

Thüringer Landesanstalt
für Landwirtschaft



Landwirtschaftlicher Bodenschutz in Thüringen



Thüringer Ministerium
für Landwirtschaft, Naturschutz
und Umwelt

FREISTAAT
THÜRINGEN



Impressum

Herausgeber: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
Naumburger Straße 98
07743 Jena
Telefon: 03641 683-0
Telefax: 03641 683-390
mail: postmaster@tll.thueringen.de

Autoren: Dr. sc. Peter Gullich
Dr. Rainer Paul
Dr. Wilfried Zorn
Dr. Volkmar König

Druck: Justizvollzugsanstalt Hohenleuben
Gartenstraße 4
07958 Hohenleuben

Mai 2008

- Nachdruck - auch auszugsweise - nur mit Quellenangabe gestattet. -

Landwirtschaftlicher Bodenschutz in Thüringen

Inhalt

1	Einführung	5
2	Rechtliche Grundlagen	6
3	Zuständigkeiten und Organisation	7
4	Vorsorge gegen Bodenschadverdichtung nach dem Thüringer Beratungsansatz	8
4.1	Was ist Bodenschadverdichtung - Ist sie vermeidbar?	8
4.2	Wie entsteht ein unzulänglicher Gefügestand und wie ist der Schadbereich abzugrenzen?	9
4.3	Erkennen von Bodenschadverdichtungen	10
4.4	Welche Vorsorge ist möglich?	11
4.5	Ermittlung des Gefahrenpotenzials	13
4.6	Planung von Vorsorgemaßnahmen im Landwirtschaftsbetrieb	13
5	Vorsorge gegen Bodenerosion nach dem Thüringer Beratungsansatz	15
5.1	Wie entsteht Bodenerosion - Ist sie vermeidbar?	15
5.2	Ermittlung des Gefahrenpotenzials	17
5.3	Planung von Maßnahmen im Landwirtschaftsbetrieb	18
5.3.1	Anbautechnische Maßnahmen auf Feldblöcken	18
5.3.2	Erosionsschutz durch Erfüllung von Cross Compliance-Anforderungen	20
5.3.3	Maßnahmeplanung auf Feldern (Feldstücken/Schlägen)	20
5.3.4	Agrar-Umweltmaßnahmen zum Schutz vor Bodenabtrag	21
6	Wie könnte sich das Gefahrenpotenzial bei Klimaveränderungen entwickeln ?	23
7	Bodendauerbeobachtung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen	24
8	Schutz des Bodens vor Schadstoffeinträgen	27
9	Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit durch optimale Bodenreaktion und Versorgung mit Grundnährstoffen	32
10	Literatur	36

1 Einführung

Landwirtschaft findet in Deutschland auf rund der Hälfte der Landoberfläche statt. Sie ist auf die Nutzung des Bodens angewiesen und daher grundsätzlich bestrebt, seine Fruchtbarkeit auf Dauer zu erhalten und möglichst zu mehren. Die Anforderungen der Gesellschaft an den Landwirt, den Boden bestmöglich zu schützen, treffen mit seinen eigenen wirtschaftlichen Interessen zusammen. Das ist eine gute Voraussetzung für wirksamen Bodenschutz. Dem Bodenschutz bei der landwirtschaftlichen Flächennutzung wird besonderer Stellenwert beigemessen. Das Bundes-Bodenschutzgesetz verpflichtet Bodeneigentümer und -nutzer zur Vorsorge gegen schädliche Veränderungen der Bodenfunktionen. Diese Vorsorge ist durch geeignete Maßnahmen der so genannten „Guten fachlichen Praxis“ zu treffen. Bodenfunktionen können durch Einträge und Anreicherungen von Schadstoffen beeinträchtigt werden, aber auch durch übermäßige Inanspruchnahme oder Anreicherung von Nährstoffen und organischer Bodensubstanz. Außerdem muss dem Gefahrenpotenzial von Bodenabtrag und bewirtschaftungsbedingter Gefügeschädigung begegnet werden.

Auch die Bemühungen um gutes Wasser in Europa, wie sie nach der europäischen Wasserrahmenrichtlinie notwendig sind, können letztlich nicht losgelöst von den Zielen des Bodenschutzes organisiert werden. Die gute landwirtschaftliche Praxis ist in weiten Teilen durch fachrechtliche Vorschriften definiert, so z. B. beim Düngen durch die Düngeverordnung, beim Pflanzenschutz durch das Pflanzenschutzgesetz, durch spezielle Vorschriften zum Tierschutz u. v. a. m. Die Grundanforderungen der „Guten fachlichen Praxis“, so auch die Einhaltung der fachrechtlichen Vorschriften, sind Voraussetzung für ungekürzte Ausgleichszahlungen (Flächenprämie). Diese Bindung von Umweltstandards an die landwirtschaftlichen Direktzahlungen erfolgt über das System des so genann-

ten Cross Compliance. Zum stofflichen Bodenschutz enthält die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) Anforderungen und Beurteilungsmaßstäbe (Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmenwerte). Zum Schutz vor Bodenabtrag und Schadverdichtung haben die zuständigen Landesbehörden die Beratung zu den Grundsätzen der „Guten fachlichen Praxis“ inhaltlich präzisiert. In Thüringen wurden deshalb von der Landesanstalt für Landwirtschaft praktikable Beratungsansätze für die Vorsorge gegen Erosion und Schadverdichtung im Landwirtschaftsbetrieb entwickelt.

Wo die „Gute fachliche Praxis“ nicht ausreicht und es deshalb zu schädlichen Bodenveränderungen kommt, können weitergehende Maßnahmen zur Gefahrenabwehr angeordnet werden. Andererseits stehen dann oftmals freiwillig in Anspruch zu nehmende Fördermaßnahmen für eine zusätzliche Vorsorge bereit.

Schließlich werden die Bemühungen um den landwirtschaftlichen Bodenschutz in allen Bundesländern komplettiert durch ein Bodenmonitoring. Die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft untersucht seit 1992 beginnend, heute insgesamt 14 Bodendauerbeobachtungsflächen hinsichtlich Veränderung der Bodenfunktionen unter praxisüblicher landwirtschaftlicher Nutzung.

Die Landesbehörden Thüringens haben in den zurückliegenden Jahren den umfassenden Schutz des Umweltgutes Boden, das gleichzeitig landwirtschaftliches Produktionsmittel ist, ernst genommen und die Voraussetzungen für die flächendeckende Erfüllung gesetzlicher Verpflichtungen geschaffen. Bei den Thüringer Landwirten sollte der Boden in guten Händen sein. Für die notwendigen Informationen und Hilfestellungen wird mit der Plattform „Landwirtschaftlicher Bodenschutz“ im Informationssystem der Landesanstalt für Landwirtschaft unter www.tll.de/ainfo gesorgt.

2 Rechtliche Grundlagen

Mit dem „Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten“ (Bundes-Bodenschutzgesetz, BBodSchG) vom 17. März 1998 besteht eine wesentliche Grundlage für einen einheitlichen Bodenschutz in Deutschland.

Nach diesem Gesetz sind:

- nachhaltig die Bodenfunktionen zu sichern und wiederherzustellen;
- Boden und Altlasten sowie hierdurch verursachte Gewässerverunreinigungen zu sanieren;
- schädliche Bodenveränderungen abzuwehren;
- Vorsorge gegen schädliche Bodenveränderungen zu treffen, sowie
- bei Einwirkungen auf den Boden Funktionsbeeinträchtigungen soweit wie möglich zu vermeiden.

Zur Gefahrenabwehr und auch zur Vorsorge sind Grundstückseigentümer wie -nutzer gleichermaßen verpflichtet. Bodenfunktionen im Sinne des Gesetzes sind:

1. Natürliche Funktionen:

- Lebensgrundlage und -raum für Menschen, Tiere, Pflanzen und Bodenorganismen;
- Bestandteil des Naturhaushaltes, insbesondere mit Wasser- und Nährstoffkreisläufen;
- Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium für stoffliche Einwirkungen aufgrund der Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften, insbesondere auch zum Schutz des Grundwassers.

2. Archiv der Natur- und Kulturgeschichte

3. Nutzungsfunktion als:

- Rohstofflagerstätte,
- Fläche für Siedlung und Erholung,
- Standort für land- und forstwirtschaftliche Nutzung sowie

- Standort für sonstige wirtschaftliche und öffentliche Nutzungen, Verkehr, Ver- und Entsorgung.

§ 7 BBodSchG begründet die Pflicht zur Vorsorge gegen schädliche Bodenveränderungen. Mit dieser Pflicht muss sich der Landwirt immer auseinandersetzen, wenn er auf den Boden einwirkt. Die Pflichten zur Gefahrenabwehr (§ 4 BBodSchG) hingegen werden dann für ihn besonders relevant, wenn eine schädliche Bodenveränderung eingetreten ist oder bereits eintreten droht.

Der Gesetzgeber sieht bei der landwirtschaftlichen Bodennutzung die Vorsorgepflicht erfüllt, wenn die Grundsätze der „Guten fachlichen Praxis“ eingehalten werden (§ 17 BBodSchG).

Diese Grundsätze umfassen insbesondere:

- Bodenbearbeitung hat unter Berücksichtigung der Witterung grundsätzlich standortangepasst zu erfolgen;
- Bodenstruktur erhalten und verbessern;
- Bodenverdichtungen so weit wie möglich vermeiden;
- Bodenabträge möglichst vermeiden;
- Naturbetonte Strukturelemente der Feldflur erhalten;
- Biologische Bodenaktivität durch die Fruchtfolgen erhalten oder fördern;
- Erhaltung des standorttypischen Humusgehaltes.

Die Grundsätze der „Guten fachlichen Praxis“ sind durch die für die landwirtschaftliche Beratung zuständigen Stellen zu vermitteln.

In der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 16. Juli 1999 (BBodSchV) sind neben den Vorschriften zur Untersuchung und Beurteilung von Bodenveränderungen auch Vorsorge-, Prüf- und Maßnahmewerte für den stofflichen Bodenschutz festgelegt sowie zulässige Frachten weiterer Stoffeinträge fixiert.

3 Zuständigkeiten und Organisation

Das Thüringer Gesetz zur Ausführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes (ThürBodSchG) vom 16. Dezember 2003 regelt die nach dem BBodSchG und der BBodSchV bestehenden Zuständigkeiten für den Bodenschutz in Thüringen. Nach § 11, Abs. 5 des Thüringer Bodenschutzgesetzes hat die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) die Beratung nach § 17 BBodSchG wahrzunehmen. Aufgrund eines Erlasses des Thüringer Ministeriums für Landwirtschaft, Naturschutz und Umwelt (TMLNU) ist sie als Nachfrageberatung anzubieten. Um diesem Beratungsauftrag gerecht zu werden, musste die TLL ein methodisches Konzept zur Beurteilung der möglichen Gefährdung von Bodenfunktionen durch die landwirtschaftliche Flächennutzung entwickeln und bereithalten. Im Mittelpunkt stehen die Gefahrenpotenziale durch Erosion und Verdichtung. Die Landkreise und kreisfreien Städte sind Untere Bodenschutzbehörde. Ihnen obliegt der Vollzug der bodenschutzrechtlichen Anforderungen (Anordnungen zur Gefährdungsabschätzung und ggf. von Gefahrenabwehr-/Sanierungsmaßnahmen bei begründetem Verdacht bzw. festgestellten schädlichen Bodenveränderungen sowie Anordnungen zur Erfüllung der Vorsorgepflichten). Darüber hinaus haben sie über evtl. Ausgleichsansprüche nach § 10 Abs. 2 BBodSchG zu befinden. Ausgleichsansprüche können nur dann entstehen, wenn der Landwirt Maßnahmen über das Niveau der „Guten fachlichen Praxis“ hinaus umsetzen muss und er nicht der Verursacher der schädlichen Bodenveränderung ist. Die als technische Fachbehörde benannte Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG) hat u.a. die Aufgabe, ein Bodeninformationssystem zu führen, in das insbesondere die Daten der Bodendauerbeobachtung aufzunehmen sind.

Die TLL hat das zur Erfüllung des gesetzlichen Beratungsauftrages notwendige methodische Konzept

entwickelt. Grundlage dafür sind langjährige experimentelle Befunde und ein umfangreiches Datenmaterial zur Kennzeichnung der funktionellen Merkmale Thüringer Ackerböden (s. Abb. 1).

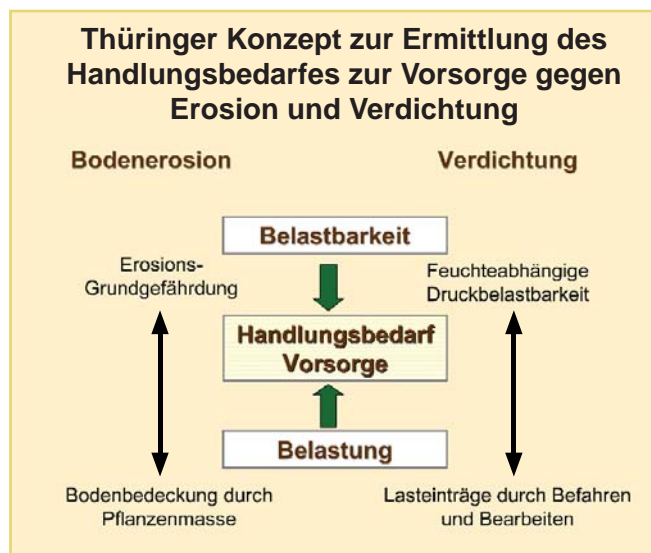


Abbildung 1

Daraus und aus Ergebnissen zu den nutzungsbedingten Einwirkungen auf die Böden wurde deren Belastbarkeit durch das Bewirtschaftungsregime abgeleitet. Dabei bedeutet „Belastbarkeit“ das Maß an funktionsbeeinträchtigender Einwirkung, bei dem der Boden seine Funktionen langfristig in ausreichendem Maße behält.

Solches Herangehen an die Konkretisierung der „Guten fachlichen Praxis“ und damit der gesetzlichen Vorsorgepflicht im Bereich der landwirtschaftlichen Bodennutzung entspricht den Grundsätzen nachhaltiger Nutzung des Produktionsmittels und Schutzgutes Boden.

4 Vorsorge gegen Bodenschadverdichtung nach dem Thüringer Beratungsansatz

4.1 Was ist Bodenschadverdichtung - Ist sie vermeidbar?

Böden bilden die unersetzliche Lebensgrundlage für Menschen, Tiere und Pflanzen. Wesentliche Bodenfunktionen beruhen auf physikalischen Eigenschaften. Diese können sich unter Druckbelastung rasch und dauerhaft verändern, häufig mit nachteiligen Auswirkungen auf die Versorgungsfunktionen. Nachhaltige Landwirtschaft bedeutet deshalb auch Erhalt und Verbesserung der für die Pflanzenversorgung notwendigen physikalischen Bodeneigenschaften.

Die im Interesse hoher Schlagkraft entwickelten und eingesetzten leistungsstarken Maschinen, Geräte und Transportfahrzeuge als Verursacher von Druckbelastung sind so einzusetzen und zu vervollkommen, dass sie beim Befahren und Bearbeiten des Bodens seine Fruchtbarkeit nicht dauerhaft beeinträchtigen.

Bodenverdichtung ist als Prozess und Zustand zu betrachten. Dabei ist zunächst nicht relevant, ob durch Bodennutzung verursacht und ob bereits eine nicht tolerierbare Beeinträchtigung der Bodenfunktionen eingetreten ist. Der Prozess führt eine Veränderung des Gefüges durch Verringerung des Porenanteils am Bodenvolumen herbei.

Als Zustand ist Bodenverdichtung ein Gefügestand mit höherem Volumenanteil an Feststoffen und geringerem Porenvolumen gegenüber einem optimalen Feststoff-Porenverhältnis. Ein Abgleich mit den Anforderungen der Kulturpflanzen anhand geeigneter Merkmale führt zur Definition des begrenzenden Zustandes. Hier reichen die Porenvolumina und deren Durchgängigkeit nicht zur ausreichenden Versorgung der Wurzeln mit Wasser und Sauerstoff aus.

Bodenverdichtung entstand und entsteht bereits durch natürliche Kräfte, z. B. die Auflast von Bodenmassen,

des Eises, Verlagerungsvorgänge von Tonmineralen im Laufe der Bodenbildung, aber auch durch die Kapillarkwirkung im Austrocknungsprozess. Diese Ursachen haben zu entsprechendem charakteristischen Wasser- und Gashaushalt, zu entsprechender Durchwurzelbarkeit usw. geführt. Als Beispiel seien die Pseudogleye mit Stauwasserregime genannt. Solche Zustände treten uns als natürliche Bodenbedingungen entgegen. In der Auswirkung viel stärker verdichtend kann jedoch der Druck wirken, der von den Fahrwerken der Traktoren, mehr noch der Ernte- und Transporttechnik auf den Boden, ausgeübt wird. **Führen diese bewirtschaftungsbedingten Verdichtungsprozesse zu einem die Bodenfunktionen limitierenden Gefügestand, sprechen wir von Schadverdichtung.**

Entscheidend für das Erkennen und die Abgrenzung des Verdichtungsstandes ist das Gefüge. Darunter versteht man die Anordnung der festen, flüssigen und gasförmigen Bestandteile des Bodens. Dabei bilden die festen Bestandteile ein Gerüst, das Poren unterschiedlicher Größe und Form umschließt. Diese Poren erfüllen vielfältige Aufgaben im Boden. Die groben Poren (Durchmesser $> 50 \mu\text{m}$) übernehmen den Gasaustausch, die Ableitung von Wasser und stehen der Durchwurzelung zur Verfügung. Die noch größeren Poren zwischen 50 und $10 \mu\text{m}$ sind ebenfalls an diesen Aufgaben beteiligt. Sie speichern jedoch bereits pflanzenverfügbares Wasser. Den umfangreichsten Speicherraum dafür stellt das Mittelporensystem mit Poren zwischen 10 und $0,2 \mu\text{m}$ Äquivalentdurchmesser bereit.

Das Gerüst der Festsubstanz kann dem Druck in Grenzen widerstehen, so dass keine oder geringe bleibende Veränderungen des Gefüges eintreten. Es baut an den Berührungspunkten der Bodenpartikel bzw. der Aggregate Stützkräfte und Scherwiderstände auf. Diese Kräfte sind vom Gefüge, dem Bodenwassergehalt und der Bodenart abhängig. Gefüge aus runden Aggregaten (Krümel, Bröckel) lagern, einer Kugelpa-

ckung ähnlich, mit einem Maximum an Stützstellen im Boden bzw. erhöhen im Verlauf der Verdichtung die Anzahl der Stützstellen. Mit weiter steigendem Druck kommt es an diesen Stellen zu Abplattungen. Bis zu diesem Zustand bestehen zwischen den Aggregaten aber noch ausreichend transportfähige Poren. Erst mit weiter steigendem Druck werden diese Aggregate in bindigen Böden zu Polyedern umgeformt; die Dichtlagerung schreitet weiter voran.

Diese polyedrischen Aggregate können nicht wie die porösen Krümel von den Wurzeln erschlossen werden. Zudem begrenzt die dichte Polyederpackung das Tiefenwachstum der Wurzeln. Das führt zu mangelnder Nährstoffaufnahme und Bodenwassernutzung.

Eine Auflösung der Polyeder und Rückbildung zu Krümeln ist bei Frosteinwirkung möglich, setzt aber eine wendende Bodenbearbeitung voraus. Lockerung der verfestigten Krume mit Grubber und darunterliegender Schichten durch Tieflockerung erzeugt nur instabile Poren zwischen den Polyedern, sie selbst bleiben aber erhalten und verfestigen sich eher noch weiter (WERNER, D. u. WERNER, B., 2001). Geringer Druck schiebt sie an den glatten Flächen wieder zu einer dichten Schicht zusammen.

Das Bodenwasser senkt die Scher- und Reibungskräfte, stützt aber die wassergefüllten Poren. Die Folge der Druckbelastung bei hohem Bodenwassergehalt ist deshalb weniger die Verdichtung als vielmehr die Knetung infolge der Scherkräfte. Dieser Prozess zerstört die Durchgängigkeit der groben Poren und fördert damit Luftmangel im Boden. Die Bodenart beeinflusst sowohl die Gefügebildung als auch das Verdichtungsverhalten. Zunehmender Tongehalt verstärkt die Wirkung des Bodenwassers, Schrumpfung bei Austrocknung verfestigt, Quellung bei Wasserzufuhr fördert die Knetung durch Scherkräfte (Abb. 2). **Während bei Lasteinträgen in sandigen Böden die Kompression überwiegt, nimmt mit steigendem Tongehalt der auf Scherkräfte zurückzuführende Verformungsanteil im-**

mer mehr zu. Deshalb verstehen wir unter Verdichtung die Summe von kompressions- und scherkraftbedingter Verformung.



Abbildung 2

4.2 Wie entsteht ein unzulänglicher Gefügestand und wie ist der Schadbereich abzugrenzen?

Veränderungen des Gefüges treten ein, wenn der Druck der Fahrzeuge und Maschinen auf den Boden die bodeneigenen Kräfte übersteigt. Bodenverdichtungen sind in der landwirtschaftlichen Praxis nicht zu vermeiden und im Falle überlockerten Bodens auch vorteilhaft. Die Verdichtung begünstigt den kapillaren Wasseraufstieg und erhöht die Zahl der Kontaktpunkte bzw. vergrößert die Kontaktflächen. Damit nehmen die Widerstandskräfte zu, der Boden wird stabiler.

Über ein bestimmtes Maß hinaus verursacht die Verdichtung eine zu starke Beeinträchtigung der Bodenfunktionen - der Schadzustand wird erreicht. Der Verlust an Grobporen ebenso wie die Zerschering dieser Poren vermindert die Transportleistungen des Gefüges und erschwert die Durchwurzelbarkeit. Für das Pflanzenwachstum und die biologischen Vorgänge im Boden sind Mindestvolumina der einzelnen Porengrößen erforderlich. Man betrachtet die gegenüber Ver-

dichtung empfindlichsten Gefügeeigenschaften, das Grobporenvolumen und dessen Durchgängigkeit. Es sollten in der Krume mindestens 8 Vol.-%, im Unterboden 5 Vol.-% Grobporen enthalten sein. Sie sollten so durchgängig sein, dass sie mindestens 2 bis 6 l Sauerstoff je m² und Tag (ALLEN, 1977) in den Boden leiten können. Diese Leistung erbringt der Boden bei einem Leitfähigkeitsbeiwert (kf-Wert) > 10 cm/d.

4.3 Erkennen von Bodenschadverdichtungen

Bodenschadverdichtungen erkennt man bereits an der Bodenoberfläche. Stehendes Wasser längere Zeit nach starken Niederschlägen, geringe Bestandesdichte und verzögerte Pflanzenentwicklung bis zum Vergilben der Pflanzen sind Anzeichen für eine Schadverdichtung. Besteht der Verdacht auf eine Schadverdichtung, kann sie ohne Messwerte an bestimmten Gefügemerkmalen erkannt werden. Die visuelle Gefügebewertung wird am Bodenprofil durchgeführt. Das Profil wird

mit dem Spaten etwa 50 cm tief ausgehoben. Anhand von Merkmalen wie der Gestalt des Gefügeverbandes, dem Aggregattyp, der Gestalt und Häufigkeit von Poren und dem Wurzelbild ist der Schadverdichtungsstatus zu erkennen. Es existieren mehrere Methoden: Visuelle Gefügediagnose nach WERNER u. THÄMERT 1989; Packungsdichte nach HARRACH, 1999; DIN 19682-10 1998 (Beschreibung und Beurteilung des Bodengefüges).

Auf bindigen Böden erkennt man Schadverdichtungen an groben glattflächigen und scharfkantigen Aggregaten (Polyeder), die Grobporen sind Risse, vereinzelt auch Röhren, ein verzweigtes Grobporensystem fehlt (vgl. Abb. 3 und 4). Starke Knetung kann hier auch zu Kohärentgefüge führen. Sandige Böden weisen ein kompaktes Einzelkorngefüge auf.

Feinwurzeln wachsen filzartig auf der Oberfläche der Aggregate entlang, tiefere Schichten werden nur entlang der Klüfte und durch biogene Größtporen erschlossen.



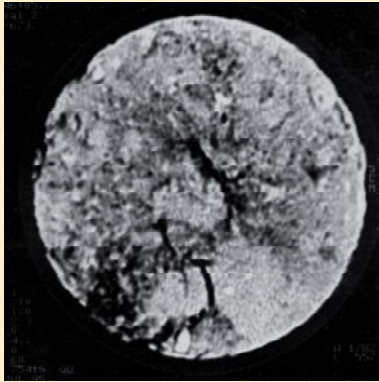
Schadverdichteter Acker nach Befahren bei zu hoher Bodenfeuchte

Schadverdichteter Boden aus Schlufflehm

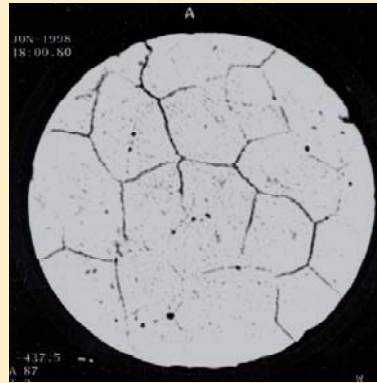
Braunerde-Pseudogley Schlagrandlage	LK (%)	kf (cm/d)
Aktueller Ap (infolge mehrfacher Grubber- Eggenbearbeitung lockert)	18,9	963
Verlassener Ap (polyedrische Aggregate, infolge Knetung nahezu undurchlässig)	8,0	0,2
Krumenbasis (grobe polyedrische Aggregate, undurchlässig)	7,1	0,1
Bv-Sw	6,9	42
Sw	Krumennaher Unterboden (Zunahme der Porenkontinuität, mittel durchlässig)	
Sd		

Abbildung 3

Visuelle Unterscheidung von Gefügeständen an Bodenausschnitten



unverdichtet



schadverdichtet

Dünnschliff einer 250 cm³ Stechzylinderprobe, Schliffbild, Horizontalschnitt

Abbildung 4

Physikalische Parameter

Die verdichtungsanzeigenden Parameter Trockenrohichte, Porenvolumen, -größenverteilung und -durchlässigkeit können mit Routinemethoden bestimmt werden.

Direkten Bezug zum Verdichtungsverhalten und der resultierenden Gefügefunktion haben die Parameter Luftkapazität (Anteil an Grobporen > 50 µm) und Porendurchlässigkeit.

4.4 Welche Vorsorge ist möglich?

Bodenschadverdichtungen sind vermeidbar. Lösungsansätze sind nach SOMMER, C. und BRUNOTTE, J. (2001):

- Nutzung technischer Möglichkeiten
- Gestaltung bodenschonender Arbeitsverfahren
- Stabilisierung des Bodengefüges
- Begrenzung der Belastungen

Die technischen Möglichkeiten sind:

1. Großvolumige, breite Reifen, die mit geringem Innendruck gefahren werden können, Gleisbandfahrwerke, Zwillingsbereifungen sowie
2. Reduzierung der Radlast durch geringere Fahrzeugmassen und/oder Verteilung der Fahrzeugmasse auf mehrere Achsen.

Bodenschonend sind folgende Arbeitsverfahren:

1. Leitspurverfahren, jedoch mit bodenschonender Belastung der Spur, um auch dort Schadverdichtungen zu vermeiden;
2. Zusammenlegen von Arbeitsgängen;
3. Pflügen ohne Befahren der Furche (On-Land-Pflügen), vgl. Abb. 5 sowie
4. Verzicht auf das Befahren zu nassen Bodens, Nutzung der Leistung der Technik zur konzentrierten Durchführung der Arbeiten in den Zeitspannen optimaler Befahrbarkeit.



Veränderung des Bodengefüges beim Pflügen

Abbildung 5

Durch „Gute fachliche Praxis“ kann die Tragfähigkeit des Bodens erhöht werden, z. B.:

1. Förderung der Krümelbildung durch ausreichende Versorgung des Bodens mit organischer Substanz (Erhalt des Humusgehaltes).
2. Nichtwendende, flachlockernde Bodenbearbeitung, ggf. Mulchsaat. Der Verzicht auf tiefe Lockerung erzeugt ein festes Gefüge unterhalb der gelockerten Schicht und erhöht damit die Tragfähigkeit. Diese ist aber auch die entscheidende Schicht für die Wurzel ausbreitung und Nährstoffaufnahme. Es ist deshalb darauf zu achten, dass ein ausreichendes kontinuierliches Grobporenvolumen erhalten bleibt. Eine Umformung der Aggregate zu Polyedern ist zu vermeiden.
3. Zum Lockern der dichten Unterkrume in mehrjährigen Abständen durchgeführte Herbst-Pflugfurche (auf tonreichen Böden in kürzeren Abständen) hat sich unter Thüringer Verhältnissen als vorteilhaft gezeigt. In Verbindung mit ausreichend organischer Substanz entwickelt sich durch natürliche Kräfte wieder ein tragfähiges Bodengerüst.
4. Gegenüber einer tiefen Bearbeitung mit Grubber ist das Wenden des Bodens günstiger, weil die verdichteten Aggregate an die Oberfläche gelangen

und dort vom Frost aufgelöst werden können. Es sollte allerdings nicht zu nasser Boden gepflügt werden. Ebenso kann Pflügen stark geneigter Flächen in Neigungsrichtung zu verstärkter Erosion führen.

Schließlich muss unter bestimmten Umständen auch eine Begrenzung der mechanischen Belastung vorgenommen werden.

1. Die Verwendung breiterer Reifen senkt zwar den Kontaktflächendruck, es werden aber auch größere Anteile dieses Druckes in den tieferen Boden eingetragen. Um den bodenschonenden Effekt zu erreichen, muss der Kontaktflächendruck stärker abnehmen als die Radlast zunimmt.
2. Bodendruck wirkt gegen die bodeneigene und damit auf den verschiedenen Böden sehr unterschiedliche Stabilität. Das bedeutet, dass auch unter Nutzung der gegenwärtig verfügbaren technischen Möglichkeiten eine Radlastbegrenzung erforderlich sein kann. Stabile Böden werden schwere und leistungsstarke Technik ohne Schädigung abstützen, für druckempfindliche kann sie ungeeignet sein.

3. Die erkannte Schadverdichtungsgefahr bezieht sich auf die Auswirkungen der verfügbaren Technik auf den Boden. Nimmt die Fahrzeugmasse weiter zu, verschärft sich die Schadverdichtungsgefahr.

Es sind zahlreiche ackerbauliche, arbeitsorganisatorische und technische Möglichkeiten der Bodenschonung nutzbar. Die effektivste Bodenschonung wird erreicht, wenn man diese Maßnahmen vorsorglich auswählen kann. Dazu ist es erforderlich, die Schadverdichtungsgefahr einzuschätzen. Das ermöglicht, gezielt die Technik und die Maßnahmen auszuwählen, die auf dem gegebenen Boden am besten wirken und am kostengünstigsten sind. Die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft hat dazu ein Beratungsmodell, den „Bodenschutzplaner“, entwickelt.

4.5 Ermittlung des Gefahrenpotenzials

Unter den Bedingungen der gegenwärtig in der Thüringer Großflächenbewirtschaftung üblichen Technik zeigt sich eine regionale Verteilung des Gefahrenpotenzials, die einen engen Bezug zur Verbreitung der Bodenformen hat.

Diese Gefährdung kann mit dem Bodenschutzplaner der TLL für jeden Betrieb ermittelt werden. Dazu gibt der Nutzer im Teil Bodengefügeschutz des Bodenschutzplaners die Feldblock-Identnummern und die Achs- bzw. Radlasten sowie die Reifenbreiten seiner vorhandenen oder der zu beschaffenden Technik für jeden Arbeitsgang ein. Das Programm zeigt die gefährdeten Feldblöcke und den Arbeitsgang an, der die Gefährdung verursacht. Durch Veränderung der technischen Parameter werden die Möglichkeiten zum Abbau der Gefährdung angegeben. Ebenso ist der Einfluss trockenerer Bodenzustände erkennbar.

4.6 Planung von Vorsorgemaßnahmen im Landwirtschaftsbetrieb

Mit dem Bodenschutzplaner der TLL können alle anfallenden Arbeiten hinsichtlich ihrer Verdichtungswirkung auf allen Feldblöcken des Betriebes überprüft werden. Wird eine Gefährdung angezeigt, kann der Nutzer Reaktionsmöglichkeiten überprüfen, wie die Veränderung der Reifenbreite/Änderung des Fahrwerkes, die Verringerung der Radlast (mehrere Achsen, leichtere Maschine) und die Ausnutzung trockenerer und damit festerer Bodenzustände (Abb. 6).

Voraussetzung für ein zuverlässiges Ergebnis sind realistische Eingabedaten, die dem verfügbaren Stand der Technik entsprechen. Dennoch muss das Ergebnis vom Nutzer auf seine Plausibilität überprüft werden. Das Modell kann nicht auf die Erfahrung und Flächenkenntnis des Bewirtschafters verzichten. Besonderes Augenmerk ist in den in Abbildung 7 dargestellten Gebieten einer ausreichenden Vorsorge gegen Schadverdichtung zu widmen.

In die Betrachtung sollten immer alle Arbeitsgänge und Feldblöcke einbezogen werden.

Umfassende Bodenschonung wird nur erreicht, wenn die gesamte Maschinenausstattung des Betriebes, die auf dem Feld eingesetzt wird, bodenschonend ausgerüstet ist und nicht nur einzelne Großmaschinen. Eine Vielzahl von Arbeiten wird mit weniger spektakulären Fahrzeugen durchgeführt. Diese erreichen aber ebenfalls hohe Massen, überfahren das Feld mehrfach, auch außerhalb der Leitspuren. Ein Beispiel dafür ist die Transporttechnik.

Bodenschutzplaner zur Vorsorge gegen Schadverdichtung

Microsoft Excel - Pflanzl. RSP-Plan

Bodenschutzplaner zur Druckbelastung

alle noch unterlegten Felder
rot markiert ausgefüllt werden!

Arbeitsmaschinenauskleiden:
agr. Düngung (Selbstfahrer)

Bodenmaschinenstand:
na B, NU & FKJ

Max. Rollbel. Gewicht bei Normlast: 220 t

Rollenbreite: 600 mm

Transport mit Tandemfahrwerk

nicht Druckbelastungspassfähige
Wachstumsstadien (akt.) 528,18
Insgesamt 528,18

Druckbelastungsquadrat

Fl. ID	Fl. Bezeichnung	ha	Druckbelastungsquadrat
27	Fl. 27	2,22	0,37
28	Fl. 28	2,22	0,37
29	Fl. 29	2,22	0,37
30	Fl. 30	2,22	0,37
31	Fl. 31	2,22	0,37
32	Fl. 32	2,22	0,37
33	Fl. 33	2,22	0,37
34	Fl. 34	2,22	0,37
35	Fl. 35	2,22	0,37
36	Fl. 36	2,22	0,37
37	Fl. 37	2,22	0,37
38	Fl. 38	2,22	0,37
39	Fl. 39	2,22	0,37
40	Fl. 40	2,22	0,37
41	Fl. 41	2,22	0,37
42	Fl. 42	2,22	0,37
43	Fl. 43	2,22	0,37
44	Fl. 44	2,22	0,37
45	Fl. 45	2,22	0,37
46	Fl. 46	2,22	0,37
47	Fl. 47	2,22	0,37
48	Fl. 48	2,22	0,37
49	Fl. 49	2,22	0,37
50	Fl. 50	2,22	0,37

Ausgangssituation

Microsoft Excel - Pflanzl. RSP-Plan

Bodenschutzplaner zur Druckbelastung

alle noch unterlegten Felder
rot markiert ausgefüllt werden!

Arbeitsmaschinenauskleiden:
agr. Düngung (Selbstfahrer)

Bodenmaschinenstand:
na B, NU & FKJ

Max. Rollbel. Gewicht bei Normlast: 250 t

Rollenbreite: 600 mm

Transport mit Tridemfahrwerk

nicht Druckbelastungspassfähige
Wachstumsstadien (akt.) 528,18
Insgesamt 528,18

Druckbelastungsquadrat

Fl. ID	Fl. Bezeichnung	ha	Druckbelastungsquadrat
27	Fl. 27	2,22	0,37
28	Fl. 28	2,22	0,37
29	Fl. 29	2,22	0,37
30	Fl. 30	2,22	0,37
31	Fl. 31	2,22	0,37
32	Fl. 32	2,22	0,37
33	Fl. 33	2,22	0,37
34	Fl. 34	2,22	0,37
35	Fl. 35	2,22	0,37
36	Fl. 36	2,22	0,37
37	Fl. 37	2,22	0,37
38	Fl. 38	2,22	0,37
39	Fl. 39	2,22	0,37
40	Fl. 40	2,22	0,37
41	Fl. 41	2,22	0,37
42	Fl. 42	2,22	0,37
43	Fl. 43	2,22	0,37
44	Fl. 44	2,22	0,37
45	Fl. 45	2,22	0,37
46	Fl. 46	2,22	0,37
47	Fl. 47	2,22	0,37
48	Fl. 48	2,22	0,37
49	Fl. 49	2,22	0,37
50	Fl. 50	2,22	0,37

Vorsorgemaßnahme

Abbildung 6

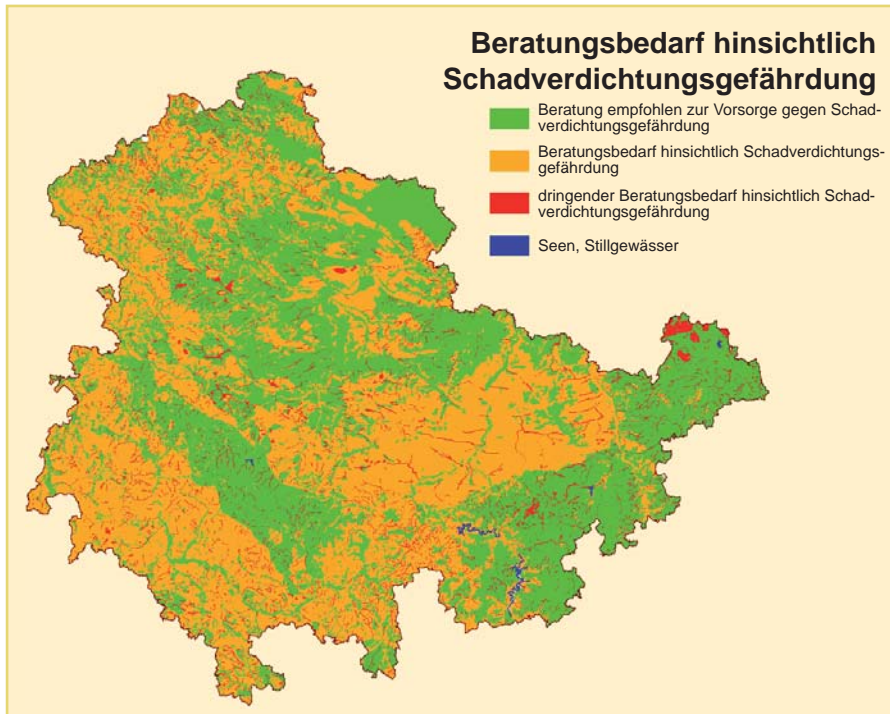


Abbildung 7

5 Vorsorge gegen Bodenerosion nach dem Thüringer Beratungsansatz

5.1 Wie entsteht Bodenerosion - Ist sie vermeidbar?

Bodenabtrag durch Wasser ist ein natürlicher Prozess, der die Oberfläche des Festlandes im Wechselspiel mit der **Entstehung** von Gebirgen durch hangabwärts gerichtete Massenverlagerung verändert.

Daran kann der Mensch nichts ändern. Durch landwirtschaftliche Nutzung wird der Naturprozess in aller Regel verstärkt, weil die Bedingungen dafür verändert werden, und zwar meist in Richtung höherer Anfälligkeit der Standorte. Neben der Wassererosion gibt es auch Bodenabtrag durch Wind. Hierbei ist die

Häufigkeit starker Winde zu Zeiten trockenen und unbedeckten leicht verwehbaren (besonders Feinsand) Oberbodens für das Gefährdungsmaß entscheidend. Winderosion hat in Thüringen aufgrund der Bodenbeschaffenheit nur einen untergeordneten Stellenwert. Deshalb konzentrieren sich nachstehende Kapitel allein auf die Wassererosion. Die Zurückführung der Erosionsgefahr auf das naturgegebene Maß würde die Aufgabe jeglicher Ackernutzung bedeuten. Das wäre ein utopisches Ziel. Deshalb wird das im Bodenschutzgesetz formulierte Handlungsziel zur Vorsorge („Bodenabträge soweit möglich zu vermeiden“) so abgesteckt, dass es bei nachhaltiger Landwirtschaft erreicht werden kann.

Folgende Faktoren sind für die graduelle Ausbildung der Erosionsgefahr bedeutsam:

- Anfälligkeit des Bodens für Loslösung und Verlagerung von Partikeln
- Häufigkeit erosionswirksamer Niederschlagsereignisse
- Neigung und Länge der Abflussbahnen (Reliefenergie)
- Umfang und Dauer der Bodenbedeckung durch Pflanzenmasse
- Spezielle Schutzwirkung durch das ackerbauliche Management

Vergleichsweise große Gefahr besteht also dort, wo häufig Oberflächenabfluss in großer Menge und mit hoher Fließgeschwindigkeit auftritt und der Niederschlag auf den ungeschützten Boden fällt. Alles, was dem entgegenwirkt, dient der Vorsorge gegen die schädliche Veränderung des Bodens.

Schädlich wirkt sich nicht nur der Verlust des humosen Oberbodens am Oberhang aus, sondern auch die



*Grabenerosion auf einem Ackerschlag
(Muschelkalk, Hanglänge > 300 m, Oktober 2007)*

mit der anschließenden Ablagerung einhergehende Heterogenisierung der Ackerschläge. Man bezeichnet diese Schäden als OnSite-Schäden. Im Gegensatz dazu können auch außerhalb der Schläge Folgeschäden, so genannte OffSite-Schäden, entstehen. Auffällig sind zum Beispiel Aufschüttungen auf Straßen, ausgespülte Wege, verstopfte Kanäle u. v. a. m. Dem guten Gewässerzustand sind Einträge von fester Bodensubstanz und Nährstoffen (v. a. Phosphor) aus Ackerflächen besonders abträglich. Landwirtschaftliche Vorsorge muss bereits beim OnSite-Schaden ansetzen. Das bedeutet, der schleichenden, flächenhaft verlaufenden Bodenverlagerung auf dem Schlag selbst entgegenzuwirken. Tritt Grabenerosion auf (nebenstehendes Foto), zeigt dies in der Regel ein höheres Gefährdungsmaß und unter Umständen auch unterlassene Maßnahmen gegen das Entstehen von starkem Oberflächenabfluss.

Wollte man Erosion bei allen nur denkbaren Faktorenkonstellationen ausschließen, also die Wirkung von Extremereignissen beherrschen, hieße das, Landwirtschaft, zumindest aber den Ackerbau, aufzugeben. Weil das nicht relevant ist, geht man von langjährig mittleren Verhältnissen aus und beugt der sich daraus ableitenden Gefährdung vor.

Fazit

Bodenabtrag durch fließendes Wasser ist ein Naturvorgang und nicht vollständig zu unterbinden. Er wird durch Ackerbau verstärkt. Bodenerosion unter landwirtschaftlicher Nutzung muss auf das bei nachhaltiger Landwirtschaft unvermeidbare Maß begrenzt werden.

5.2 Ermittlung des Gefahrenpotenzials

Das Prognosemodell der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (SCHWERTMANN, VOGL, KAINZ; 1987) entspricht den im Kapitel 5.1 dargestellten Anforderungen. Mit diesem Modell wird die Gefährdungsabschätzung für den flächenhaften Bodenabtrag im Mittel langjähriger Verhältnisse erfasst. Genau das braucht man für die Planung von Vorsorge. Dabei ist es nicht nötig, die Abtragungswirkung eines bestimmten Niederschlagsereignisses nach Menge und Zeit korrekt abzubilden. Dazu gibt es physikalische Modelle, die allerdings sehr hohe Ansprüche an die Eingangsparameter stellen und im Ergebnis für eine vergleichende Gefährdungsanalyse aller Ackerflächen unzweckmäßig sind. Die Allgemeine Bodenabtragungsgleichung (ABAG) beinhaltet die in Abbildung 8 dargestellten Faktoren. Das Gefährdungsmaß A - Mittlerer jährlicher Bodenabtrag in $t/ha \times a$ - ist als Vergleichsmaß für die Erosionsgefährdung zu verstehen. Im Hinblick auf abgetragene Mengen drückt diese Größe allenfalls ein Potenzial aus, mit dem man rechnen kann, nicht aber tatsächlich jährlich anfallende Tonnagen. Der Bewirtschaftungsfaktor C bildet den Beitrag der Landbewirt-

schaftung zum Erosionsschutz ab und ist im Einzelfall lage- und anbaukonkret zu verwenden. Große C -Faktoren drücken geringe Bodenbedeckung aus und ziehen ein hohes Gefährdungsmaß A nach sich. Ebenso ist der Schutzfaktor P an die Verhältnisse im Einzelfall gebunden. Die Faktoren Regenerosivität R , Bodenerodibilität K , Hanglänge L und Hangneigung S wurden für die Ackerfläche Thüringens ermittelt und werden als Vektordaten vorgehalten. Ihre Verarbeitung zur Karte der Erosionsgefährdung Thüringer Ackerböden erfolgt in einem Geografischen Informationssystem (GIS). Die Relieffaktoren L und S sind an Geländeauschnitte gebunden. Sie charakterisieren die abflusswirksamen Hänge. Sie wurden nach einer speziellen Modellvariante der ABAG (multiple flow) unter Anwendung der ArcView-Erweiterung AV Erosion (SCHÄUBLE, 2005) und des Digitalen Geländemodells DGM 5 für die im InVeKoS-System enthaltenen Thüringer Ackerfeldblöcke ermittelt. Damit erfordern neue Feldblockzuschnitte neue LS -Ermittlungen. Die Verwendung des hochauflösenden Geländemodells gestattet die realitätsgetreue Berücksichtigung des Reliefs auch bei kleineren Feldblöcken. Der Regenerosivität R liegt eine aus den Jahresniederschlagssummen der Jahre 1970 bis 2000 entwickelte Karte für Thüringen zugrunde. Die Einschätzung der Bodenerodibilität K basiert auf Analysedaten von über 400 Bodenprofilen und den Einheiten der Bodengeologischen Karte Thüringens. Damit werden letztlich Bodeninformationen im Mittelmaßstabsbereich (1 : 50 000 bis 1 : 100 000) verwendet. Obwohl die Qualitätsverbesserung durch Verwendung höher auflösender Informationen, wie z. B. von Daten der Bodenschätzung, nachgewiesen ist (PERNER und WURLITZER, 2005), bleibt in absehbarer Zeit keine andere Wahl, weil die Feldschätzungskarten in Thüringen wegen nicht vorhandener Bearbeitungskapazität und finanzieller Mittel noch nicht georeferenziert und vektorisiert verfügbar sind. Daran soll künftig wieder verstärkt gearbeitet werden. Die standortbedingte Grundgefährdung der Ackerfläche (Faktorprodukt $R \times K \times L \times S$) steht also in der beschrie-

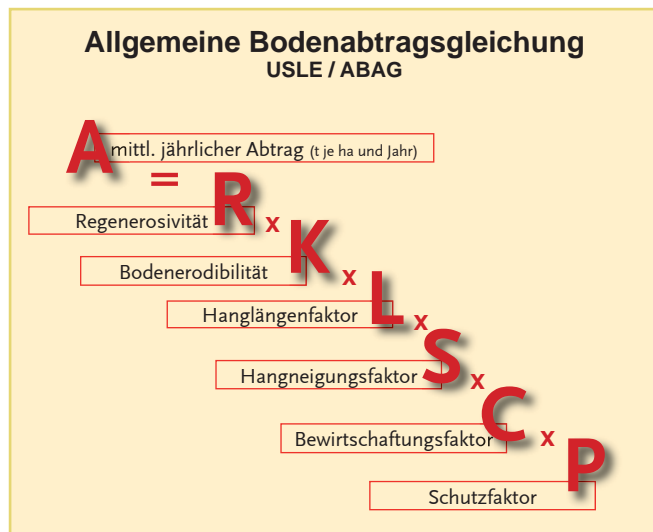


Abbildung 8

Erosions-Grundgefährdung (R x K x L x S) der Ackerfläche Thüringens

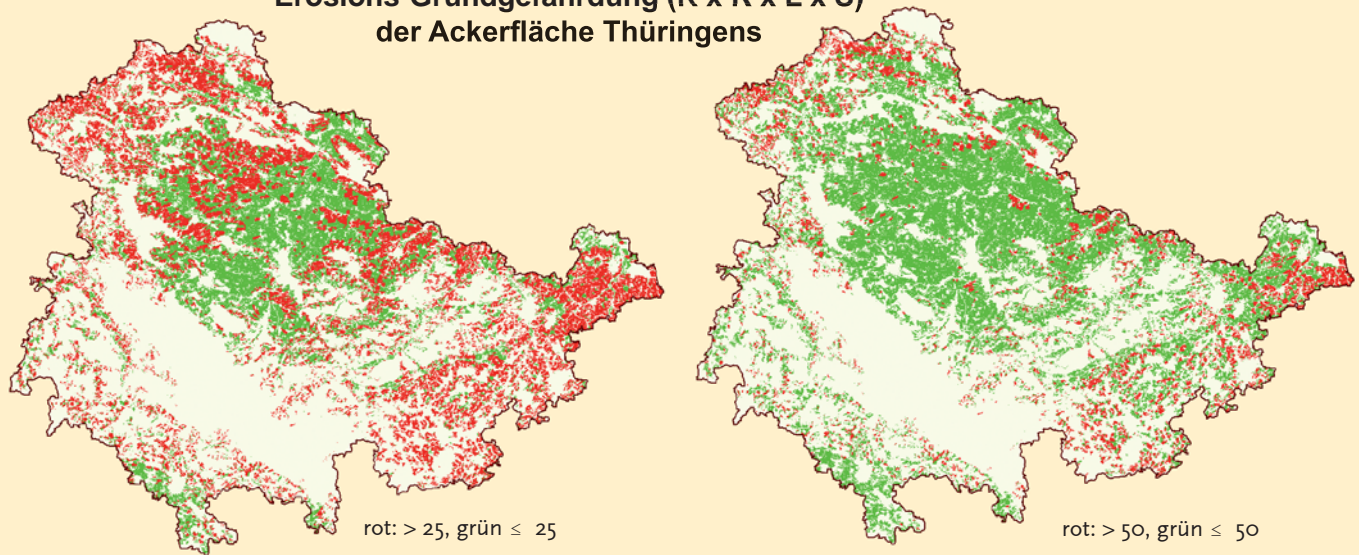


Abbildung 9

benen Form als Basisinformation für verschiedene Bodenschutzanforderungen feldblockbezogen bereit (Abb. 9). Anwendungen sind:

- Beratung nach § 17, Abs. 2 BBodSchG
- Betriebliche Planung von Vorsorgemaßnahmen
- Gebietskulissen für Fördermaßnahmen zum Erosionsschutz
- Planung und Kontrolle von Cross Compliance-Auflagen

5.3 Planung von Maßnahmen im Landwirtschaftsbetrieb

5.3.1 Anbautechnische Maßnahmen auf Feldblöcken

Anbautechnische Maßnahmen sind die nächstliegenden, die zu prüfen sind, wenn die Vorsorge gegen Bodenerosion im Landwirtschaftsbetrieb verbessert werden muss. In erster Linie ist der Bewirtschaftungs-

faktor C zu betrachten, erst danach, unter gewissen Umständen, der Schutzfaktor P. Der C-Faktor drückt die mittlere Abtragsgefahr bei Anbau einer Fruchtart im Vergleich zu Schwarzbrache aus. Neben zeitlichem Verlauf und Intensität der Bodenbedeckung durch Pflanzenmasse geht auch der im Jahreszeitraum mit häufigen Starkniederschlägen gewöhnlich vorhandene Bedeckungsgrad ein. Genau genommen, müsste diese Rückkoppelung zum Regenerositätsfaktor R über regional differenzierte C-Faktoren einer Fruchtart Berücksichtigung finden. Gegenwärtig bleibt für solche Arbeiten jedoch keine Zeit. Die erste anbautechnische Maßnahme besteht also in dem Versuch, mehr Kulturen mit hohem C-Faktor auf die Feldblöcke des Betriebes mit geringerer Erosions-Grundgefährdung (vgl. Kapitel 5.2) zu stellen. Dieser Spielraum bemisst sich neben der theoretisch möglichen Minimierung des Abtragsrisikos im Betrieb auch an betrieblichen Erfordernissen, wie z. B. Minimierung der Aufwendungen für

den innerbetrieblichen Transport von Konservatfutter (Silomaisanbau in Silo- und Stallnähe). Weiterhin sind der Verbleib von Ernte- und Pflanzenrückständen auf der Bodenoberfläche sowie die Rauigkeit der Bodenoberfläche über den C-Faktor wirksam. Konservierende Bodenbearbeitung/Mulchsaat mindern das Erosionsrisiko dann am meisten (um den Faktor 2 bis 7) wenn möglichst viel Pflanzenmasse auf dem Feld verbleibt und ein pflugloses System nicht durch alternierendes Pflügen unterbrochen wird (Tab. 1).

Tabelle 1: C-Faktoren einiger Fruchtarten bei unterschiedlichem Bodenbearbeitungssystem

Fruchtart	Bewirtschaftungsfaktor C	
	Pflug, keine Zwischenfrucht	kons. Bodenbearbeitung/Mulch
Dauergrünland	0,004	
Winterweizen	0,12	0,04
Winterraps	0,07	0,04
Silomais	0,35	0,05

Die Schutzmaßnahme, quer zum Hang zu bearbeiten, wird über den Schutzfaktor P abgebildet. Bei hangabwärts gerichteter Bearbeitung beträgt der P-Faktor 1 und reduziert somit das Gefährdungsmaß A der ABAG nicht. Bei Querbearbeitung sinkt der Faktor in Abhängigkeit von Hangneigung und -länge, so dass eine Gefährdungsminderung angezeigt wird. Wichtig ist aber zu wissen, dass bei Überschreitung einer kritischen Hanglänge die Schutzwirkung der Querbearbeitung nicht mehr gegeben ist (Durchbruch der „Kaskade“ durch mehr Abfluss). Deshalb sind längere Hänge dann ebenso zu werten wie bei hangabwärts gerichteter Bearbeitung. Der P-Faktor beträgt dann wieder 1. Die kritische Hanglänge ist geringer als allgemein gedacht (Tab. 2). Die mittlere Größe der Thüringer Ackerfeldblöcke liegt bei 13,5 ha (mit 367 m Kantenlänge wenn man quadratische Form unterstellt), wobei aber 75 % der Ackerfläche in Feldblöcken > 13,5 ha liegt. Einzelne Feldblöcke umfassen auch mehr als 300 ha.

Tabelle 2: P-Faktor und kritische Hanglänge

Hangneigung (%)	P-Faktor	Kritische Hanglänge (m)
2	0,5	130
4	0,5	100
8	0,6	60
15	0,7	24

Daraus wird deutlich, dass Querbearbeitung in Thüringen nur in Ausnahmefällen das Mittel der Wahl sein kann.

Als Planungshilfe zur Anwendung durch den praktischen Landwirt wurde der „Bodenschutzplaner“ entwickelt. In dieser einfach zu bedienenden Excel-Anwendung kann der Zuwachs an Vorsorgeleistung durch bessere Anbauverteilung auf die Ackerfeldblöcke geprüft werden (Abb. 10).

Die Anwendung ist unter www.tll.de/ainfo zum Download veröffentlicht. Bei der Anwendung müssen lediglich die zu prüfenden Ackerfeldblöcke eingegeben werden, und nach Zuordnung der angebauten Fruchtarten ist sofort die Erosions-Gefährdungssituation bzw. die

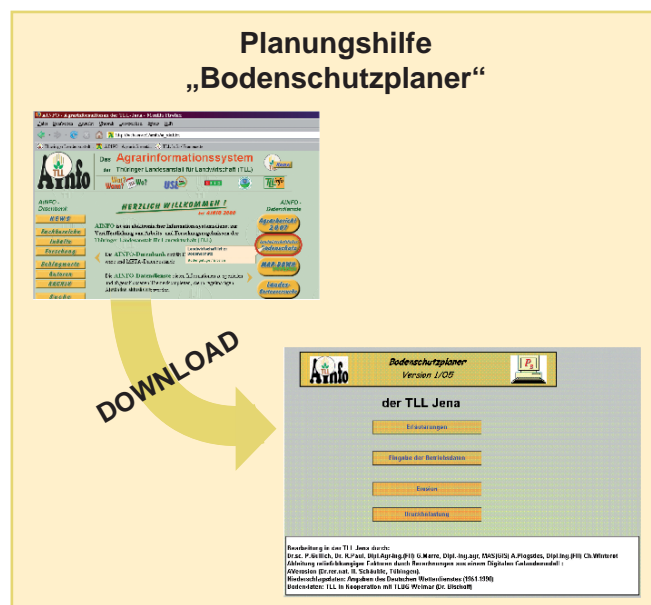


Abbildung 10

Vorsorgeleistung des Betriebes sichtbar. Freilich kann man zentral nur die Information für die InVeKoS-Kategorie „Feldblock“ bereitstellen. Das wird den Nutzer nicht befriedigen, der einen Teil davon nutzt, der obendrein nicht den mittleren Verhältnissen entspricht. Allerdings sind mehr als zwei Drittel der Thüringer Ackerfeldblöcke identisch mit einem Feld (gleicher Nutzer, gleiche Fruchtart). Die Planung von Maßnahmen, die Felder oder die beabsichtigte Unterteilung von Feldblöcken betreffen, muss vorzugsweise als Beratungsleistung angesehen werden, wie in Kapitel 5.3.3 dargestellt.

5.3.2 Erosionsschutz durch Erfüllung von Cross Compliance-Anforderungen

Mit Cross Compliance-Kriterien werden Grundanforderungen der „Guten fachlichen Praxis“ in kontrollfähiger Weise organisiert.

So werden mit dem Direktzahlungen-Verpflichtungen-Gesetz (BGl. 2004, I, S. 1763 ff.) Direktzahlungen an die Landwirte auch an die Einhaltung von Erosionsschutzbedingungen gebunden. Während es bisher keinen Bezug des Kriteriums zur Erosionsgefährdung des Standortes gab, sind die Nutzflächen bis zum Beginn des Jahres 2009 nach ihrer Erosionsgefährdung einzustufen. In Thüringen ist, wie bereits dargestellt, nur die Wassererosion relevant, der Ausweis geschieht unter Verwendung der in Kapitel 5.2 dargestellten Datenbasis. Die Thüringer Ackerfläche zeigt die in Abbildung 11 dargestellte Grundgefährdung. Damit besteht ein einheitliches methodisches Konzept für den langjährig erprobten und eingeführten Beratungsansatz und das Instrument Cross Compliance - eine notwendige Voraussetzung für wirksamen Bodenschutz. Die deutschlandweit einheitlich vorgesehenen Anforderungen in den voraussichtlich drei Gefährdungsklassen (keine/mittel/hoch) betreffen in erster Linie das Bodenbearbeitungsverfahren und mittelbar die Dauer

der Bodenbedeckung. Mitte des Jahres 2008 ist mit abschließenden Festlegungen zu rechnen. Danach erhalten die Ackerfeldblöcke eine Kennung, aus der die Zugehörigkeit zu einer Gefährdungsklasse hervorgeht. Die Antragsunterlagen für das InVeKoS-Verfahren 2009 werden diese Information enthalten, sofern entsprechende Beschlüsse gefasst werden.

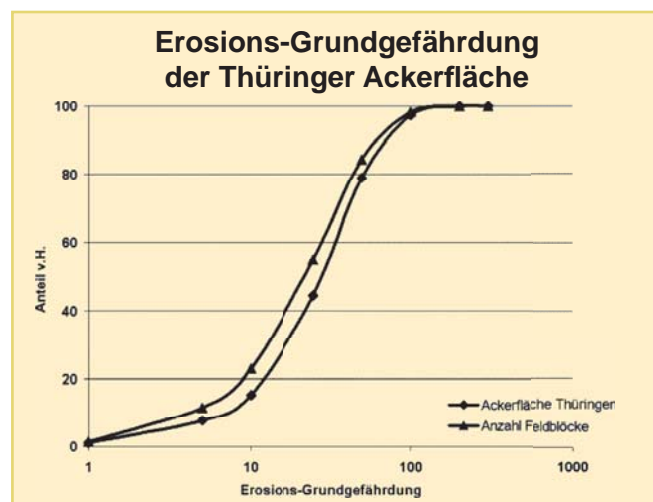


Abbildung 11

5.3.3 Maßnahmeplanung auf Feldern (Feldstücken/Schlägen)

Wenn das Gefahrenpotenzial von Nutzungseinheiten durch Maßnahmen vermindert werden soll, die zu einer Verkürzung der Fließlängen führen, reicht das in Kapitel 5.3.2 beschriebene Vorgehen nicht aus. Dort wurde unter der Annahme gearbeitet, dass an den Feldblockgrenzen erosionswirksame Hänge beginnen, bzw. enden und das Abflussgeschehen dem im Geländemodell abgebildeten Relief ohne sonstige Hindernisse folgt. Diese Annahme stimmt dann nicht mehr, wenn Teile von Feldblöcken oder die Schutzwirkung von Abflusshindernissen zu prüfen sind. Für erste Vorprüfungen zur Maßnahmeplanung auf Feldern bie-

tet sich die nach Rasterelementen (Pixel) aufgelöste Darstellung der Felblockanalysen an. Diese lassen Bereiche mit höherer und mit geringerer Gefährdung erkennen, wie Abbildung 12 zeigt.

Da die Ermittlung des L-Faktors der ABAG mit der Software „AV Erosion“ bezogen auf die Felblockgrenzen erfolgte, ergeben sich bei anderen Geländeauschnitten auch andere Konstellationen des L-Faktors. Deshalb sind die genannten Rasterdaten nicht rechen-technisch auf andere Geländeauschnitte übertragbar.

Zur Planung von Schutzmaßnahmen auf der Einzel-fläche und nicht für den gesamten Felblock (z. B. Feldstück, Schlag) ist die Software „AV Erosion“ (Arc-View und Spatial Analyst) unter Nutzung der oben beschriebenen Daten möglich. Die Software steht zum Download bereit auf der Plattform „Landwirtschaftlicher Bodenschutz unter www.tll.de/ainfo, das Digitale Geländemodell muss vom Thüringer Landesvermessungsamt käuflich erworben werden, die übrigen Daten kann man nach Rücksprache mit der Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie bzw. von der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft in der dafür erforderlichen Form erhalten. Ein mögliches Ziel

Hochauflösende Erosions-Gefährdungsanalyse für die Nutzfläche eines Landwirtschaftsbetriebes

(Beispiel, 5 x 5 m-Raster)

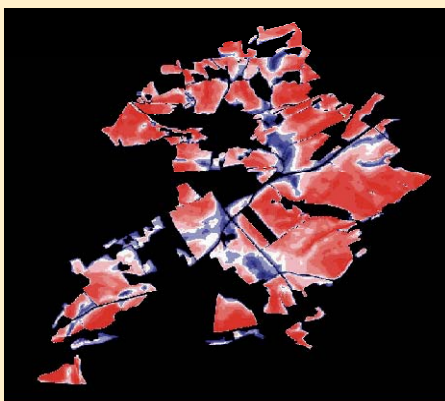


Abbildung 12

solcher Arbeiten ist z. B. die Überprüfung der Wirkung hanglängenverkürzender Schutzelemente unter Verwendung engmaschig gerasterter Informationen. Beispielsweise können folgende hanglängenverkürzende Lösungen in „AV Erosion“ abgebildet und lagemäßig optimiert werden:

- Anlage von Flurelementen, wie Hecken;
- Anlage von zeitweiligen und überfahrbaren Zwischenstrukturen wie Grün- und Blühstreifen;
- Teilung von Felblöcken sowie
- Anlage von Wegen und Gräben.

In den meisten Fällen wird es rationeller sein, gemeinsam mit geeigneten Beratern zu planen (Beratung bei der dafür zuständigen TLL nachfragen), oder selbst im Rahmen von speziellen Bildungsmaßnahmen unter Anleitung zu arbeiten.

5.3.4 Agrar-Umweltmaßnahmen zum Schutz vor Bodenabtrag

Die Förderinitiative Ländliche Entwicklung in Thüringen 2007 bis 2013 (TMLNU, 2008) beinhaltet im Programm zur Förderung von umweltgerechter Landwirtschaft, Erhaltung der Kulturlandschaft, Naturschutz und Landschaftspflege in Thüringen (KULAP 2007) drei Maßnahmen zum Erosionsschutz auf der Ackerfläche. Erstmals in diesem Programm wurden InVeKoS-kompatible Fördergebietskulissen ausgewiesen. Wegen begrenzter Fördergelder erfolgte eine Beschränkung dieser Kulissen auf Felblöcke mit hoher Erosionsgefährdung und gleichzeitiger unmittelbarer Eintragsgefahr von Phosphor und Bodenmaterial in die Oberflächengewässer. Folgende Maßnahmen sind Beiträge der Landwirtschaft zur Reduzierung diffuser Stoffeinträge in Gewässer und damit zur Erreichung der Ziele nach Europäischer Wasserrahmenrichtlinie (EG, 2000). Sie werden in den Maßnahmenprogrammen ausgewiesen:

Maßnahme W 2.1

Förderung des Anbaus von Zwischenfrüchten oder Untersaaten im Ackerbau. Aussaat- und Umbruchtermine sind an den Erfordernissen des Gewässerschutzes ausgerichtet. Erosions-Schutzwirkung durch möglichst lange Bodenbedeckung sowie Minderung der Stickstoffaustragsrisikos durch Nährstoffbindung.

Fördergebietskulisse:

Im Stickstoff-Überschussgebiet auf der Ackerfläche, im Phosphor-Überschussgebiet auf stark erosionsgefährdeten Feldblöcken an Gewässern (Abb. 13 und 14).

Beihilfeshöhe:

70 €/ha Zwischenfrucht-/Untersaatfläche

Maßnahme W 2.2

Keine wendende Bodenbearbeitung, sowie Mulch- oder Direktsaat oder Mulchpflanzverfahren.

Fördergebietskulisse:

Im Phosphor-Überschussgebiet auf stark erosionsgefährdeten Feldblöcken an Gewässern (Abb. 14).

Beihilfeshöhe:

54 €/ha Mulch- oder Direktsaat- oder Mulchpflanzverfahren

Maßnahme L 3.3

Förderung der Anlage von Uferrandstreifen mit 3 bis 24 m Breite (gemessen ab Feldblockgrenze). Vorgeschriebene Blühmischungen in einmaliger oder jährlicher Ansaat.

Fördergebietskulisse:

Im Phosphor-Überschussgebiet auf stark erosionsgefährdeten Feldblöcken an Gewässern (Abb. 14).

Mit diesen Förderangeboten wird deutlich, dass sich die Landwirte auf den Aktionsfeldern Bodenschutz und Gewässerschutz in Thüringen eines methodisch einheitlichen Instrumentariums zur Vorsorge bedienen.

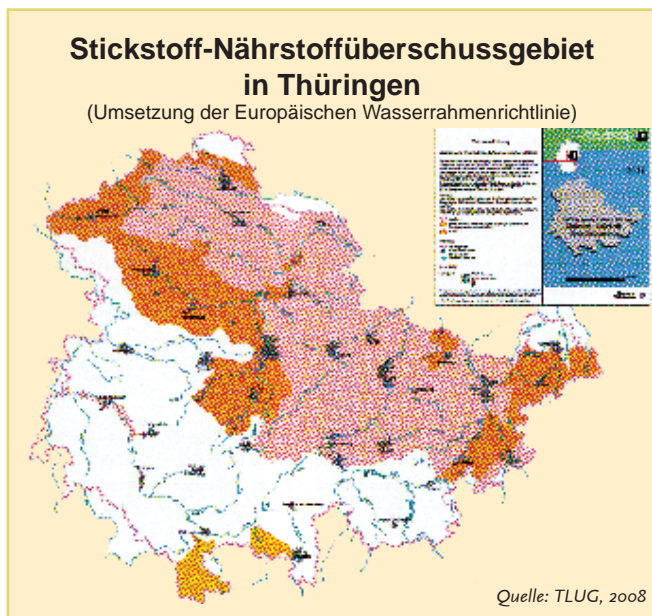


Abbildung 13

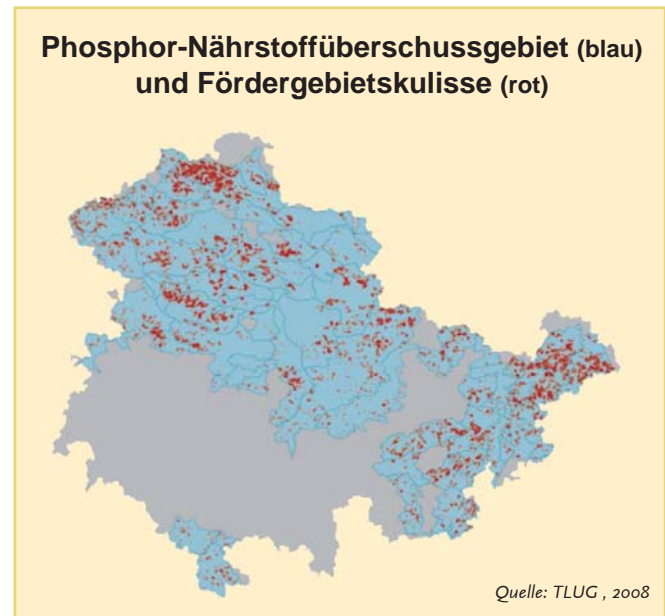


Abbildung 14

6 Wie könnte sich das Gefahrenpotenzial bei Klimaveränderungen entwickeln ?

Die TLL prüft in einem Projekt „Landwirtschaft und Klimawandel“ die möglichen Veränderungen maßgeblicher Standorteigenschaften, um Hilfestellungen für erforderliche Anpassungsreaktionen der Landwirte geben zu können. Diese Arbeiten stehen noch am Anfang. Hinsichtlich der Gefährdung des Bodens durch Erosion und Schadverdichtung ist zu prüfen, wie sich die Häufigkeit ungünstiger Standortzustände entwickeln wird. Für die Klimadaten werden Regionalisierungen vorliegender Klimaszenarien herangezogen und im Zusammenwirken mit Bodenmerkmalen beurteilt. Folgende Klimaentwicklungen könnten, wenn sie denn eintreten, eine Verschärfung der Gefährdung Thüringer Ackerböden durch Erosion und Verdichtung mit sich bringen:

Erosion:

- Häufigere Starkniederschläge in Zeiten geringer Bodenbedeckung
- Anbau von geringer den Boden bedeckenden Kulturen wegen klimatisch bedingt wachsender Vorzüglichkeit derselben

Verdichtung:

- Längere Zeitspannen hoher Bodenfeuchte in Frühjahr und Herbst
- Geringere Frostwirkung im Winter (weniger Gefüge-Regeneration)

Ob solche Veränderungen anzunehmen sind, muss erst noch untersucht werden. Eine Zunahme von Starkregenereignissen allerdings scheint sich abzuzeichnen (Abb. 15). Die TLL hat sich vorgenommen, die regionale Differenzierung von Änderungen der Standorteigenschaften wie der Trockentage in der Vegetationsperiode, der Sickerwassermengen, des technologischen Bodenzustandes (Befahr- und Bearbeitbarkeit) unter

dem Einfluss von Klimawandel abzuschätzen und als Entscheidungshilfe für das Management im Landwirtschaftsbetrieb in handhabbarer Form bereitzustellen. Dazu arbeiten die Fachleute der Landesanstalten für Landwirtschaft sowie der für Umwelt und Geologie eng zusammen.

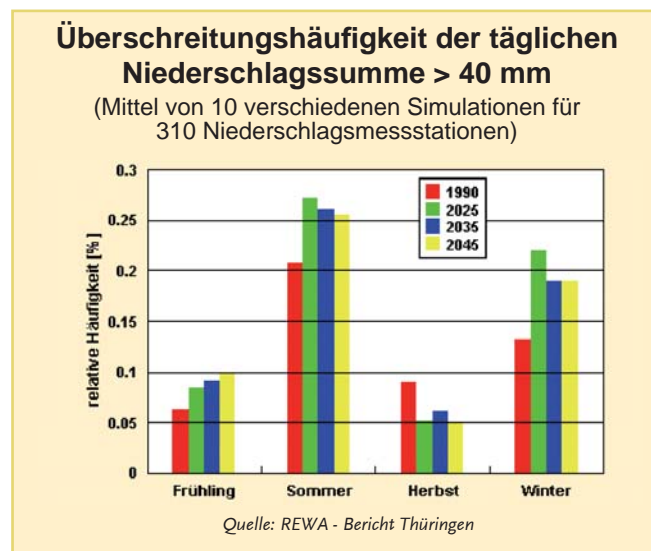


Abbildung 15

7 Bodendauerbeobachtung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen

Die Bodendauerbeobachtung ist ein Teil des Umweltmonitorings, das die Bundesländer auf der Grundlage einer gemeinsamen Vereinbarung nach abgestimmten Grundsätzen durchführen. Die ersten Dauerbeobachtungsflächen (BDF) wurden in den alten Bundesländern bereits Ende der 80er Jahre eingerichtet. Mit dem Bundes-Bodenschutzgesetz wurde 1998 auch für die Bodendauerbeobachtung eine verbindliche Rechtsgrundlage geschaffen.

Das Bodenmonitoring dient folgenden Zielen:

- Aktuelle Zustandsbeschreibung,
- Überwachung von längerfristigen Veränderungen und
- Ableitung von Entwicklungsprognosen.

Nachfolgende Anforderungen haben die Messprogramme zu erfüllen:

- Frühwarnsystem,
- Erfolgskontrolle von umweltpolitischen Maßnahmen,
- Beweissicherung,
- Umfeld-Überwachung,
- Referenzwertbeschaffung für Belastungen (Hintergrundwerte, Belastungskataster),
- Versuchsplattform für die Forschung und
- Referenzstandorte für die bodenkundliche Standortaufnahme.

Die Programme auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen sollen den Erhalt der Bodenfunktionen unter dem Einfluss praxisüblicher Landwirtschaft überwachen. Gleichzeitig soll damit die nutzungsbedingte Beanspruchung der Schutzgüter Wasser und Atmosphäre kontrolliert werden. Die Landwirtschaft muss den anspruchsvollen Zielen und Pflichten des Boden-

schutzrechtes in Erfüllung des umfassenden Nachhaltigkeitsgrundsatzes dauerhaft Rechnung tragen. Die Bodendauerbeobachtung soll dazu eine Hilfe sein.

Das gesamte Bodenmonitoring in Thüringen umfasst neben landwirtschaftlicher Nutzung auch Forststandorte und Standorte mit Sonderbelastungen. Nach den Regelungen im Thüringer Bodenschutzgesetz hat die Landesanstalt für Umwelt und Geologie eine Koordinierungsfunktion für das Gesamtprogramm. Sie arbeitet mit der Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei (TLWJF) sowie mit der Landesanstalt für Landwirtschaft im Rahmen des Bodenmonitorings eng zusammen. Insgesamt sind folgende BDF in Thüringen eingerichtet:

- 14 Intensivmessflächen unter landwirtschaftlicher Nutzung (TLL),
- drei Messflächen unter landwirtschaftlicher Nutzung mit vereinfachtem Messregime (TLUG),
- neun Messflächen unter forstlicher Nutzung (TLUG in Zusammenarbeit mit TLWJF) und
- neun Messflächen auf Sonderstandorten (TLUG).

Die 14 intensiv beprobten landwirtschaftlichen BDF der TLL sind so über die landwirtschaftliche Nutzfläche verteilt, dass die wesentlichen Unterschiede in den landwirtschaftsrelevanten Bodenmerkmalen berücksichtigt sind und sowohl Acker- als auch Grünlandnutzung angemessen vertreten sind (Abb. 16).

Die Spezifik der landwirtschaftlichen Nutzung erfordert Messprogramme mit Wiederholungen in kurzen Zeitabständen. Dem Produktionszyklus folgend, sind pflanzenertragsbezogene Parameter jährlich, nährstoffgehaltsbezogene Parameter sogar mehrfach im Jahr zu erheben. Bodenbiologische und bodenphysikalische Untersuchungen erfolgen alle zwei Jahre. Zusätzlich zu den Messungen auf der Beobachtungsfläche werden Angaben zur betriebsüblichen Bewirtschaftung auf dem gesamten Feldstück dokumentiert, um die Nutzungseinflüsse auf die Bodenfunktionen



Abbildung 16

bewerten zu können. Durch dieses aufwändige Mess- und Beobachtungsregime unterscheiden sich die landwirtschaftlichen Intensiv-BDF von anderen, auf denen Wiederholungsuntersuchungen des Bodens im mehrjährigen Abstand ausreichen.

Wie sieht eine Bodendauerbeobachtungsfläche aus?

Damit die Ergebnisse einer Zeitreihe von wiederholten Untersuchungen möglichst wenig von der räumlichen Variabilität beeinflusst wird, werden quadratische Flächen von 50 m Seitenlänge auf Feldern von Landwirtschaftsbetrieben ausgewählt. Diese Flächen werden mittels DGPS genau eingemessen, so dass die Messprogramme über lange Jahre auf der gleichen Fläche stattfinden können. Eine innere Kernfläche von 30 × 30 m ist den Programmen mit zerstörungsfreier Probenahme vorbehalten, während mit Aufgrabungen verbundene Untersuchungen auf der verbleibenden Randfläche stattfinden.



Messplatz zur Erfassung des Regenwurmbesatzes

Auf den ersten Flächen begannen die Untersuchungen bereits 1992. In einer zusammenfassenden Auswertung der landwirtschaftlichen Bodendauerbeobachtung (GULLICH et al., 2006) wurden folgende zusammengefasste Hauptergebnisse gefunden:

- Die Böden wurden nicht mit Schwermetallen und organischen Schadstoffen kontaminiert.
- Der Besatz mit Regenwürmern blieb insgesamt ausreichend.
- Die Entwicklung des Bodengefüges auf den BDF bestätigte den Thüringer Beratungsansatz zur Vorsorge gegen Schadverdichtung.
- Unterversorgung der Böden mit Phosphor und z. T. auch Kalium tritt verbreitet auf und begrenzt die Stickstoffausnutzung.
- Unterschiedliches Speicher- und Regulationsvermögen der Böden sollte beim Düngungsmanagement noch stärker als bisher berücksichtigt werden.

Der Auswertungsbericht mit den Angaben zu den erhobenen Parametern und Messmethoden steht im

Internet unter www.tll.de/ainfo zur Verfügung. Bisher sind etwa 40.000 Datensätze mit insgesamt 700.000 Einzeldaten erfasst und durch die TLL in einer ACCESS-basierten Datenbank abgelegt. Vorbereitete Auswerteroutinen erleichtern aktuelle Schnell-Abfragen. Die Nutzung dieses Datenbestandes kann unter Einhaltung der datenschutzrechtlichen Bestimmungen bei Nachweis eines berechtigten Interesses erfolgen. Die Weitergabe von Daten zum Nutzungsregime (Aufwandmengen, Ausbringezeitpunkte u. ä.) sowie eine Bekanntgabe der genauen geografischen Lage der Fläche ist jedoch nur mit Zustimmung des jeweiligen Landwirtschaftsunternehmens möglich.

Die Daten der Bodendauerbeobachtung sind eine wichtige Informationsquelle, wenn die Notwendigkeit tiefgründiger Untersuchungen komplexer Fragestellungen, wie z. B. zur Landnutzung unter Bedingungen des Klimawandels oder die Stoffaustragsgefahr unterschiedlicher Standorte, beurteilt werden soll. Die Bodendauerbeobachtung hat den Vorzug langer Messreihen zu sehr vielen Parametern am gleichen Ort. Damit sind auch wechselseitige Abhängigkeiten von Bodenfunktionen zu analysieren. BDF sollen und können aber nicht landwirtschaftliche Monitoringsysteme ersetzen, die zur Ableitung spezieller Beratungsempfehlungen mit höherer räumlicher Messnetzdichte (... und damit höherer Flächenrepräsentanz) betrieben werden, etwa das Thüringer Netz der Nährstoff-Dauertestflächen.

8 Schutz des Bodens vor Schadstoffeinträgen

Grundsätzliches: Die Rechtsnormen des stofflichen Bodenschutzes sind im Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) in Verbindung mit der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) enthalten. In Thüringen gilt darüber hinaus das Thüringer Bodenschutzgesetz (ThürBodSchG) vom 16. Dezember 2003.

Als Schadstoffe werden Stoffe und Zubereitungen eingestuft, die aufgrund ihrer Gesundheitsschädlichkeit, ihrer Langlebigkeit oder Bioverfügbarkeit im Boden oder aufgrund anderer Eigenschaften und ihrer Konzentration geeignet sind, den Boden in seinen Funktionen zu schädigen oder sonstige Gefahren hervorzurufen (§ 2 BBodSchV). In der BBodSchV ist der Umgang mit anorganischen Schadstoffen (Schwer- und Halbmetalle) und organischen Schadstoffen (z. B. Polychlorierte Biphenyle, Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe) geregelt.

Nachfolgende Darlegungen konzentrieren sich auf die Schwermetalle. Aus ökotoxikologischer Sicht haben

erhöhte Gehalte an Cadmium (Cd), Blei (Pb), Quecksilber (Hg), Thallium (Tl) und Arsen (As) aufgrund schädlicher Wirkungen in der Nahrungskette Boden-Pflanze-Tier/Mensch ein besonderes Gefährdungspotenzial. Andere Schwermetalle, insbesondere Kupfer (Cu), Zink (Zn), Mangan (Mn) und Kobalt (Co), wirken in höheren Konzentrationen zwar ebenfalls potenziell toxisch, sind aber in geringen Konzentrationen für die Pflanzen lebensnotwendig.

Generell gilt aber für die Schwermetalle, dass sie natürlich bedingt (Gesteinsverwitterung) in unterschiedlichem Maße im Boden vorhanden sind. Erst bei Überschreitung der Vorsorgewerte (Tab. 3) nach BBodSchV besteht unter Berücksichtigung von geogenen oder großflächig siedlungsbedingten Schadstoffgehalten die Besorgnis von schädlichen Bodenveränderungen. Solche Veränderungen sind Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen, die zu Gefahren, erheblichen Nachteilen oder Belästigungen für den einzelnen oder die Allgemeinheit führen können.

Schwermetallanreicherungen im Boden sind dauerhaft, weil die Auswaschung mit dem Sickerwasser in der Regel gering ist und auch mikrobiologische Prozesse keine Rolle spielen. Großflächige Schwermetallanreicherungen können nach derzeitigem Kenntnisstand nicht mit vertretbarem Aufwand beseitigt werden. Deshalb ist der Schutz des Bodens vor dem Entstehen von Schwermetallbelastungen die Pflicht aller Bodeneigentümer und -nutzer.

Erhaltung des unbedenklichen Schwermetallstatus landwirtschaftlich genutzter Böden. Die Böden in Thüringen haben überwiegend niedrige Schwermetallgehalte (Abb. 18). Das bestätigt sich immer wieder bei Bodenuntersuchungen, die im Vollzug der Klärschlammverordnung (AbfKlärV, 1992) durchgeführt werden. Die Untersuchungsergebnisse werden nach den Grenzwerten der AbfKlärV beurteilt. Die Grenzwerte haben im Wesentlichen die gleiche Größenordnung wie die Vorsorgewerte der Bodenart Ton. Bei Überschreitung darf kein Klärschlamm auf die entsprechenden Flächen ausgebracht werden. Eine äquivalente diesbezügliche

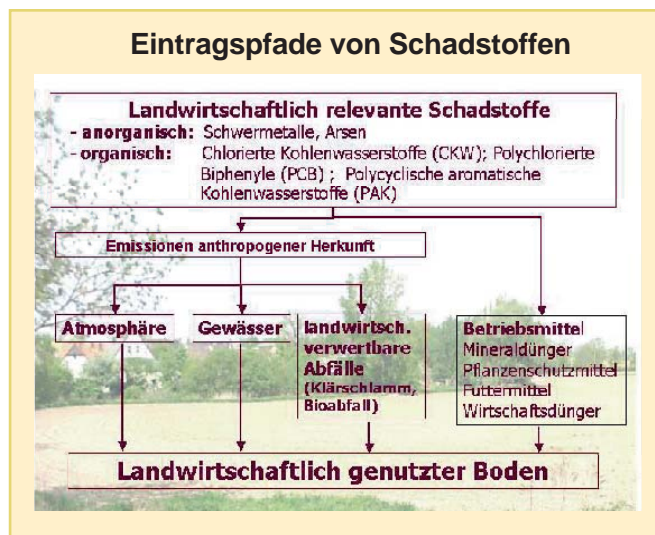


Abbildung 17

Tabelle 3: Vorsorgewerte der BBodSchV

Bodenart	Cadmium	Blei	Chrom	Kupfer	Quecksilber	Nickel	Zink
Ton	1,5	100	100	60	1,0	70	200
Lehm/Schluff	1	70	60	40	0,5	50	150
Sand	0,4	40	30	20	0,1	15	60

Regelung ist auch in der Bioabfallverordnung (BioAbfV) enthalten. Deren Grenzwerte sind mit den Vorsorgewerten der BBodSchV identisch.

Bei ihrer Überschreitung wird durch Untersagung der Aufbringung der entsprechenden landwirtschaftlich verwertbaren Abfälle (Klärschlamm, Kompost) ein Schwermetalleintrag verhindert, um den unbedenklichen Status zu erhalten.

Die im Vollzug der AbfKlärV durchgeführten Bodenuntersuchungen (TLL, 2008) an 8.564 Ackerflächen zeigen bei den ökotoxikologisch problematischen Schwermetallen Cd, Pb und Hg, dass mehr als 95 % der Flächen Gehalte von weniger als die Hälfte der Grenzwerte (Vorsorgewerte) aufweisen (Abb. 18). Bei Cu, Zn und Cr sind das mehr als 85 % der Flächen. Abweichend davon hat ein größerer Flächenanteil Ni-Ge-

halte in der Größenordnung des Grenzwerts und darüber. Ursache dafür sind die gesteinsbedingt höheren Gehalte der Muschelkalk- und Keuperböden in Thüringen. In den geogenen Bindungsformen ist Ni wenig pflanzenverfügbar und ökotoxisch nicht bedenklich.

Schwermetalleinträge durch Immissionen

Die landwirtschaftlichen Nutzflächen unterliegen einem Schwermetalleintrag durch atmosphärische Niederschläge. Diese Einträge werden durch bulk-Messungen in ländlichen Räumen ermittelt, wobei die nasse Deposition und teilweise die trockene Deposition erfasst wird. Derzeitig kann mit folgenden Einträgen kalkuliert werden (LfL Bayern, 2005):

Schwermetall	Deposition (g/ha u. Jahr)
Cadmium	0,2
Chrom	2,4
Kupfer	18,0
Blei	7,0
Nickel	2,5
Zink	110,0

Nach bayerischen Messungen (LfL Bayern, 2005) sind die atmosphärisch bedingten Depositionen in den letzten 20 Jahren insbesondere bei Pb, Cd, Cr und Ni deutlich zurückgegangen. Ein besonders starker Rückgang der jährlichen Pb-Einträge (1985: 70 g/ha u. Jahr; 2004: 7 g/ha u. Jahr) ist auf den bayerischen Bodendauerbeobachtungsflächen der als Folge des Benzin-Blei-Gesetzes (1988) festgestellt worden. Aufgrund des grenzüberschreitenden Transports von Luftverschmutzungen sind die Depositionen nur begrenzt vermeidbar.

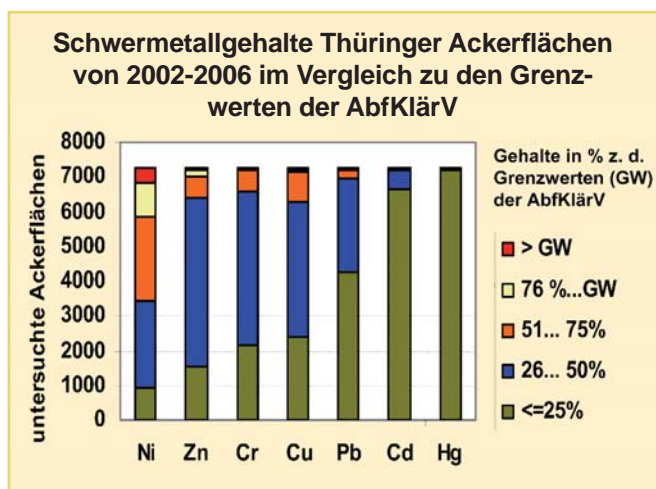


Abbildung 18

Schwermetalleinträge durch organische Düngestoffe

Zu den organischen Düngestoffen zählen vor allem die Wirtschaftsdünger aber auch landwirtschaftlich verwertbare Abfälle (Klärschlamm, Kompost). Entsprechend der Herkunft haben diese Düngestoffe unterschiedliche Schwermetallgehalte. Bei den Wirtschaftsdüngern ist das einerseits darauf zurückzuführen, dass die natürlicherweise in den pflanzlichen Futtermitteln enthaltenen Schwermetallmengen im tierischen Organismus nur in geringem Maße resorbiert und deshalb wieder ausgeschieden werden. Andererseits kommt es bei Cu und Zn zu teilweise erheblichen Anreicherungen im Kot der Nutztiere, weil diese Elemente mit ergotropischen und therapeutischen Anwendungszielen in der Tierhaltung eingesetzt werden.

In Tabelle 4 sind die jährlichen mittleren Schwermetallfrachten durch die organischen Düngestoffe enthalten, die mit praxisüblichen Aufwandmengen (auf ein Jahr bezogen) eingetragen werden.

Bei den Wirtschaftsdüngern sind das, bezogen auf die Frischmasse, 35 t Gülle/ha und Jahr und bei Stallmist 350 dt/ha in drei Jahren. Bei Klärschlamm entspricht das den zulässigen 5 t Trockenmasse/ha in drei Jahren nach AbklärV und bei Kompost 30 t Trockenmasse/ha in drei Jahren.

Der Vergleich zeigt, dass die Klärschlämme und Komposte 5- bis 20-fach höhere Schwermetalleinträge bringen als die Wirtschaftsdünger. Die höchsten Ein-

träge kommen über den Kompost aufgrund höherer Schwermetallgehalte als die Wirtschaftsdünger und der hohen Trockenmasse-Aufbringungsmenge. Der Klärschlamm hat in der Regel die höchsten Schwermetallgehalte, die Einträge werden aber durch die Aufwandmengenbegrenzung relativ niedrig gehalten. Abweichend hiervon sind die Frachten bei Cu und Zn. Hier hat der Schweinemist die deutlich höchsten Einträge, gefolgt von Kompost. Die niedrigsten kommen über die Wirtschaftsdünger aus der Rinderhaltung.

Schwermetalleinträge durch Mineraldünger

Die Anwendung von Mineraldüngern zur ausgewogenen Nährstoffversorgung der Pflanzen ist unverzichtbar für die Erzielung hoher Erträge. Damit sind ebenfalls Schwermetalleinträge verbunden. Für die Kalkulation wurden die praxisüblichen Nährstoffmengen zugrunde gelegt, die zur Deckung des jährlichen Pflanzenbedarfs erforderlich sind (Tab. 5).

Die Schwermetalleinträge sind bei den mineralischen N- und K-Düngern ohne Anteil geogener Rohstoffe (Phosphat, Kalk) deutlich niedriger als bei den organischen Düngern. Die phosphathaltigen Dünger bringen relativ hohe Cd-Einträge in der Größenordnung wie Klärschlamm und Kompost sowie Cr-Einträge in der Größenordnung der Wirtschaftsdünger. Die Kalkdünger haben geogen bedingt hohe Einträge an Cd, Cr, Pb und Zn. Hier wirkt sich besonders die in der Regel erforderliche hohe Aufwandmenge zur Erreichung des optimalen pH-Bereichs aus.

Tabelle 4: Mittlere Schwermetalleinträge organischer Düngemittel

Organische Dünger	t TM/ha × a	g/ha × a						
		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
Rindermist ¹⁾	2,9	0,8	37,4	237,8	15,1	16,8	551,0	0,1
Schweinemist ¹⁾	2,9	1,0	29,9	1.305,0	27,6	14,8	3.097,2	0,1
Rindergülle ¹⁾	2,8	0,8	20,4	372	16,5	21,6	756	0,17
Schweinegülle ¹⁾	1,4	0,6	13,2	433	14,4	8,7	1201	0,03
AbklärV ²⁾	1,7	2,0	64,6	352	44,2	90,1	1304	1,4
Kompost ³⁾	10	4,7	253,0	577	163,0	464,0	2040	1,6

Quellen: 1) TLL, 2003 2) TLL, 2008 3) UBA/BGK, 2003

Tabelle 5: Mittlere jährliche Schwermetalleinträge durch Mineraldünger

Mineraldünger	Nährstoffgehalte	min. Nährstoff-einsatz	g/ha × Jahr ¹⁾						
			Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
Kalkammonsalpeter	27 % N	150 kg N/ha	0,03	0,49	0,82	0,02	11,8	22,7	0,01
Harnstoff	46 % N	150 kg N/ha	0,003	0,20	0,27	0,09	0,11	1,20	0,003
Ammonsulfatsalpeter	21 % N	150 kg N/ha	0,007	0,71	1,78	0,28	0,05	3,3	0,007
NPK-Dünger (16+16+16)	16 % N/7 % P/13 % K	150 kg N/ha	2,0	40,7	25,0	21,7	2,1	77,6	0,02
NP-Dünger (18+46)	18 % N/20% P	25 kg P/ha	1,2	18,0	3,0	2,4	0,5	23,9	0,0
Triple-Superphosphat	20 % P	25 kg P/ha	3,5	28,6	1,9	2,6	1,8	44,3	0,0
Kali-Dünger	40 % K	70 kg K/ha	0,002	0,10	0,13	0,11	0,05	0,40	0,002
Kohlens. Kalk-Dünger	50 % CaO	30 dt CaO/ha	3,1	59,0	32,5	21,7	228	551	0,4

1) Quelle: LFL Sachsen, 2008

Schwermetallausträge durch Auswaschung und Pflanzenentzug

Die Austräge an Schwermetallen aus landwirtschaftlichen Nutzflächen resultieren aus der Auswaschung durch Sickerwasser und der Abfuhr vom Feld durch die Ernteprodukte (Tab. 6). Die höchste Schwermetallabfuhr durch die Pflanzen erfolgt bei Cu und Zn. Das bestätigt, dass die Pflanzen diese Schwermetalle als Mikronährstoffe benötigen. Am niedrigsten ist der Austrag durch Auswaschung bei Cd, Pb und Hg.

Vergleich der Schwermetallein- und -austräge am Beispiel von Cadmium

Cadmium ist das Schwermetall mit dem höchsten ökotoxikologischen Gefährdungspotenzial. Deshalb

ist von Bedeutung, ob durch die praxisübliche Bewirtschaftung ein Überhang der Einträge erfolgt.

Der Vergleich in Abbildung 19 zeigt, dass nur 1 g Cd/ha und Jahr durch Pflanzenentzug und Sickerwasser ausgetragen wird. Das entspricht etwa dem Eintrag durch die Wirtschaftsdünger. Bei Hinzurechnung der unvermeidbaren Immission aus atmosphärischen Niederschlägen von 0,2 g/ha und Jahr ist der Austrag bereits kompensiert.

Keine wesentliche Auswirkung hat die Anwendung der Stickstoff- und Kalidünger ohne Phosphatanteile. Mit deutlichem Überhang der Einträge ist jedoch bei Anwendung der P- und Kalkdünger zu rechnen. Die entsprechende Düngung führt demzufolge zu einer Cd-Anreicherung im Boden. Eine analoge Wirkung hat die Ausbringung von Klärschlamm und insbesondere Kompost.

Tabelle 6: Mittlere Schwermetallausträge auf landwirtschaftlichen Nutzflächen

Jährl. Austrag durch	Schwermetallaustrag in g/ha × Jahr						
	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg
Sickerwasser (200 mm)	0,28	9,2	8	17,8	0,56	38	0,28
Ernteprodukte	0,67	5,3	33,9	10,3	5,9	173	-
Gesamt	0,95	14,5	41,9	28,1	6,5	211	0,28

Quelle: UBA, 2001

Cadmium-Ein- und -Austräge bei praxisüblicher Bewirtschaftung

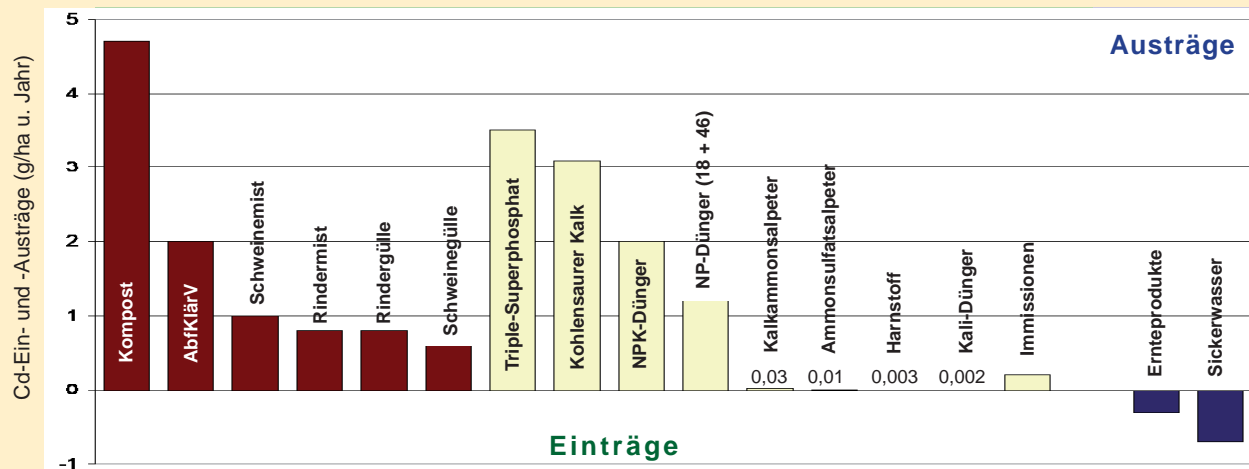


Abbildung 19

Fazit

Die Schwermetallbilanz der Böden wird durch Ein- und Austräge bestimmt. Die jährlichen Schwermetallausträge durch Pflanzenentzug und Auswaschung werden zu 9 % (Ni) bis 108 % (Pb) bereits durch die nahezu unvermeidbaren Schwermetalldepositionen aus den atmosphärischen Niederschlägen kompensiert. Deshalb sollte der Landwirt die Schwermetalleinträge durch seine Bewirtschaftungsmaßnahmen beachten. Durch den Einsatz von Wirtschafts- und anderen Düngemitteln werden in unterschiedlichem Maße Schwermetalle eingetragen. Die geringsten Einträge haben mineralische N- und K-Dünger ohne Anteil geogener Rohstoffe (Phosphat, Kalk). Die höchsten Einträge erbringen die phosphathaltigen und Kalk-Dünger sowie Klärschlamm und Komposte. Zu beachten sind die hohen Cu- und Zn-Gehalte, insbesondere in den Wirtschaftsdüngern aus der Schweinehaltung.

Im Düngemittelrecht wird durch die Vorgabe von Kennzeichnungs- und Grenzwerten für Düngemittel eine Begrenzung der Schwermetallfrachten vorgegeben, um schwermetallreiche Rohstoffherkünfte zukünftig

auszuschließen. Zur Einstellung ausreichender Nährstoffgehalte im Boden und des optimalen pH-Bereichs durch Düngung gibt es für den Landwirt keine Alternative. Bei der Auswahl der Mineraldünger, insbesondere der kohlensuren Kalke, sollte der Landwirt jedoch auf niedrige Schwermetallgehalte achten. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft hat die Verwertung von Wirtschaftsdüngern unbedingten Vorrang vor dem Einsatz an Klärschlamm und Kompost. Dabei sollte die häufig wiederholte Aufbringung der Wirtschaftsdünger auf hofnahe Flächen vermieden werden. Wenn Klärschlämme oder Komposte eingesetzt werden, sollte der Landwirt nur schadstoffarme Chargen abnehmen.

Die teilweise hohen Cu- und Zn-Einträge durch Wirtschaftsdünger können durch Reduzierung der Cu- und Zn-Supplementierung in Futtermitteln auf der Basis optimierter ergotrophischer und therapeutischer Bedarfsnormen sowie entsprechenden fütterrechtlichen Regelungen reduziert werden. Es besteht aber diesbezüglich noch erheblicher Forschungsbedarf (SCHULTHEISS u. a., 2002).

9 Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit durch optimale Bodenreaktion und Versorgung mit Grundnährstoffen

Kalk- und Nährstoffversorgung des Bodens sind wichtige Merkmale der Bodenfruchtbarkeit. Kalkmangel bewirkt eine langfristige Schädigung der Bodenfunktion, wie sie im Bodenschutzgesetz als zu schützende Produktionsfunktion benannt ist. Mangelhafte Kalk- und Nährstoffversorgung mindern das Ertragspotenzial des Bodens erheblich. Natürliche Prozesse, Säureinträge aus der Atmosphäre, und unter gewissen Umständen auch die Bewirtschaftung, führen zur Versauerung des Bodens. Dieser Entwicklung muss durch bedarfsgerechte Kalkung entgegen gewirkt werden. Der Kalkbedarf ergibt sich aus dem durch Bodenuntersuchung festgestellten pH-Wert, dem Humusgehalt und der Bodenart. Ziel der Kalkzufuhr ist das Einstellen bzw. Erhalten eines bodenartspezifisch optimalen pH-Wertbereiches, der als pH-Klasse C definiert ist. Dieses Konzept fördert neben der Nährstoffdynamik und -verfügbarkeit auch biologische Aktivität, Bodengefüge, Aggregatstabilität und letztlich das Infiltrationsvermögen für Niederschläge.

Nach den aktuellen Ergebnissen der Bodenuntersuchungen sind in Thüringen 30 % des Acker- und 31 % des Grünlandes versauert und bedürfen einer Kalkung (Tab. 7). Häufig verfügen die kalkbedürftigen Böden über eine unzureichende Mg-Versorgung infolge Mg-Auswaschung. Das betrifft 15 % des Acker- und 18 % des Grünlandes. Bei gleichzeitigem Kalk- und Magnesiumdüngbedarf verbessert der Einsatz magnesiumhaltiger Düngekalke die Mg-Versorgung des Bodens langfristig.

Tabelle 7: Kalk- und Mg-Versorgung Thüringer Acker- und Grünlandböden im Zeitraum 2004 bis 2006

Kalk- bzw. Nährstoffversorgung	Flächenanteile (%) in den pH ¹⁾ - und Gehaltsklassen ²⁾				
	A	B	C	D	E
Ackerland					
pH	4	26	42	24	4
Mg	1	14	23	20	42
Grünland					
pH	9	22	22	19	28
Mg	3	15	20	15	47

1) Definition der pH-Klassen - Kalkversorgung:

A = sehr niedrig, B = niedrig, C = anzustrebend (optimal),
D = hoch, E = sehr hoch

2) Definition der Gehaltsklassen für Mg:

A = sehr niedriger, B = niedriger, C = mittlerer, D = hoher,
E = sehr hoher Gehalt

Die Versauerung der Böden schädigt die Pflanzenwurzeln infolge der Freisetzung toxischer Al^{3+} - und Mn^{2+} -Ionen, fördert die Auswaschung der Kationen Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} und vermindert die Verfügbarkeit insbesondere von Phosphor, Magnesium und Molybdän. Die genannten Faktoren hemmen das Pflanzenwachstum erheblich.

Abbildung 20 zeigt als Beispiel die Wirkung langjährig unterlassener Kalkung auf einem leichten Buntsandsteinverwitterungsboden. Auf Teilflächen dieses Schlages liegen Boden-pH-Werte von 3,8 bis 4,2 und verursachen eine sehr starke Schädigung der Sommergerste bis zum völligen Ertragsausfall. Mit ansteigendem pH-Wert nimmt der Kornertrag zu, und die Sommerbraugerste erreicht bei optimaler Kalkversorgung ein für den leichten Standort hohes Ertragsniveau.

Die N-Düngung, die zur Saat in optimaler Höhe ausgebracht wurde, konnte von den Pflanzen nicht bzw. nur unvollständig aufgenommen und zur Ertragsbildung genutzt werden. Infolge dessen liegen auf den stark versauerten Flächen erhöhte N_{min} -Gehalte nach der Ernte vor. Das erhöht die Gefahr von Nitratverlagerungen in tiefere Bodenschichten.

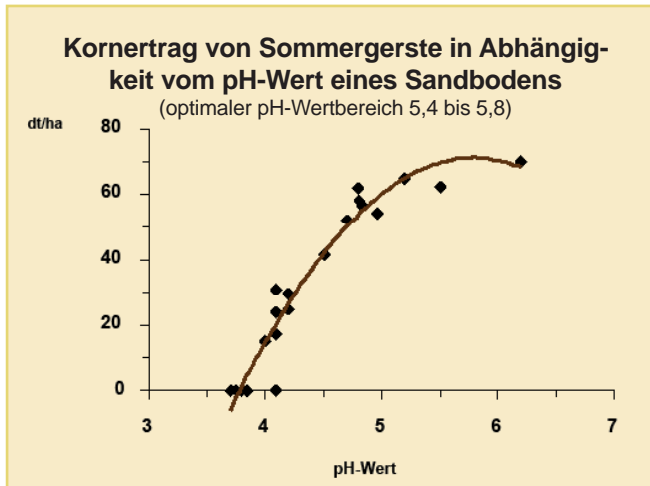


Abbildung 20

Nach 1990 haben die Landwirte in Thüringen aus Kostengründen nicht nur die Kalkung, sondern auch die mineralische P- und K-Düngung stark reduziert. Parallel dazu hat sich ein Strukturwandel zu einer verstärkten Marktfruchtproduktion, aber geringeren Tierbeständen vollzogen. Daraus resultieren insbesondere mit den Marktfrüchten ein verstärkter P-Export aus den Betrieben und ein geringerer P-Rückfluss aus der Tierhaltung. Gleichzeitig hat die P-Abfuhr vom Feld infolge gestiegener Ernteerträge deutlich zugenommen. Im Mittel der landwirtschaftlich genutzten Fläche Thüringens liegen stark negative P- und K-Bilanzsalden vor (Abb. 21).

Die Auswertung der Nährstoffvergleiche Thüringer Landwirtschaftsbetriebe belegt, dass der geringe Einsatz mineralischer P-Dünger häufig ohne Berücksichtigung der P-Gehaltsklasse des Bodens erfolgt. Im Interesse eines effizienten P-Düngereinsatzes ist die P-Zufuhr auf Böden mit sehr niedriger, niedriger und auch mittlerer P-Versorgung (Gehaltsklassen A, B, C) sinnvoll, während bei hohem oder sehr hohem P-Gehalt (Gehaltsklassen D und E) mittelfristig bis zur nächsten Bodenuntersuchung auf eine P-Düngung verzichtet werden kann. Der Abbau zu hoher P-Vorräte in den Ackerböden trägt letztlich auch



Auswirkung langjähriger unterlassener Kalkung eines Sandbodens auf Sommergerste

zur Verminderung der P-Einträge in Gewässer über die Bodenerosion bei.

Infolge der stark reduzierten P-Düngung hat der Flächenumfang der besonders P-düngebedürftigen Gehaltsklassen A und B in den letzten Jahren dramatisch zugenommen (Tab. 8).

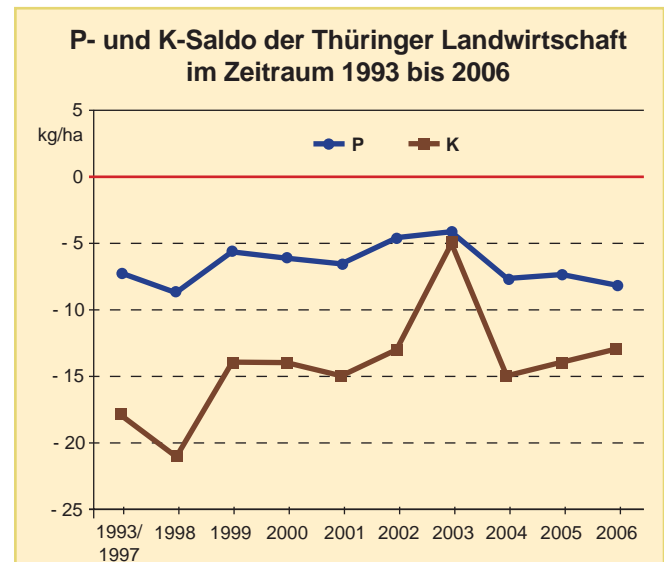


Abbildung 21

Tabelle 8: Phosphor- und Kaliumversorgung Thüringer Acker- und Grünlandböden im Zeitraum 2004 bis 2006

Nährstoff	Flächenanteile (%) in den Gehaltsklassen ¹⁾				
	A	B	C	D	E
Ackerland					
P	13	30	26	16	15
K	2	16	30	31	21
Grünland					
P	32	27	17	11	13
K	12	26	23	19	20

¹⁾ Definition der Gehaltsklassen für P, K und Mg:

A = sehr niedriger, B = niedriger, C = mittlerer, D = hoher, E = sehr hoher Gehalt

Gegenwärtig sind 43 % des Acker- und 59 % des Grünlandes sehr niedrig und niedrig mit P versorgt. Bei K beträgt der unterversorgte Flächenanteil 18 % des Acker- und 38 % des Grünlandes. Diese Standorte benötigen eine bedarfsgerechte P- bzw. K-Düngung. Diese muss größer sein, als die Nährstoffabfuhr vom Feld.

Die Auswirkung langjährig unterlassener P-Düngung auf den Ertrag verdeutlicht das Ergebnis des statischen P-Düngungsversuches in Dornburg (Abb. 22).

Der P-Gehalt der ungedüngten Variante ist von Gehaltsklasse C in B gesunken. Parallel dazu sind die Ertragsminderungen im Vergleich zur bedarfsgerechten

P-Düngung stark gestiegen. Im Zeitraum 2003 bis 2006 betrug die Ertragsreduktion infolge unterlassener P-Düngung bei Getreide 5 bis 7 dt/ha sowie bei Raps 3 dt/ha. Parallel zu den Ertragsminderungen infolge P-Mangel sinkt die Verwertung des gedüngten Stickstoffs. Ein Beispiel hierfür zeigt Tabelle 9. Die bedarfsgerechte P-Düngung hat im Vergleich zur Variante ohne P nicht nur zu einer Erhöhung des Kornertrages um 6,4 dt/ha, sondern auch zu einem Anstieg der N-Aufnahme durch Korn und Stroh geführt.

Für die optimale Verwertung des gedüngten Stickstoffs ist eine harmonische Ernährung der Kulturpflanzen mit allen essenziellen Nährstoffen von großer Bedeutung. Wird der Pflanzenertrag durch einen Mangel an einem anderen Nährstoff begrenzt, sinkt auch die N-Ausnutzung mit negativen Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der N-Düngung und erhöht das Risiko von Nitratverlagerungen in tiefere Bodenschichten. Das kann auch höheren Nitratreintrag in das Grundwasser bedeuten. Eine ausgewogene bedarfsgerechte Versorgung der Pflanzen mit allen wichtigen Nährstoffen stellt damit einen wichtigen Beitrag zur Reduzierung des Nitrataustrages aus landwirtschaftlich genutzten Flächen dar.

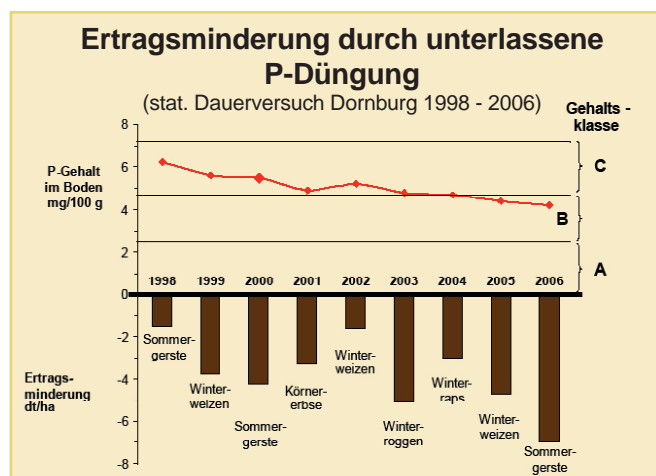


Abbildung 22

Tabelle 9: Wirkung der P-Düngung auf Kornertrag von Winterweizen und N-Entzug durch Korn und Stroh (P-Düngungsversuch Bad Salzungen, 2002)

Düngung	Kornertrag dt/ha	N-Entzug (Korn und Stroh) kg N/ha
ohne P	77,3	150
P-Düngung	83,7	166

Eine bedarfsgerechte P-Düngung von Standorten mit sehr niedriger, niedriger oder mittlerer P-Versorgung (Gehaltsklassen A bis C) verbessert demnach die Ausnutzung der N-Düngung und trägt zu Reduzierung der Nitratgehalte im Boden im Herbst bei.

Die empfohlene Unterlassung bzw. Reduzierung der P-Düngung auf Böden mit sehr hoher bzw. hoher P-Versorgung (Gehaltsklassen E und D) führt zur Senkung erhöhter Boden-P-Gehalte ohne negative wirtschaftliche Folgen für den Landwirt und reduziert damit das Potenzial für die Erosionsbedingte Eutrophierung der Oberflächengewässer. Diese Zusammenhänge verdeutlichen, dass eine bedarfsgerechte P-Düngung unter Berücksichtigung der P-Bodenvorräte zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit notwendig ist und gleichzeitig einen aktiven Beitrag zum Schutz der Wasserqualität leistet.

10 Literatur

ALLEN, L.-H. (1977): Soil water and root development. Soil and Crop Science Soc. Of Florida, 36, 18-18

ANONYM (1998): Gesetz zum Schutz des Bodens - Bundes-Bodenschutzgesetz, BGBl I, G 5702, Nr. 16 v. 28.3.1998, S. 502-510

ANONYM (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung v. 16.07.1999, BGBl. I (1999) Nr. 36

ANONYM (2003): Thüringer Gesetz zur Ausführung des Bundes-Bodenschutzgesetzes v. 16.12.2003, Ges.- u. Verordnungsblatt Thüringen, Nr. 15, 30.12.2003, S. 511-515

TLL (2003): Datenspeicher des Untersuchungsprogramms Schwermetallgehalte in Wirtschaftsdüngern

DIN 19682-10 (1998): Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau - Felduntersuchungen - Teil 10: Beschreibung und Beurteilung des Bodengefüges

TMLNU (2008): ELER - Förderinitiative Ländliche Entwicklung in Thüringen

TLL (2008): Ergebnisse des Landesklärschlammkatasters (2002 bis 2006).
<http://webserver1.jena.tll.de/ainfo/pdf/kska0108.pdf>

TMLNU (2007): Gewässerschonende Landbewirtschaftung in Thüringen

UBA (2001): Grundsätze und Maßnahmen für eine vorsorgeorientierte Begrenzung von Schadstoffeinträgen in landbaulich genutzten Böden.- UBA Berlin, Texte 59/2001

GULLICH, P.; MARRE, G.; PAUL, R. et al. (2006): Bodendauerbeobachtung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen-Monitoring zur Erfassung von Veränderungen wesentlicher Bodenfunktionen. TLL, Abschlussbericht (2006), 108 S.

HARRACH, T. (1999): Beurteilung des Bodengefüges im Gelände - Insbesondere Bewertung der Packungsdichte und Schätzung der nFK im Wurzelraum. In: Bildungsseminar für die Agrarverwaltung Rheinland-Pfalz (Hrsg.) Boden und Bodenschutz - Zusammenfassung der Beiträge zu einem Seminar am 10./11. Sept. 1998 in Emmelshausen, Seminar 2/99, S. 34-40

LfL Bayern (2005): 20 Jahre Boden-Dauerbeobachtung in Bayern.- LfL Freising, Schriftenreihe 8/2005

PERNER, J.; WURLITZER, J. (2005): Maßnahmen gegen bodenerosionsbedingte Stoffausträge in Thüringer Landwirtschaftsbetrieben. Abschlussbericht im Modellvorhaben VERSTOLA im Auftrag der TLL, 71 S.

Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (2000)

SCHÄUBLE, H. (2005): AV Erosion für ArcView 3.x. Software und Manual; teilw. Erweiterungen durch J. Wurlitzer

SCHULTHEIß U.; DÖHLER, H.; SCHENKEL, H. (2002): Möglichkeiten der Fütterungspraxis zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern. In: Fütterungsstrategien zur Verminderung von Spurenelementen/Schwermetallen in Wirtschaftsdüngern, KTBL Darmstadt, 2002, KTBL-Schrift 410

SCHWERTMANN, U.; VOGL, W.; KAINZ, M. (1987): Boden-erosion durch Wasser. Vorhersage des Abtrages und Bewertung von Gegenmaßnahmen. Ulmer, Stuttgart

SOMMER, C.; BRUNOTTE, J. (2001): Bodenschadverdichtungen: Technische Möglichkeiten zur Vorsorge gegen Bodenschadverdichtungen in der pflanzlichen Produktion. Landtechnik 56 (5), S. 314-315

WERNER, D.; THÄMERT, W. (1989): Diagnose des physikalischen Bodenzustandes. Arch. Acker-Pflanzenbau Bodenk. 33 (12), S. 728-739

WERNER, D.; WERNER, B. (2001): Verdichtung und Regeneration des Gefüges eines schluffigen Tonbodens (Tschernosem): Bodenphysikalische, computertomografische und rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen. J. Plant Nutr. Soil Sci., 164, S. 79-90

UBA/BGK (2003): Endbericht-Neubewertung von Kompostqualitäten 2003.-Bioplan Dr. Reinhold und Dr. Müller GmbH, 14542 Werder