antheren. Die Kalli wurden anschließend auf Nährmedien mit folgender Zusammensetzung übertragen: A) MS Nährmedium, zusammen mit 3% Saccharose, 0,3 mg L⁻¹ BA, 0,2 mg L⁻¹ NAA; B) MS Nährmedium mit 3%

Saccharose, 0,1 mg L⁻¹ NAA, 0,1 mg L⁻¹ Kinetin und 0,65 mg L⁻¹ Ancymidol. Die Sorte „Rekord“ produzierte die höchste Anzahl embryogener Kalli auf dem Nährmedium A. Für die Sorte „Rekord“ wurden ebenfalls auf beiden Nährmedien die jeweils höchste Anzahl an Embryonen pro Petrischale, Embryonen pro Kallus, Jungpflanzen pro Petrischale und Jungpflanzen pro Kallus bestimmt.

Schlüsselwörter: *Androgenese*, *Antherenkultur*, *Asparagus officinalis* L., *embryogener Kallus*

Introduction

Asparagus officinalis L.) is a dioecious, perennial crop. Since asparagus male plants produce 25% more yield than female ones (Sneep, 1953), all-male hybrids (Mm) are produced by crossing super-male (MM) with female (mm) genotypes. Super-males can be obtained by two methods: self-pollination of hermaphroditic flowers on male plants, where only 25% of the progeny are super-male (MM) and by anther culture techniques, respectively. The first approach is limited by genetic and environmental factors, because male plants do not constantly produce hermaphroditic flowers (Feng & Wolyn, 1993). The reason why male asparagus cultivars are superior to female plants in crop yield is most likely that no photosynthate is required for seed production and they do not produce seedlings which compete with established plants for water and nutrients (Aneja et al., 1999). Therefore, plant breeding aims at producing homozygous clones. Traditional breeding of such pure lines, particularly that of open pollinating plants like for instance asparagus is time consuming and labor intensive. A consistent method to produce double-haploid plants is by anther and ovule cultures, which provide homozygous plants for classical and molecular genetic studies (Cao et al., 1995; Shalaby, 1996). Androgenetic calli or embryoids from one or a few microspores are produced from *in vitro* anther cultures of asparagus after 4-6 weeks to the development on a suitable medium (Doré, 1990). Studies with view to produce super-male asparagus plants via anther cultures were reported, but the results were inconsistent (Doré, 1974; Falavigna et al., 1983; Feng & Wolyn, 1991; Hondelmann & Wilberg, 1973; Inagaki et al., 1980; Rotondo et al., 1983). Anther cultures are a powerful technique that after 20 years of its development gained a distinct

impact on the release of asparagus cultivars (Veilleux, 1994). Among the different factors affecting androgenesis, the genotype has probably the most striking influence (Shalaby et al., 2003; Tsay et al., 1982). So, the frequency of anther producing callus depended on the cultivar and ranged from 0.7 to 26.5% (Qiao & Falavigna, 1990; Peilai et al., 1999). This result proved that the genotype is a key factor influencing the *in vitro* androgenesis of asparagus. It was the aim of this experiment to study the effect of three asparagus cultivars widely grown on production fields in Germany on the frequency of callus induction and callus differentiation.

Materials and methods

The asparagus genotypes used as anther donor plants were „Record“, „Huchels Alpha“ and „Schwetzinger Meisterschuss“.

The developmental stage of the microspores was determined by squashing anthers in 0.5% aceto-carmine. Flower buds of 1.5-2 mm containing microspores at the uninucleate stage, just before mitosis, were collected in August from field-grown plants and exposed to cold temperatures (4° C) for 48 hours. Then the buds were sterilized in 10% calcium hypochlorite for 10 minutes, afterwards rinsed three times with sterile distilled water and finally placed on a sterilized paper towel to absorb excessive surface water. From each genotype, about 250 (10 x 25) anthers without filament were carefully dissected from the flower buds before being placed onto the callus induction medium. This MS medium was that of Murashige and Skoog (1962) and which was supplemented with 3% sucrose, 0.1 mg L⁻¹ NAA (naphthalene acetic acid), 0.5 mg L⁻¹ BA (6-benzyladenine) and 0.5 mg L⁻¹ 2,4-D (2,4-dichlorophenoxyacetic acid) (Doré, 1974). Agar (8 g L⁻¹) was added before the pH of the medium was adjusted to 5.8 with 0.1 N NaOH and 0.1 N HCl. The medium was autoclaved at 121° C and 1.1 kg cm⁻² for 15 minutes. Every petri-dish (7 x 1 cm) contained 15 ml media. 25 anthers were placed in each petri-dish. This experiment was designed in completely randomized design with ten replicates. The dishes were then sealed with parafilm and incubated at 32° C in darkness for four weeks (Feng & Wolyn 1991). Afterwards, the anthers were incubated at 25° C with a photoperiod of 16 hours for in total 4 weeks. Then the number of calli was determined and the number of calli per 100 anthers was calculated.

The calli were transferred to two kinds of differentiation medium: MS medium supplemented with 3% sucrose, 0.3 mg L⁻¹ BA and 0.2 mg L⁻¹ NAA (medium A) and MS medium supplemented with 3% sucrose, 0.1 mg L⁻¹ NAA, 0.1 mg L⁻¹ kinetin and 0.65 mg L⁻¹ ancymidol (medium B), respectively.

After four weeks the number of embryogenic calli and the number of embryos per callus were determined.

The embryos were transferred to a germination medium (MS hormone free medium) and the number of total plantlets per dish and number of plantlets per callus was determined after four weeks. Then, plantlets were transferred to rooting medium (MS medium supplemented with 0.1 mg L⁻¹ NAA).

Cytological study: Root tips (1-1.5 cm) from plantlets of the cultivars „Record“ and „Huchels Alpha“ were treated with 0.05% colchicine for two hours and then fixed in 3:1 ethanol:glacial acetic acid for 24 hours, and afterwards washed with distilled water. The roots were hydrolyzed in 1 N HCl for 5 minutes at 60° C. Afterwards, they were stained with aceto-carmine, squashed gently and investigated by employing a light microscope to determine the number of chromosomes. The data was processed by analysis of variance; the Duncan's multiple range test of the SPSS program version 10 was used for the comparison between treatments (SPSS, 1999).

Results and discussion

Callus induction

The data presented in Tab. 1 show that the asparagus genotypes differed significantly in the callus induction rate. The cultivar „Record“ showed the highest percentage of responding anthers, while these values were lower for „Huchels Alpha“ and „Schwetzinger Meisterschuss“ with 40 % and 54 %, respectively. These values are distinctly higher than those reported by Peilai et al. (1999), who found variations of only 7.1% to 26.5% when using the cultivars UC72, UC711, UC157 and MW500, which were cultured on the same medium as those in the presented study. However, Shuxing et al. (1995) showed that 29 to 84% of all anthers formed callus when different plants of the cultivar UC72 were compared. Differences among cultivars and individual plants of the same cultivar can be attributed to the genetic diversity of the F₁ population (Tsay et al., 1982). In experiments of Shalaby et al. (2003) significant differences between asparagus cultivars in callus induction rate and number of embryogenic calli were found. Callus formation, embryo and plantlet development are shown exemplary for the cultivar „Record“ in Fig. 1.

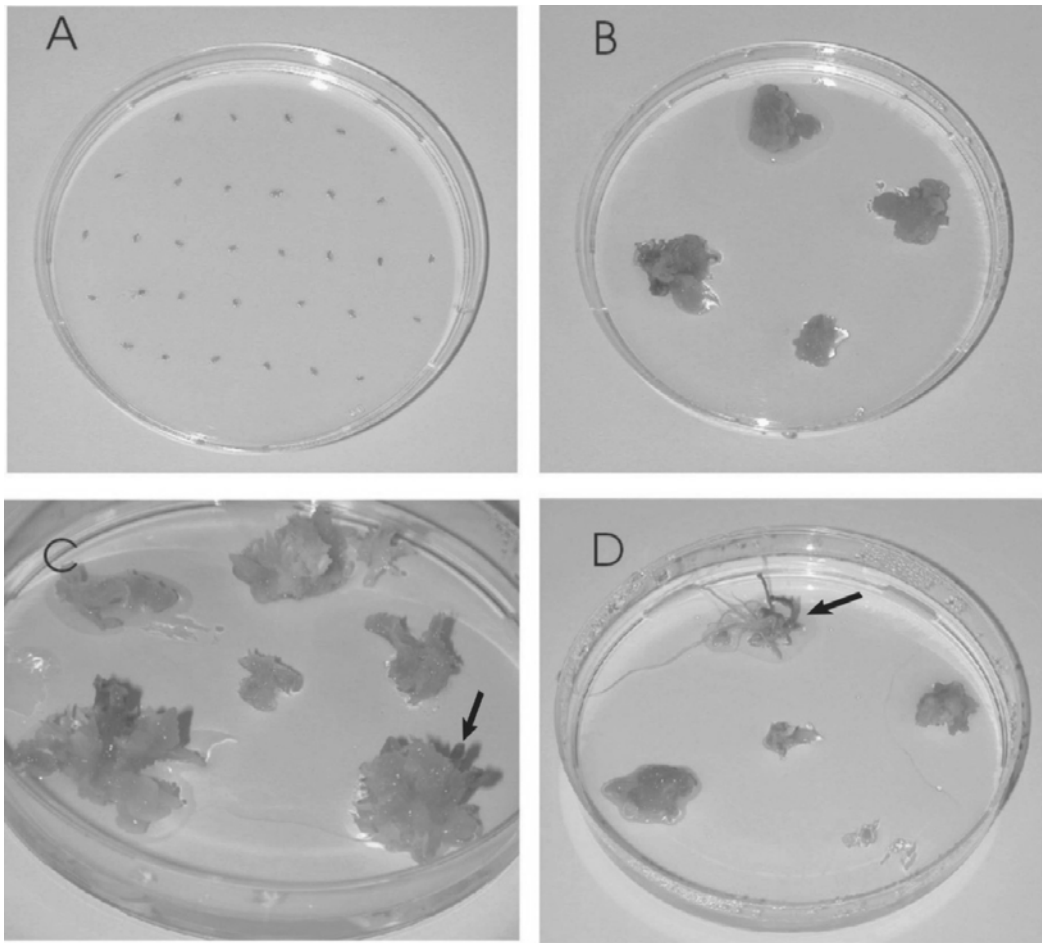


Fig. 1: Plantlet development from anther cultures of the cultivar “Record”. **A:** Excised anthers. **B:** Callus formation after 8 weeks. **C:** Embryo formation after 12 weeks. **D:** regenerated plantlets after 16 weeks

Tab. 1: Genotypical differences in callus induction of asparagus anther cultures

Cultivar	Number of calli per dish ¹	Anthers forming calli (%)
Record	16.5 a	66
Huchels Alpha	10.0 c	40
S. Meisterschuss	13.5 b	54

¹Numbers with different characters indicate statistically different means at the 5% level of the Duncan test. Every dish contained 25 anthers.

Callus differentiation

The influence of the genotype on the number of embryogenic calli and the percentage of embryogenic calli is shown in Tab. 2. The data reveal that the growth medium had an impact on the number of embryogenic calli. Again the cultivar „Record“ had the highest rate of embryogenic calli. The medium A was favorable with view to a higher rate of embryogenic callus than medium B. This could possibly be due to the presence of BA (Shuxing et al., 1995). The highest percentage of calli (86% and 46.6%) that yielded embryos was determined for the cultivar „Record“ in both growth media (Tab. 2). In

studies of Qiao and Falavigna (1990) about 20% of the asparagus calli were not regenerated or produced abnormal shoots and roots. This rate was distinctly higher for „Huchels Alpha“ and „Schwetzinger Meisterschuss“ (Tab. 2). In comparison, Peilai et al. (1999) found that only 20% from the calli formed shoot apices or plantlets. Also, Shalaby et al. (2003) reported that the percentage of embryogenic calli ranged from 19.7% to 52.8% in dependence on the genotype. Wolyn and Feng (1993) revealed that genotype, incubation temperature and sampling date strongly affected the number of embryogenic calli in asparagus anther cultures.

Tab. 2: Genotypical differences in the number of embryogenic calli produced from asparagus anther cultures in relation to the differentiation medium

Cultivar	Medium A		Medium B	
	Number of embryogenic calli per dish	Embryogenic calli (%)	Number of embryogenic calli per dish ¹	Embryogenic calli (%)
Record	4.3 a	86.0	2.5 a	46.6
Huchels Alpha	2.5 b	50.0	2.0 a	40.0
S. Meisterschuss	2.0 b	40.0	0.6 b	12.0

¹Numbers with different characters indicate statistically different means at the 5% level of the Duncan test.

Every dish contained 25 anthers

Tab. 3: Genotypical differences in the number of embryos, embryos per callus, plantlets and plantlets per callus differentiated from asparagus anther culture in relation to the growth medium

Cultivar	Medium A				Medium B			
	Number of embryos per dish ¹	Number of embryos per callus	Number of plantlets per dish	Number of plantlets per callus	Number of embryos per dish	Number of embryos per callus	Number of plantlets per dish	Number of plantlets per callus
Record	37.0 a	7.4 a	29.0 a	5.8 a	42.5 a	8.5 a	26.5 a	5.3 a
Huchels Alpha	31.0 b	6.2 b	9.5 b	1.9 b	31.5 b	6.3 b	21.5 b	4.3 b
S. Meisterschuss	27.5 c	5.5 c	2.5 c	0.5 c	18.5 c	3.7 c	0.0 c	0.0 c

¹Numbers with different characters indicate statistically different means at the 5% levels by the Duncan's test. Every dish contained 25 anthers

Regeneration of plantlets

Data presented in Tab. 3 show that the influence of the genotype on the number of embryo-like structures and plantlets was similar in both growth media. Again the cultivar „Record“ yielded the highest number of embryos, embryos per callus, plantlets and number of plantlets per callus. In this study, the number of plantlets per callus for the cultivar „Huchels Alpha“ was much higher than that determined by Shalaby et al. (2003), who used the same cultivar, but another induction medium. Feng and Wolyn (1991) tested three media for embryo maturation and found that 15% to 50% of the embryos matured and germinated. In another study, Shuxing et al. (1995) found that the highest frequency of shoot formation was obtained on the MS medium containing 0.1mg L⁻¹ BA as shoot formation proved to be sensitive to BA.

The examination of the regenerated plantlet root tips by light microscopy revealed that the chromosome number of cultivars 'Record' and „Huchels Alpha“ were haploid (10 chromosomes) in 15% and 10% of the plantlets, while correspondingly 85% and 90% were diploid. This is relevant as anther cultures in asparagus are used to produce homozygous super-male plants that can generate all-male progeny, an important criteria for breeding high yielding cultivars. The results of this study can be summarized as follows: the asparagus cultivar „Record“ produced

12% more calli than „Schwetzinger Meisterschuss“ and 26% more than „Huchels Alpha“, respectively. The same cultivar yielded a higher number of embryogenic calli than other cultivars and the differentiation medium A was favorable with view to a higher rate of embryogenic callus than medium B.

References

- Aneja M, Gianfagna TJ, Garrison SA, Duner EF (1999) Rapid sex-typing of asparagus for male hybrid seed production using n-propyl N-(3,4-dichlorophenyl) carbamate (NPC). Hort Science 34 (6): 1090-1094
- Cao MQ, Li Y, Liu F, Jiang T, Liu GS (1995) Application of anther culture and isolated microspore culture to vegetable crops improvement. Acta Hort 392: 27-38
- Doré C (1974) Production de plantes homozygotes males et females a' partir d'anthères d'asperge, cultivées in vitro. CR Acad Sci Paris 278 D: 2135-2138
- Doré C (1990) Asparagus anther culture and field trials of dihaploids and F1 hybrid. Biotechnology in agriculture and forestry 12: 322-345
- Falavigna A, Tacconi MG, Soressi GP (1983) Recent progress in asparagus breeding by anther in vitro culture. Acta Horticulturae 131: 215-222

- Feng XR, Wolyn DJ** (1991) High frequency production of haploid embryos in *Asparagus* anther culture. *Plant Cell Rep* 10 (11): 574-578
- Feng XR, Wolyn DJ** (1993) Development of haploid asparagus embryo from liquid cultures of anther-derived calli is enhanced by ancymidol. *Plant Cell Rep* 12 (5): 281-285
- Hondelmann W, Wilberg B** (1973) Breeding all-male cultivars of asparagus by utilization of anther and tissue culture. *Z. Pflanzenzuechtg* 69: 19-24
- Inagaki N, Harada T, Yakuwa T** (1980) Studies on the anther culture of Horticultural plants. I- Callus formation from the asparagus anther. *J Japan Soc Hort Science* 49 (1): 71-78
- Murashige T, Skoog F** (1962) A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco cultures. *Physiol Plant* 15: 473 - 497
- Peilai H, Liming C, Zhenglai Z, Shihua L, Gezhi S, Lin J** (1999) Anther culture and plant regeneration for *Asparagus officinalis* L.. Proceeding of the Eucarpia meeting on leafy vegetables genetics and breeding; 8-11 Jun 1999. Palacky University; Olomouc (Czech Republic) 302 p
- Qiao YM, Falavigna A** (1990) An improved in vitro anther culture method for obtaining doubled-haploid clones of asparagus. *Acta Hort* 271: 145-150
- Rotondo J, Harney P, Tiessen H** (1983) Direct and indirect embryogenesis in microspores of *Asparagus officinalis* L. cv. Viking. *Asparagus Research Newsletter* 1 (2): 8 - 9
- Shalaby TA** (1996) Producing double haploid plants through ovule and anther culture technique in *Cucurbita pepo* L. M.Sc. Thesis, Fac. Aric., Tanta Univ., Egypt
- Shalaby TA, Haneklaus S, Schnug E** (2003) Influence of growth regulators and cultivar on callus and embryo induction in anther cultures of asparagus (*Asparagus officinalis* L.) *Landbauforsch Voelkenrode* 53: 217-221
- Shuxing S, DaoQian Z, ChengHe Z, ShiXing L** (1995) Improved rate of callus and plantlet from anther culture of asparagus (*Asparagus officinalis* L.). *Acta Hort* 402: 299-305
- Sneep J** (1953) The significance of andromonoecy for the breeding of *Asparagus officinalis* L. *Euphytica* 2: 89-95
- SPSS** (1999) Statistical Package for the Social Sciences Incorporation, Chicago, Ill. SPSS base 10.0 applications guide. Chicago: SPSS, XI, 426 p, ISBN 0-13-017901-9
- Tsay HS, Lai PC, Chen LJ** (1982) The development of haploid plants of *Asparagus officinalis* L. through anther culture. *Taiwan Asparagys Res* 1981: 23-26
- Veilluex RE** (1994) Development of new cultivars via anther culture. *Hort Science* 29: 1238-1241
- Wolyn DJ, Feng X** (1993) Genotype, temperature, and sampling date affect embryogenesis in asparagus anther culture. *Hort Science* 28 (3): 216-217

Kalkung und Bodenleben

Kirsten Stöven und Ewald Schnug

Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Bundesallee 50, D-38116 Braunschweig

Zusammenfassung

Eine Bodenkalkung hat durch die Veränderung des pH-Wertes im Boden und die Stabilisierung der Bodenstruktur eine Wirkung auf die Organismen, die im Boden leben. Die veränderten Lebensbedingungen wirken in Kombination mit anderen Faktoren, die das Bodenleben beeinflussen. Neben dem pH-Wert wirkt die Bodenfeuchte stimulierend bzw. limitierend auf viele Bodenorganismen. So kann beispielsweise der pH-Wert des Bodens für eine Art optimal sein, aber die mangelnde Bodenfeuchte macht die Existenz dieser Organismen unmöglich.

Auf Artenebene verschiebt sich prinzipiell nach Bodenkalkungen das Artengefüge aller Bodenorganismen in Richtung neutrophiler oder alkalitoleranter Arten. Dies ist umso auffälliger, je saurer der Boden vor der Kalkung war. Ein infolge einer Bodenkalkung stabileres Hohlraumssystem kann die Abundanzen insbesondere der größeren Bodentiere erhöhen, die in den luftgefüllten Kammern des Bodens leben und nicht graben können.

Schlüsselwörter: *Bodenleben, Bodenorganismen, Kalkung, pH-Wert*

Summary

Soil liming affects soil organisms by changing soil pH and stabilizing soil structure. The changed living conditions become effective in combination with other factors, which control soil life. Beside the pH value, the soil moisture content is stimulating or limiting the life of soil organisms. The pH value of a soil might be ideal for one species, while the lack of soil moisture simply eliminates the existence of that organisms. At species level, the community is shifted towards pH-neutral or alkaline tolerant species by liming. This influence is more distinctive if the soil was extremely acid before liming. Following a soil liming treatment more stabile pores in the soil favor the abundance, especially of larger soil animals, which are existing in the air-filled pores and which are unable to burrow.

Keywords: *liming, pH value, soil life, soil organisms*

Einleitung

Mit dem Begriff Bodenleben wird die Gesamtheit der zwischen Erdoberfläche und tieferliegendem Gestein lebenden Organismen bezeichnet, synonym werden auch die Bezeichnungen Edaphon und Bodenbiozönose verwendet (Gisi, 1990; Topp, 1981).

Zum Bodenleben zählen Tiere (Bodenfauna) und Bakterien, Algen sowie Pilze (Bodenflora). Auch unterirdische Pflanzenorgane bzw. -teile wie Wurzeln, Knollen, Zwiebeln und Stolonen gehören zum Bodenleben. Das Leben in der Bodenzone ist ein noch recht wenig erforschtes Gebiet, so dass Durner (2002) den Lebensraum Boden als „Terra incognita“ bezeichnet. Der Lebensraum der Bodenorganismen ist das Hohlraumssystem zwischen den mineralischen und organischen Bodenteilchen (Abb. 1) oder in der Streuschicht (pflanzlicher Bestandsabfall). Die Bodenorganismen erzeugen durch Graben und Fressen der Bodenpartikel, Pflanzen durch das Wachstum von Wurzeln und Wurzelhaaren, ständig neue Hohlräume und Poren. Die ökologische Funktion der Bodenorganismen ist der Abbau der Streu bis hin zu anorganischen Molekülen, die den Pflanzen zum Aufbau neuer Biomasse dienen. Der Boden befindet sich im Idealfall in einem Fließgleichgewicht (Gisi, 1990). Nach dem Abfallen des Blattes vom Baum z.B. werden zunächst leicht lösliche Bestandteile der Biomasse wie z.B. Zucker, Aminosäuren etc. ausgewaschen, was zu einer Anreicherung von Bakterien und Pilzen im Boden führt. Im nächsten Schritt werden die Blätter von den Primärzersettern unter den Bodentieren durch Zerbeißen zerkleinert, dabei werden Zellstrukturen zerstört und die Zellfragmente und -inhalte für andere Bodenorganismen zugänglich gemacht (Anderson & Ineson, 1984). Mit dem Kot der Primärzersetzer werden die nur wenig verdauten Pflanzenteile wieder freigesetzt. Dieser dient wiederum Sekundärzersettern als Nahrung. Auf dem Kot der Primär- und Sekundärzersetzer siedeln Mikroorganismen an, die das Material in seine chemischen Bausteine zerlegen. Der Bakterien- und Pilzrasen wird von weiteren Sekundärzsetzern beweidet. Ohne diese Beweidung käme der Abbau des Materials zum Erliegen, da die Mikroorganismen sich nicht mehr vermehren würden (Gisi, 1990).

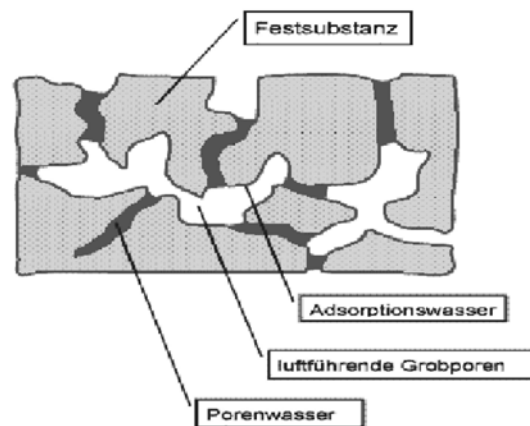


Abb. 1: Schematische Darstellung des Bodens als Hohlräumensystem (Staatliche Lehr- u. Versuchsanstalt für Wein- u. Obstbau Weinsberg)

Auf die Bodenorganismen wirken eine Vielzahl von physikalischen, chemischen, biologischen und anthropogenen Faktoren ein (Abb. 2), die die Zusammensetzung der biologischen Lebensgemeinschaft im Boden verändern und das Fließgleichgewicht des Auf- und Abbaus pflanzlicher Biomasse stören können.

Mit jedem Eingriff in den Boden, z.B. bei Bodenbearbeitung, Düngung oder Pestizideinsatz, werden die Lebensbedingungen zumindest für einen Teil der Bodenorganismen tiefgreifend verändert. Diese Arbeit beschäftigt sich mit den Auswirkungen der Bodenkalkung auf das Bodenleben. Bodenkalkungen werden zur Regulierung des pH-Wertes im Boden, zur Verbesserung der Nährstoffversorgung von Pflanzen durchgeführt. Die Beurteilung der Auswirkungen von Eingriffen in den Boden bzw. die Charakterisierung von Standorten kann anhand der am Standort leben-

den Bodenorganismen erfolgen. Dazu werden quantitativ und qualitativ erfassbare Daten gesammelt (Römbke et al., 1997) und Standorte mittels dieser verglichen oder Veränderungen nach Eingriffen in das Ökosystem ermittelt. Dunger (1978) schlägt u.a. die Erfassung von Artenzahl, Abundanz (Individuenanzahl pro Flächen-, Volumen- oder Gewichtseinheit), Reproduktion (z.B. Eizahl, Teilungsrate) oder Biomasse vor. Die Direktwägung der Individuen der Bodenbiozönose ist jedoch praktisch nur beim Regenwurm möglich, daher beruhen die Biomasseangaben in der Literatur für alle anderen Bodenorganismen auf Schätzungen, die anhand von Multiplikation des Durchschnittsgewichtes der Individuen einer Art mit der Abundanz errechnet werden (Römbke et al., 2002).



Abb. 2: Faktoren, die das Leben der Bodenorganismen beeinflussen

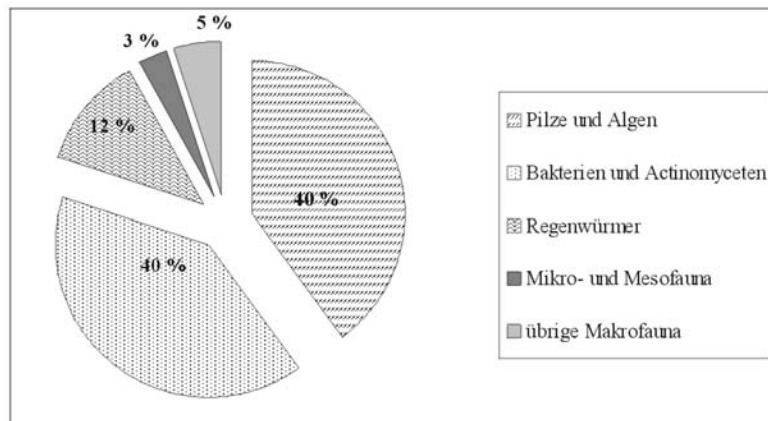


Abb. 3: Mittlere Zusammensetzung bezogen auf das Trockengewicht (Topp, 1981)

Die Biomasse ist wiederum eine Bezugsgröße für Funktionsparameter wie beispielsweise Respiration (Aufnahme von Sauerstoff), Streuabbau (Gewichtsabnahme von Laub im Netzbeutel) oder Verhaltensäußerungen von Bodenorganismen (z. B. Grabaktivität von Regenwürmern). Die Mitglieder der Bodenbiozönose werden anhand ihrer Körpergröße verschiedenen Größenklassen zugeordnet (Tab. 1; Gisi, 1990). Die Organismen mit der geringsten Körpergröße sind im Boden mit den höchsten Individuenzahlen vertreten. Abb. 3 zeigt die Zusammensetzung der Biozönose im Boden.

Auswirkungen der Bodenkalkung auf ausgewählte Bodenorganismen

Im Folgenden werden die Reaktionen ausgewählter Bodenorganismen auf die Bodenkalkung beschrieben.

Tab. 1: Klassifizierung der Bodenorganismen nach Größenklassen basierend auf Individuengrößen und Vertreter der Größenklassen (Gisi, 1990; Topp, 1981)

Größenklasse	Individuengröße	Organismen
Megafauna	>2cm	große Regenwürmer
Makrofauna	2mm – 2cm	Schnecken, kl. Regenwürmer, Asseln, Doppelfüßler
		Milben, Fadenwürmer, Enchytraeiden, Springschwänze, Rädertiere
Mesofauna	0,2 – 2mm	Protozoen
Mikrofauna	20 - 200µm	Algen, Pilze, Bakterien

Megafauna

Zur Megafauna zählen Regenwürmer und Wirbeltiere. Da Wirbeltiere wie Maulwurf und Spitzmaus jedoch nur in außerordentlich geringer Individuenzahl pro Flächeneinheit (i.d.R. ein Quadratmeter) verglichen mit den Individuenzahlen der anderen Vertreter des Edaphons auftreten, werden sie nicht berücksichtigt (Topp, 1981). Regenwürmer (Lumbriciden) sind an den meisten Standorten die für das Bodenökosystem wichtigsten Bodenorganismen (Römbke et al., 2002), deren Bedeutung für die Bodenfruchtbarkeit bereits Darwin (1904) bekannt war. Die Lumbriciden bewegen sich bohrend und fressend durch den Boden und hinterlassen bis zu 5 mm dicke Röhren (Bioporen), die für die Durchlüftung des Bodens wichtig sind (Gisi, 1990). Sie nehmen an der Oberfläche große Mengen Streu auf, die sich im Darm der Tiere mit den ebenfalls aufgenommenen mineralischen Bodenpartikeln vermischt. Die auf der Streuoberfläche befindlichen Bakterien werden während der Darmassage nicht abgetötet und tragen zur Zersetzung der pflanzlichen Substanz bei. Im Darm des Wurmes werden die zunächst unverdaulichen organischen und anorganischen Bestandteile durch Darmsekrete miteinander verkittet, dadurch werden feste organo-mineralische Verbindungen, bzw. Ton-Humus-Komplexe gebildet (Topp, 1981). Durch das Absetzen der Kothaufen an anderer Stelle als die Nahrungsaufnahme, erfolgt die Einmischung der Streu in den Boden. Da Regenwürmer nur einen geringen Teil der in der Streu enthaltenen Energie nutzen können, müssen sie große Mengen an Nahrung aufnehmen. Bodenorganismen der nachfolgenden Größenklassen dient der Kot der Regenwürmer als Nahrung (Topp, 1981).

Die Anzahl der Regenwürmer pro Quadratmeter Boden beträgt durchschnittlich 1-3 Individuen oder 56 g m⁻² Biomasse (Trockengewicht) (Gisi, 1990). In Deutschland sind 39 Arten aus der Familie der Lumbricidae bekannt (Graff 1983), an einem Standort

kommen etwa 2 - 9 Spezies vor (Roembke et al., 1997). Es werden anhand ihres Lebensraumes epigäische (Bewohner der Streuschicht) von anözischen (Tiefgräber) und endogäischen (Bewohner des Mineralhorizontes) Arten unterschieden. Allerdings können die Lumbricidae je nach Lebensalter und Umweltbedingungen in einen anderen Lebensraum wechseln (Römbke, 1997). Regenwürmer reagieren insbesondere auf Bodenfeuchtigkeitsverhältnisse sensibel und sind gegen Trockenheit (< 20 % Bodenfeuchte) sehr empfindlich. Weiterhin hat der pH-Wert des Bodens eine große Bedeutung für die Verbreitung von Regenwürmern. Offenbar bevorzugen die meisten Arten einen neutralen bis leicht basischen pH-Bereich (Römbke, 1997). Wird durch die Kalkung eines sauren Waldbodens der pH-Wert in Richtung Neutralpunkt verschoben, so wandern Regenwürmer auf die zuvor wurmlose Fläche. Diesen Kalkungseffekt kann man jedoch nur auf zuvor sehr sauren Böden beobachten (Römbke, 1997). Gisi (1990) berichtet von einer Verzehnfachung der Regenwurmpopulation nach Kalkung, allerdings bleibt eine Zunahme der Biomasse aus.

Makrofauna

Zu dieser Größenklasse (2 mm – 2 cm) gehören Vertreter unterschiedlichster physiologischer Tiergruppen wie kleine Regenwürmer, Schnecken, Asseln, Doppelfüßler, Larven von Fluginsekten und Webespinnen. Die Reaktionen der kleinen Regenwürmer auf Bodenkalkung sind mit denen größerer Regenwürmer vergleichbar.

Pro Quadratmeter Boden leben 2 - 3 Asseln (Isopoda) (Gisi, 1990), sie fehlen in Ackerböden jedoch weitgehend (Fründ, 1997). In Deutschland sind fast 50 Arten landlebender Asseln bekannt. Zoologisch werden sie zu den Krebsen (Crustacea) gestellt, daher ist ein wesentlicher Standortfaktor für Asseln die Feuchte bzw. der Wasserhaushalt eines Standortes, allerdings variiert infolge der Anpassung an das Landleben das Ausmaß der Feuchtepräferenz artspezifisch (Fründ 1997). Im Allgemeinen sind Asseln auf basen- und kalkreichen Böden häufiger als auf sauren zu finden (Fründ, 1997). Topp (1981) erklärt, dass Kalk im Panzer oder in der Schale von Schnecken, Asseln und Tausendfüßlern eingelagert ist. Diese Bodentiere sind daher auf verfügbaren Kalk angewiesen und unempfindlich gegenüber hohen pH-Werten. Die Individuenzahlen dieser Bodentiere nehmen bei Kalkmangel ab (Topp, 1981). Fründ (1997) fand jedoch auch an versauerten Standorten Asseln. Scheu (1990) beobachtete bei Bodenversauerung einen Rückzug der saprophagen Makrofauna aus dem Mineralboden in die Streuschicht.

Mesofauna

Zur Mesofauna gehören Bodentiere mit einer Körpergröße von 0,2 - 2 mm. Nur die größeren Vertreter der

Mesofauna sind mit bloßem Auge wahrnehmbar. In dieser Größenklasse werden Nematoden, Bodenarthropoden wie Milben (Acari) und Collembolen sowie Enchyträen vereinigt.

Nematoden (Fadenwürmer) leben semiaquatisch (Büttner 1988) im dünnen Wasserfilm (Adsorptionswasser, Abb. 1), der die Bodenpartikel umgibt (Topp, 1981, Gisi, 1997). Pro Gramm Boden sind 10-1000 Nematoden vorhanden (Gisi, 1997). Die Nematodenzönose des Bodens ist sehr artenreich, Büttner (1988) geht davon aus, dass zu den 20.000 bekannten Spezies noch etwa 80.000 unbekannt addiert werden müssen. Nematoden werden nach ihrer Ernährungsweise in trophische Gruppen eingeteilt (Gruber, 1994). Es gibt neben omnivoren Spezies auf bestimmte Nahrung spezialisierte Arten, z.B. bakterio- und mykophage Arten sowie carnivore Spezies, die sich von anderen Bodentieren (Protozoen, Bodenarthropoden) ernähren, hinzu kommen endo- und ektophytoparasitäre Arten höherer Pflanzen. Allen gemein sind die der jeweiligen Nahrung angepassten Saugmundwerkzeuge. Neben diesen der Bodenbiozönose zugeordneten Nematoden gibt es eine Vielzahl in Tieren parasitisch lebender Arten (Remane et al., 1985).

Nematoden sind gegenüber abiotischen Lebensbedingungen (Temperatur, Trockenheit) weitgehend unempfindlich, da sie diese über Jahre im Zustand der Anhydrobiose überdauern können (Topp, 1981). Aufgrund ihrer permeablen Kutikula werden sie von den physikochemischen Bedingungen des Bodenporenwassers direkt beeinflusst (Römbke et al., 2002). Büttner (1988) geht davon aus, dass eine abnehmende Abundanz oder das Verschwinden von Arten, die empfindlich auf steigende pH-Werte infolge einer Bodenkalkung reagieren, durch anpassungsfähige (euryöke) Arten ausgeglichen wird, so dass die gesamte Besiedlungsdichte eines Bodens mit Nematoden nicht verändert wird. Nach Yeates (1981) wirkt der pH-Wert eher indirekt auf Nematoden indem dieser wachstumshemmend oder stimulierend auf andere Bodenorganismen und die Pflanzendecke wirkt und somit die Nahrungssituation der Nematoden beeinflusst. Nach Gisi (1997) erhöhen mineralische und organische Düngemaßnahmen im Allgemeinen die Individuenzahlen der Nematoden, da durch die Düngung das Nährstoffangebot zunimmt.

Milben (Acari) werden in die Unterordnungen Hornmilben (Oribatiden) und Raubmilben (Gamasinen) differenziert (Römbke et al., 2002). Hornmilben sind im Allgemeinen phytophag, sie fressen artspezifisch bestimmte Algen, Pilzhyphen oder Flechten (Topp, 1981). Einige Arten können sogar Holz verwerten, andere zersetzen tote Tiere und Kot (Gisi, 1990). Die besonderen Abbauleistungen sind zurückzuführen auf die im Darm von Milben lebenden Symbionten (cellu-

lolytische, xylolytische und chitinolytische Bakterien und Protozoen) (Topp, 1981).

In Mitteleuropa sind 800 - 1000 Arten bekannt (Beck et al., 1996), Römbke et al. (2002) gehen von 550 - 600 Arten aus. Die Besiedlungsdichte eines Ackers beträgt 10.000 - 20.000 Individuen pro Quadratmeter aus etwa 20 Arten, Kiefernwälder haben mit 425.000 die höchste Abundanz aus bis zu etwa 60 Arten (Beck et al., 1997). Neben der Bodenfeuchte ist der pH-Wert des Bodens von zentraler Bedeutung (Beck et al., 1997). Allerdings ist die beobachtete Abundanzzunahme von Oribatiden bei extrem saurem pH eher im Ausfall der Nahrungskonkurrenten zu sehen (Beck et al., 1997). Hagvaar und Abrahamsen (1980) und Koskenniemi und auch Huhta (1986) fanden nach Kompensationskalkungen mit raschem Anstieg des pH-Wertes eine Reduktion der Oribatiden-Besiedlungsdichte.

Raubmilben sind in Mitteleuropa mit ebenfalls 800 - 1000 Arten bekannt, an einem Standort werden durchschnittlich jedoch weniger als 100 Arten gefunden (Ruf, 1997). Sie sind in vielen Böden nur mäßig abundant (Römbke et al., 2002). Auf Ackerflächen siedeln etwa 2.000 - 120.000 Individuen pro Quadratmeter, auf Grünland 2.600 - 20.000 und im Waldboden bis zu 35.000 (Römbke et al., 2002). Viele Raubmilben ernähren sich vorwiegend von Nematoden. Daher spiegeln die Abundanzen der Gamasinen unter Umständen nur die Reaktion der Nematoden auf deren Lebensbedingungen wider (Ruf, 1997). Einige Gamasinen scheinen durch basische Verhältnisse, andere durch saure begünstigt zu werden. Eine Kalkdüngung im Wald bewirkte in einem von Römbke et al. (2002) zitierten Versuch einen Anstieg der Diversität im Gamasinen-Artengefüge.

Taxonomisch werden Regenwürmer (Lumbriciden) und die kleineren Enchytraeiden aufgrund des sehr ähnlichen Körperbaus als Anneliden zusammengefasst. Enchytraeiden kommen außer an sehr trockenen Standorten mit sehr hohen Dichten, etwa 20.000 - 60.000 Individuen pro Quadratmeter, in der Streuauflage und im Mineralboden vor (Römbke et al., 2002). In Mitteleuropa gibt es 200 - 300 Arten. Enchytraeiden ernähren sich saprophytisch oder mikrophytophag. Einige Arten können wie Regenwürmer unzersetztes Laub aufnehmen und treten damit mit diesen in Nahrungskonkurrenz. Oft liegt die Abundanz der Enchytraeiden an sauren Standorten höher als auf basischen Flächen. Offenbar wiegt hier der Standortfaktor „Nahrungsangebot“ stärker als der Faktor „pH-Wert“. Didden (1993) fand allerdings keine Korrelation zwischen dem pH-Wert des Bodens und der Abundanz von Enchytraeiden. Auf Standorten mit pH-Werten von 3,9 bis 6,4 nahm die Artenzahl mit steigendem pH-Wert zu (Abrahamsen, 1972). Eine Bodenkalkung führt zum Rückgang acidophiler Arten, dieser Rückgang wird jedoch nicht von Enchytraeiden

mit neutralem oder basischem pH-Optimum ausgeglichen, da Regenwürmer durch den höheren pH-Wert gefördert werden und die Enchytraeiden am gekalkten Standort verdrängen.

Mikrofauna

Vertreter der Mikrofauna sind die Protozoa (Einzeller = Flagellata, Rhizopoda, Ciliata). Protozoen leben vorwiegend in den oberen 10 cm des Bodens in wassergefüllten Poren und in dem dünnen Wasserfilm, der Bodenpartikel und Wurzeln umgibt (Abb.1). Sie sind mit einer Abundanz von 10^4 - 10^6 Individuen pro g Boden die häufigsten Bodentiere, jedoch kann sich die Anzahl der Individuen sehr rasch ändern, da eine starke Abhängigkeit vom Wassergehalt des Bodens besteht (Gisi, 1990). Trockenperioden überdauern sie als Zysten, die nach Regen sehr schnell erneut auskeimen (Lehle, 1990). Protozoen ernähren sich vorwiegend von Bakterien, aber auch von Algen, Pilzen oder unterirdischen Pflanzenorganen (Lehle, 1990).

Protozoen reagieren in der Regel schneller als Metazoen auf Veränderungen der Standortfaktoren. Bei günstigen Lebensbedingungen vermehren sie sich rasch, sie haben daher ein hohes bioindikatives Potential. Artenassoziationen können häufig mit bestimmten Habitatbedingungen korreliert werden (Lehle, 1990).

Einige Protozoen wie z.B. die Flagellaten (Geißeltierchen) bevorzugen basische Böden. Rhizopoden (beschaltete und nackte Amöben) reagieren empfindlich auf wechselnde Boden-pH-Werte. Die nackten Amöben (Amoebina) bilden beim Rückgang des Kapillarswassers sehr resistente Zysten. Beschaltete Amöben (Testacea) sind im sauren Boden besonders häufig, mit zunehmendem pH-Wert nimmt ihre Abundanz ab (Lehle, 1990). Ciliaten (Wimperntierchen) bevorzugen nach Gisi (1990) Kalkböden. Lehle (1990) hingegen stuft die Ciliaten als eurypotent ein (also einen großen pH-Wert-Bereich tolerierend) und berichtet von Ciliaten an extrem sauren Standorten (pH 2,7).

Eine Bodenkalkung wirkt sich auf die Protozoen unterschiedlich aus. Die Auswirkungen werden anhand der Zusammensetzung des Artenspektrums und der Zu- oder Abnahme der Anzahl der Individuen einer Art ermittelt. Manche Arten reagieren relativ schnell, andere mit mehrmonatiger Verzögerung. Die Kalkung sehr saurer Böden bewirkt im Allgemeinen eine Zunahme der Individuen als auch die Erweiterung des Artenspektrums. Die „neuen“ Arten können durch Windanflug, Zoochorie (Verbreitung durch Tiere) oder durch Auskeimen von Dauerzysten den Standort besiedeln. Lehle (1990) beobachtete nach einer Bodenkalkung die Zunahme der bakteriophagen Ciliaten, bei versauernden Böden nehmen mycetophage Ciliaten zu.

Mikroflora

Pilze und Bakterien stellen den größten Anteil der Biomasse und mit bis zu 10^8 Zellen pro Gramm Boden die größte Anzahl an Organismen im Boden dar (Römbke, 1997). Die Streuschicht kann höhere Besiedelungsdichten aufweisen (Förster, 1994). Die überwiegende Anzahl von Mikroorganismen besiedelt Standorte mit einem pH-Wert im Bereich von 6 - 9. Neutrophile Mikroorganismen haben ein pH-Optimum zwischen pH 6,2 und 7,8. Über pH 8 nimmt der Anteil der alkaliphilen Mikroorganismen zu, unter pH 6 der der Acidophilen (Schlegel, 1992). Pilze präferieren pH-Werte im Boden von $\leq 5,5$ (Metting, 1993).

Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass durch die mit einer Bodenkalkung einhergehenden Anhebung des pH-Wertes das Artenspektrum der im Boden vorkommenden Mikroorganismen in Richtung Bakterien verschoben wird, d.h. die pilzliche Biomasse nimmt ab, während die bakterielle Biomasse zunimmt (Förster, 1994). Diese Verschiebung des Artenspektrums wird vorwiegend in der Humusauflage, dem O-Horizont, deutlich (Kreutzer, 1995).

Schlussfolgerungen

Eine moderate Bodenkalkung hat eine positive Wirkung auf das Bodenleben. Durch die Stabilisierung des Boden-pH-Wertes im leicht sauren bis neutralen Bereich und durch Stärkung des Hohlraumsystems wird die Biodiversität der Bodenbiozönose gefördert.

Literatur

Abrahamsen G (1972) Ecological study of Enchytraeidae (Oligochaeta) in Norwegian coniferous forest soils. *Pedobiologia* 12: 26-82

Anderson JM, Ineson P (1984) Interactions between microorganisms and soil invertebrates in nutrient flux pathways of forest ecosystems. In: Anderson J.M., Rayner A.D.M., Walton D.W.H. (Eds.) *Invertebrate-microbial interactions*, Cambridge University Press, 59-88

Beck L, Woas S, Horak F (1997) Oribatida. In: Römbke J. et al. (1997) *Boden als Lebensraum für Bodenorganismen* [online]. Karlsruhe, zu finden in <http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/bofaweb/berichte/tbb04/tbb04.htm> [zitiert am 26.01.2004]

Beck L, Woas S, Horak F (1997) Taxonomische Ebenen als Basis der Bodenindikation – Fallbeispiele aus der Gruppe der Oribatiden (Acari). *Abh. Ber. Naturkundemus. Görlitz* 69: 67-85

Büttner V. (1988) *Untersuchungen zur Ökologie der Nematoden eines Kalkbuchenwaldes*. Göttingen, Dissertation, 213 p

Darwin C (1904) *The formation of vegetable mould through the action of worms with observations on their habits*. London : Murray, 298 p

Didden W (1993) Ecology of terrestrial Enchytraeidae. *Pedobiologia* 37: 2-29

Dunger W (1978) Parameter der Bodenfauna in einer Catena von Rasen-Ökosystemen. *Pedobiologia* 18: 310-340

Durner W (2002) So nah und doch so fern... Die Bodenzone als terra incognita der Geowissenschaften. Antrittsvorlesung an der TU Braunschweig am 04.12.2002

Förster B (1994) *Untersuchungen zur Rolle der Mikroorganismen im Dekompositionsprozeß eines Wiesen und eines Waldökosystems unter dem Einfluß des Fungizids Carbendazim*. Frankfurt/Main, Dissertation, 193 p

Fründ H-C (1997) Diplopoda und Isopoda. In: Römbke J. et al. (1997) *Boden als Lebensraum für Bodenorganismen* [online]. Karlsruhe, zu finden in <http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/bofaweb/berichte/tbb04/tbb04.htm> [zitiert am 26.01.2004]

Gisi U (1990) *Bodenökologie*. Stuttgart : Thieme, 304 p, ISBN 8-13-747201-6

Graff O (1983) *Unsere Regenwürmer – Lexikon für Freunde der Bodenbiologie*. Hannover : Verlag M.& H. Schaper, 112 p, ISBN 3-7944-0127-1

Gruber U (1994) *Auswirkungen der Rotationsbrache auf Nematoden, Schnecken und Getreidefußkrankheiten*. Hohenheim, Dissertation, 87 p

Hagvar S, Abrahamsen G (1980) Colonization by Enchytraeidae, Collembola and Acari in sterile soil samples with adjusted pH levels. *Oikos* 34: 245-258

Kreutzer K (1995) Effects of forest liming on soil processes. *Plant and Soil* 168-169: 447-470

Koskenniemi A, Huhta V (1986) Effects of fertilization and manipulation of pH on mite (Acari) populations of coniferous forest soil. *Rev Ecol Biol Sol* 23: 271-286

Lehle E (1990) *Zur Ökologie von Bodenorganismen von Bodenciliaten (Protozoa: Ciliophora): Qualitativ-quantitative Untersuchungen in terrestrischen Ökosystemen*. Freiburg (Breisgau) : Hochschulverlag

Metting FB (1993) Structure and Physiological Ecology of Soil Microbial Communities. In: Metting F.B., Blaine F. *Soil Microbial Ecology*. New York: Marcel Dekker Inc , pp 3-25, ISBN 0-8247-8737-4

Remane A, Storch V, Welsch U (1985) *Kurzes Lehrbuch der Zoologie*. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 561 p, ISBN 3-437-20337-1

Römbke J (1997) Lumbricidae. In: Römbke J. et al. (1997) *Boden als Lebensraum für Bodenorganismen* [online]. Karlsruhe, zu finden in

<http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/bofaweb/berichte/tbb04/tbb04.htm>
[zitiert am 26.01.2004]

Römbke J (1997) Boden als Lebensraum für Bodenorganismen [online]. Karlsruhe, zu finden in <http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/bofaweb/berichte/tbb04/tbb04.htm>
[zitiert am 26.01.2004]

Römbke J (2002) Entwicklung von biologischen Bodengüteklassen für Acker- und Grünlandstandorte. Berlin: Umweltbundesamt, 273 p, ISSN 0722-186X

Ruf A (1997) Gamasina. In: Römbke J. et al. (1997) Boden als Lebensraum für Bodenorganismen [online]. Karlsruhe, zu finden in <http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/bofaweb/berichte/tbb04/tbb04.htm>
[zitiert am 26.01.2004]

Schlegel HG (1992) Allgemeine Mikrobiologie. Stuttgart, Thieme Verlag, 634 p

Scheu S (1990) Die saprophage Makrofauna (Diplopoda, Isopoda und Lumbricidae) in Lebensräumen auf Kalkgestein: Sukzession und Stoffumsatz. Göttingen. Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 57, 302 p

Ruf A (1997) Gamasina. In: Römbke J. et al. (1997) Boden als Lebensraum für Bodenorganismen [online]. Karlsruhe, zu finden in <http://www.xfaweb.baden-wuerttemberg.de/bofaweb/berichte/tbb04/tbb04.htm>
[zitiert am 26.01.2004]

Topp W (1981) Biologie der Bodenorganismen. Heidelberg : Quelle und Meyer, 224 p, UTB 1101, ISBN 3-494-0219-5

Yeates GW (1981) Nematode populations in relation to soil environmental factors: a review. *Pedobiologica* 22: 312-338

Untersuchung zum Informationspotenzial multispektraler Satellitendaten zur Aktualisierung grossmaßstäbiger Bodenkarten

Erik Zillmann und Ewald Schnug

Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Bundesallee 50, D-38116 Braunschweig

Zusammenfassung

Die Erdoberfläche wird von einer Vielzahl von Satelliten in regelmäßigen Abständen beobachtet. Die Sensoren zeichnen im Jahresverlauf oftmals auch unbewachsene Ackerflächen auf. Damit ergibt sich die Möglichkeit, mit Hilfe der multispektralen Satellitendaten die räumliche Variabilität des Bodens zu untersuchen. Der Schwerpunkt dieser Arbeit stellt die Lokalisierung und räumliche Abgrenzung von Bodenunterschieden im Vergleich zu grossmaßstäbigen Bodenkarten der Reichsbodenschätzung (RBS) dar. Die Untersuchungen wurden anhand von Satellitendaten der Aufnahmesysteme Landsat-TM und IRS-1C aus dem Jahr 1997 im Randbereich des Thüringer Beckens bei Weimar durchgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein Potenzial zur Differenzierung unterschiedlicher Texturklassen im Satellitenbild besteht, wobei die größte Bedeutung dem Spektralbereich des mittleren Infrarots zukommt. Die Lage und Ausdehnung der Bereiche unterschiedlicher Texturen im Satellitenbild weichen teilweise vom Kartenmaterial ab, stellen aber die genauere Informationsebene dar.

Schlüsselwörter: *Bodeninformation, Bodenreflexion, Bodentextur, Fernerkundung, räumliche Variabilität*

Summary

Satellite remote sensing allows the observation of the earth at regular temporal intervals. During the vegetation period bare soils are also measured by the different sensor systems. This allows the detection of spatial soil variability within multispectral satellite data. The main objective was the localisation and spatial differentiation of soil variability in comparison with large-scale soil evaluation maps of Germany (RBS). The investigations were carried out with satellite data of the region at the border of the Thüringer Becken near Weimar in 1997.

The results revealed the potential of multispectral satellite data to discriminate between different soil texture classes. For this application the spectral region in the middle infrared is of highest relevance. The site location and spatial expansion of areas with different soil texture differ partially from map information, but the satellite data is more accurate.

Keywords: *remote sensing, soil information, soil reflection, soil texture, spatial variability*

Einleitung

Die teilflächenspezifische Landbewirtschaftung (Precision Agriculture) soll der lokalen Variabilität natürlicher Standorteigenschaften Rechnung tragen, welche innerhalb eines Schrages größer sein kann, als in der gesamten umliegenden Landschaft, (Haneklaus et al., 1997). Die Realisierung dieser Managementmethode ist somit abhängig von der verfügbaren Informationsgrundlage über die Bodenheterogenitäten des Standortes.

Derzeit verfügbares Kartenmaterial ist hinsichtlich der räumlichen Genauigkeit nur bedingt für eine teilflächenorientierte Bewirtschaftung geeignet. Für die Erfassung kleinräumiger Bodenunterschiede sind grossmaßstäbige Bodenkarten im Maßstab von 1:5000 bis 1:25000 erforderlich (Capelle, 1999). Die Reichsbodenschätzung (RBS) stellt diesbezüglich noch immer die genaueste flächendeckend verfügbare Kartengrundlage über Textur, Entwicklungsgrad und Entstehungsart der Böden dar. Zu beachten ist hierbei, dass die Daten in den 1930er Jahren von einer Vielzahl an Personen mit unterschiedlicher Expertise erhoben wurden. Diese umfassende Datenbasis liegt heute teilweise digital vor.

Flächendaten über Boden- und Standortmerkmale sind mit traditionellen Erkundungs- und Kartierungsmethoden kaum noch rationell und mit ausreichender Genauigkeit zu beschaffen. Nach Herbst und Lamp (1999) wäre auf 47 % der Bodenfläche der Bundesrepublik eine 100 m Rasterbeprobung notwendig, um die Bodenverteilung hinreichend sicher zu erfassen. Auf den übrigen 53 % dagegen müssten die Proben aufgrund der starken Bodenheterogenität sogar in einem Raster von 50 m und dichter erhoben werden. Entsprechende Rasterabstände von 50-100 m ermittelten auch Haneklaus et al. (1997) für verschiedene Gebiete Norddeutschlands. Aufgrund der unregelmässigen Ausprägung der Bodenheterogenitäten kann aber eine Rasterbeprobung deren Erfassung innerhalb eines Schrages nicht immer gewährleisten (Poknee et al., 1996). Andere Ansätze zur effizienteren Bestimmung von dauerhaften Bodenparametern, wie Textur und Humusgehalt, liefern z. B. das „Self-Surveying-Verfahren“ (Haneklaus et al., 1998; Schröder, 1999) und für mittelfristig veränderliche Nährstoffe das „Directed-Sampling“ (Schnug et al., 1994, 1998; Poknee et al., 1996). Diese Verfahren können aber auch nur lokal zur Bestimmung von Bodenparametern herangezogen werden.

Den Methoden der Fernerkundung wird ein großes Potenzial zur großräumigen Variabilitätsfassung innerhalb landwirtschaftlicher Nutzflächen zugesprochen (Moran et al., 1997; Dixon & McCann, 1997; Brisco et al., 1998; Panten et al., 2003). Für die Erfassung räumlich-zeitlicher Variabilität von mittelfristig veränderlichen Nährstoffen ist die multispektrale Fernerkundung jedoch ungeeignet, da keine konsistenten Zusammenhänge zwischen Nährstoffversorgung und spektraler Signatur vorliegen (Panten, 2002). Von Interesse sind in diesem Zusammenhang daher die dauerhaften Bodenparameter Textur und Humusgehalt, welche das Reflexionsverhalten von Böden beeinflussen (Baumgardner et al., 1985) und die Hauptursache der standörtlichen Heterogenität darstellen (Panten et al., 2003).

Ziel der vorliegenden Untersuchung war der Vergleich des Informationsgehalts derzeit verfügbarer Kartenwerke, speziell der Reichsbodenschätzung, mit multispektralen Satellitenaufnahmen in Hinblick auf die Lokalisierung, räumliche Abgrenzung und inhaltliche Interpretation von Bodenvariabilitäten. Hierbei sollte insbesondere die räumliche Differenzierung unterschiedlicher Texturklassen im Satellitenbild analysiert und anhand der Karteninformation interpretiert werden. Weiterhin wurde der Informationsgehalt unterschiedlich spektral auflösender Aufnahmesensoren evaluiert.

Reflexionseigenschaften von Böden

Eine umfangreiche Zusammenfassung über die spektralen Reflexionseigenschaften von Böden wird von Baumgardner et al. (1985) geliefert. Böden reflektieren im sichtbaren Spektrum (0,4 – 0,7 μm) generell relativ schwach. Mit zunehmender Wellenlänge nimmt die Reflexionsintensität zu. Die Reflexion der solaren Strahlung an der vegetationslosen Bodenoberfläche wird hauptsächlich von den Faktoren Humusgehalt, Bodentextur, Eisenoxidgehalt und Bodenfeuchte bestimmt, wobei Wechselwirkungen bestehen.

Humusgehalt

Der Humusgehalt hat einen dominierenden Einfluss auf die Reflexionsintensität des Bodens. Nach Stoner und Baumgardner (1981) führt ein Anteil organischer Substanz von > 2 % zu einer vollständigen Überlagerung der Reflexionseigenschaften anderer Bodenbestandteile. Es besteht ein negativer Zusammenhang zwischen dem Gehalt an organischer Substanz und der Reflexionsintensität über den gesamten spektralen Bereich bis in das mittlere Infrarot hinein (Baumgardner et al., 1985; Coleman & Montgomery, 1987). Die Absorption ist im sichtbaren Spektralbereich am stärksten und nimmt mit Zunahme der Wellenlänge ab. Für die Differenzierung unterschiedlicher Gehalte sind insbesondere die Spektralbereiche im Rot und nahen Infrarot gut geeignet (Frazier et al., 1989). Diskrete Absorptionsbanden konnten bisher nicht nachgewiesen werden (Henderson et al., 1989).

Bodentextur

Die räumliche Variabilität der Korngrößen beeinflusst die spektrale Reflexion gleichmäßig über den gesamten Wellenlängenbereich (Baumgardner et al., 1985). Laboruntersuchungen von Boers und Hanks (1965) unter standardisierten Bedingungen zeigten eine höhere Gesamtreflexion feinkörniger Texturen im Vergleich zu grobkörnigen. Im Gelände dagegen weisen sandige Böden eine höhere Reflexion auf als tonige Böden (Myers et al., 1975). Die Ursache ist in der Aggregatbildung feinkörniger Böden zu sehen, die zu einer rauheren Oberflächenstruktur und damit einer Abnahme der Gesamtreflexion führt. Außerdem spielen Überlagerungseffekte durch organische Substanz und Bodenfeuchtigkeit eine entscheidende Rolle.

Eisenoxid und Kalziumkarbonat

Die Zunahme des Gesamtgehaltes an Eisenoxiden im Boden führt zu einer Dämpfung der spektralen Reflexion im gesamten sichtbaren Wellenlängenspektrum (Obuchov & Orlov, 1964). Eine charakteristische Absorptionsbande liegt bei 0,87 μm , deren Breite mit dem Eisengehalt zunimmt (Baumgardner et al., 1985). Zwischen Kalziumkarbonatgehalt und Reflexionsintensität des Bodens besteht ein positiver Zusammenhang im sichtbaren Spektrum (Ben-Dor & Banin, 1995). Nach Schröder (1989) führt ein Gehalt von > 25 % zu einem dominierenden Einfluss des Karbonats auf das Reflexionssignal, was die Reflexionswirksamkeit anderer Bodenparameter einschränkt. Dieser Aspekt spielt insbesondere bei der Ermittlung von Erosionserscheinungen eine Rolle, da hier das carbonathaltige geologische Ausgangsgestein verstärkt an die Bodenoberfläche gelangt (Brixy, 1997; Leone et al., 1995).

Bodenfeuchte

Der Einfluss der Bodenfeuchtigkeit auf die spektrale Reflexion wurde von Bowers und Hanks (1965) untersucht. Sie zeigten, dass ein Anstieg des Feuchtigkeitsgehaltes die Reflexion über die gesamte spektrale Bandbreite von 0,5 - 2,5 μm dämpft und die charakteristischen Absorptionsbanden bei 1,4 μm und 1,9 μm um so stärker ausgeprägt sind. Die Reflexionsintensität nimmt vor allem im Infrarot ab und lässt feuchte Böden in diesem Spektralbereich besonders dunkel erscheinen.

Material und Methoden

Testgebiet

Die Untersuchungen fanden auf Testflächen (Flächengrößen: 23 – 73 ha) nördlich von Weimar (N 51,1°; O 11,25°) im Randbereich des Thüringer Beckens statt (Abb. 1), dessen geologisches Ausgangsgestein von Schichten des unteren und mittleren Keupers bestimmt wird (Seidel, 1995).

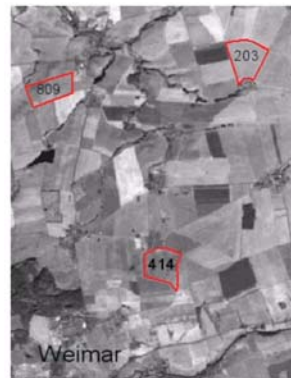


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes bei Weimar mit Testflächen 203, 809 und 414.

Der mittlere Keuper ist geprägt durch Tonmergellagen, die sich in Folge von Verwitterungsprozessen zu tonigen Fließerden entwickelten. Er zeichnet sich vor allem durch sehr kalkhaltige Tone aus. Der untere Keuper weist eine größere Heterogenität mit sich abwechselnden Tonmergel- und sandigen Schichten auf. Über dem Ausgangsgestein sedimentierten äolische Lössschichten, die in großen Teilen des Gebietes die folgende Bodenentwicklung beeinflussten. Der Löß Thüringens ist aus lokalem geologischem Material entstanden und besitzt aus diesem Grund einen sehr hohen Tonanteil. Leitbodenformen im Untersuchungsraum sind die Parabraunerde, die Parabraun-Schwarzerde und die Rendzina. Als Begleitbodenformen treten Braunerden und Pelosole auf. Die Geomorphologie des Gebietes besteht vorwiegend aus welligen Plateaubereichen und Flachhängen. Die Reliefunterschiede innerhalb der einzelnen Testflächen sind gering. Eine detaillierte Beschreibung des Untersuchungsgebietes ist in Zillmann (1999) nachzulesen.

Satellitenszenen

Die Untersuchungen wurden anhand von Satellitenszenen der Aufnahmesysteme Landsat 5 -TM und IRS-1C von September 1997 durchgeführt. Die spektrale Auflösung der Aufnahmekanäle ist in Tab. 1 aufgeführt. Die Daten wurden unter Verwendung eines digitalen Geländemodells auf das Gauß-Krüger-Koordinatensystem geokodiert. Die Atmosphärenkorrektur wurde mittels eines einfachen Verfahrens (*Dark-Object-Substraction*) vorgenommen.

Aufgrund der Zielstellung der Studie konzentrierten sich die Untersuchungen auf vegetationslose Schläge, um ein unverfälschtes spektrales Abbild des Bodens analysieren zu können. Die entsprechenden Schläge wurden unter Verwendung des von Rouse et al. (1974) entwickelten Normalized-Difference-Vegetation-Index (NDVI) aus den Satellitenszenen extrahiert.

Tab. 1: Spektrale und räumliche Auflösung der Aufnahmesensoren des Landsat 5-TM und IRS 1-C

Landsat-5 TM			IRS-1C		
Band	Bandbreite μm	Pixel m	Band	Bandbreite μm	Pixel m
1	0.45-0.52	30	pan	0.5-0.75	≤ 10
2	0.52-0.60	30	LISS 1	0.52-0.59	23.5
3	0.63-0.69	30	LISS 2	0.62-0.68	23.5
4	0.76-0.90	30	LISS 3	0.77-0.86	23.5
5	1.55-1.75	30			
7	2.08-2.35	30			
6	10.4-12.5	120			

Aufgrund der klimatischen Bedingungen im Vorfeld der Aufnahmen vom 22.09.1997 (Landsat TM) bzw. 25.09.1997 (IRS-1C) variierte die Bodenfeuchtigkeit nur geringfügig. An der Wetterstation der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) bei Buttstedt wurden lediglich geringe Niederschläge innerhalb der letzten drei Wochen vor den Aufnahmen gemessen, so dass der Boden zumindest oberflächlich stark ausgetrocknet war (Zillmann, 1999). Die vorhandenen Unterschiede in der spektralen Reflexion beruhen somit auf den chemischen und physikalischen Eigenschaften des Bodens.

Methodik

Aus den vorverarbeiteten Satellitenszenen wurden die Testflächen ausmaskiert und mit den digitalisierten und georeferenzierten Klassengrenzen der RBS in ein geografisches Informationssystem (GIS) integriert. Flächen unterschiedlicher Reflexionsintensität innerhalb der Schläge wurden visuell in 2 - 3 Klassen differenziert. Hierfür wurden sowohl die Einzelkanäle als auch Farbdarstellungen verwendet. Aus den spektral abgrenzbaren Bereichen wurden jeweils zufällig 10 Bildpixel als Messpunkte für die spektrale Reflexion ausgewählt und die Grauwerte für jeden Spektralkanal extrahiert. Die so ermittelten Stichproben wurden als Mittelwert für den als spektral homogen anzusehenden Bereich des Schlages für die spektrale Signatur-

analyse verwendet.

Aufgrund fehlender Geländeinformation (Ground truth) konnten für die inhaltliche Interpretation der Reflexionsvariabilität nur die aus der RBS ableitbaren Bodeninformationen als Referenz herangezogen werden.

Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigten, dass eindeutige Klassenunterschiede in der Bodenart durchaus auch in multispektralen Satellitendaten räumlich abgrenzbar waren. So zeigten sandige und tonige Böden

in einzelnen Spektralkanälen eine andere Reflexionsintensität, als die im Untersuchungsgebiet dominierenden lehmigen Böden (L).

Der südliche Teilbereich von Schlag 414 mit erhöhtem Sandanteil (sL) wies in den Spektralkanälen des mittleren Infrarots des Landsat-TM eine höhere Reflexion auf, als der restliche Schlag (Abb. 2, rechts). Die räumliche Ausdehnung der Fläche mit erhöhter Reflexion erstreckt sich jedoch weiter in den Schlag hinein, als es die Klasseneinteilung der RBS ausweist. Die Information aus dem Satellitenbild bietet somit eine höhere räumliche Genauigkeit.

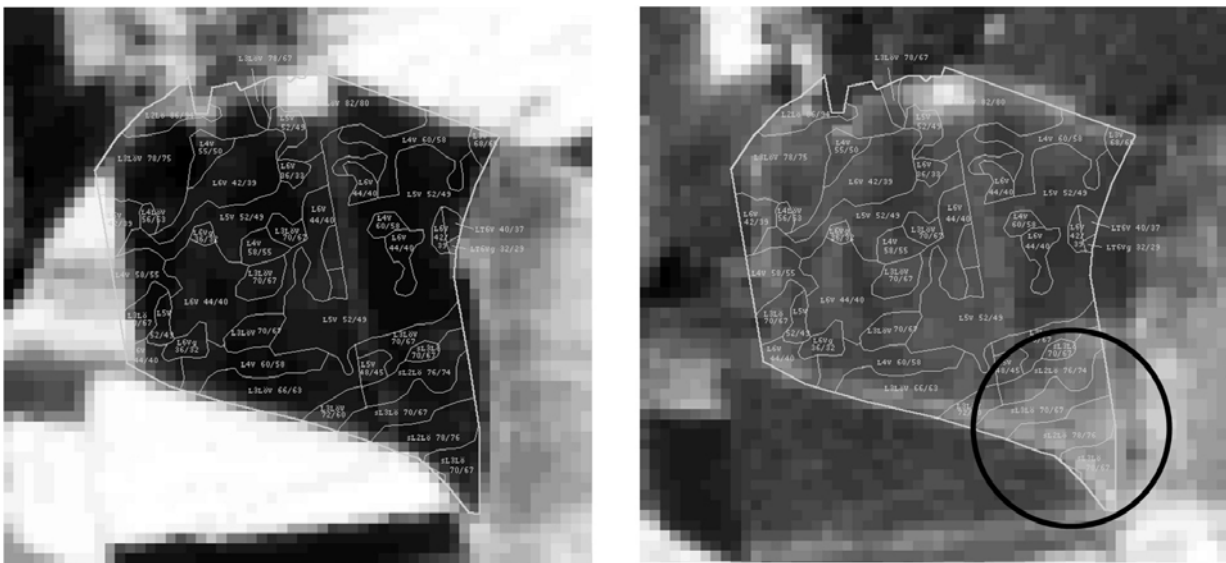


Abb. 2: Einzelkanalardarstellung des Schlages 414 bei Wohlsborn, überlagert mit den Klassen der Reichsbodenschätzung, links: Landsat TM-3 und rechts: Landsat TM-7 (Aufnahmedatum: 22.09.1997)

Bodensignaturdiagramm von Schlag 414

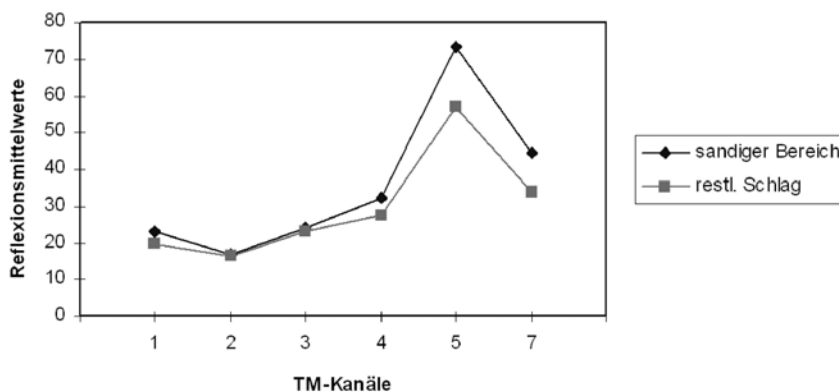


Abb. 3: Bodensignaturdiagramm für zwei Teilbereiche von Schlag 414 bei Wohlsborn für die spektrale Reflexion der Landsat-TM Kanäle

Im sichtbaren und nahen infraroten Wellenlängen-spektrum war die visuelle Differenzierung dieses Bereiches dagegen nicht möglich. Dies wird auch durch die Signaturanalyse bestätigt (Abb. 3), in der die größten Reflexionsunterschiede beider Teilflächen im Bereich des mittleren Infrarots liegen (Kanäle TM-5 und TM-7).

Entsprechende Reflexionsunterschiede konnten auch für tonige Böden (LT/T) ermittelt werden, wobei diese eine geringere Reflexion als die Lehmböden (L) zeigten. Dies ist in Abb. 4 im nordöstlichen Bereich des Schlags 809 zu erkennen. Auch hier zeigten der visuelle Vergleich (Abb. 4) der Bilddaten und die Signaturanalyse (Abb. 5), dass die tonigen Bereiche

insbesondere im Spektralbereich des mittleren Infrarots lokalisiert werden konnten.

In den Aufnahmen des IRS-1C, der lediglich im sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich arbeitet, waren die genannten Texturunterschiede nicht zu erkennen. Dies unterstreicht die Bedeutung des mittleren infraroten Spektralbereichs für die Erfassung von Bodenheterogenitäten. Es kann ausgeschlossen werden, dass andere reflexionswirksame Bodenfaktoren, wie Bodenfeuchte oder organische Substanz die Reflexionssignatur beeinflussten.

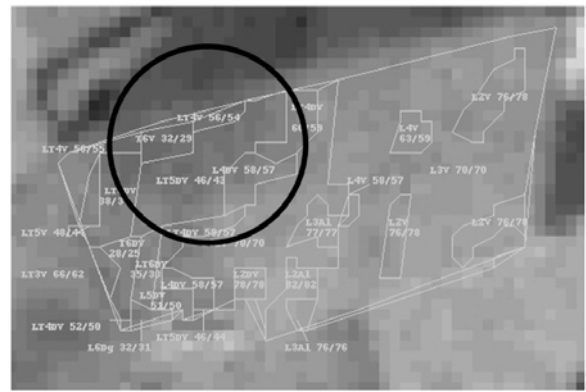
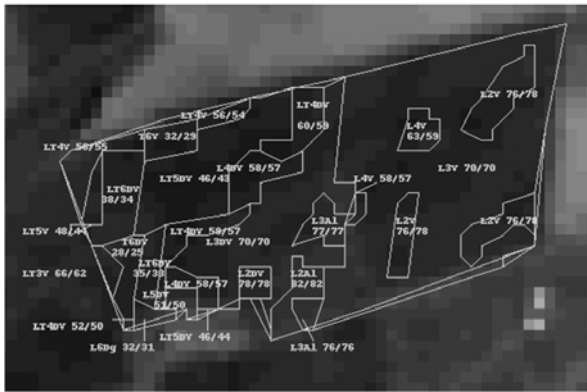


Abb. 4: Einzelkanalarstellung des Schlags 809 bei Buttelsstedt, überlagert mit den Klassen der Reichsbodenschätzung, links: Landsat TM-3 und rechts: Landsat TM-7 (Aufnahmedatum: 22.09.1997)

Bodensignaturdiagramm von Schlag 809

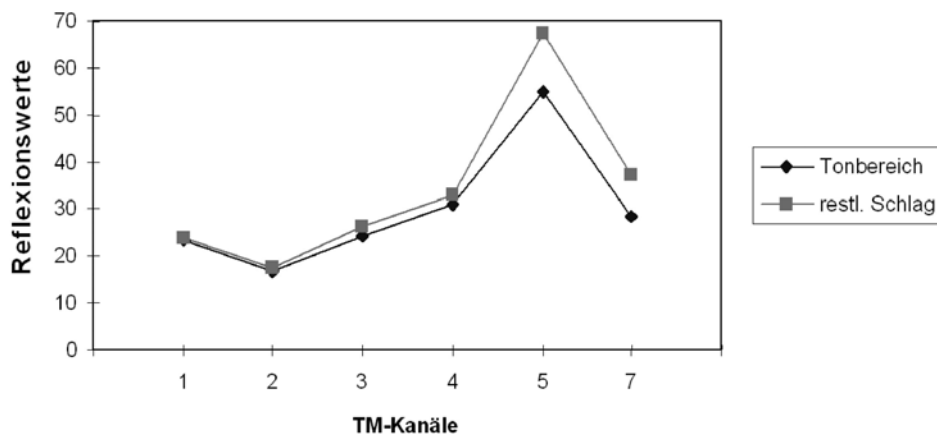


Abb. 5: Bodensignaturdiagramm für zwei Teilbereiche von Schlag 809 bei Buttelsstedt für die spektrale Reflexion der Landsat-TM Kanäle

Zum einen war der Oberboden aufgrund der klimatischen Situation im Vorfeld der Aufnahmen vollständig abgetrocknet und zum anderen konnte keine erhöhte Absorption im roten und nahen infraroten Kanal, bedingt durch die organische Substanz, nachgewiesen werden.

Des Weiteren ließen sich eindeutig Bereiche ausweisen, die auf Erosionserscheinungen hindeuteten, da deren Reflexion durch Kalziumkarbonat beeinflusst war. Dies ist für Teilflächen der Fall, die in der RBS als Klassen mit geringer Lößdeckschicht über Verwitterungsboden (LöV) ausgewiesen sind. Diese Bereiche zeigten vor allem im sichtbaren Spektralbereich eine höhere Reflexion, wie am Beispiel in Abb. 6 zu sehen ist. Im mittleren Infrarot ist dagegen keine spektrale Trennung möglich (Abb. 6, rechts). Die räumlichen Abgrenzungen im Satellitenbild stimmen auch hier nicht eindeutig mit der Klassenabgrenzung der RBS (LöV) überein, dafür spiegeln sich die niedrigen Bodenwerte nahezu identisch in dem Gebiet starker Reflexion wider. Einen Zusammenhang zwischen Bodenwerten der RBS und der spektralen Signatur ermittelte Glaser (1989) in seinen Untersuchungen. Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit lag aber keine konsistente Beziehung diesbezüglich vor. Die landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands sind meistens oberflächlich entkalkt. Daher wird dieser Bodenparameter bei der spektralanalytischen Untersuchung häufig außer Acht gelassen. Für die Lokalisierung erodierter Flächen mittels Fernerkundung stellt der CaCO_3 -Gehalt des Oberbodens jedoch einen bedeutsamen Indikator dar. Auf erodierten Flächen tritt das carbonathaltige geologische Ausgangsgestein häufig an die Oberfläche und beeinflusst die Reflexion des Oberbodens (Brixy, 1997; Schröder, 1989).

Schlußfolgerungen

Bodenheterogenitäten können mittels Fernerkundung nur dann erfasst und einem bestimmten Merkmal zugeordnet werden, wenn sie entsprechende unterschiedliche spektrale Reflexion hervorrufen. Da die in den Satellitendaten abgebildete Information lediglich aus dem Oberboden (Ap-Horizont) stammt, lassen sich keine Rückschlüsse auf darunter liegende Bodenhorizonte und deren Eigenschaften ziehen. Landwirtschaftliche Untersuchungen umfassen dagegen üblicherweise den gesamten Oberboden (Panten et al., 2003). Es scheint daher kaum möglich, unterschiedliche Bodentypen zu differenzieren, sondern lediglich Flächen unterschiedlicher Oberflächeneigenschaften (Korolyuk & Shcherbenko, 1994).

Schlaginterne Unterschiede in der Bodenart ließen sich aufgrund verschiedener Reflexion im Satellitenbild erfassen. Auf einem trockenen Boden mit nur geringem Gehalt an organischer Substanz zeigten sandige, lehmige und tonige Areale eindeutig von einander abweichende Reflexionsintensitäten, insbesondere im Spektralbereich des mittleren Infrarots. Dies verdeutlicht die Bedeutung der spektralen Auflösung zukünftiger Sensoren. Eine einseitige Verbesserung der räumlichen Auflösung ist für die die Bodenheterogenität betreffende Fragestellungen nur von geringem Wert, sofern die spektrale Auflösung ungenügend ist. Die spektral abgrenzbaren Teilflächen waren in ihrer Lagegenauigkeit und Ausdehnung genauer als die Klassenzuweisung der Reichsbodenschätzung, so dass sich beide Datensätze hervorragend ergänzen.

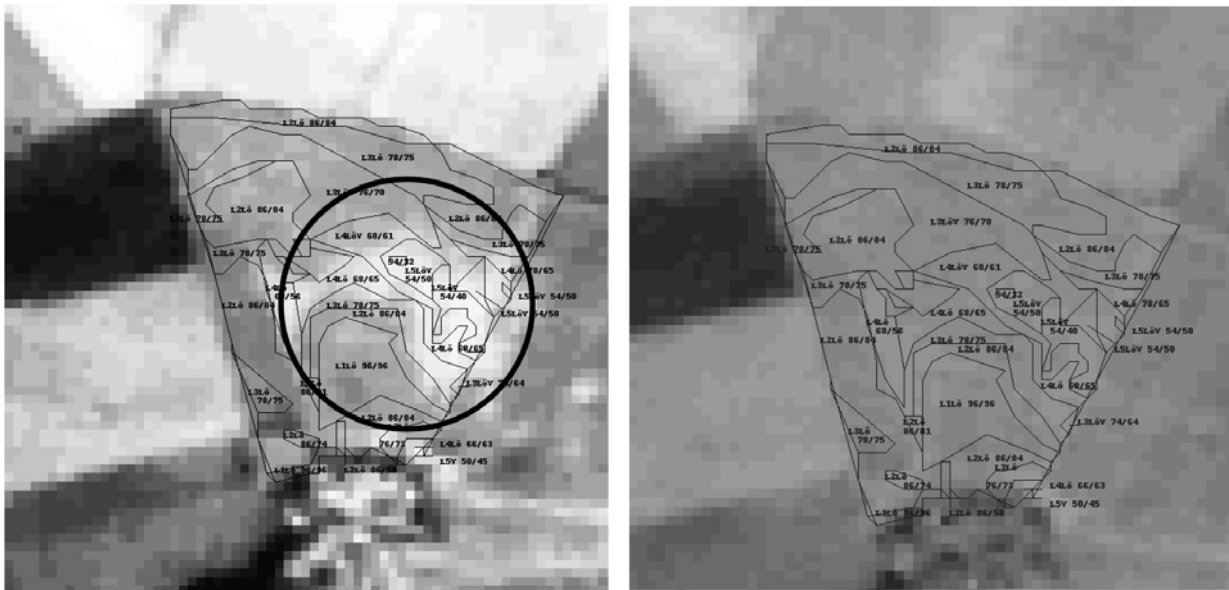


Abb. 6: Einzelkanalardarstellung des Schlates 203 bei Rohrbach, überlagert mit den Klassen der Reichsbodenschätzung, links: Landsat TM-3 und rechts: Landsat TM-5 (Aufnahmedatum: 22.09.1997)

Aussagen hinsichtlich der Variabilität anderer Bodeneigenschaften wie z. B. Humusgehalt sind anderen Studien zufolge durchaus möglich (u. a. Coleman & Montgomery, 1987; Frazier et al., 1989; Henderson et al., 1989).

Die Bodenreflexion wird weiterhin von verschiedenen Parametern wie z. B. Bodenfeuchtigkeit, Bodenrauigkeit und Bearbeitungspraktiken beeinflusst. Die Wechselwirkungen aller Parameter machen es notwendig, aktuelle Ground truth-Daten zur Kalibrierung der spektralen Reflexion zu erheben. Nur so lassen sich wertvolle Informationen zur Ableitung von Bearbeitungsentscheidungen im Precision Agriculture bereitstellen, auch wenn dies mit zusätzlichem Arbeitsaufwand und demzufolge höheren Kosten verbunden ist.

Literatur

Baumgardner MF, Silva LF, Biehl LL, Stoner ER (1985) Reflectance properties of soils. *Adv in Agronomy* 38: 1-44

Bowers SS, Hanks RJM (1965) Reflection of radiant energy from soils. *Soil Science*, 100: 130-138

Brisco B, Brown RJ, Hirose T, Mc Nairn H, Staenz K (1998) Precision Agriculture and the Role of Remote Sensing: A Review; *Canadian Journal of Remote Sensing*, 24, 3: 315-327

Brixy I (1997) Erfassung erosionsgeschädigter Böden in der Lößlandschaft des Querfurter Raumes im Mitteldeutschen Trockengebiet anhand von Daten des Landsat Thematic Mapper. *Mitt Dt Bodenk Ges* 83, 395- 398

Capelle A (1999) Die Eignung von Bodenkarten unterschiedlicher Maßstäbe für die Erfassung der kleinräumigen Heterogenität, In: Erfassung der kleinräumigen Heterogenität, KTBL-Arbeitspapier 264: 42-46

Coleman TL, Montgomery OL (1987) Soil moisture, organic matter and iron content effect on the spectral characteristic of selected Vertisols and Alfisols in Alabama. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53: 1659-1663

Dixon J, McCann M (1997) Precision Agriculture in the 21st Century: Geospatial and Information Technologies in Crop Management. Washington D.C.: National Academy Press, 118 p, ISBN 0-309-05893-7

Frazier BE, Yaan-Cheng (1989) Remote Sensing of soils in Eastern Palouse region with Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environ* 28: 317-325

Glaser R (1986) Fernerkundung mit Landsat 5 TM – Anwendungsmöglichkeiten am Beispiel von Würzburg und Umgebung, auch unter Berücksichtigung verschiedener Planungsebenen, DFVLR Wissenschaftlicher Bericht, Oberpfaffenhofen

Haneklaus S, Ruehling I, Schroeder D, Schnug E (1997) Studies on the Variability of Soil and Crop Fertility Parameters and Yields in different landscapes of Northern Germany. *Precision Agriculture 1997*, I, 785-792, Stafford JV (ed) Scientific Publishers Ltd., UK

Henderson TL, Szilagyi A, Baumgardener MF, Chen T, Landgrebe DA (1989) Spectral band selection for classification of organic matter content. *Soil Science Soc of Am J* 53: 1778-1784

Herbst R, Lamp J (1999) Zur kleinräumigen Heterogenität der Böden Deutschlands und zum Akzeptanzpotenzial der Teilflächenbewirtschaftung. Erfassung der kleinräumigen Heterogenität, KTBL-Arbeitspapier 264: 33-41

Korolyuk TV, Shcherbenko HV (1994) Compiling soil maps on the basis of remotely sensed data digital processing: soil interpretation. *Inter J of Remote Sensing*, 17, 7: 1379-1400

Moran MS, Inoue Y, Barnes EM (1997) Opportunities and Limitations for Image-Based Remote Sensing in Precision Crop Management, *Remote Sensing of Environment*, 61:319-346

Myers VI (1975) Crops and soils. – In: Reeves R (ed): *Manual of remote sensing*, Vol. 2, Falls Church, 1975

Leone AP, Wright GG, Corves C (1995) The application of satellite remote sensing in upland areas of Southern Italy. *Inter J of Remote Sensing* 16, 6: 1087-1105

Obuchov AI, Orlov DS (1964) Spectral reflectivity of the major soil groups and possibility of using diffuse reflection in soil investigations. *Pocvovedenie*, 2

Panten K (2002) Ein Beitrag zur Fernerkundung der räumlichen Variabilität von Boden- und Bestandesmerkmalen. *Landbauforsch Völkenrode SH* 232. ISSN 0376-0723; ISBN 3-93314-57-9

Panten K, Lilienthal H, Zillmann E, Haneklaus S, Schnug E (2003) Remote sensing and precision agriculture. In: Lal R (ed) *Encyclopedia of soil science*; New York USA: Marcel Dekker Inc. 2003 <<http://www.dekker.com/servlet/product/productid/E-ESS>> [zitiert am 15.04.2004]

Pocknee S, Boydell BC, Green HM, Waters DJ, Kvien CK (1996) Directed Soil Sampling. In: Robert PC, Rust RH, Larson WE (eds) *Precision Agriculture; proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture*, Minneapolis, 23-26 of June 1996. Madison: ASA-CSSA-SSSA, pp 159-168, ISBN 0-89118-132-6

Rouse JW, Haas R, Schell JA, Deering DW, Harlan JC (1974) Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural

vegetation. NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, Md. 371 p

Schnug E, Haneklaus S, Murphy DPL (1994) Equifertiles - an innovative concept for efficient sampling in the local resource management of agricultural soils. *Asp of Appl Biol* 37: 63-72

Schnug E, Panten K, Haneklaus S (1998) Sampling and nutrient recommendations - The future. *Commun Soil Sci Plant Anal* 29, (11-14), 1455-1462

Schröder H (1989) Fernerkundung von Löß- und Verwitterungsstandorten und deren bodenerosiver Schädigung unter Anwendung von Verfahren der Multispektralanalyse. *Petermanns Geografische Mitteilungen* 133/2: 129-139

Schröder D (1999) Strategien zur Erfassung der kleinräumigen Heterogenität. In: *Erfassung der kleinräumigen Heterogenität*, KTBL-Arbeitspapier 264: 47-52

Seidel G (1995) *Geologie von Thüringen*, Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 556 S.

Stoner ER, Baumgardner MF, (1981) Characteristic variations in reflectance of surface soils. - In: *Soil Science Soc. of Am. J.* Vol. 45: 1161-1165

Zillmann E (1999) Versuch der Lokalisierung und Interpretation von Feldheterogenitäten anhand von optischen Satellitenaufnahmen - Ein Vergleich von Landsat Thematic Mapper und IRS-1C -, Diplomarbeit TU-Berlin

251	Susanne Freifrau von Münchhausen (2003) Modellgestützte Analyse der Wirtschaftlichkeit extensiver Grünlandnutzung mit Mutterkühen	8,00€
252	Axel Munack . Olaf Schröder . Hendrik Stein . Jürgen Krahl und Jürgen Bünger (2003) Systematische Untersuchungen der Emissionen aus der motorischen Verbrennung vom RME, MK1 und DK	5,00€
253	Andrea Hesse (2003) Entwicklung einer automatisierten Konditionsfütterung für Sauen unter besonderer Berücksichtigung der Tierleistung	8,00€
254	Holger Lilienthal (2003) Entwicklung eines bodengestützten Fernerkundungssystems für die Landwirtschaft	8,00€
255	Herwart Böhm . Thomas Engelke . Jana Finze . Andreas Häusler . Bernhard Pallutt . Arnd Verschwele und Peter Zwerger (Hrsg.) (2003) Strategien zur Regulierung von Wurzelunkräutern im ökologischen Landbau	10,00€
256	Rudolf Artmann und Franz-Josef Bockisch (Hrsg.) (2003) Nachhaltige Bodennutzung — aus technischer, pflanzenbaulicher, ökologischer und ökonomischer Sicht	9,00€
257	Axel Munack und Jürgen Krahl (Hrsg.) (2003) Erkennung des RME-Betriebes mittels eines Biodiesel-Kraftstoffsensors	5,00€
258	Martina Brockmeier . Gerhard Flachowsky und Ulrich von Poschinger-Camphausen (Hrsg.) (2003) Statusseminar Welternährung Beiträge zur globalen Ernährungssicherung	9,00€
259	Gerold Rahmann und Hiltrud Nieberg (Hrsg.) (2003) Ressortforschung für den ökologischen Landbau 2002	8,00€
260	Ulrich Dämmgen (Hrsg.) (2003) Nationaler Inventarbericht 2004 — Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen — Teilbericht der Quellgruppe Landwirtschaft	7,00€
262	Folkhard Isermeyer (Hrsg.) (2003) Fleisch 2025	9,00€
263	Ernst-Jürgen Lode und Franz Ellendorff (Hrsg.) (2003) Perspektiven in der Tierproduktion	7,00€
268	Martina Brockmeier und Petra Salamon (2004) WTO-Agrarverhandlungen — Schlüsselbereich für den Erfolg der Doha Runde Optionen für Exportsubventionen, Interne Stützung, Marktzugang	9,00€
269	Angela Bergschmidt (2004) Indikatoren für die internationale und nationale Umweltberichterstattung im Agrarbereich	8,00€
270	Klaus Walter (2004) Analyse der Beziehung zwischen den Kosten für Tierarzt und Medikamente in der Milchviehhaltung und der Produktionstechnik, dem Futterbau, der Arbeitswirtschaft sowie der Faktorausstattung ausgewählter norddeutscher Betriebe	9,00€
271	Uwe Petersen und Gerhard Flachowsky (Hrsg.) (2004) Workshop Positivliste für Futtermittel als Beitrag zur Futtermittelsicherheit — Erwartungen, Konzepte, Lösungen A Positive List of feedstuffs as a contribution to feed safety — Expectations, concepts and solutions	7,00€
272	Gerold Rahmann und Thomas van Elsen (Hrsg.) (2004) Naturschutz als Aufgabe des Ökologischen Landbaus	7,00€
273	Gerold Rahmann und Stefan Kühne (Hrsg.) (2004) Ressortforschung für den ökologischen Landbau 2004	7,00€

274	Folkhard Isermeyer (Hrsg.) (2004) Ackerbau 2025	9,00€
275	Abdelaziz Ibrahim Abdelaziz Aly Omara (2004) Further development of a mobile wind energy plant for a low-pressure irrigation system	9,00€
276	Gerold Rahmann . Hiltrud Nieberg . Susanne Drengemann . Alois Fenneker . Solveig March . Christina Zurek Bundesweite Erhebung und Analyse der verbreiteten Produktionsverfahren, der realisierten Vermarktungswege und der wirtschaftlichen sowie sozialen Lage ökologisch wirtschaftender Betriebe und Aufbau eines bundesweiten Praxis-Forschungs-Netzes (2004)	13,00€
277	Ioana Salac (2005) Influence of the sulphur and nitrogen supply on S metabolites involved in Sulphur Induced Resistance (SIR) of <i>Brassica napus</i> L.	11,00€
278	Maria del Carmen Lamas (2005) Factors affecting the availability of uranium in soils	8,00€
279	Ulrich Dämmgen (Hrsg.) (2005) Bestimmung von Ammoniak-Einträgen aus der Luft und deren Wirkung auf Waldökosysteme (ANSWER-Projekt)	7,00€
280	Hans-Joachim Weigel und Ulrich Dämmgen (Hrsg.) (2005) Biologische Senken für atmosphärischen Kohlenstoff in Deutschland — Tagungsband	9,00€
281	Albert Sundrum and Friedrich Weißmann (eds.) (2005) Organic pig production in free range systems	7,00€
282	Folkhard Isermeyer . Alexander Gocht . Werner Kleinhanß . Bernd Küpker . Frank Offermann . Bernhard Osterburg . Joachim Riedel und Ulrich Sommer (2005) Vergleichende Analyse verschiedener Vorschläge zur Reform der Zuckermarktordnung	7,00€
283	Luit J. De Kok and Ewald Schnug (eds.) (2005) Proceedings of the 1st Sino-German Workshop on Aspects of Sulfur Nutrition of Plants	11,00€
284	Rainer Oppermann and Gerold Rahmann (2005) Transforming Rural Communication Three sociological case studies in a developed an urbanized rural area of northern Germany: regional partnership Lübeck bay, organic farming and nature protection	7,00€
285	Jyldyz Uzakbaeva (2005) Effect of different tree species on soil quality parameters in forest plantations of Kyrgyzstan	8,00€
286	Silvia Haneklaus, Rose-Marie Rietz, Jutta Rogasik and Susanne Schrötter (eds.) (2005) Recent advances in in agricultural chemistry	11,00€
287	Maria del Carmen Rivas (2005) Interactions between soil uranium contamination and fertilization with N, P and S on the uranium content and uptake of corn, sunflower and beans, and soil microbiological parameters	8,00€
288	Alexandra Izosimova (2005) Modelling the interaction between Calcium and Nickel in the soil-plant system	8,00€
289	Wilfried Brade und Gerhard Flachowsky (Hrsg.) (2005 ²) Rinderzucht und Milcherzeugung — Empfehlungen für die Praxis	13,00€

Viele frühere Sonderhefte sind weiterhin lieferbar.

Bei Interesse wenden Sie sich bitte an landbauforschung@fal.de oder Frau Röhm unter 0531-596-1403.