

## PHYSIKALISCHER BODENSCHUTZ

**Konzept zur Umsetzung der rechtlichen Vorgaben  
im Umweltschutzgesetz (USG) und in der  
Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo)**



**BODENKUNDLICHE GESELLSCHAFT DER SCHWEIZ**

**SOCIETE SUISSE DE PEDOLOGIE**

**Adresse:** Geographisches Institut der Universität Zürich (GIUZ)  
Winterthurerstrasse 190, CH-8057 Zürich

**Telefon** 01 635 51 21 oder 22      **Fax** 01 635 68 48

**E-Mail** fitze@geo.unizh.ch

**Postcheck-Konto:** BGS Bern 30-22131-0 Bern

**Vorstand / Comité 1999**

Präsident / Président:	F. Borer, Solothurn	032 627 24 91	E-Mail franz.borer@vd.so.ch
Vizepräsident / Vice-président:	R. Schulin, Schlieren	01 633 60 71	E-Mail schulin@ito.umnw.ethz.ch
Beisitzer / Assesseur:	J.-M. Gobat, Neuchâtel	032 718 23 37	Jean-Michel.Gobat@bota.unine.ch
Sekretär / Secrétaire:	P. Fitze, Zürich	01 635 51 22	E-Mail fitze@geo.unizh.ch
Rechnungsführer / Comptable:	M. Jozic, Ebikon	041 450 26 57	E-Mail mj@agrolab.ch

**Redaktion / Rédaction**

M. Müller

Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft, 3052 Zollikofen

Telefon 031 910 21 24/11      Fax 031 910 22 96/99      E-Mail Moritz.Mueller@shl.bfh.ch

**Dokumentationsstelle / Service des documents**

Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale LMZ, Länggasse 79, 3052 Zollikofen

Telefon 031 911 06 68      Fax 031 911 49 25

E-Mail lmz@pop.agri.ch      Internet <http://combi.agri.ch/lmz>

**Vorsitzende der Arbeitsgruppen / Présidents des groupes de travail**

Klassifikation und Nomenklatur:	J. Presler, Zürich	01 385 29 58	E-Mail babu_zh@datacomm.ch
Lysimeter:	J. Brändli, Zürich	01 256 91 11	
Bodenschutz und Werthaltung:	U. Vökt, Zollikofen	031 910 53 31	
Bodenerosion/Bodenkonservierung:	D. Schaub, Basel	061 272 69 28	
Bodenkartierung:	M. Knecht, Zürich	01 383 70 71	E-Mail ambio@bluewin.ch
Reflexion/Strategie	P. Germann, Bern	031 631 38 54	E-Mail germann@giub.unibe.ch

**Koordination Ausstellung und Broschüre BODEN/SOL**

U. Zihlmann, Zürich-Reckenholz      01 377 74 08      E-Mail Urs.Zihlmann@fal.admin.ch

BODENKUNDLICHE GESELLSCHAFT DER SCHWEIZ  
SOCIETE SUISSE DE PEDOLOGIE

DOKUMENT 9

## **PHYSIKALISCHER BODENSCHUTZ**

### **Konzept zur Umsetzung der rechtlichen Vorgaben im Umweltschutzgesetz (USG) und in der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo)**

vorgeschlagen von der  
"Plattform Bodenschutz" der  
Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz

S. Tobias, R. Schulin, D. Schaub, P. Weisskopf, B. Buchter,  
S. Zimmermann, F. Borer, U. Vökt

*Die Mitglieder der Arbeitsgruppe:*

R. Bono, F. Borer, B. Buchter, J.-P. Clément, E. Diserens, M. Fischler, S. Häusler,  
S. Isler, J.-A. Neyroud, S. Rolli, Ch. Salm, D. Schaub, R. Schulin, S. Tobias,  
U. Vökt, P. Weisskopf, L. Zehnder, S. Zimmermann

ISBN 3 260 05430 8

Juris Druck und Verlag  
Dietikon 1999

## Publikationen der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz

**Bestellungen, Versand:** Landw. Lehrmittelzentrale LMZ

Länggasse 79  
3052 Zollikofen  
Tel. 031 911 06 68  
Fax 031 911 49 25  
E-Mail [lmz@pop.agri.ch](mailto:lmz@pop.agri.ch)  
Internet <http://combi.agri.ch/lmz>

**BGS-Bulletins** Preis: Fr. 15.- pro Stück ohne Porto und Verpackung

Nummer	Jahr	Bestellnummer
3	1979	970 801
5	1981	970 802
6	1982	970 803
8	1984	970 805
11	1987	970 808
12	1988	970 809
14	1990	970 811
15	1991	970 812
16	1992	970 813
17	1993	970 814
18	1994	970 815
19	1995	970 816
20	1996	970 817
21	1997	970 818
22	1998	970 819
23	1999	970 870

No. 1, 2, 4, 7, 9, 10 und 13 vergriffen

**BGS-Dokumente** Preis: Fr. 15.- (No. 9 Fr. 25.-) pro Stück ohne Porto und Verpackung

Nummer	Jahr	Thema	Bestellnummer
1 f	1984	Exploitation du gravier et agriculture	970 840
2 f	1985	Estimation et protection des sols	970 841
3 d	1986	Bodenschädigung durch den Menschen	970 822
4 d	1989	Lysimeterdaten von schweizerischen Messstationen	970 823
5 d	1994	Aktuelle Bodenforschung in der Schweiz	970 824
6 d	1995	Aktuelle Bodenforschung in der Schweiz II	970 825
7 d	1995	Aktuelle Bodenforschung in der Schweiz III	970 826
8 d	1996	Aktuelle Bodenforschung in der Schweiz IV	970 827
9 d	1999	Physikalischer Bodenschutz	970 828

No. 1 und 2 deutsch vergriffen. No. 9 französisch in Vorbereitung

### Weitere Publikationen

Exkursionsführer ISSS 1986 (Alpentransversale)	Bestellnummer	970 860
Gefährdete organische Böden der Schweiz (1982)		970 861

Titelbild: Christoph Biedermann (Nebelspalter 15/1995)

Sprachliche Überarbeitung: Susanne Wegmann

Fotos: Marco Walser

ISBN 3 260 05430 8

Copyright: 1999 Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz

## Vorwort

Die Anträge und Diskussionen zum zweiten Absatz von Artikel 33 des Umweltschutzgesetzes haben es gezeigt: National- und Ständerat wollten den Boden vor Verdichtung und Erosion schützen. Diese Bestimmung ist nicht klammheimlich via Hintereingang ins USG hineingeschlüpft.

Auch der Bundesrat steht hinter diesem Bodenschutzanliegen. Er hat in der Verordnung über Belastungen des Bodens konkretisierenden Bestimmungen dazu bewusst zugestimmt.

Beides ist erfreulich und macht Mut, verpflichtet uns aber auch.

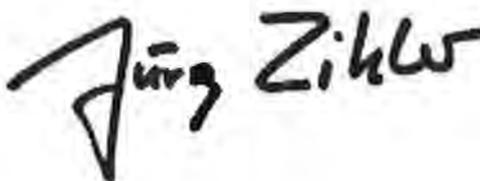
Denn was da so schön auf Gesetzes- und Verordnungspapier steht, muss in der Praxis auch vor Ort umgesetzt werden (können). Sonst geht der Boden letztlich leer aus.

Der physikalische Bodenschutz ist eine noch sehr jugendliche Materie, die sich nicht auf viele Erfahrungen abstützen kann. Es ist deshalb sehr verdienstvoll, dass sich die Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz hier aktiv engagiert. Sie, die immer mehr zur eigentlichen Plattform aller in der Schweiz bodenkundlich und bodenschützerisch Tätigen wird, ist dank ihrer gemischten Mitgliedschaft präjudiziert, bodenkundliches Wissen mit gesetzgeberischen Vorgaben und Wünschen der Praxis zu verbinden.

Dieses Konzept zur Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes ist ein treffliches Beispiel dafür.

Ich danke der BGS, im Speziellen ihrer Arbeitsgruppe Bodenschutz, im Namen des BUWAL für Ihre Initiative und Arbeit, die uns einen guten Schritt weiterbringt, herzlich.

Bundesamt für Umwelt, Wald,  
und Landschaft  
Sektion Boden und allgemeine  
Biologie

A handwritten signature in black ink that reads "Jürg Zihler". The signature is written in a cursive, slightly stylized font.

Jürg Zihler

## Dank

Die Autoren bedanken sich bei den übrigen Mitgliedern der Arbeitsgruppe für die intensiven Diskussionen und die konstruktive Kritik, wodurch das Werk dem Anspruch, ein umfassendes Grundsatzpapier zum physikalischen Bodenschutz darzustellen, gerecht werden konnte. Dietmar Matthies und August Ott sei gedankt für ihr kritisches Lektorat. Ebenso gebührt Etienne Diserens und Jean-Auguste Neyroud Dank für die Korrektur der französischen Fassung. Schliesslich danken die Autoren dem Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Abt. Stoffe und Bodenschutz, Sektion Boden und allgemeine Biologie, für die Finanzierung der sprachlichen Überarbeitung des Textes sowie der Übersetzung ins Französische.

Silvia Tobias, Rainer Schulin, Daniel Schaub, Peter Weisskopf, Bernhard Buchter, Stefan Zimmermann, Franz Borer, Urs Vökt

Februar 1999

### *Die Mitglieder der Arbeitsgruppe:*

R. Bono, F. Borer, B. Buchter, J.-P. Clément, E. Diserens, M. Fischler, S. Häusler, S. Isler, J.-A. Neyroud, S. Rolli, Ch. Salm, D. Schaub, R. Schulin, S. Tobias, U. Vökt, G. von Rohr, P. Weisskopf, L. Zehnder, S. Zimmermann

## Zusammenfassung

Der Boden stellt für Menschen, Tiere, Pflanzen und Mikroorganismen eine wesentliche Lebensgrundlage dar. Durch seine Nutzung kann der Mensch den Boden jedoch gefährden. Daher ist er vor übermässigen menschlichen Eingriffen zu schützen.

### **Ziele des Bodenschutzes**

Der Bodenschutz befasste sich in der Schweiz, wie auch in anderen Ländern, vorerst mit dem Schutz vor Belastungen durch persistente Schadstoffe und insbesondere durch Schwermetalle. Erst später kam der physikalische Bodenschutz hinzu. Sein Ziel ist der Schutz des Bodens vor Schäden infolge von physikalischen Belastungen, das heisst vor Verdichtung, Erosion, Umlagerungen und Rekultivierungen sowie vor Eingriffen in den Bodenwasserhaushalt. Da der Boden ein unvermehrbares Gut darstellt, kommt dem Vorsorgeprinzip im Bodenschutz besondere Bedeutung zu.

Die Ziele des Bodenschutzes lassen sich nach folgenden Schwerpunkten gliedern:

1. **Erhaltung der Multifunktionalität:** Der Boden kann sehr unterschiedliche Funktionen gleichzeitig erfüllen. Diese Multifunktionalität des Bodens wird bei der Auslegung des Begriffs Bodenfruchtbarkeit gemäss der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) berücksichtigt. Bodenfruchtbarkeit wird dort nicht nur als Ertragsfähigkeit interpretiert, sondern vielmehr als Fähigkeit des Bodens, seine Funktionen zu erfüllen. Die langfristige Sicherung dieser Multifunktionalität des Bodens ist das Ziel sowohl des stofflichen als auch des physikalischen Bodenschutzes.
2. **Vermeidung von Bodenschäden:** Entsprechend dem Vorsorgegedanken des Umweltschutzgesetzes (USG) sollen in erster Linie zukünftige Bodenschäden vermieden werden. Dennoch sollen die wirtschaftlichen Nutzungsmöglichkeiten des Bodens erhalten bleiben. Daher muss insbesondere der physikalische Bodenschutz durch eine nachhaltige Bodennutzung und -bewirtschaftung umgesetzt werden.
3. **Flächenschutz:** Die Bodenfruchtbarkeit ist auf einer möglichst grossen und zusammenhängenden Fläche zu erhalten. Erreicht werden kann dieser Flächenschutz einerseits durch den Schutz vor weiterer bzw. zukünftiger Versiegelung, andererseits aber auch durch einen Flächenausgleich bei der Umnutzung von Böden. Der Gedanke des Flächenausgleichs entspricht demjenigen von Ersatzaufforstungen bei Waldrodungen.
4. **Sanierung bestehender Schäden:** Bereits entstandene Bodenschäden müssen möglichst saniert werden. Physikalische Schäden sollen durch angepasste Bewirtschaftungstechniken behoben werden, die die natürliche Regeneration des Bodens fördern.

### **Grundsätze für die Umsetzung und den Vollzug**

Bei der praktischen Umsetzung und beim behördlichen Vollzug des physikalischen Bodenschutzes geht es im wesentlichen darum, sicherzustellen, dass die physikalischen Belastungen des Bodens, die sich aus dessen Nutzung ergeben, innerhalb ökologisch verträglicher Grenzen bleiben. Als Entscheidungskriterien sind hierzu boden- und maschinenbezogene Kennwerte nötig. Es müssen

Richtwerte gefunden werden, die die physikalische Belastbarkeit des Bodens wiedergeben. Daraus sind Grenzwerte für zulässige Belastungen abzuleiten.

Insbesondere bei physikalischen Belastungen hängen Form, Ausmass und Dauerhaftigkeit der Bodenschäden nicht nur von der Belastung, sondern auch von der Empfindlichkeit des Bodens ab. Das Ökosystem Boden kann zwar Schäden als Folge physikalischer Belastungen bis zu einem gewissen Grad regenerieren. Klare quantitative Angaben hierzu können jedoch zurzeit noch nicht gemacht werden. Die Verantwortung in der Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes liegt somit nicht nur bei Behörden und Landwirten, Forstwirten oder Bauleuten, sondern auch bei Forschungsanstalten, Schulen, Verbänden und Politikern.

Der physikalische Bodenschutz weist zudem wichtige Schnittstellen mit anderen Fachgebieten auf. Zu erwähnen sind insbesondere jene betreffend Gewässerschutz und Wasserbau, Land-, Forst- und Bauwirtschaft sowie der Raumordnung mit der Raumplanung und Kulturtechnik. Diese Schnittstellenfunktion gilt es in der praktischen Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes zu berücksichtigen.

Ansetzen soll der praktische Bodenschutz vor allem in folgenden Bereichen:

- **Aufklärung und Motivation:** Das Wissen über die sich im Boden abspielenden Prozesse bei der Bewirtschaftung ist weiter zu vertiefen und stärker in die Aus- und Weiterbildung der betreffenden Akteure einzubinden.
- **Beurteilungs-, Mess- und Kontrollgrössen:** Es sind Richtwerte zu bestimmen, die die Grenzen der ökologischen Belastbarkeit des Bodens kennzeichnen sollen. Über eine erweiterte Typenprüfung von Fahrzeugen und bodenbearbeitenden Maschinen sollen nur solche Geräte zugelassen werden, die den Bodenfunktionen keine dauerhaften Schäden zufügen.
- **Empfehlungen, Richtlinien, Vorschriften und Lenkungsmassnahmen:** Bereits bei der Nutzungszuteilung und insbesondere bei der Kulturenwahl in der Landwirtschaft ist auf die Belastbarkeit des Bodens zu achten. Entsprechende Empfehlungen, Vorschriften und Lenkungsmassnahmen sind hierzu festzulegen. Zudem sind Richtlinien zur guten fachlichen Praxis für verschiedene Formen und Techniken der Bodenbewirtschaftung zu erlassen.

### ***Häufige Problemstellungen in der Schweiz***

Anhand konkreter Beispiele lässt sich zeigen, welche physikalischen Bodenschäden in der Schweiz häufig auftreten, welches die Hauptursachen und welches wirkungsvolle Präventionsmassnahmen sind:

- **Verdichtungsschäden** können auf verschiedene Prozesse zurückgeführt werden: Bodendurchmischung, Sackungsverdichtung, Scherung, Knetung und Homogenisierung. Sie treten bei Bodenumlagerungen und Rekultivierung, bei kulturtechnischen Massnahmen zur Bodenverbesserung oder aber bei der Befahrung und Bearbeitung des Bodens auf. Die eigentliche Ursache eines Schadens liegt meistens darin, dass der Boden zum Zeitpunkt der Bearbeitung aufgrund seines hohen Feuchtegehalts für die verwendeten Geräte zu wenig tragfähig ist. Die

Massnahmen sind gemäss dem Vorsorgeprinzip ganz auf die Verhinderung von dauerhaften Beeinträchtigungen durch Verdichtung auszurichten.

- **Bodenerosion** ist in der Schweiz hauptsächlich auf den Abtrag durch Wasser zurückzuführen. Betroffen sind vor allem Böden in Hanglagen, die entweder natürlicherweise schlecht aggregiert sind, oder deren Krümelstruktur durch die Bodenbewirtschaftung zerstört wurde. Flächenhafter Abtrag entsteht auf verschlammten Bodenoberflächen. Sammelt sich das Wasser in Traktorspuren oder Saatrillen, insbesondere bei stärker geneigten Hängen, führt dies zur sogenannten Rillenerosion. Diese Rillen können sich zu Netzwerken verbinden, was in den unteren Bereichen der Hänge zu tiefen Rinnen (Talwegerosion) führen kann. Vermeiden lässt sich die Erosion durch Anpassung der Parzellenform und Bewirtschaftungsrichtung an die Hangneigung. Insbesondere auf strukturlabilen Böden ist zudem die Schwarzbrache zu vermeiden.
- Unter den **hydraulischen Beeinträchtigungen** des Bodens sind vor allem die Entwässerungen von Mooren für die landwirtschaftliche Nutzung von grosser Bedeutung. Die Belüftung torfhaltiger Bodenhorizonte führt zum Abbau der organischen Substanz, was durch die bekannten Moorsackungen augenfällig wird. Moorsackungen sind schwere Bodenschäden, die auch über geologische Zeiträume nicht regeneriert werden können. Die Moorbodenkultur ist daher in keinem Fall nachhaltig und muss absolut vermieden werden.
- Die **direkte Versickerung des Meteorwassers** in den Boden ist aus zwei Gründen problematisch. Zum einen werden die aus der Luft auf die versiegelten Flächen abgelagerten Schadstoffe auf relativ kleinen Versickerungsflächen konzentriert in den Boden eingeschwemmt, was stoffliche Belastungen des Bodens zur Folge hat. Zum anderen gelangen auf demselben Weg feinste Stäube in das Porensystem, was zur Verstopfung der Poren und somit zur Verdichtung des Bodens führen kann. Das eidgenössische Gewässerschutzgesetz ist so anzupassen, dass es dieser Bedrohung des Bodens Rechnung trägt.

### ***Vorschläge für Richtwerte***

Die «Plattform Bodenschutz» der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz (BGS) macht im Anhang Vorschläge für Richtwerte betreffend Bodenverdichtung und Erosion. Sie erachtet folgende physikalischen Bodenkennwerte als geeignet zur Definition von Richtwerten in bezug auf Bodenverdichtungen: Grobporenvolumen, Leitfähigkeit für Luft oder Wasser, Infiltrationsrate und Durchwurzelungstiefe. Die Belastbarkeitsgrenzen des Bodens gegenüber mechanischen Belastungen sollten anhand folgender Parameter bestimmt werden: Vorbelastung (bei Feldkapazität), Scherfestigkeit (bei Feldkapazität), Saugspannung, Eindringwiderstand, Spurtiefe (Deformation), Plastisches Verhalten (Ausrollbarkeit) des Bodens und Skelettgehalt.

In bezug auf die Bodenerosion sind die Richtwerte als tolerierbare Abtragsraten definiert. Im Sinne des Vorsorgeprinzips wäre für die Bodenerosion zwar ein Richtwert von null festzulegen. Die «Plattform Bodenschutz» der BGS unterstützt aber die im Anhang der VBBo genannten Richtwerte in Abhängigkeit der Gründigkeit. Diesen entsprechend sollte nach heutigem Wissen das natürliche Ertragspotential des Bodens in einem Zeitraum von 300 bis 500 Jahren nicht wesentlich vermindert werden.



# Inhalt

<b>Vorwort</b>	<b>I</b>
<b>Dank</b>	<b>II</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>III</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>2</b>
1.1 Definition des physikalischen Bodenschutzes	2
1.2 Die Multifunktionalität des Bodens	2
<b>2. Ziele und Konzepte des physikalischen Bodenschutzes</b>	<b>5</b>
2.1 Ziele des physikalischen Bodenschutzes	5
2.2 Physikalische Bodenschäden	6
2.3 Empfindlichkeit und Regenerationsfähigkeit des Bodens	7
2.4 Schnittstellen des physikalischen Bodenschutzes	10
2.4.1 Räumliche Bedeutung der Bodenfunktionen	10
2.4.2 Querbeziehungen zu anderen Fachgebieten und in der Gesetzgebung	11
<b>3. Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes</b>	<b>12</b>
3.1 Grundsätze der Umsetzung und des Vollzugs	12
3.2 Mittel für die Umsetzung und den Vollzug	14
3.2.1 Aufklärung und Motivation	14
3.2.2 Beurteilungs-, Mess- und Kontrollgrössen	15
3.2.3 Empfehlungen, Richtlinien, Vorschriften und Lenkungsmassnahmen	16
<b>4. Physikalischer Bodenschutz in der Praxis</b>	<b>17</b>
4.1 Mechanische Beeinträchtigungen	18
4.1.1 Überschüttung, Bodendurchmischung, Rekultivierung	18
4.1.2 Sackungsverdichtung, Scherungen, Knetung und Homogenisierung	22
4.1.3 Erosion	26
4.2 Hydraulische Beeinträchtigungen	27
4.2.1 Entwässerung	27
4.2.2 Bewässerung	29
4.2.3 Direkte Meteorwasserversickerung	29
<b>Quellen</b>	<b>30</b>
<b>Anhänge</b>	<b>32</b>
1 Konzept zur Herleitung von Richtwerten in bezug auf Bodenverdichtung	
2 Konzept zur Herleitung von Richtwerten in bezug auf Bodenerosion	
3 Bodendefinition der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz	
4 Für den physikalischen Bodenschutz relevante Artikel des Umweltschutzgesetzes (USG) und der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo)	

# 1. Einleitung

## 1.1 Definition des physikalischen Bodenschutzes

Boden ist die äusserste Schicht der Erdkruste. Er wird geprägt vom Muttergestein, dem Klima und dem Relief, den Lebewesen und durch die Zeit. Im Boden findet ein reger Austausch von Materie und Energie zwischen Luft, Wasser und Gestein statt. Als Teil des Ökosystems nimmt der Boden eine Schlüsselstellung in globalen Stoffkreisläufen ein.<sup>1</sup> Dadurch stellt er für Menschen, Tiere, Pflanzen und Mikroorganismen eine wesentliche Lebensgrundlage dar. Der Mensch kann diese Lebensgrundlage durch die Nutzung aber gefährden, weshalb sie vor übermässigen menschlichen Eingriffen zu schützen ist (Blume 1992).

Der Bodenschutz war in der Schweiz, wie in vielen Ländern, bisher primär auf den Schutz vor Belastungen durch persistente Schadstoffe ausgerichtet. Beim stofflichen Bodenschutz standen insbesondere die Schwermetalle im Vordergrund.<sup>2</sup> Der physikalische Bodenschutz befasst sich vor allem mit dem Schutz vor der Verminderung der Bodenfruchtbarkeit durch physikalische Belastungen.

Im Vordergrund des physikalischen Bodenschutzes steht erstens der Schutz vor Strukturveränderungen als Folge hoher Druck- und Scherspannungen, die durch Maschinen auf den Boden übertragen werden. Die dadurch hervorgerufene Verformung des Bodengefüges führt zu einer Verringerung der Wasser- und Luftdurchlässigkeit des Bodens, das heisst zur **Verdichtung**. Zweitens geht es um die Verhinderung des Bodenverlustes als Folge von Abrieb und Abtrag von Bodenpartikeln durch Wasser- oder Luftströmungen an der Bodenoberfläche, um **Erosion bzw. Deflation** also. Der dritte Bereich umfasst den Schutz des Bodens vor Schäden durch **Abtrag, Deposition, Umlagerung und Neuschüttung** von Bodenmaterial im Zusammenhang mit dem Rohstoffabbau oder (Gross-) Baustellen. Viertens beinhaltet der physikalische Bodenschutz auch den Schutz vor **Veränderungen des Bodenwasser- und Lufthaushalts** insbesondere infolge grossräumiger Vorflutregulierungen weiter Gebiete.

## 1.2 Die Multifunktionalität des Bodens

Der Boden kann sehr verschiedenartige Funktionen erfüllen. Diese Funktionen sind ökologischer, ökonomischer und ideeller Art. Die wichtigsten Bodenfunktionen sind:

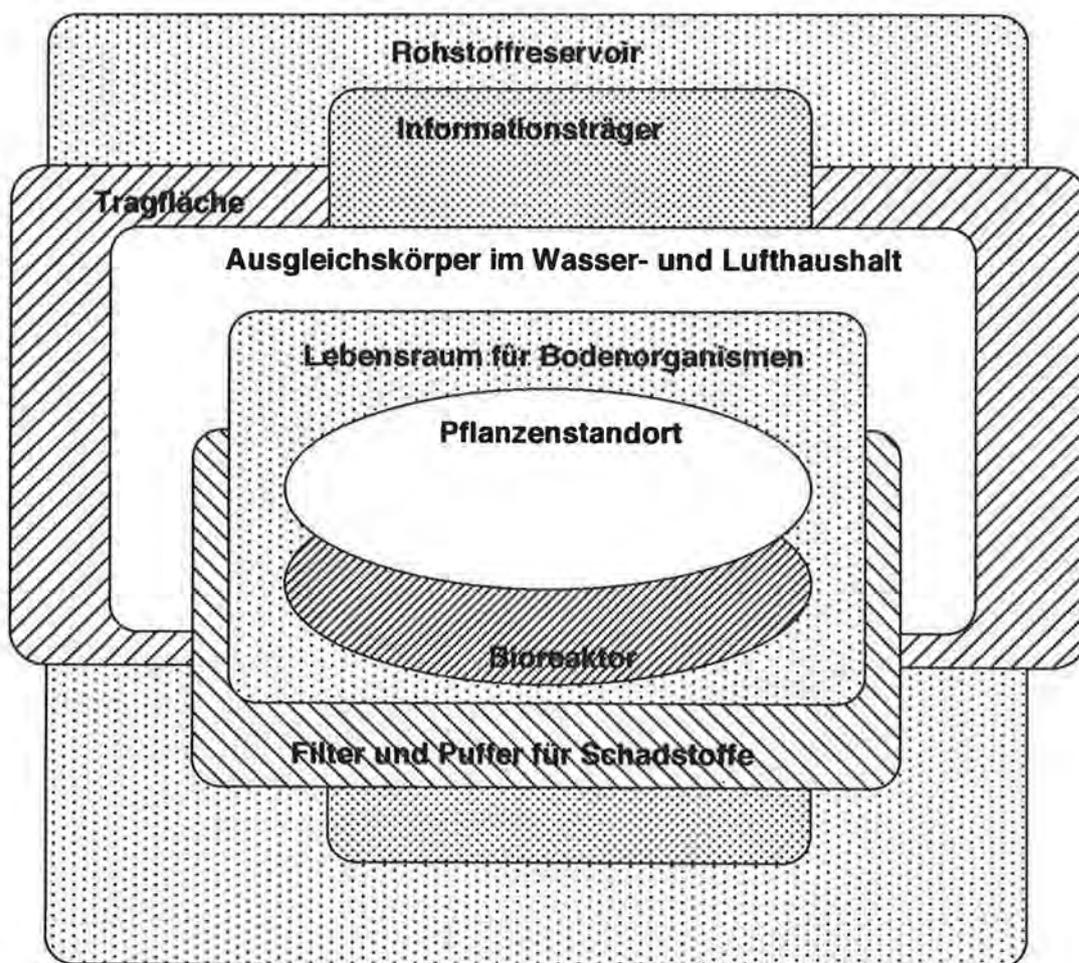
- Bioreaktor für den Abbau organischer Stoffe
- Standort für die natürliche Vegetation und für die Kulturpflanzen
- Lebensraum für Bodenorganismen (inkl. Genreservoir)
- Filter und Puffer für Stoffe
- Ausgleichskörper im Wasser-, Luft- und Wärmehaushalt
- Geschichtliche Urkunde (Boden als Informationsträger)
- Tragende Unterlage für Bauten bzw. Fahrbahn für land- und forstwirtschaftliche Fahrzeuge und Geräte.
- Rohstoffreservoir

---

<sup>1</sup> Definition von «Boden»: Vorschlag der Ad-hoc-Arbeitsgruppe «Bodendefinition» zuhanden der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz (ausführlicher Text im Anhang)

<sup>2</sup> Verordnung über Schadstoffe im Boden (VSBö) 1986 (SR 814.12)

Die einzelnen Bodenfunktionen sind von unterschiedlicher Empfindlichkeit gegenüber physikalischen Belastungen (vgl. Fig. 1). Ein wichtiger Grund für diese Unterschiede ist, dass die einzelnen Funktionen ungleich stark von einander abhängen. In der untenstehenden, stark vereinfachten Abbildung ist eine Funktion in der Regel als umso empfindlicher einzustufen, je weiter sie im Vordergrund steht. Die Funktionen im Vordergrund setzen diejenigen im Hintergrund, mindestens zum Teil, voraus. Je stärker eine Bodenfunktion durch die Beeinträchtigung einer anderen Funktion selbst Schaden erleidet, als umso empfindlicher ist sie zu klassieren. Dies gilt vor allem für die Funktionen Pflanzenstandort, Bioreaktor, Lebensraum, Ausgleichskörper im Wasser-, Luft- und Wärmehaushalt. Die Funktionen Informationsträger, Rohstoffreservoir und Tragfläche sind zwar für die erstgenannten fünf Funktionen keine unabdingbare Voraussetzung. Sie werden aber erst durch einen Profilaufbruch beeinträchtigt, was jeweils auch zu einer, mindestens temporären, Störung der anderen fünf Funktionen führt.



*Fig. 1 Die verschiedenen Bodenfunktionen*

Die Auslegung des Begriffs Bodenfruchtbarkeit gemäss der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) geht weiter als die reine Ertragsfähigkeit des Bodens insbesondere aufgrund seiner Funktion als Pflanzenstandort. Als Bodenbelastungen werden im USG jegliche Veränderungen

gen der natürlichen Beschaffenheit des Bodens bezeichnet (Art. 7 Abs. 4<sup>bis</sup> USG). Gemäss VBBo gilt ein Boden als fruchtbar, wenn neben der Funktion als Pflanzenstandort auch seine Funktionen als Bioreaktor, Lebensraum für Bodenorganismen, Filter und Puffer für Stoffe sowie Ausgleichskörper im Wasser-, Luft- und Wärmehaushalt gewährleistet sind (Art. 4 VSBo, Art. 2 Abs. 2 VBBo).

Im allgemeinen Sprachgebrauch ist der Begriff «Bodenfruchtbarkeit» mit einem gewissen Wert des Bodens verbunden. Allerdings beurteilen die einzelnen Interessenkreise (Landwirte, Behörden, Umweltschutzorganisationen etc.) den Wert des Bodens vielfach nach unterschiedlichen Kriterien. In den folgenden Ausführungen wird der Begriff «Bodenfruchtbarkeit» gemäss der Definition in der VBBo verwendet und dem englischen Ausdruck «soil quality» gleichgesetzt. In aktuellen Diskussionen wird die **Bodenfruchtbarkeit** (soil quality) definiert als **Fähigkeit des Bodens, seine Funktionen zu erfüllen**, und zwar sowohl innerhalb seiner Ökosystemgrenzen als auch in Wechselwirkung mit anderen Umweltsystemen (Larson und Pierce 1994; Karlen et al. 1997; Johnson et al. 1997). In diesem Sinne ist die Bodenfruchtbarkeit als Mass für die Multifunktionalität des Bodens zu interpretieren.

Jede Funktion hat bereits für sich eine gewisse Bedeutung. Sie kann je nach Standortgegebenheiten und Ansprüchen des Menschen oder anderer Lebewesen von unterschiedlicher Wichtigkeit für die Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit werden. So macht sich der Mensch je nach **Nutzungsart** andere Bodenfunktionen zunutze bzw. optimiert gewisse Funktionen für eine gewünschte Nutzung. Dadurch können die übrigen Funktionen beeinträchtigt und zum Teil sogar zerstört werden (z. B. Versiegelung, Materialabbau, Verdichtung durch Befahrung bzw. Veränderung des Bodenwasserhaushalts durch Meliorationen).

Die empfindlichsten Funktionen werden zuerst betroffen, was in jedem Fall eine Einschränkung der Multifunktionalität des Bodens bedeutet. Dies soll am Beispiel der landwirtschaftlichen Nutzung erläutert werden. Hier profitiert der Mensch in erster Linie von der Funktion des Bodens als Standort für Kulturpflanzen. Dies setzt aber auch die Funktionen als Lebensraum für Bodenorganismen, Ausgleichskörper im Wasser- und Lufthaushalt, Filter und Puffer für Stoffe sowie die Funktion als Bioreaktor voraus. Eine Befahrung des Bodens in feuchtem Zustand mit schweren Maschinen (z. B. bei der Hackfruchternte) kann zu bleibenden Bodenverdichtungen führen. Mangelhafte Sauerstoffversorgung in den verdichteten Bodenschichten kann die Lebensraumfunktion des Bodens stark beeinträchtigen. Hieraus ergibt sich wiederum eine Behinderung der Bodenfunktion als Bioreaktor. Zudem wird durch die Verdichtung die Durchgängigkeit des Porensystems für Wasser und Luft reduziert, so dass der Ausgleich zwischen Atmosphäre, Boden (Pedosphäre) und Untergrund (Lithosphäre) verringert wird.

## 2. Ziele und Konzepte des physikalischen Bodenschutzes

### 2.1 Ziele des physikalischen Bodenschutzes

Voraussetzung für die praktische Umsetzung und den behördlichen Vollzug des physikalischen Bodenschutzes ist eine konkrete Definition des Schutzziels. Die Zieldefinition ist in diesem Fall von besonderer Wichtigkeit, da der Boden durch die Nutzung bereits an vielen Standorten in seinen physikalischen Eigenschaften verändert worden ist. Diese Veränderungen äussern sich nicht in allen Fällen negativ im Sinne einer verminderten Ertragsfähigkeit des Bodens. Eingriffe in den Bodenwasser- und -lufthaushalt können die Produktivität des Bodens gegenüber dem natürlichen Zustand auch erhöhen.

Das eigentliche Ziel sowohl des stofflichen als auch des physikalischen Bodenschutzes ist die **langfristige Sicherung der Multifunktionalität des Bodens** und damit die Erhaltung einer möglichst hohen Bodenfruchtbarkeit. Die **Schutzgüter des physikalischen Bodenschutzes** stellen die in Kap. 1.2 genannten Bodenfunktionen dar. Das konkrete Schutzziel hängt von der spezifischen Bedeutung der lebenserhaltenden Bodenfunktionen für Mensch und Natur am jeweiligen Standort ab. Das heisst, das konkrete Schutzziel steht in Beziehung zu den Standortverhältnissen und zum Potential eines Bodens. Es muss deshalb für jeden einzelnen Fall unter Berücksichtigung der grossräumigen Zusammenhänge und Randbedingungen definiert werden. Einerseits kann es darum gehen, die natürlichen Bodenfunktionen in ihrem ursprünglichen Zustand zu erhalten bzw. durch Sanierung dahin zurückzuführen. Andererseits kann es aber auch das Ziel sein, gewisse Bodenfunktionen für bestimmte Nutzungen zu optimieren.

Ein wesentlicher Leitgedanke des USG ist das **Vorsorgeprinzip**, das heisst das Prinzip der nachhaltigen Schadensvermeidung zur Sicherung der Multifunktionalität des Bodens. Dieses ist deshalb von besonderer Bedeutung, weil der Boden ein unvermehrbares Gut darstellt (Lal 1994). Die wirtschaftlichen Nutzungsmöglichkeiten des Bodens sollen aber erhalten bleiben. Bodenschutz muss in erster Linie mit der Bodennutzung umgesetzt werden. Für die land- und forstwirtschaftliche Bodennutzung bedeutet das, dass Bearbeitungs- und Bewirtschaftungsformen gepflegt werden sollen, die gewährleisten, dass die standorttypische natürliche oder durch Kultivierung erworbene Bodenfruchtbarkeit fortbestehen bleibt oder gegebenenfalls wiederhergestellt wird. Bereits die Wahl der Bodennutzung und -bewirtschaftung muss im Hinblick auf das Regenerationspotential (vgl. Kap. 2.3) des Bodens erfolgen (Stasch und Stahr 1993).

Nachhaltiger Bodenschutz bedeutet aber auch **Flächenschutz**, das heisst die Erhaltung der Lebensraumfunktionen des Bodens auf einer möglichst grossen Fläche (Häberli 1991). Konkret ergeben sich daraus drei Forderungen: In erster Linie hat sich die Bautätigkeit auf brachliegende Flächen innerhalb der bestehenden, erschlossenen Bauzonen zu konzentrieren. Zweitens sollen unüberbaute Flächen in Bauzonen rückgezont werden. Drittens fordert der nachhaltige Bodenschutz auch den Flächenausgleich bei der Umnutzung des Bodens.

Wenn eine bestimmte Fläche in eine Nutzungsart überführt wird, welche die lebenserhaltenden Funktionen des Bodens beeinträchtigt, ist in derselben geographischen Region eine anderweitig genutzte Fläche derselben Grösse als Lebensraum für Bodenlebewesen und als Pflanzenstandort wiederherzustellen. Daraus ergibt sich die Forderung nach der Pflicht zur Rückführung von Bau- brachen in ökologisch nutzbare Flächen. Soll beispielsweise eine landwirtschaftlich genutzte Fläche überbaut werden, ist gleichzeitig anderswo ein Flächenausgleich zu schaffen, indem z. B.

eine stillgelegte Strasse rückgebaut, rekultiviert und der landwirtschaftlichen Nutzung zur Verfügung gestellt wird. Diese Idee entspricht dem Grundsatz der Ersatzaufforstung bei Rodungen (WaG Art. 1 Abs. 1, Art. 3, Art. 7 Abs. 1). Nachhaltiger Schutz des Bodens vor physikalischer Zerstörung ist ohne Verwirklichung dieser drei Postulate in der Raumplanung nicht möglich. Ideen hierzu finden sich bei Knoepfel et al. (1996).

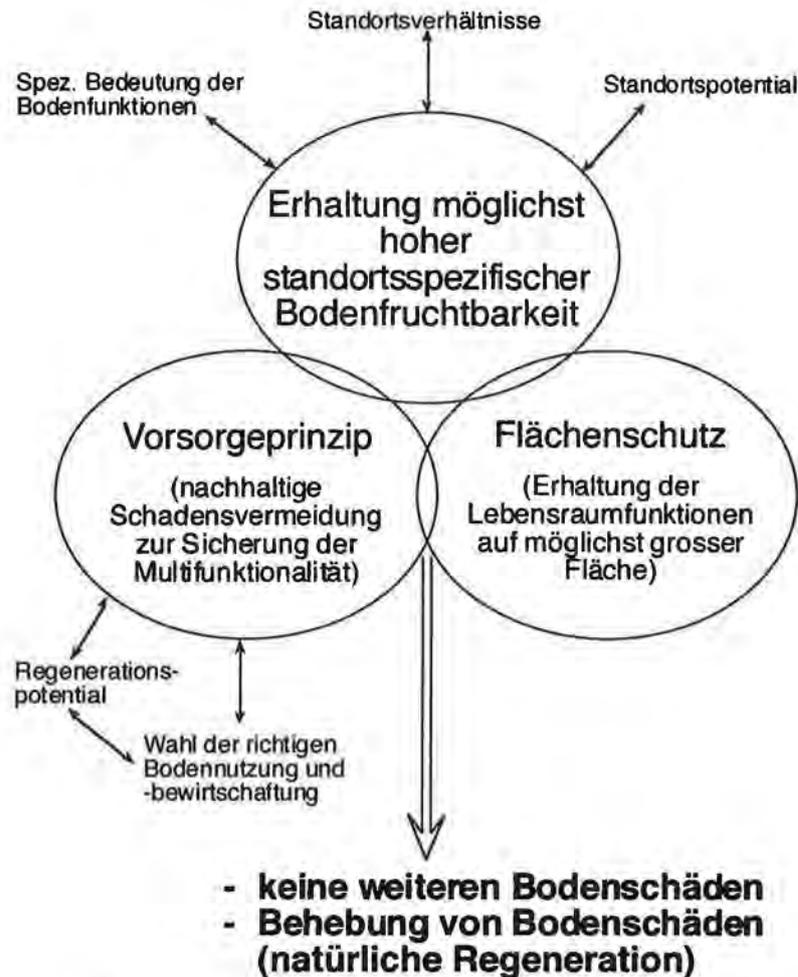


Fig. 2 Die Ziele des physikalischen Bodenschutzes

## 2.2 Physikalische Bodenschäden

Im Sinne des Vorsorgeprinzips geht es im Bodenschutz primär darum, grundsätzlich keine weiteren Bodenschäden hervorzurufen, die die Fruchtbarkeit des Bodens dauerhaft beeinträchtigen. Physikalische Bodenschäden bedeuten allgemein die Beeinträchtigung einer oder mehrerer Bodenfunktionen als Resultat von Strukturveränderungen. Die Ursachen für Schäden an einzelnen Bodenfunktionen können in Nah- und Fernwirkungen unterteilt werden.

Beispiele von **Nahwirkungen** sind die landwirtschaftliche Bearbeitung und die Bodenumlagerung im Rahmen von Bauvorhaben, die das Bodengefüge zerstören. Bei den Nahwirkungen spielt

der direkte Einfluss durch Bebauen, Bearbeiten, Befahren etc. bei der Nutzung des Bodens die entscheidende Rolle in der Verursachung von physikalischen Bodenschäden. Die indirekten Einflüsse sind zwar weniger offensichtlich, sie wirken sich aber dadurch negativ aus, dass sie die Empfindlichkeit des Bodens (vgl. Kap. 2.3) erhöhen. Ein Beispiel dafür sind Eingriffe in den Wasserhaushalt eines Gebietes, welche zu einer erhöhten Bodenfeuchtigkeit führen. Beispiele für die **Fernwirkung** sind Störungen im Bodenwasserhaushalt und Erosion infolge von Gewässerregulierungen. In Tab. 1 sind typische physikalische Eingriffe in den Boden und häufige dauerhafte Folgeschäden aufgelistet.

<b>Physikalische Einwirkung</b>	<b>Häufige Formen von Folgeschäden</b>
Nicht fachgerechte landwirtschaftliche Bodenbearbeitung (insb. bei zu hoher Bodenfeuchte)	Gefügezerstörung (Knetung, Verschmierung) im Oberboden, Verkrustung, Verschlammung, Erosion
Befahren mit zu schweren land- oder forstwirtschaftlichen Fahrzeugen (insb. bei zu hoher Bodenfeuchte)	Gefügezerstörung (Knetung) im Oberboden, Verdichtungen im Ober- und Unterboden, Erosion
Erbewegungen (Aushub, Umlagerung, Aufschüttung) (insb. bei zu hoher Bodenfeuchte)	Gefügestörung, Störung des Profilaufbaus, Verdichtung, Vernässung
Entwässerung (Drainierung)	Sackungen in organischen Bodenhorizonten
Bewässerung	Versalzung im Kapillarsaum, Verringerung des Wasseraufnahmevermögens (bei zunehmender Bewässerungsintensität)

*Tab. 1 Typische physikalische Einwirkungen und häufige dauerhafte Folgeschäden*

Über die Vermeidung neuer Schäden hinaus geht es im Sinne der Vorsorge auch um die Behebung bestehender Bodenschäden. Dies soll in erster Linie durch die Förderung der natürlichen Regeneration geschehen. Hierfür sind Techniken für einen schonenden Umgang mit dem Boden zu fördern und weiter zu entwickeln.

Zum Vorsorgeprinzip gehört auch die Schadensprävention bei ungewissem Nutzen. Das heisst, dass grundsätzlich alle Bodenfunktionen zu schützen sind, auch wenn sie für die aktuelle bzw. beabsichtigte Nutzung nicht von Bedeutung zu sein scheinen. In erster Linie geht es zwar um den Schutz der empfindlichen Funktionen wie Ausgleichskörper im Wasser-, Luft- und Wärmehaushalt, Lebensraum und Pflanzenstandort. Aber auch die weniger empfindliche Funktion des Bodens als Informationsträger kann zu einem ungewissen Zeitpunkt von massgebender Bedeutung werden. Vor allem sind unnötige Veränderungen des Bodenprofilaufbaus, beispielsweise bei Aufschüttungen zur Humusentsorgung, zu vermeiden.

### **2.3 Empfindlichkeit und Regenerationsfähigkeit des Bodens**

Bei persistenten Schadstoffen ist die stoffliche Belastung des Bodens durch den Eintrag gegeben. Die Auswirkungen auf die Funktionen des Bodens hängen allerdings stark von der Art der Bin-

dung dieser Schadstoffe im Boden und der Form ihrer Bioverfügbarkeit ab. Bei den physikalischen Belastungen sind die negativen Auswirkungen auf die Bodenfunktionen mit der Beeinträchtigung des Bodengefüges und dem Verlust an Bodensubstanz gegeben. Form, Ausmass und Dauerhaftigkeit dieser Verminderungen der Bodenfruchtbarkeit hängen jedoch nicht nur von der Art, Grösse oder Dauer der einwirkenden Belastung ab, sondern wiederum auch von den Eigenschaften des Bodens.

Die Empfindlichkeit eines Bodens gegenüber mechanischen Belastungen wird zum einen durch den Aufbau seiner festen Substanz bestimmt. Zum anderen aber spielt sein momentaner Feuchtigkeitszustand eine ganz wesentliche Rolle. Letzterer kann unter dem Einfluss der standörtlichen Witterungsbedingungen sehr starken, kurzfristigen Schwankungen unterworfen sein. Die Empfindlichkeit gegenüber einer bestimmten Belastung kann sich dadurch innert kürzester Zeit drastisch ändern. Die Empfindlichkeit ist also einerseits **standortbedingt**, das heisst zum Beispiel abhängig von Bodentyp und -art sowie vom Klima. Andererseits ist sie **zustandsbedingt**, das heisst, abhängig von Bodenfeuchte, aktueller Bestockung, Gefügestand und Vorbelastung infolge früherer Nutzungs- und Bewirtschaftungsweisen.

Wie jedes Ökosystem besitzt auch der Boden eine gewisse Kapazität, mit der Zeit Schäden zu regenerieren. Wird diese Kapazität überschritten, erleidet das System irreversible Schäden. Die Fähigkeit des Bodens, nach verschiedenen Arten von Eingriffen oder Schädigungen zum ursprünglichen Zustand zurückzukehren, wird als Regenerationsfähigkeit des Bodens definiert (Szabolcs 1994). Dies kann durch pedogenetische Prozesse oder menschliche Einflüsse geschehen.

**Natürliche Regenerationsprozesse** spielen sich im Rahmen der Pedogenese ab. Die Regeneration des Bodengefüges und allmähliche Auflösung der Pflugscholle bei dauerhafter Umstellung von Ackerbau auf Naturwiese ist ein Beispiel hierfür. Während dieses Prozesses wird die Krümelstruktur im Oberboden und die Porendurchgängigkeit in den Unterboden wiederhergestellt. Die erforderliche Zeitspanne für eine natürliche Regeneration hängt von Klima und Bodenfeuchtegang sowie vom Schadensausmass ab. Letzteres hängt - wie oben erwähnt - seinerseits von der Empfindlichkeit des Bodens zum Zeitpunkt der Belastung ab. Die Regenerationszeit ist aber häufig wesentlich länger als der Zeitraum zwischen einzelnen mechanischen oder physikalischen Einwirkungen auf den Boden, die sich durch die normale Nutzung ergeben.<sup>3</sup>

Mit **anthropogenen Sanierungsmassnahmen** kann die Regenerationszeit mitunter stark verkürzt werden. Dies ist jedoch nur möglich, wenn die Zeit mitberücksichtigt wird, die das Ökosystem Boden braucht, um sich von den betreffenden Eingriffen zu erholen. Die Wiederherstellung der Bodenfunktionen «Lebensraum» und «Pflanzenstandort» beispielsweise bedingt fachgerechte Rekultivierung und anschliessend schonende Folgebewirtschaftung.

---

<sup>3</sup> Beispielsweise konnte nach einer einmaligen Befahrung einer Kunstwiese im Sommer in der Radspur des Traktors eine Setzung der Bodenoberfläche um ca. 2 cm festgestellt werden. Bis zur nächsten Befahrung drei Monate später (Zeitpunkt des letzten Schnitts im Jahr) hat sich die Radspur in ihrer Höhenlage nicht signifikant verändert. Vor allem hat sie ihr ursprüngliches Niveau nicht wieder erreicht. Die nächste Befahrung führte zu einer weiteren Niveauabsenkung der Radspur. Die mechanische Elastizität des Bodens wurde bereits bei einmaliger Befahrung überschritten und die Wirkung wurde kumuliert. Durch den Vergleich der Bodenbewegungen mit dem Saugspannungsverlauf konnten auch die Setzungen bzw. Hebungen infolge Quellen und Schrumpfen erfasst werden. Diese waren jedoch von einer zehnfach geringeren Grössenordnung als die Deformationen infolge der Fahrzeugaufasten (Baracchi und Stüber 1997).

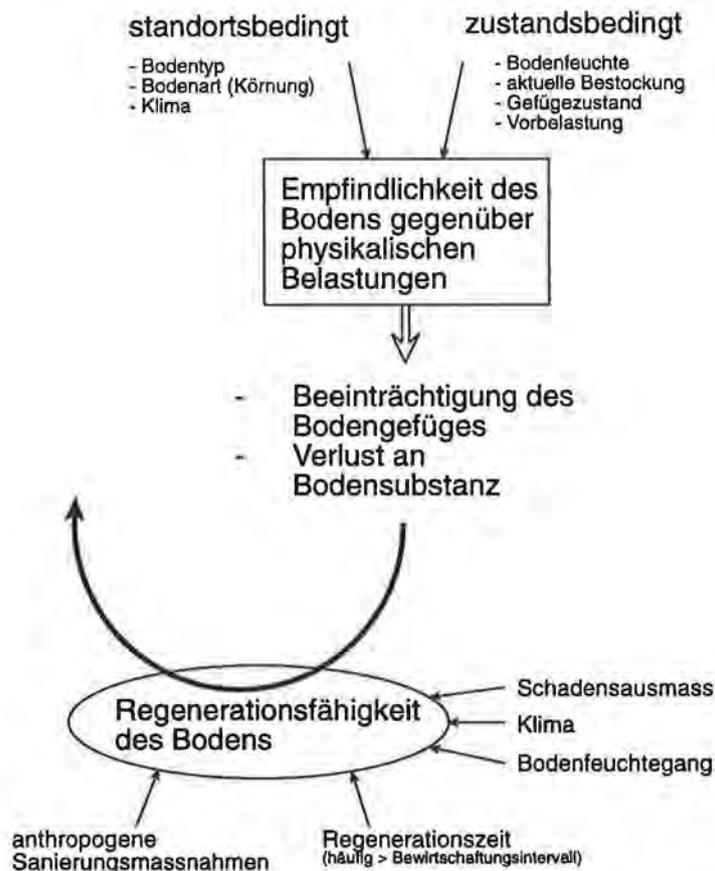


Fig. 3 Empfindlichkeit und Regenerationsfähigkeit des Bodens nach mechanischer Belastung

Aufgrund der mechanischen Reaktion des Bodens allein lässt sich beim gegenwärtigen Stand des Wissens schwer vorhersagen, welche Wirkung mechanisch-physikalische Belastungen auf die natürlichen Bodenfunktionen haben. Als Indikator hierfür wurde bei Langzeitversuchen in Schweden und in der Ukraine der Ernteertrag verwendet.<sup>4</sup> Verdichtungen im Oberboden, die bei Experimenten vorsätzlich verursacht wurden, führten in den Jahren darauf zu Ernteverlusten. Nach 4 bis 6 Jahren waren die Verdichtungen aufgrund pflanzenbaulicher Kriterien nicht mehr feststellbar. Doch auch der land- oder forstwirtschaftliche Ertrag ist kein hinreichendes Mass zur Abschätzung der Regenerationsfähigkeit des Ökosystems Boden. Hängt dieser doch auch stark von

<sup>4</sup> Um die Lockerungswirkung des Pflügens zu prüfen, wurde der Boden während fünf Jahren jeweils unmittelbar vor dem Pflügen an der Oberfläche stark verdichtet. Infolge dieser Verdichtungen nahm der Ertrag von Jahr zu Jahr ab. Nach 4 bis 5 Jahren stabilisierten sich die Erträge auf einem tieferen Niveau. Nachdem das zusätzliche Verdichtungsverfahren eingestellt worden war, wurde der Boden in der ursprünglichen Weise weiterhin gepflügt. Innert 4 bis 5 Jahren stiegen die landwirtschaftlichen Erträge wieder auf das ursprüngliche Niveau. Hieraus schlossen die Wissenschaftler, dass negative Effekte auf den Ernteertrag infolge von Oberbodenverdichtungen durch jährliches Pflügen und klimatische Einflüsse in 4 bis 5 Jahren kompensiert werden können. In einem weiteren Versuch konnten nach einer zehnfachen Befahrung mit einem 8 t schweren Traktor während 5 bis 6 Jahren Ernteverluste aufgezeigt werden. Danach waren keine Verluste infolge dieser Verdichtung nachweisbar (Håkansson und Medvedev 1995).

die erforderlich ist, um alle in Kap. 1.2 aufgelisteten Bodenfunktionen und somit die Multifunktionalität des Bodens (vgl. Fig. 1) wiederherzustellen. Zur Zeit können jedoch noch keine Standards zur quantitativen Beurteilung der Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit angegeben werden (Schulin 1993).

## **2.4 Schnittstellen des physikalischen Bodenschutzes**

### **2.4.1. Räumliche Bedeutung der Bodenfunktionen**

Die in Fig. 1 abgebildeten Bodenfunktionen zeichnen sich nicht nur durch starke Wechselwirkungen untereinander aus. Sie sind auch auf sehr unterschiedlichen räumlichen Skalen von Bedeutung. Während der Boden die Funktionen «Tragfläche» und «Informationsträger» räumlich eng begrenzt auf dem Bereich des Bodenprofils erfüllt, ist die Funktion als Ausgleichskörper im Wasser- und Lufthaushalt im Bereich eines gesamten hydrologischen Einzugsgebiets von Bedeutung. Grossräumige kulturtechnische Massnahmen zur Vorflutregulierung wirken sich in der Regel auf den Grundwasserhaushalt der umliegenden Flächen aus. Dies gilt insbesondere bei künstlicher Absenkung oder Anhebung der Vorflutsohle und dadurch des Wasserspiegels mit Auswirkungen auf die Wasserspiegelhöhen und -schwankungen. Solche grossräumige Massnahmen können zu Veränderungen des Bodens auf der Skala des Bodenprofils führen und Auswirkungen auf die Funktion des Bodens als Pflanzenstandort haben.

Grossräumige anthropogene Einwirkungen auf den **Bodenwasserhaushalt** (Vorflutregulierungen, Drainagen, Bewässerungen) haben häufig den Zweck, die landwirtschaftlichen Produktionsbedingungen auf der Stufe des Bodenprofils zu verbessern. Umgekehrt kann aber auch die Landwirtschaft durch die Bewirtschaftungsform einzelner Parzellen den Zustand von Gewässern stark beeinflussen, in deren Einzugsgebieten die betreffenden Parzellen liegen. Starke Lockerung eines feinkörnigen, strukturschwachen Oberbodens hat oft Erosion bei heftigen Regenfällen zur Folge. Mit den abgeschwemmten Bodenpartikeln werden aber auch über Düngemittel eingetragene Nähr- und Schadstoffe transportiert. Auf diese Weise werden viele Oberflächengewässer, die als Vorflut dienen, eutrophiert.

Durch die Vorflutabsenkung senkt sich auch der **Grundwasserspiegel** in den dem Gewässer benachbarten Böden, das heisst der Flurabstand wird vergrössert. Dadurch können bessere (Wasserhaushalts-)Verhältnisse für bestimmte Kulturpflanzen geschaffen werden. Negative Folgen ergeben sich dadurch aber in organischen Bodenschichten, die stark belüftet und in der Folge zersetzt werden. Dies führt zu den bekannten (Moor-)Sackungen. In umgekehrter Weise lassen sich durch Vorflutanhebungen bestimmte Gebiete gezielt (wieder) vernässen, wie dies z. B. im Rahmen moderner Meliorationen für die Wiedervernässung ehemaliger Feuchtgebiete praktiziert wird (z. B. Grenchner Witi, Baudepartement des Kantons Solothurn 1993a und 1993b).

**Landwirtschaftliche Hilfsstoffe**, die auf einzelnen Parzellen in den Boden eingebracht werden, können durch das Bodenprofil ins Grundwasser gelangen. Mit dem Grundwasser können sie weitertransportiert werden und so ihre Wirkung auf einen wesentlich grösseren Raum ausdehnen, was zu negativen Effekten führen kann, zum Beispiel zur Grundwassereutrophierung durch künstlich eingebrachte Nährstoffe.

Die einseitige Bevorzugung einzelner Bodenfunktionen für die Nutzung durch den Menschen kann zu Nutzungskonflikten führen, wenn dadurch andere Bodenfunktionen beeinträchtigt wer-

den. Für eine Überbauung respektive **Versiegelung** des Bodens beispielsweise ist nur seine Tragfunktion massgebend. Die Versiegelung zerstört in der Regel aber alle übrigen Bodenfunktionen unwiderruflich.

#### 2.4.2 Querbeziehungen zu anderen Fachgebieten und in der Gesetzgebung

Entsprechend den sehr unterschiedlichen räumlichen Ausdehnungen der einzelnen Bodenfunktionen kann der physikalische Bodenschutz nicht auf die Skala des Bodenprofils begrenzt bleiben. Vielmehr muss der Schutz des Bodens vor physikalischen Belastungen als integraler Bestandteil eines umfassenden Umwelt- und Ressourcenschutzes verstanden werden. Dabei sind die wichtigen Querbeziehungen zu folgenden Fachgebieten zu berücksichtigen:

- **Gewässerschutz und Wasserbau:** Hochwasser als Auslöser von Bodenerosion; Eintrag von Bodenpartikeln und daran gebundenen Nähr- und Schadstoffen in Oberflächengewässer.
- **Land- und Forstwirtschaft:** Veränderung der Bodenstruktur durch die Bodenbearbeitung und –befahrung.
- **Bauwirtschaft:** Veränderung des Profilaufbaus und der Bodenstruktur durch Bodenumlagerung, Befahrung und Rekultivierung (z. B. Deponien),
- **Raumordnung** (Raumplanung, Kulturtechnik): Ausscheiden bestimmter Flächen für bestimmte Nutzungsarten bzw. Optimierung, insbesondere Veränderung des Bodenwasserhaushalts für die landwirtschaftliche Nutzung (Meliorationen).

Infolge der zahlreichen Schnittstellen zu anderen Fachgebieten sind mehrere nicht bodenspezifische gesetzliche Bestimmungen relevant für den Bodenschutz. Der Schutz vor übermässiger Versiegelung, Rohstoffausbeutung oder Abfalldeponierung beispielsweise wird im Raumplanungsgesetz (RPG) geregelt. Dagegen ist der Schutz der natürlichen Bodenfunktionen vor physikalischen Belastungen beim Umgang mit Boden ein Ziel des USG.

Entsprechend den oben erwähnten Querbeziehungen zu anderen Fachgebieten sind folgende gesetzliche Grundlagen von Bedeutung für den Bodenschutz, obwohl sie diesen nicht explizit zum Inhalt haben:

- Gewässerschutz- und Wasserbaugesetz
- Landwirtschaftsgesetz
- Waldverordnung
- Technische Verordnung über Abfälle
- Raumplanungsgesetz.



seits können sie mittels der funktionalen Beziehungen unter den einzelnen Indikatoren angegeben werden.

Aus der Beziehung zwischen der Bodennutzung bzw. -bewirtschaftung und der Reaktion des Bodens sind Entscheidungskriterien zur Beurteilung der ökologischen Verträglichkeit bestimmter Nutzungs- und Bewirtschaftungsformen respektive der dadurch hervorgerufenen physikalischen Prozesse abzuleiten. Einerseits sollen diese Kriterien der Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes in der Praxis dienen, indem sie die Grundlagen bilden für:

- eine standortangepasste Nutzungszuteilung auf raumplanerischer Ebene.
- Empfehlungen zu einer standortangepassten Wahl der Fruchtfolge, Mechanisierung und Anbautechnik auf Bewirtschafterebene in bezug auf die Bodenbearbeitung, mechanische Pflegemassnahmen, Ernte und Transport in der Landwirtschaft, Holzernte, Transport, Pflanzung und Schlagbaumbeseitigung in der Forstwirtschaft.
- Richtlinien für eine «gute land- bzw. forstwirtschaftliche Praxis» und somit Anleitungen zur erforderlichen Berücksichtigung der Bodenstabilität zum Zeitpunkt der geplanten Arbeitsschritte.
- Richtlinien für eine bodenökologisch verträgliche Bau- und Rekultivierungstechnik.

Andererseits sollen diese Entscheidungskriterien für die Behörden Prüfkriterien zur Überwachung des Bodenzustands sowie zum Nachweis der Verantwortlichkeit bei ökologischen Schäden im Sinne des Verursacherprinzips des USG sein.

In der praktischen Umsetzung können bodenschonende Nutzungs- und Bewirtschaftungsformen bereits aufgrund einer qualitativen Umschreibung der Zusammenhänge zwischen Bodenbewirtschaftung und Reaktion des Bodens definiert und zugeteilt werden. Im Streitfall ist das Verursacherprinzip mit quantitativen Nachweisen aber weitaus wirkungsvoller anzuwenden.

Wesentlich ist in diesem Zusammenhang die Frage nach der Messbarkeit der Indikatorgrössen. Für die Bestimmung von **Richtwerten** sollte der Messaufwand der Dynamik der einzelnen Parameter entsprechen. Langsam ändernde Grössen, welche hauptsächlich standortbedingt sind wie zum Beispiel Bodenart und Profilaufbau, können exakter und aufwendiger bestimmt werden. Diese können in «Bodenempfindlichkeitskarten» eingetragen werden. Schnell ändernde Grössen wie etwa Bodenfeuchte und Gefügestand der bearbeiteten Ackerkrume dagegen müssen einfach und für Landwirt, Forstwart oder Bauführer selbst abschätzbar sein. Nach Möglichkeit sollen hierfür einfache Faustregeln anwendbar sein. In Frage kommen beispielsweise Spurtiefe, Ausrolltests, Penetrometer- und Tensiometertests.

Bei der Erarbeitung von **Richtlinien** ist schrittweise vorzugehen. So schnell wie möglich müssen aufgrund qualitativer Erkenntnisse und Erfahrungen Anleitungen für Anbautechniken erarbeitet werden, die der Bodenempfindlichkeit angepasst sind. Diese ersten Anleitungen sind sukzessive durch neue Erkenntnisse und insbesondere auch mit quantitativen Angaben zu ergänzen. Dieses Vorgehen ist im USG vorgesehen. Die entsprechenden Richtlinien sollen durch den Bundesrat bzw. die zuständigen Bundesämter erlassen werden (Art. 33 Abs. 2 USG, Art. 6 Abs. 6 VBBo).

Für die Realisierung des physikalischen Bodenschutzes sind verschiedene **Akteure** in unterschiedlichen Arbeitsgebieten verantwortlich:

- **Politiker**
- **Interessengruppen und -verbände** (NGOs)
- **Schulen:**
  - (Fach-) Hochschulen (ETH, UNI, FH)
  - Land-, Forstwirtschafts-, Baufachschulen
  - Mittelschulen, Volksschulen
- **Forschungsanstalten** (FAL, FAT, RAC, FAW, FAM, RAP, WSL, EAWAG)
- **Behörden auf:**
  - Bundesebene (BUWAL, BLW, BWW, BRP, BEW)
  - Kantonsebene (Bodenschutzfachstellen, Landwirtschafts-, Raumplanungsämter, Naturschutzfachstellen)
  - Gemeindeebene (insb. Verantwortliche für Baurechts- und Grundstückrechtsfragen)
- **Praktiker:**
  - Landwirte
  - Forstwirte
  - Bauarbeiter, Vorarbeiter
  - Bauleiter, Planer.

### **3.2 Mittel für die Umsetzung und den Vollzug**

Folgender Ansatz soll der praktischen Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes dienen:

#### **3.2.1 Aufklärung und Motivation**

Dies ist die Aufgabe von land-, forst- und bauwirtschaftlichen Schulen und entsprechenden (Fach-)Hochschulen sowie von Politikern und Umweltschutzorganisationen (NGOs). Dabei geht es um folgende Punkte:

- **Wissensgrundlagen:** Es sind vermehrt fachliche Grundlagen über die Wirkungszusammenhänge zwischen physikalischen Bodenbelastungen und deren Folgen für die Bodenfruchtbarkeit und andere Auswirkungen auf die Umwelt zu erarbeiten. Diese Grundlagen sind in praxistaugliche Anleitungen für einen schonenden Umgang mit dem Boden bei seiner Bewirtschaftung und beim Bau von technischen Anlagen umzusetzen.
- **Motivation:** Durch Vermittlung des Wertes von ökologisch intaktem Boden als Lebensgrundlage ist das Verständnis und der Sinn des Bodenschutzes und damit die Motivation zu seiner freiwilligen Unterstützung aus ethischer Überzeugung und Verantwortlichkeit zu fördern.
- **Ausbildung:** In der praktischen land- und forstwirtschaftlichen Ausbildung ist verstärkt auf die Notwendigkeit und die Umsetzung einer standortgerechten Fruchtfolge und Bewirtschaftung hinzuweisen. Ebenso sind diejenigen Personen, die für die Einsatzplanung und Bedienung von Geräten und Maschinen auf unversiegelten Böden verantwortlich sind, so zu schulen, dass sie ihre Verantwortung gegenüber dem Boden wahrnehmen können. Es sollte ein Angebot von Kursen mit Feldübungen und entsprechender Literatur geschaffen werden, auf denen das Fachwissen zu einem bodenschonenden Maschineneinsatz auch ausserhalb von Schulen erworben werden kann. Der Besuch solcher Kurse sollte durch eine Bescheinigung nachgewiesen werden können.



*Fig. 5 Von der forstlichen Bodenkunde der WSL werden jedes Jahr Kurse für Forstwartvorarbeiter und Forstmaschinenführer angeboten, die den möglichst bodenschonenden Einsatz von Forstmaschinen zum Thema haben. Hier beurteilen Kursteilnehmer die Verdichtung in Waldböden, die durch Befahrung mit Forstmaschinen entstanden ist.*

### 3.2.2 Beurteilungs-, Mess- und Kontrollgrößen

Beurteilungs-, Mess- und Kontrollgrößen sollen einerseits dem Bewirtschafter konkrete Hinweise über die aktuelle Empfindlichkeit des Bodens und die Einwirkungen der Bewirtschaftungsweise liefern. Andererseits sollen sie den Behörden dazu dienen, die Nachhaltigkeit bestimmter Bewirtschaftungsformen im Sinne des physikalischen Bodenschutzes zu überprüfen. Diese Größen sollen folgende Aspekte berücksichtigen:

- **Standortbezogene Daten:** Als Planungsgrundlage für die Bewirtschaftung und für Bauprojekte ist die Verdichtungsempfindlichkeit zu kartieren. Als primäres Beurteilungskriterium ist die Vorbelastung mit einzubeziehen, die aus der Drucksetzungskurve zu ermitteln ist.
- **Physikalische Richtwerte:** Zur Erfolgskontrolle müssen auf der Wirkungsseite geeignete Merkmale der qualitätsbestimmenden physikalischen Eigenschaften des Bodens beobachtet werden. Primär in Frage kommen als messbare Parameter der standortbedingten Empfindlichkeit der Anteil an Grobporen, die Vorbelastung und die Luftdurchlässigkeit bei Feldkapazität. Nur in Bezug auf den Grobporenanteil ist zur Zeit eine ausreichende Datengrundlage zur Festlegung eines Richtwertes vorhanden. Die wichtigsten messbaren Parameter der zustandsbedingten Empfindlichkeit sind dabei der Wassergehalt und die Saugspannung.

Die Gefahr ökologischer Schäden droht jedoch nicht erst, wenn einzelne Richtwerte über- bzw. unterschritten sind, sondern bereits bei rascher Verschlechterung der entsprechenden Bodenkennwerte. Daher muss der aktuelle Bodenzustand möglichst flächendeckend und in

regelmässigen Zeitabständen mittels Monitoring überprüft werden. Die Beobachtungsintervalle sind der Geschwindigkeit der Veränderung der Bodenkenngrössen anzupassen. Grundsätzlich müssen sie 5 bis 10 Jahre umfassen, bei negativer Entwicklung des Bodens müssen sie eventuell wesentlich gekürzt werden. Nur so können die zur Schadensvermeidung notwendigen Vorkehrungen rechtzeitig getroffen werden.

- **Erweiterte Typenprüfung von Geräten und Maschinen:** Auf der Ursachenseite gilt es, Grenzwerte für zulässige mechanische Belastungen bei gegebener Bodenempfindlichkeit festzulegen. In Ergänzung dazu sollte eine erweiterte Typenprüfung für land- und forstwirtschaftliche Fahrzeuge eingeführt werden. Es sollten Kennzahlen zur Lastverteilung und Kraftübertragung auf den Untergrund sowie besondere Effekte bei der Bodenbearbeitung bei typischen Arbeitsabläufen land- und forstwirtschaftlicher Fahrzeuge und Maschinen ermittelt werden. Beispiele solcher Effekte sind die Druckausbreitung unter Fahrwerken und die flächenhafte Bodenbeanspruchung in Abhängigkeit von Maschinenkonfiguration und -einstellung. Diese Kennzahlen sind nicht nur im Hinblick auf die Gefahr der Bodenverdichtung, sondern auch der Erosion zu bestimmen. Schliesslich geht es darum, den Einsatzbereich land- und forstwirtschaftlicher Fahrzeuge und Geräte abzugrenzen.

Aus der Typenprüfung sollen Anweisungen zur Konstruktion bodenschonender Landmaschinen abgeleitet werden. Als allgemeine Kriterien gelten hierfür zumindest die Radlasten, der Kontaktflächendruck sowie allfällige «Multipasseffekte» aufgrund der Anzahl erforderlicher Überfahrten für einen Arbeitsgang.

Ein besonderes Augenmerk ist auf Geräte und Maschinen zu richten, die mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auch bei sogenannt fachgerechtem Einsatz nicht tolerierbare Verdichtungen hervorrufen. Sie sollten nicht zugelassen werden oder nur für Böden, deren standörtliche Empfindlichkeit einen bestimmten Wert nicht überschreitet. Analoges kann auch für ganze Anbausysteme eingeführt werden.

- **Selbstkontrolle:** Als Grundlage für die Selbstkontrolle der für mechanische Bodenbelastungen Verantwortlichen sind einfache feldtaugliche Tests und Beurteilungskriterien zu entwickeln. In Betracht zu ziehen sind hierzu unter anderem Eindring-Sonden in Kombination mit Bodenfeuchtebestimmungen und Kriterien auf der Grundlage von Spurtiefe und Spurform (randliche Aufwölbung) unter Berücksichtigung von Radlast und Kontaktflächenprofil.

### 3.2.3 Empfehlungen, Richtlinien, Vorschriften und Lenkungsmassnahmen

Diese sind von den Behörden auf Bundes-, Kantons- oder Gemeindeebene zu initiieren und als rechtskräftig zu erklären. Dazu gehören:

- **Bestimmung der Nutzungseignung** des Bodens unter Berücksichtigung seiner Empfindlichkeit und Regenerationsfähigkeit: Bereits auf der Stufe der Raumplanung sollte sich die Einteilung in Nutzungszonen neben den übrigen Standortkriterien verstärkt auf der Basis der Bodenfruchtbarkeit und -empfindlichkeit bzw. Regenerationsfähigkeit abstützen. Das Umweltministerium Baden-Württemberg (1995) beispielsweise hat einen Leitfaden erarbeitet, mit dem insbesondere auch dem Bauen «auf der grünen Wiese» Einhalt geboten werden soll (Prinzip der Flächenerhaltung, vgl. Kap. 2.1).

Innerhalb einer bestimmten Nutzungszone sollte die Bewirtschaftungsweise auf die Empfindlichkeit und Regenerationsfähigkeit des Bodens abgestimmt werden. Daraus ergibt

sich insbesondere für die Landwirtschaftszone die Pflicht zur Wahl einer bodenökologisch verträglichen Fruchtfolge. Das heisst, alle für die geplanten Kulturen nötigen Arbeitsschritte sind zu den nötigen Zeitpunkten mit den zur Verfügung stehenden Geräten durchzuführen, ohne dem Bodenökosystem bleibende Schäden (vgl. Kap. 2.3) zuzufügen. Als Grundlage hierzu sollten **Bodenempfindlichkeitskarten** analog zu den Gefahrenkarten für Lawinen und andere Naturgefahren erstellt werden. Ein erster Schritt in diese Richtung wurde für den Kanton Basel-Landschaft bereits getan (Bau- und Umweltschutzdirektion Kanton Basel-Landschaft 1998).

- **Richtlinien zur guten fachlichen Praxis:** Der schonende Umgang mit Boden sollte als Bestandteil von Richtlinien zur guten fachlichen Praxis bei der Bewirtschaftung von Böden und beim Bau von Anlagen beschrieben und geregelt sein. Solche Richtlinien sollten durch die Bodenkundliche Gesellschaft anerkannt sein (Schulin 1995). Regeln zur guten fachlichen Praxis sind insbesondere für die Land- und Forstwirtschaft, den Strassenbau und den Bau unterirdisch verlegter Leitungen erforderlich. Als Leitfaden können hierzu grundsätzlich die Bodenschutzrichtlinien für den Bau unterirdisch verlegter Rohrleitungen dienen, die das Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW) 1993 erlassen und 1997 revidiert hat. Eine weitere Grundlage können die Merkblätter des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK 1995) bilden.
- **Materielle Anreize** für die Bewirtschafter: Die Entrichtung von ökologischen Ausgleichszahlungen sollte von der schonenden Bewirtschaftung des Bodens auch in bezug auf die physikalischen Belastungen abhängig gemacht werden. Hierzu sind neben dem Zustand des Bodens und den angebauten Kulturen auch die auf dem Feld zum Einsatz kommenden Geräte zu berücksichtigen. Unter den Mindestanforderungen zur Anerkennung eines Anbausystems als Integrierte Produktion werden bereits heute erosionshemmende Anbautechniken erwähnt (Bundesamt für Landwirtschaft 1996, Art. 9 DZV). Eine Erweiterung der Mindestanforderungen auf den Schutz gegen Bodenverdichtungen wäre durchaus sinnvoll.  
Zudem sollten Labels für bodenschonende Geräte und Maschinen sowie Branchenvereinbarungen in bezug auf bodenschonende Anbauweisen zu Wettbewerbsvorteilen unter den Lohnunternehmen führen.

#### 4. Physikalischer Bodenschutz in der Praxis

In diesem Kapitel werden konkrete Beispiele für in der Schweiz häufig auftretende physikalische Bodenschäden sowie deren Hauptursachen erläutert. Zudem werden wirkungsvolle Präventionsmassnahmen aufgezeigt. Insbesondere sollen die in Kap. 3.1 genannten Akteure konkrete Hinweise erhalten, wie sie mit ihren Möglichkeiten und Pflichten beitragen können, den physikalischen Bodenschutz in der Praxis umzusetzen. An dieser Stelle ist auch auf die umfassende Synthese von Mosimann (1996) hinzuweisen, die die Gefährdungssituation der Böden in der Schweiz flächendeckend erläutert.

## **4.1 Mechanische Beeinträchtigungen**

### **4.1.1 Überschüttung, Bodendurchmischung, Rekultivierung**

**Überschüttung** bedeutet das Aufbringen von Bodenmaterial auf einen natürlich gelagerten oder bereits teilweise abgetragenen Boden zwecks Entsorgung von Aushubmaterial oder zur Beseitigung von topographischen (Geländemulden) oder pedologischen (Vernässungen) Bewirtschaftungsschwernissen. Unabdingbare Voraussetzung für eine Überschüttung ist der vorgängige, getrennte Abtrag von Ober- und Unterboden.

**Schadensbilder:** Eine künstliche Überschüttung (Geländeänderung) ist entweder lose geschüttet, also anfänglich überlockert und sehr instabil, oder sie wird durch das meist maschinelle Auftragen des Humus auf den Unterboden verdichtet. In beiden Fällen fehlt zu Beginn eine stabile Sekundärstruktur, welche ein kontinuierliches Hohlraumsystem bildet. Wird die Auffüllung befahren, kommt es oft zu Verknetungen, welche insbesondere im Unterboden kaum mehr gelockert werden können. Zudem führen plötzlich ändernde Porendurchmesser an der Schichtgrenze (Porensprung) dazu, dass das Porenwasser aus der frisch geschütteten Schicht nicht in die unterliegende Schicht abgeleitet werden kann.

**Schadensvermeidung:** Auf die Schadensursachen und die Möglichkeiten zur Schadensvermeidung wird nachfolgend im Zusammenhang mit den Rekultivierungen näher eingegangen.

**Bodendurchmischung** bedeutet das Vermengen und Ausebnen von natürlich gelagertem oder künstlich aufgeschüttetem Boden, um topographische oder pedologische Einschränkungen für die land- oder forstwirtschaftliche Nutzung zu beseitigen. Sie können zum Ziel haben, die Luft- und Nährstoffverhältnisse im Wurzelraum oder die Bearbeitbarkeit des Bodens zu verbessern.

**Schadensbilder:** Durch solche Vermischungen werden die ursprüngliche Horizontabfolge, die Horizontmächtigkeit oder die Horizonteinheitlichkeit verändert. Der Boden wird so destabilisiert. Dadurch wird das Verdichtungsrisiko stark erhöht. Problematisch ist kurzfristig die Zerstörung der Bodenstruktur, langfristig die Veränderung des Chemismus. Letzteres ist der Fall, wenn beispielsweise karbonathaltiger Untergrund mit karbonatarmem Boden vermengt wird. Erkennbar ist der Schaden vor allem aufgrund der Veränderung morphologischer Kriterien, das heisst keine einheitlichen Horizonteigenschaften, das Fehlen klarer Horizontgrenzen, standortuntypische Abfolgen bzw. Eigenschaften von Horizonten. Es gibt jedoch kaum eindeutige Messgrößen. Hinweise erhält man möglicherweise aufgrund erhöhter Variabilität in kleinsten Flächen- bzw. Volumeneinheiten, welche für die jeweiligen Horizonte und Tiefen nicht typisch ist (Bodenart/Skelettgehalt, Sorptionseigenschaften, pH). Auch standortuntypische Eigenschaften bezüglich organ. C- oder Kalkgehalt, Körnung, Skelettanteil, etc. können Hinweise geben.

**Schadensursachen:** Bei der landwirtschaftlichen Nutzung sind vor allem meliorative Eingriffe wie Tiefpflügen, Tieflockern mit Spezialspatenmaschine oder Schwergrubber in bestehenden, standorttypisch geschichteten Böden für Bodendurchmischungen verantwortlich. Auch die Einarbeitung von zusätzlich aufgebrachtem Material (Aushub, etc.) bei ungenügend abgetrocknetem Boden ist kritisch und häufig die Ursache von Schäden. Bei Bauarbeiten sind es Terrainveränderungen mit Baggern oder das Überschütten bzw. Einarbeiten von Aushubmaterial mit Baggern, die zu Bodendurchmischungen führen.

In gewissen Fällen können Bodendurchmischungen erwünscht sein. In der nachfolgenden Auflistung ist der Übergang vom erwünschten bis zum unerwünschten Ausmass der Bodenveränderung graduell zunehmend von 1) bis 5):

- a) Grossflächige, nur knapp unter die übliche Bearbeitungstiefe reichende landwirtschaftliche Eingriffe mit Spatenmaschinen oder Grubbern zur gelegentlichen tieferen Lockerung zwecks Beseitigung von oberflächennahen Verdichtungen, die in der Regel am Übergang zwischen der Bearbeitungsschicht und dem Unterboden liegen.
- 2) Kleinflächige Terrainkorrekturen innerhalb ackerbaulich meist gut nutzbarer Schläge, um in einem stark coupierten Geländeausschnitt die Bewirtschaftung zu vereinfachen (Einebnung) oder um in einer kleinen, durch Grundwasser vernässten Mulde das Verdichtungsrisiko bei der Bewirtschaftung zu vermindern.
- 3) Grossflächige, tiefreichende Bodenlockerung bzw. -vermischung, um Staunässe oder intensive, tiefreichende Verdichtungen zum Beispiel mit Spezialspatenmaschinen zu beheben oder um zum Beispiel durch Tiefpflügen den Abbau der organischen Substanz durch Einmischen von anstehendem oder zugeführtem mineralischem Material zu verzögern.
- 4) Unangepasstes, unsorgfältiges Vorgehen beim Wiederverfüllen von Baugruben.
- 5) Grossflächige Terrainveränderungen im Sinne erheblicher Veränderungen von Standorteigenschaften oder zur nicht statthaften «Entsorgung» von Aushubmaterial.

**Schadensvermeidung:** Die Durchmischung bzw. Homogenisierung kann ein durchaus beabsichtigter Bearbeitungseffekt bei der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung sein. Das Ziel kann es sein, den Wurzelraum oder die biologisch aktive Schicht auszudehnen oder organische Substanz bzw. Bodenmaterial mit erwünschten Eigenschaften einzumischen. Schäden lassen sich vermeiden, wenn

- klare Zielvorgaben vorhanden sind (Vorstellungen von den Standorteigenschaften vorher/nachher) und die erzielbaren Verbesserungen den Eingriff rechtfertigen (Erleichterung einer standortgemässen, risikoärmeren Bewirtschaftung ohne permanente Sanierungsmassnahmen).
- die Ausführung des Baus bzw. Eingriffs standortgerecht geplant wird und ein klares Konzept für die Folgebewirtschaftung existiert (Abklärung des Bearbeitungsbedarfes, zeitliche Abfolge der Arbeitsschritte, Materialwahl, Arbeitstiefe, Maschineneinsatz).
- die Arbeit fachgerecht, nach «guter landwirtschaftlicher Praxis» durchgeführt wird, das heisst insbesondere, dass
  - a) eine minimal notwendige Bodenabtrocknung maschinenspezifisch eingehalten wird,
  - b) geeignete Maschinen eingesetzt werden (möglichst kleines Gewicht, bodenschonende Arbeitsweise),
  - c) eine schonende Folgebewirtschaftung erfolgt, die der natürlichen Strukturbildung ausreichend Zeit einräumt (sofortige Wiederbegrünung bzw. geeignete Fruchtfolgegestaltung mit extensiver Bewirtschaftung ohne hohe Druckbelastungen).
- möglichst schriftliche Verpflichtungen zur Einhaltung der Qualitätskriterien bzw. zur Absicherung der Vorgehensweise getroffen werden.

**Rekultivierung** bedeutet die technische Wiederherstellung eines umgelagerten oder abgetragenen Bodens, um eine vorgesehene Nachnutzung zu ermöglichen. Besondere Bedeutung kommt der

Wiederherstellung von Flächen für die Land- und Forstwirtschaft sowie für den Naturschutz zu, da diesen Nutzungen durch die zunehmende Versiegelung immer weniger Raum verbleibt. In der Schweiz nahmen die versiegelten Flächen von 1986 bis 1996 von 168'665 ha auf 213'421 ha oder um gut 25 % zu (Bundesamt für Statistik, 1986 und 1996). Für die Wiederherstellung des Standorts ist in der Forstwirtschaft der Begriff «Wiederaufforstung» gebräuchlicher, im Naturschutz spricht man eher von «Renaturierung».



*Fig. 6 Rekultivierung der Abbaustelle des Zementwerkes in Rekingen (AG)*

**Schadensbild:** Im Gegensatz zu natürlich gewachsenen Böden sind der Aufbau und die Eigenschaften künstlicher Schüttungen nicht durch natürliche Pedogenese entstanden. Dem jahrtausendelangen kontinuierlichen Prozess der Strukturbildung, verursacht durch Schwerkraft, Wasser, Wind, Vegetation und den mit ihr vergesellschafteten Mikroorganismen und Bodentieren können Rekultivierungen als kurzfristige technische Eingriffe nicht gleichkommen.

Die Mächtigkeiten von Unter- und Oberboden sind bei Rekultivierungen in der Regel, unabhängig von den Geländeformen, einheitlich. Da das Bodenmaterial oft lastwagenweise von den verschiedensten Orten herantransportiert wird, können künstliche Schüttungen aber insbesondere betreffend der Zusammensetzung des Bodenmaterials und des Bodenwasser- und -lufthaushalts starke Inhomogenitäten aufweisen (Schafer 1988). Bei der Kartierung können geologische oder geomorphologische Hinweise deshalb nicht, wie bei natürlich gewachsenen Böden, für die Extrapolation von punktuellen Bodeninformationen zu flächenhaften Aussagen verwendet werden. Eine weitere Ursache für Inhomogenitäten ist oft auch das unterentwickelte Gefüge des frisch geschütteten Bodens: Stark homogenisierte Bereiche liegen in unmittelbarer Nachbarschaft zu groben Kluten, Steinen oder Hohlräumen. Die Schüttung kann aber auch zu einer Homogenisie-

rung des Gefüges über das ganze Profil führen, die erst mit der Strukturregeneration allmählich wieder verschwindet (Friedli, 1997).

Die Porendurchgängigkeit ist noch längere Zeit nach der Rekultivierung nicht gewährleistet. Zusätzlich stellt die Rohplanie auf einer Rekultivierung normalerweise eine Stauschicht dar. Das infiltrierende Wasser kann daher nicht in die Tiefe versickern, sondern muss seitlich abgeführt werden können. Vernässungen sind die am meisten verbreiteten Probleme, die Landwirte auf Rekultivierungen beklagen. Rekultivierte Böden weisen zudem oft bis an die Bodenoberfläche einen hohen Skelettgehalt auf (viele Steine, auch mit grossen Durchmessern).

**Schadensursachen:** Wegen der überlagerten Effekte der einzelnen Arbeitsschritte einer Rekultivierung bis zur Folgenutzung sind die tatsächlichen Ursachen einer Vernässung nachträglich oft schwierig nachzuweisen. Bei Vernässungen im Bereich der Rohplanie, des Unterbodens und der Grenze zwischen Ober- und Unterboden sind Fehler bei der Rekultivierung selbst anzunehmen. Gründe dafür können zu lange Schläge ohne Drainage oder Unebenheiten auf der Rohplanie sein, oder die Verdichtung des Unterbodens beim flächenhaften Auftrag des Oberbodens. Für Verdichtungen an der Bodenoberfläche ist dagegen meistens der Bewirtschafter verantwortlich. Stark verdichtete Stellen innerhalb der Bodenhorizonte entstehen beim Einbau von zu feuchtem Material oder bei zu intensiver mechanischer Belastung, wie vor allem auf Anhäupfern, wo der Traktor wendet, oder bei Einfahrten für Landwirtschafts- oder Rekultivierungsfahrzeuge.

**Schadensvermeidung:** Für die Rekultivierung von Böden für die Landwirtschaft existieren in der Schweiz verschiedene Richtlinien und Merkblätter, von der BGS, von Forschungsanstalten, Kantonen, dem BUWAL und anderen interessierten Gruppen. Diese Richtlinien werden laufend ergänzt oder überarbeitet<sup>5</sup>.

Für eine erfolgreiche Rekultivierung sind folgende Punkte entscheidend:

- Lockerer Auftrag des Unter- und Oberbodens bei trockenen Verhältnissen. Zur Stabilisierung der Bodenschichten sollte eine Zwischenbegrünung durchgeführt werden, welche mindestens ein Jahr dauert bzw. die beibehalten wird, bis sich eine Regenwurmpopulation eingestellt hat.

---

<sup>5</sup> Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz BGS/SSP und Baudepartement des Kantons Aargau, 1984: Kiesabbau und Landwirtschaft (am Beispiel des Kantons Aargau). BGS Dokument 1. Juris Druck und Verlag. Zürich

Direktion der öffentlichen Bauten und Direktion der Volkswirtschaft des Kantons Zürich, 1991: Richtlinien für die Durchführung von Rekultivierungen (von Auffüllungen, Geländeänderungen, Deponien, Kiesgruben, Ablagerungen, Installationsplätzen, Baupisten). Zürich

Eidg. Forschungsanstalt für landwirtschaftlichen Pflanzenbau FAL (ehem. FAP) Reckenholz und Schweiz. Fachverband für Sand und Kies FSK (Hrsg.), 1987: Kulturland und Kiesabbau. Richtlinien zur Rückführung von Abbaugebieten in die Landwirtschaft. Zürich-Reckenholz und Bern

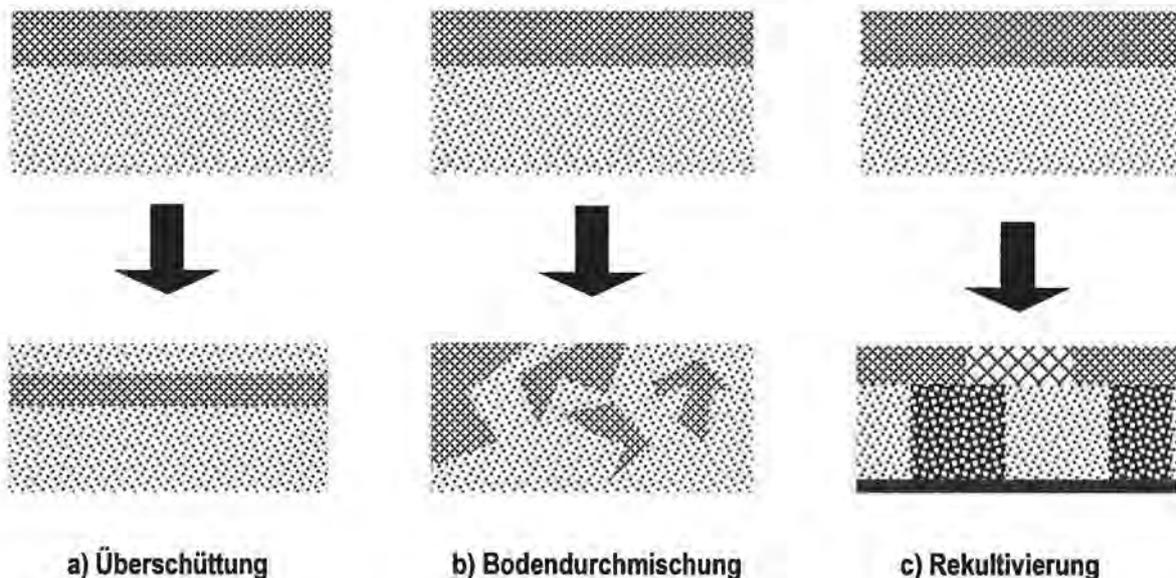
Salm Ch., 1996: Bodenschutz beim Bauen (Handbuch). Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL. Bern

Technische Verordnung über Abfälle TVA vom 10. Dez. 1990

VSBo-Mitteilung Nr. 4, 1993: Verwertung von abgeschältem Oberboden. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL und Eidg. Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene IUL (ehem. FAC). Bern und Liebefeld

Umweltministerium Baden-Württemberg, 1991: Erhaltung fruchtbaren und kulturfähigen Bodens bei Flächeninanspruchnahmen. Luft-Boden-Abfall, Heft 10

- Befahrung des Unterbodens bei der Humusierung nur mit leichtem Gerät. Wo immer möglich sollte das Befahren ganz vermieden werden. Möglich ist dies zum Beispiel durch Auftrag des Humus von Sandpisten oder von der Rohplanie aus.



**Fig. 7 Überschüttung, Bodendurchmischung, Rekultivierung:** Alle drei Formen sind anthropogene Eingriffe in das Bodenprofil. Die Bodenhorizonte werden in ihrer Mächtigkeit und Abfolge gestört. Insbesondere bei Rekultivierungen wird oft innerhalb eines Horizontes Bodenmaterial unterschiedlicher Herkunft vermischt. Alle drei Eingriffe führen zu einer Überlockerung des Bodens, wodurch seine Verdichtungsempfindlichkeit stark erhöht wird.

#### 4.1.2 Sackungsverdichtung, Scherungen, Knetung und Homogenisierung

Bei Sackungsverdichtungen handelt es sich um die Kompaktion des Bodengefüges durch Normal- und Schubspannungen, verursacht durch land- und forstwirtschaftliche Fahrzeuge sowie durch Baumaschinen (Diserens und Bucher 1997). Bei Scherungen werden in sich mehr oder weniger natürlich strukturierte Bodenbereiche oder Bodenpartikel durch Schubspannungen gegeneinander verschoben (Grundbruch). Knetung und insbesondere Homogenisierung können das Gefüge vollkommen umwandeln. Dabei wird es nicht in jedem Fall komprimiert, sondern im Extremfall können auch neue Hohlräume geschaffen werden.

**Schadensbilder:** Sackungsverdichtungen beinhalten bleibende Volumenverminderungen bzw. die Erhöhung der Lagerungsdichte. Sie führen in erster Linie zum Verlust von Grobporen sowie häufig zum Unterbruch der Poren. Schäden treten bereits auf, wenn einzelne, auch dünne Schichten im Bodenprofil verdichtet sind. Die Konsequenzen sind eine verminderte Wasser- und Luftleitfähigkeit, ein reduziertes Infiltrationsvermögen und eine eingeschränkte pflanzennutzbare Gründigkeit. Augenfällige Folgeprobleme sind Staunässe nach Regenperioden und Trockenstress für die Vegetation nach längerer Trockenheit. Bei schluffreichen Böden kann es zu Verschlammungen und Verkrustungen sowie, je nach topographischer Neigung der Bodenoberfläche, auch zu Erosion führen.

Die Schadensmerkmale von Scherung und Knetung können je nach Ausprägung der Druckeinwirkung sehr unterschiedlich sein:

- **Scherung:** Bruchzonen mit gestörter (ev. erhöhter) Leitfähigkeit und verändertem (evtl. erhöhtem) Porenvolumen zwischen Bodenbereichen, die im Nahbereich ( $\mu\text{m}$ - bis  $\text{cm}$ -Bereich) der Bruchzone verdichtet sein können, im Fernbereich ( $\text{cm}$ -Bereich und mehr) dagegen mehr oder weniger unbeeinflusst sind.
- **Knetung:** Meist stark verdichtete Teilbereiche mit erheblicher Abnahme von Porosität und Leitfähigkeit. Je nach Druckeinwirkung (Spannungsrichtung und -grösse) und Bodenzustand (Scherfestigkeit bzw. Bodenfeuchte) ist auch eine Neubildung von Hohlräumen möglich. Diese sind aber selten miteinander verbunden. Die Leitfähigkeit im Horizontmassstab bleibt verringert oder wird zumindest nicht erhöht.
- **Homogenisierung:** Zerstörung der Sekundärstruktur, Übergang zu Kohärent- und Einzelkornstruktur (Primärstruktur), meistens verbunden mit Verdichtung und Verringerung der Wasser- und Luftleitfähigkeit.

Unter Umständen treten mehrere Phänomene nebeneinander auf: Im Horizontmassstab kann die Leitfähigkeit durch Makroporen in Scherbereichen und Schwundrissen erhöht sein, während dazwischenliegende Bodenvolumen (Makroaggregate, Kluten) verdichtet und sehr wenig leitfähig sind.

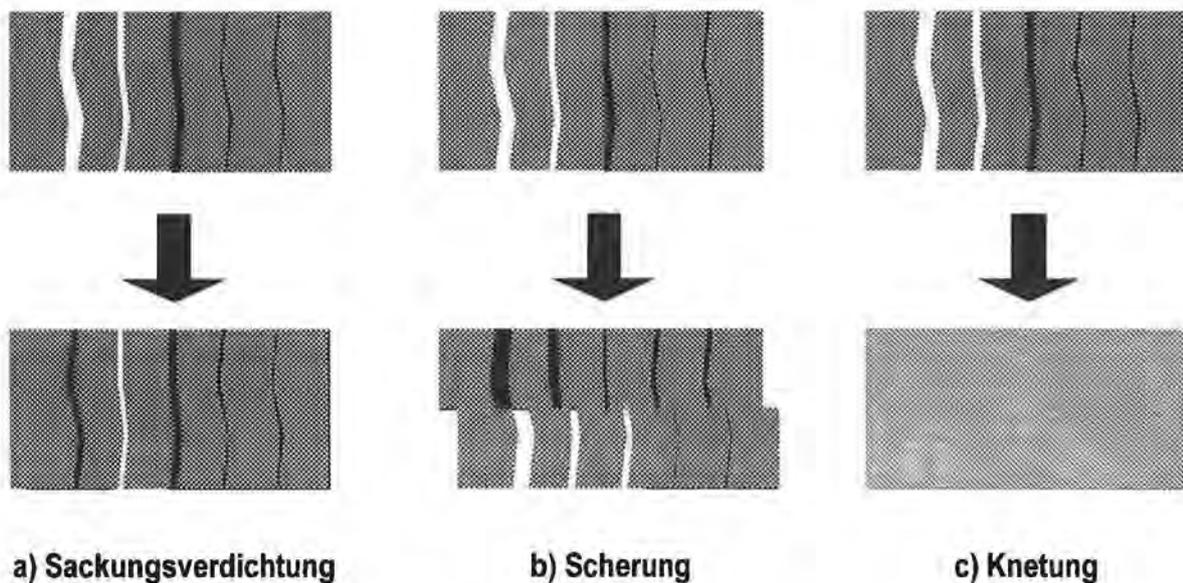


Fig. 8 a) **Sackungsverdichtung:** Eine Sackungsverdichtung führt zur Zerstörung von Grobporen. Dadurch nimmt das Porenvolumen gesamthaft ab, der relative Anteil an Mittel- und Feinporen kann aber erhöht werden.  
 b) **Scherung:** Eine Scherung führt nicht in jedem Fall zur Erhöhung der Lagerungsdichte. Die Bodenporen werden jedoch abgesichert und sind danach nicht mehr durchgängig.  
 c) **Knetung:** Knetung bedeutet die Zerstörung der Sekundärstruktur. Beim Übergang zu Kohärent- oder Einzelkorngefüge (Primärstruktur) redet man von Homogenisierung.

**Schadensursachen:** Die Ursache der Sackungsverdichtungen liegt in der Regel in der Belastung des Bodens (Befahrung, Bearbeitung) mit schweren land- und forstwirtschaftlichen Geräten bzw. Baumaschinen und -fahrzeugen, wenn der Boden die entsprechende Tragfähigkeit (Vorbelastung, Scherfestigkeit) nicht aufweist. Dabei sind zwei Komponenten zu unterscheiden: Die durch seinen Aufbau gegebenen Festigkeitseigenschaften des Bodengerüsts und die kurzfristigen Schwankungen der Tragfähigkeit in Abhängigkeit von der Witterung und dem Gebietswasserhaushalt.

Die Wahl von Bewirtschaftungsverfahren und der Einsatz von Geräten oder Fahrzeugen ohne Rücksicht auf die standörtlich gegebene Empfindlichkeit führt oft zu Situationen, in denen die mit einer bestimmten Form der Bewirtschaftung verbundenen Belastungen zu einem ungünstigen Zeitpunkt auf den Boden einwirken. Bei Belastungen wird der momentane Feuchtigkeitszustand, und damit die zustandsabhängige Komponente der Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens, in der Regel zu wenig berücksichtigt. Dies rührt zum einen daher, dass den Verantwortlichen keine

geeigneten Methoden zur Beurteilung der Tragfähigkeit des Bodens zur Verfügung stehen bzw. bekannt sind. Zum andern sind sie von wirtschaftlichen Zwängen, die einem bodenschonenden Einsatz von Geräten und Maschinen entgegenstehen, nicht in genügendem Masse frei.

Auch bei Scherung und Knetung sind Befahrungen durch land- und forstwirtschaftliche Fahrzeuge sowie Baumaschinen bei instabilem (z.B. nassem) Bodenzustand bzw. mit zu hohen Radlasten oder Kontaktflächendrücken wichtige Ursachen. Im Unterschied zu den Sackungsverdichtungen werden hier allerdings oft andere ungünstige Ausprägungen und Kombinationen von Ursachen wirksam: weicher, «plastischer» Boden und intensive Beanspruchungen, insbesondere bei dynamischen Belastungen (z. B. Vibrationen). Auch bei der Bodenbearbeitung in der landwirtschaftlichen Nutzung stehen extreme Ursachenkonstellationen im Vordergrund: instabiler, entweder sehr brüchiger, «pulverisierter» oder plastischer, «verknerteter» Boden in Verbindung mit sehr hohen Druckspannungen (z.B. durch schnell rotierende Werkzeuge und geringer Vorschubgeschwindigkeit).



*Fig. 9 Verdichtung in Fahrspuren wird vielfach durch gehemmte Sickerung ersichtlich.*

**Schadensvermeidung:** Der Schutz des Bodens vor Verdichtungen durch mechanische Belastungen ist auf die freiwillige Umsetzung durch die direkt am Boden tätigen Personen angewiesen; behördliche Anordnungen von einschränkenden Massnahmen können nur extreme Bodenbeeinträchtigungen verhindern. Es wird höchstens stichprobenweise möglich sein, die Einhaltung von feuchtigkeitsabhängigen Belastungsgrenzwerten direkt zu kontrollieren. Eine Kontrolle muss auf der Wirkungsseite der Belastungen ansetzen. Hierzu fehlen aber noch geeignete Parameter und Beurteilungskriterien, die insbesondere der von Natur aus gegebenen räumlichen und zeitlichen Variabilität der Böden Rechnung tragen.

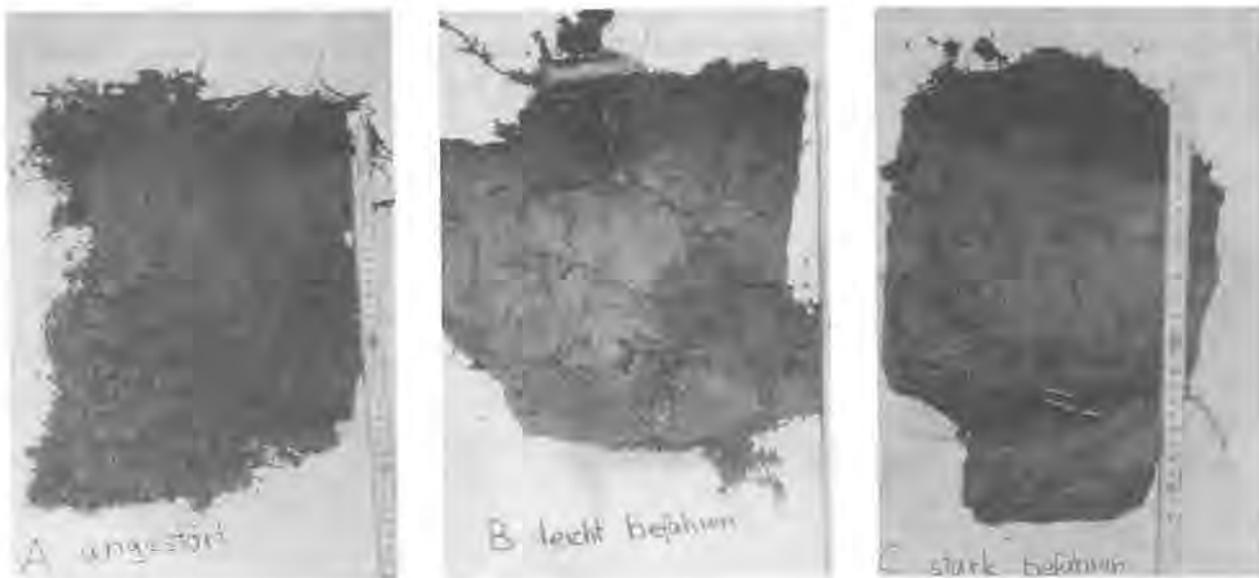


Fig. 10 Diese Fotoserie entstand in einem Waldbestand in Rüdlingen. An drei unterschiedlich stark befahrenen Standorten, die alle innerhalb einer Distanz von 60 m liegen, wurden drei Spatenstiche angebracht und die Verdichtung anhand von Gefüge und Reduktionsmerkmalen beurteilt.

- a) Spatenstich des unbefahrenen Bestandes: Natürliche Lagerung der Feinerde (lockere Struktur)
- b) Spatenstich des leicht befahrenen Bestandes: Leichte Verdichtung erkennbar (Gefüge sichtbar gequetscht)
- c) Spatenstich des stark befahrenen Bestandes: Starke Verdichtungs- und Vernässungsmerkmale erkennbar (bläuliche Verfärbung bis 15 cm Tiefe)

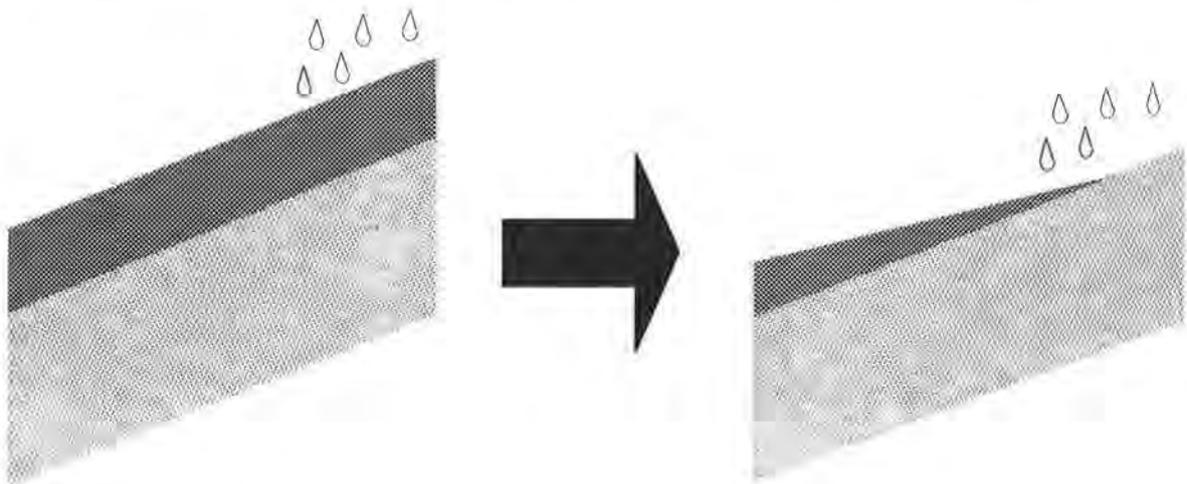
Da eine «Bodenreparatur» nur in begrenztem Ausmass möglich ist, sind die Anstrengungen ganz auf die Verhinderung von Beeinträchtigungen gemäss dem Vorsorgeprinzip zu konzentrieren. Die bestimmenden Prinzipien für den Schutz des Bodens vor Verdichtungen durch mechanische Belastungen sind also (vgl. auch Kap. 3.1)

- a) Ausbildung, Weiterbildung, Information,
- b) Eigenverantwortlichkeit: Motivation, fachliche Kompetenz und selbständige Erfolgskontrolle,

- c) **Vorsorge:** Vermeiden von schädlichen Belastungen und Anpassen der unumgänglichen Belastungen an die Empfindlichkeit des Bodens, insbesondere in Hinsicht auf die Einsatzzeiten der Maschinen. Bei Bearbeitungen ist vorerst der Bearbeitungsbedarf abzuklären (notwendige Arbeitstiefe, erforderlicher Lockerungsgrad); Gerät, Geräteeinstellung und Arbeitsgeschwindigkeit sind darauf abzustimmen. Unter Umständen ist gar keine ganzflächige Bearbeitung nötig, im Idealfall sogar eine Direktsaat möglich.

### 4.1.3 Erosion

Aufgrund der naturräumlichen Gegebenheiten der Schweiz ist vor allem der Abtrag durch Wasser für die Bodenerosion bestimmend. Hierbei kann generell zwischen zwei Schadensarten, den Abtrags- und den Aufschüttungsformen unterschieden werden. Die Schadensbilder der Abtragsformen sind sehr vielfältig. Dies ist bedingt durch die unterschiedlichen Einflussfaktoren: Niederschlag, Bodenform, Bodenzustand, Bodenbedeckung, Flurstruktur und Landnutzungsart sowie Hangneigung und Hangform. Die Schäden sind somit in der Regel nicht auf eine einzige Ursache zurückzuführen. Sie variieren sowohl nach standörtlichen Gegebenheiten als auch zeitlich mit dem Witterungsverlauf.



*Fig. 11 Erosion: Bodenerosion ist in der Schweiz hauptsächlich auf den Abtrag durch Wasser zurückzuführen. Flächenhafter Abtrag entsteht auf verschlammten Bodenoberflächen. Sammelt sich das Wasser in Traktorspuren oder Saatrillen, insbesondere bei stärker geneigten Hängen, kommt es zur sogenannten Rillenerosion. Diese Rillen können sich zu Netzwerken verbinden, was zur Talwegerosion führen kann.*

**Schadensbilder und -ursachen:** Flächenverschlämmungen entstehen vor allem auf schlecht aggregierten Böden mit geringer Bodenbedeckung. Durch die Kraft der aufprallenden Regentropfen zerfallen die Bodenaggregate. Die Bruchstücke verschliessen die Poren, der Boden verschlämmt oberflächlich und die Infiltrationskapazität nimmt ab.

Flächenhafter Abtrag entsteht, wenn wegen Oberflächenverschlämmung oder Wassersättigung im Boden das anfallende Niederschlagswasser nicht mehr vollständig infiltriert und als geringmächtige Schichtflut über den ganzen Acker läuft, ohne sich wesentlich einzutiefen. Bei diesem Vor-

gang wird das durch die Regentropfenerosion bereitgestellte Bodenmaterial abgespült. Auch Saatgut und Pflanzen können dabei ausgespült werden.

Bei zunehmender Hangneigung oder bei zunehmender Konzentration des Oberflächenabflusses in bearbeitungsbedingten Vertiefungen (Traktorspuren, Saatrillen) wird der Flächenabfluss unregelmässig und es bilden sich kleine, linienhafte Rillen. Diese einzelnen Rillen können sich auf grösseren Äckern zu Netzwerken verbinden und schliesslich zu hohen Abtragsmengen führen. In wassersammelnden Tiefenlinien im Bereich der Mittel- und Unterhänge können sich aus dem Rillen-Netzwerk tiefe Rinnen (Talwege) entwickeln. Diese sogenannte Talwegerosion verursacht hohe Bodenabträge und führt zu langen Umlagerungsstrecken des Bodenmaterials.

Bei abnehmender Transportkraft des Wassers wird das erodierte Bodenmaterial abgelagert und es bilden sich verschiedene Aufschüttungsformen. Dies ist der Fall bei abnehmender Hangneigung, nachlassender Niederschlagsintensität oder erhöhtem Fliesswiderstand der Bodenoberfläche. Der Humushorizont der ursprünglichen Bodenoberfläche wird mit Bodensedimenten überdeckt. Auch Saat und Pflanzen können verschüttet werden. Bei grossen Erosionssystemen mit linearen Abtragsformen erhöht sich die Gefahr, dass das erodierte Bodenmaterial erst ausserhalb des Ackers auf Feldwegen, Drainagegräben und Strassen abgelagert oder in angrenzende Gewässer eingetragen wird. Dadurch können einerseits Rückhaltebecken und Teiche verlanden. Andererseits beeinträchtigen die mit dem Bodenmaterial eingeschwemmten Dünger und Pflanzenbehandlungsmittel die Gewässergüte.

**Schadensvermeidung:** Von den oben erwähnten Einflussfaktoren sind primär die Flurstruktur, die Landnutzungsart, die Bodenbedeckung und der Bodenzustand direkt durch die anthropogene Nutzung beeinflussbar. Eine für die Schweiz grundlegende Arbeit zum Thema Bodenerosion wurde von Mosimann et al. (1991) verfasst. Darauf aufbauend hat der Kanton Baselland eine detaillierte Erhebung der Situation bezüglich Bodenerosion im Kanton durchgeführt sowie Strategien zur Vermeidung weiterer Schäden aufgezeigt (Bau- und Umweltschutzdirektion Kanton Basel-Landschaft 1994). Grundlagen zur Abschätzung der Erosionsgefährdung durch den Praktiker liefern Mosimann und Rüttimann (1996).

## **4.2 Hydraulische Beeinträchtigungen**

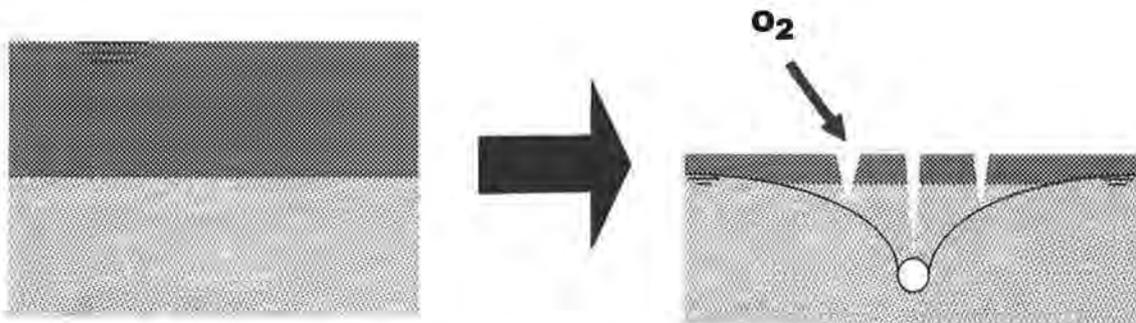
### **4.2.1 Entwässerung**

Von Bedeutung sind vor allem die technischen Eingriffe der Vergangenheit zur Entwässerung von Sumpf- und Mooren. Diese Drainagen dienten in erster Linie der landwirtschaftlichen Erschliessung oder der Melioration weiter Feuchtgebiete des Schweizer Mittellandes. Sie stellten in jedem Fall bedeutende Eingriffe in das Grundwasser- und Vorflut-Regime dar.

**Schadensbilder und -ursachen:** Die Entwässerung von Ried- und Moorböden führt zur Sackung durch Setzung, Schrumpfung, Torfmineralisation und Erosion. Als Folge ändern sich die Eigenschaften und mit der Zeit auch die landwirtschaftliche Nutzungseignung der betroffenen Böden. Die Setzung bewirkt eine Volumenverminderung und somit die Verdichtung der organischen Auflage mit verschiedenen negativen Begleiterscheinungen. Aerobe Schichten sind der Torfmineralisation ausgesetzt, welche eine weitere Verdichtung der Torfsubstanz, eine Umverteilung der Porengrössenanteile sowie eine Verminderung des Gesamtporenvolumens bewirkt. Periodi-

sche Austrocknung und Wiederbefeuchtung der obersten Torfschichten führt zu weiteren Strukturveränderungen und geringerer nutzbarer Wasserkapazität. Auch die chemischen Eigenschaften des Torfes verändern sich aufgrund der beschriebenen Prozesse. Unter anderem werden schwer abbaubare Komponenten angereichert. In der Freisetzung von Nitrat, gasförmigen Stickstoffverbindungen und Kohlendioxid sowie von akkumulierten organischen und anorganischen Schadstoffen liegt zudem ein Belastungspotential für Grundwasser und Luft.

Die Sackungsraten sind in den ersten Jahren nach einer Entwässerung besonders gross und können in der Schweiz bis zu 30 mm pro Jahr betragen. Bei wiederholter Tieferlegung der Drainagen entsteht ein Zyklus von Entwässerung, Sackung, Torfschwund, Schrumpfung und Höhenverlust. Hat die organische Auflage einmal eine kritische Mächtigkeit unterschritten, wird mineralisches Substrat durch den Pflug mit Torf vermischt.



**Fig.12 Torfsackung:** Die Belüftung torfhaltiger Bodenhorizonte führt zum Abbau der organischen Substanz, was durch die bekannten Moorsackungen augenfällig wird. Moorsackungen sind schwere Bodenschäden, die auch über geologische Zeiträume nicht regeneriert werden können.

Mit der Alterung von kultivierten, das heisst, entwässerten Moorböden geht häufig eine Verschlechterung der landwirtschaftlichen Nutzungseignung einher. Die anfangs noch gut durchlässigen Böden werden zunehmend stau- und schliesslich haftnass. Die Wachstumsbedingungen für Pflanzen verschlechtern sich und die maschinelle Bearbeitung wird durch Wasserstau und ungleichmässiges Relief erschwert. Das Stickstoff-Überangebot führt zu einer flachen (und nicht tiefreichenden) Ausbildung der Wurzeln. Dies kann die Qualität und Quantität der pflanzlichen Produkte herabsetzen. Die Zeitspanne zwischen den wiederkehrenden Meliorationsmassnahmen verkürzt sich bei schlechter werdenden Nutzungsbedingungen dauernd, wobei die Erträge und vor allem die Ertragssicherheit bei steigenden Meliorationskosten immer geringer ausfallen. Nach dem vollständigen Abbau des Torfes bestimmen der verbleibende mineralische Untergrund und die hydrologischen Bedingungen die weitere Nutzung der neu entstandenen Böden. Typisch ist die Entstehung von Anmoorgleyen auf tonigen Unterlagen. Bei Seekreidesubstraten ist von einer deutlichen Beeinträchtigung der landwirtschaftlichen Nutzungseignung auszugehen.

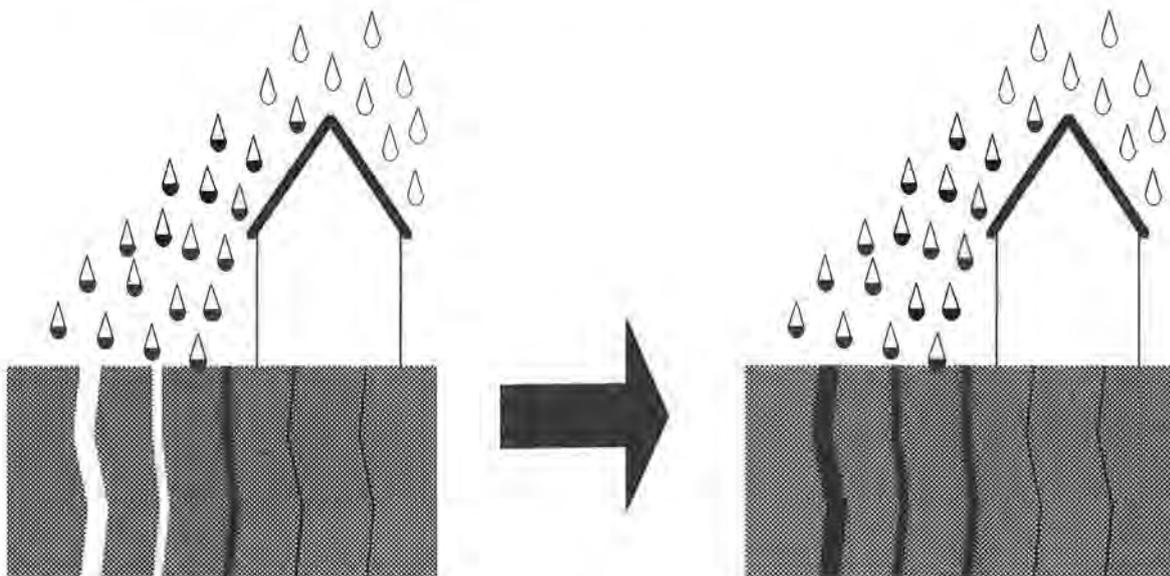
**Schadensvermeidung:** Mit Blick auf extensivere landwirtschaftliche Nutzungsformen, auf die Erhaltung der Artenvielfalt und der Vielfalt von Bodenformen sowie auf die erwähnte, zusätzliche Belastung anderer Umweltgüter muss die Nutzung organischer Böden drastisch reduziert werden. Die Moorbodenkultur ist in keinem Fall nachhaltig, da sie zu Schäden führt, die über geologische Zeiträume hinweg vollständig irreversibel sind. Zudem wird dadurch auch die Archivfunktion (Informationsträgerfunktion) des Bodens zerstört.

#### 4.2.2 Bewässerung

In trockeneren Gebieten kommt es im Zusammenhang mit der Bewässerung zur Versalzung von Böden. In der Schweiz spielen Bodenschäden wie Versalzung, Gefügeschäden und Erosion als Folge der Bewässerung lediglich im Wallis eine Rolle. Der Salzgehalt von Bewässerungswasser sollte 1,5 g Salz pro Liter nicht übersteigen und möglichst wenig Natrium enthalten.

#### 4.2.3 Direkte Meteorwasserversickerung

**Schadensbilder:** Bei der direkten Meteorwasserversickerung werden die auf Dächern und Strassenflächen abgelagerten Stäube und Schadstoffe mit dem Wasser dem Boden zugeführt und können sich dort unter Umständen schnell negativ auswirken. Es resultiert nebst der stofflichen auch eine physikalische Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit.



*Fig. 13 Direkte Meteorwasserversickerung: Bei der direkten Meteorwasserversickerung werden zum einen die aus der Luft auf die versiegelten Flächen abgelagerten Schadstoffe auf relativ kleinen Versickerungsflächen konzentriert in den Boden eingeschwemmt, was stoffliche Belastungen des Bodens zur Folge hat. Zum anderen gelangen auf demselben Weg feinste Stäube in das Porensystem, was zur Verstopfung der Poren und somit zur Verdichtung des Bodens führen kann.*

**Schadensursachen:** Verglichen mit der Regen-Auffangfläche (Dach oder versiegelter Boden) ist die Versickerungsfläche für Meteorwasser im Siedlungsgebiet meist massiv reduziert. Strassenentwässerungen über die Bankette in offenes Land bewirken das Einschwemmen von feinsten Staubteilchen in das Porensystem (unabhängig von der Schadstoffbelastung). Zusätzlich ist mit einer erhöhten Schadstoffbelastung der Böden zu rechnen. Dadurch kommt es zu einer inneren Kolmatierung und als Folge zu einer Störung des Porensystems (Verstopfung). Dies wiederum

führt mit der Zeit zu einem gestörten Abflussverhalten und Wasserhaushalt (tendenziell Richtung Stauwasserboden) sowie gleichzeitig zu einem Anstieg der scheinbaren Bodendichte, das heisst zu einer unerwünschten Verdichtung des Bodens.

**Schadensvermeidung:** Die Forderung nach Versickerung des «unverschmutzten Abwassers» in der Gewässerschutzgesetzgebung (GSchG Art. 7, Abs. 2) sollte dahingehend präzisiert und eingeschränkt werden, dass Strassenabwässer generell und in unterschiedlichem Masse Meteorabwasser von mit Metall gedeckten Dächern (Zink, Blei, Kupfer) oder in Gebieten mit hoher Luftbelastung (Staub) als verschmutztes Wasser zu gelten haben und somit auch nicht unkontrolliert über den gewachsenen Boden versickert werden dürfen (Boller und Häfliger 1996, Amt für Umweltschutz des Kantons Solothurn 1997).

## Quellen

- Amt für Umweltschutz des Kantons Solothurn, 1997: Neuer Umgang mit Meteorwasser. Richtlinie für die Versickerung von Regenabwasser im Liegenschaftsbereich. AfU-Bericht Nr. 38, Solothurn
- Baracchi C. und Stüber Th., 1997: Methoden zur Bestimmung der Verdichtungsempfindlichkeit von aggregierten Böden. Diplomarbeit ETHZ Abt. VIII, Institut für Kulturtechnik, Zürich, unveröffentlicht
- Baudepartement des Kantons Solothurn, 1993a: Zonenvorschriften zur kantonalen Landwirtschafts- und Schutzzone Witi. Entwurf vom 23. Juni 1993
- Baudepartement des Kantons Solothurn, 1993b: Erläuterungen zur kantonalen Landwirtschafts- und Schutzzone der Witi von Grenchen bis Solothurn.
- Bau- und Umweltschutzdirektion Kanton Basel-Landschaft (Hrsg.), 1994: Bodenerosion im Kanton Basel-Landschaft, Liestal, 31 S.
- Bau- und Umweltschutzdirektion Kanton Basel-Landschaft (Hrsg.), 1998: Empfindlichkeit der Baselbieter Böden gegenüber mechanischen Belastungen, Liestal, 31 S. und Anhang
- Blume, H.-P. (ed.), 1992: Handbuch des Bodenschutzes. ecomed, Landsberg/Lech. 794 S.
- Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz BGS/SSP und Baudepartement des Kantons Aargau, 1984: Kiesabbau und Landwirtschaft (am Beispiel des Kantons Aargau). BGS Dokument 1. Juris Druck und Verlag, Zürich
- Boller M., M. Häfliger, 1996: Verbleib von Schwermetallen bei unterschiedlicher Meteorwasserentsorgung. Gas Wasser Abwasser (gwa) 1/96: 3-15
- Bundesamt für Energiewirtschaft (ed.), 1997: Richtlinien zum Schutze des Bodens beim Bau unterirdisch verlegter Rohrleitungen.
- Bundesamt für Landwirtschaft, 1996: Weisungen über die Mindestanforderungen für die Anerkennung von Regeln der Integrierten Produktion im Feldbau. 12 S.
- Bundesamt für Statistik 1986 und 1996: Statistische Jahrbücher der Schweiz 1986 und 1996.
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (DVWK) (Hrsg.), 1995: Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden. Teil I: Mechanische Belastbarkeit. Merkblätter zur Wasserwirtschaft 234. 11 S.
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (DVWK) (Hrsg.), 1996: Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden. Teil II: Auflastabhängige Veränderung von bodenphysikalischen Kennwerten. Merkblätter zur Wasserwirtschaft (Entwurf Jan. 1996). 11 S.
- Direktion der öffentlichen Bauten und Direktion der Volkswirtschaft des Kantons Zürich, 1991: Richtlinien für die Durchführung von Rekultivierungen (von Auffüllungen, Geländeänderungen, Deponien, Kiesgruben, Ablagerungen, Installationsplätzen, Baupisten). Zürich, 10 S.

- Diserens, E., F. Bucher, 1997: Bodenverdichtung aus der Sicht der Bodenmechanik. *Agrarforschung* 2/1997: 83-86
- DZV, Verordnung über Direktzahlungen vom 7. Dezember 1998 (SR 910.132)
- Eidg. Forschungsanstalt für landwirtschaftlichen Pflanzenbau FAL (ehem. FAP) Reckenholz und Schweiz. Fachverband für Sand und Kies FSK (Hrsg.), 1987: Kulturland und Kiesabbau. Richtlinien zur Rückführung von Abbaugebieten in die Landwirtschaft. Zürich-Reckenholz und Bern
- Friedli, B., 1997: Neue Methoden zur bodenökologischen Beurteilung rekultivierter Flächen. Einsatz von Erhebungstechniken aus den Bereichen Fernerkundung und Geophysik. Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Kulturtechnik, ETH Zürich, und dem Kanton Aargau, unveröffentlicht
- GSchG, Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer vom 24. Jan. 1991 (SR 814.20)
- Häberli, R., C. Lüscher, B. Praplan Chastonay, Ch. Wyss, 1991: Bodenkultur, Vorschläge für eine haushälterische Nutzung des Bodens in der Schweiz. Verlag der Fachvereine, Zürich. 192 S.
- Håkansson, I., V. W. Medvedev, 1995: Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for stresses caused by heavy vehicles. *Soil and Tillage Research* 35 (1995): 85-97
- Johnson, D. L., S. H. Ambrose, T. J. Bassett, M. L. Bowen, D. E. Crummey, J. S. Isaacson, D. N. Johnson, P. Lamb, M. Saul, A. E. Winter-Nelson, 1997: Meanings of Environmental Terms. *J. Environ. Qual.* 26:581-589 (1997)
- Karlen, D. L., M. J. Mausbach, J. W. Doran, R. G. Cline, R. F. Harris, G. E. Schuman, 1997: Soil Quality: a Concept, Definition, and Framework for Evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:4-10 (1997)
- Knoepfel, P., D. Achermann, W. Zimmermann, 1996: Bilanzstudie Bodenpolitik 1990 bis 1995. Inst. de hautes études en administration publique und WWF Schweiz. Chavannes-près-Revens und Zürich
- Lal, R., 1994: Sustainable Land Use Systems and Soil Resilience. In: D. J. Greenland, I. Szabolcs (eds), 1994: Soil Resilience and Sustainable Land Use. CAB International, Wallingford: 41-67
- Larson, W. E., F. J. Pierce, 1994: The Dynamics of Soil Quality as a Measure of Sustainable Management. In: J. W. Doran, D. C. Coleman, D. F. Bezdicek, B. A. Stewart (eds.) 1994: Defining Soil Quality for a Sustainable Environment. *Soil Sci. Soc. of America Special Publ.* 35: 37-51
- Mosimann, Th., A. Maillard, A. Musy, J.-A. Neyroud, M. Rüttimann, P. Weisskopf, 1991: Erosionsbekämpfung in Ackerbaugebieten. Ein Leitfaden für die Bodenerhaltung. Themenbericht d. Nationalen Forschungsprogrammes „Nutzung des Bodens in der Schweiz,“. Liebefeld-Bern. 187 S.
- Mosimann, Th., M. Rüttimann, 1996: Abschätzung der Bodenerosion und Beurteilung der Gefährdung der Bodenfruchtbarkeit. Grundlagen zum Schlüssel für Betriebsleiter und Berater. Amt f. Umweltschutz u. Energie, Bodenschutzfachstelle Baselland. Liestal. 40 S.
- Mosimann, Th., 1996: Die Gefährdung der Böden in der Schweiz. WWF Schweiz. Zürich
- NHG, Bundesgesetz über den Natur- und Heimatschutz vom 1. Juli 1966 (SR 451)
- RPG, Bundesgesetz über die Raumplanung vom 22. Juni 1979 (SR 814.12)
- Salm Ch., 1996: Bodenschutz beim Bauen (Handbuch). Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL. Bern
- Schafer, W. M. 1988: Implications of Spatial Variability to Postmine Management. In: L. R. Hossner (ed.) 1988: Reclamation of Surface-Mined Lands. Vol. II: 231-237. CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida
- Schulin, R., 1993: Physikalische Grundlagen zur Umschreibung des Begriffs der Bodenfruchtbarkeit. *Landwirtschaft Schweiz*, 6: 115-120
- Schulin, R., 1995: Physikalischer Bodenschutz und die Kluft zwischen Physik und Bodenschutz. *Bull. Bodenkundl. Ges. Schweiz*, Bd. 19: 67-72
- Stasch, D., K. Stahr, 1993: The Soil Potential Concept - A Method for the Fundamental Evaluation of Soils and Their Protection. In: H. J. P. Eijsackers and T. Hamers (eds.), *Integrated*

- Soil and Sediment Research: A Basis for Proper Protection: 107-109. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- Szabolcs, I., 1994: The Concept of Soil Resilience. In: D. J. Greenland, I. Szabolcs (eds), 1994: Soil Resilience and Sustainable Land Use. CAB International, Wallingford: 33-39
- TVA, Technische Verordnung über Abfälle vom 10. Dez. 1990 (SR 814.600)
- Tobias, S., 1994: Aktuelle Fragen des Bodenschutzes in der Schweiz und die Konzepte zu dessen Realisierung. *Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung* 35 (1994): 74-80
- Umweltministerium Baden-Württemberg (ed.), 1991: Erhaltung fruchtbaren und kulturfähigen Bodens bei Flächeninanspruchnahmen. *Luft, Boden, Abfall* 10 (1991)
- Umweltministerium Baden-Württemberg (ed.), 1995: Bewertung von Böden nach ihrer Leistungsfähigkeit. *Luft, Boden, Abfall* 31(1995)
- USG, Bundesgesetz über den Umweltschutz vom 7. Oktober 1983 (SR 814.01)
- VBBö, Verordnung über Belastungen des Bodens vom 1. Juli 1998 (SR 814.12)
- VSBo-Mitteilung Nr. 4, 1993: Verwertung von abgeschältem Oberboden. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL und Eidg. Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene IUL. Bern und Liebefeld (in Revision)
- WaG, Bundesgesetz über den Wald vom 4. Okt. 1991 (SR 921.0)

## **Anhänge**

- 1 Konzept zur Herleitung von Richtwerten in bezug auf Bodenverdichtung**
- 2 Konzept zur Herleitung von Richtwerten in bezug auf Bodenerosion**
- 3 Bodendefinition der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz**
- 4 Für den physikalischen Bodenschutz relevante Artikel des Umweltschutzgesetzes (USG) und der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBö)**

## Konzept für die Definition von Richtwerten für Bodenverdichtungen

### 1. Ziel und Zweck der Richtwerte für Bodenverdichtungen<sup>1</sup>

Das Konzept für die Herleitung von Richtwerten für Bodenverdichtungen<sup>1</sup> ist im Hinblick auf das allgemeine Bodenschutzziel, die nachhaltige Sicherung (und wo nötig Wiederherstellung) der Multifunktionalität des Bodens aufzustellen. Die Schutzgüter des Bodenschutzes sind die Bodenfunktionen

- Lebensraum für Bodenorganismen (darin enthalten auch Genreservoir)
- Standort für die natürliche Vegetation und Kulturpflanzen
- Ausgleichskörper im Wasser-, Luft- und Wärmehaushalt
- Bioreaktor für den Abbau organischer Stoffe
- Filter und Puffer für Stoffe
- Geschichtliche Urkunde (Boden als Informationsträger)
- Tragende Unterlage für Bauten bzw. Fahrbahn für land- und forstwirtschaftliche Fahrzeuge und Geräte
- Rohstoffreservoir

Die Richtwerte für Bodenverdichtungen sollen ebenso wie die Richtwerte für stoffliche Belastungen oder Erosion der Umsetzung des Vorsorgeprinzips dienen. Insbesondere sollen sie eine Grundlage für den nachhaltigen Schutz der Bodenfunktionen Lebensraum, Pflanzenstandort und Ausgleichskörper im Wasser-, Luft- und Wärmehaushalt bilden.

### 2. Richtwert oder Grenzwert?

Im Schweizer Umweltschutzrecht bedeuten Grenzwerte Grenzen zwischen einem rechtmässigen und einem unrechtmässigen Zustand. Im Sinne des Vorsorgeprinzips sollten sie so definiert sein, dass sie (auch wiederholt) erreicht, aber nicht überschritten werden dürfen, damit kein ökologischer Schaden entsteht. Richtwerte hingegen definieren lediglich eine Vermutung in bezug auf einen recht- oder unrechtmässigen Zustand. Daraus ergibt sich eine Umkehr der Beweislast, wenn ein Richtwert überschritten (bzw. je nach Definition unterschritten) wird. Für das Beispiel des Bodenschutzes heisst das, wenn bei Belastungen unterhalb eines Richtwerts die langfristige Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit anzunehmen ist, so wird umgekehrt angenommen, dass bei Überschreitung des Richtwerts die Bodenfruchtbarkeit nicht mehr langfristig gesichert ist. In einem Streitfall liegt es bei einer Richtwertüberschreitung nicht am Kläger, die Gefährdung der Bodenfruchtbarkeit nachzuweisen, sondern am Verursacher der Belastung, das Gegenteil, nämlich die langfristige Sicherung

---

<sup>1</sup> Unter dem Begriff „Bodenverdichtung“ werden alle Strukturveränderungen zusammengefasst, die infolge Veränderung der Porengrössenverteilung oder Störung der Porenkontinuität zu dauerhaften Schäden an den Bodenfunktionen führen. Derartige Strukturveränderungen sind insbesondere Sackungsverdichtungen, Scherungen und Knetungen. Diese Prozesse führen jedoch längst nicht in allen Fällen zu einer Erhöhung der Lagerungsdichte (vgl. auch Kap. 4.1.2 des Konzepts zur praktischen Realisierung des physikalischen Bodenschutzes).

der Bodenfruchtbarkeit trotz Überschreitung des Richtwerts, zu beweisen. Die vollziehenden Behörden sind bei Überschreitung (bzw. ev. auch Unterschreitung) eines Richtwerts verpflichtet, das belastete Gebiet zu beobachten, die Ursachen der Belastung abzuklären sowie Massnahmen zur Begrenzung eines weiteren Belastungsanstiegs auf der Grundlage vorhandener Gesetze zu treffen.

Bei Bodenverdichtungen steht auf der Ursachenseite die Bodennutzung durch den Menschen, auf der Wirkungsseite steht das Ökosystem Boden mit den entsprechenden Bodenfunktionen. In einem ersten Schritt sollen auf der Wirkungsseite Richtwerte definiert werden, bei deren Über- bzw. Unterschreitung vermutet werden muss, dass die Multifunktionalität des Bodens, das heisst, die Fähigkeit, die Bodenfunktionen zu erfüllen, langfristig nicht mehr gewährleistet ist. Daraus abgeleitet sollen auf der Ursachenseite Grenzwerte für zulässige Belastungseinträge definiert werden (Fig. A1.1).

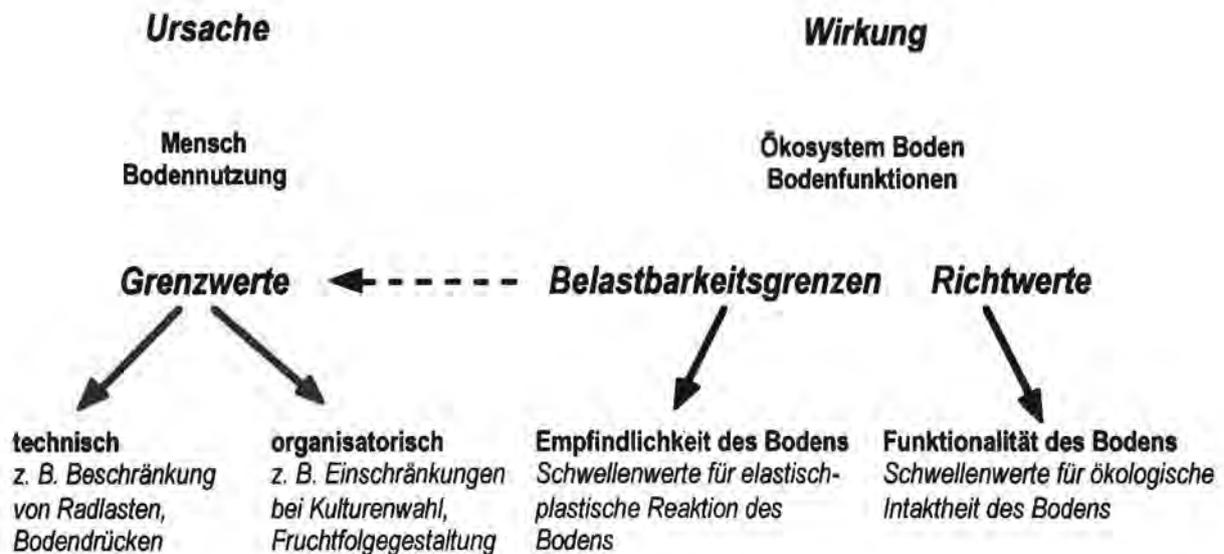


Fig. A1.1 Definition von Grenz- und Richtwerten in bezug auf Bodenverdichtungen. Grenzwerte sind in Abhängigkeit der Belastbarkeitsgrenzen des Bodens festzulegen.

Eine Besonderheit von Bodenverdichtungen besteht jedoch in der Tatsache, dass ein Schaden an den Bodenfunktionen nicht nur von Art, Ausmass und Dauer einer mechanischen Belastung abhängt, sondern ebenso stark vom Zustand des Bodens zum Zeitpunkt der Belastung. Entsprechend seinem Aufbau und Feuchtegehalt besitzt der Boden eine gewisse Eigenfestigkeit, die der mechanischen Belastung entgegen wirkt. Erst wenn diese Eigenfestigkeit überschritten wird, kommt es zu Verdichtungsschäden. Der Boden besitzt also gewisse Toleranzen gegenüber mechanischen Belastungen. Die Grenzen dieser Toleranzen auf der Wirkungsseite müssen gefunden werden, damit im Sinne des Vorsorgeprinzips Schäden durch Bodenverdichtungen vermieden werden können. Die oben genannten Grenzwerte auf der Ursachenseite sind sinnvollerweise in Abhängigkeit dieser Belastbarkeitsgrenzen zu definieren.

Als Beispiel sei die Wirkungskette bei Bodenverdichtungen im landwirtschaftlichen Pflanzenbau analysiert (Fig. A1.2). Durch die Wahl der Kulturen und der Fruchtfolge werden wichtige Bewirtschaftungscharakteristika bestimmt, insbesondere Bearbeitungs- und Befahrungstermine sowie oft auch die Grössenordnung der notwendigen Ernte- und Transportmaschinen. Bearbeitungsgeräte

und -zeitpunkte ergeben sich im einzelnen aus der Anbautechnik, während die Ernte- und Transportmechanisierung weitgehend von der Wahl des Bewirtschafters bzw. den verfügbaren Maschinen abhängt. Aufgrund der verwendeten Geräte und Maschinen sowie deren Auslastung ergeben sich Belastungsparameter wie Radlasten, Kontaktflächendrücke oder Bearbeitungseffekte, die als Bodenbelastungen in Form von Druck- oder Scherspannungen bzw. Vibrationen wirksam werden. Der Belastung steht die Festigkeit des Bodens (Vorbelastungswert und Scherfestigkeit) gegenüber. Die gegenseitige Wirkung der Spannungen führt zu Deformationen des Bodens, Bodendeformationen können elastisch, d. h. reversibel, sein, wenn die Druckspannungen kleiner als der Vorbelastungswert und die Schubspannungen kleiner als der Scherfestigkeitswert des Bodens sind. Andernfalls kommt es zu plastischen, d. h. irreversiblen Deformationen des Bodengefüges in Form von Verdichtung, Scherung, Knetung oder Homogenisierung. Aus der plastischen Deformation eines Bodens ergeben sich Veränderungen seiner physikalischen Eigenschaften (Gefügearrt, -aufbau, Porenvolumen, -verteilung, -kontinuität). Dies führt schliesslich auch zu Veränderungen der Bodenfunktionen, insbesondere der Funktionen „Lebensraum“, „Pflanzenstandort“ und „Ausgleichskörper im Wasser-, Luft- und Wärmehaushalt“.

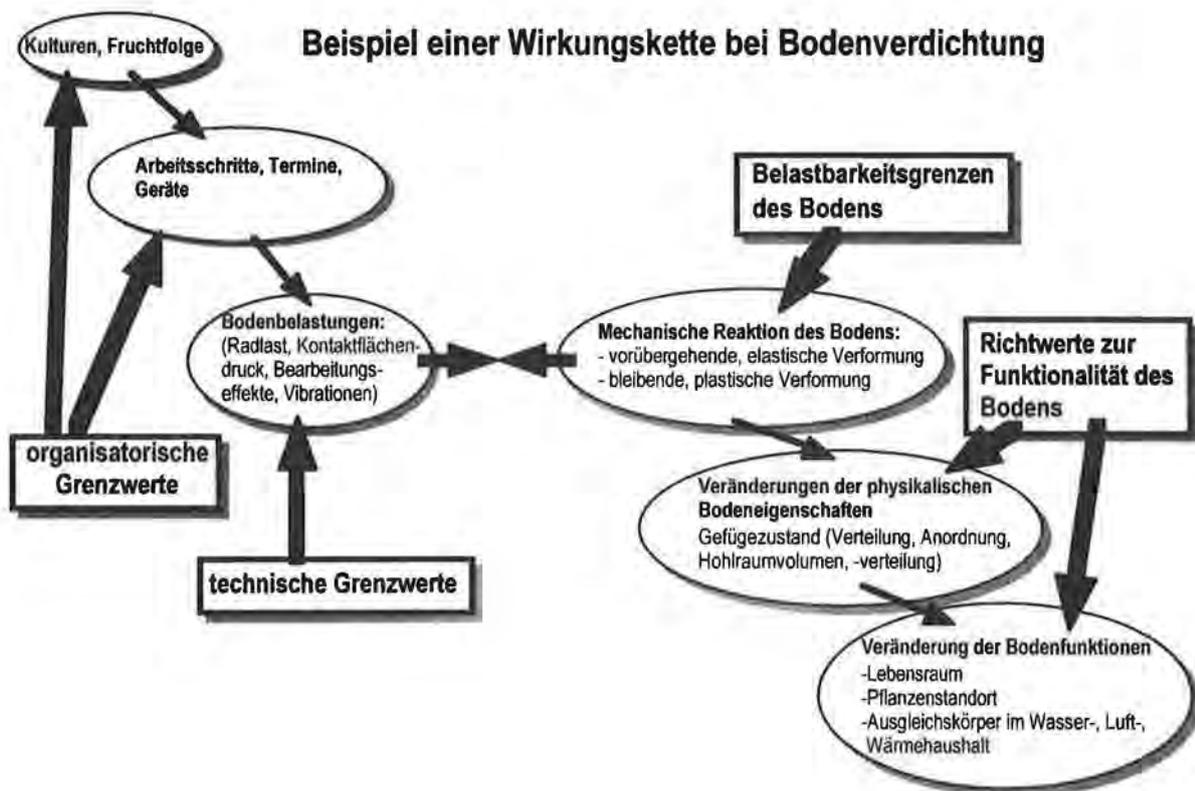


Fig. A1.2 Beispiel einer Wirkungskette bei Bodenverdichtungen

Richtwerte und Belastbarkeitsgrenzen sind auf der Wirkungsseite zu definieren. Richtwerte sollen die ökologische Funktionalität, Belastbarkeitsgrenzen die Empfindlichkeit des Bodens gegenüber physikalischen oder mechanischen Belastungen repräsentieren. Mit anderen Worten stellen Richtwerte in bezug auf Bodenverdichtungen Minimalbedingungen für die nachhaltige Erfüllung der Bodenfunktionen „Lebensraum“, „Pflanzenstandort“ und „Ausgleichskörper im Wasser-, Luft- und

Wärmehaushalt“ dar. Andererseits beziehen sich die Belastbarkeitsgrenzen des Bodens auf seine Funktion als tragfähige Fahrbahn. Diese Belastbarkeitsgrenzen dürfen nicht überschritten werden, damit die Bodenfunktionen keine dauerhaften Schäden erleiden.

Grenzwerte sind auf der Ursachenseite, im vorliegenden Beispiel bei der landwirtschaftlichen Nutzung, zu definieren. Sie sind in Abhängigkeit der Belastbarkeitsgrenzen des Bodens festzulegen und sollen die maximal zulässigen Emissionen repräsentieren. Grenzwerte organisatorischer Art stellen Einschränkungen bei der Kulturwahl oder Fruchtfolgegestaltung dar, denn diese bestimmt die notwendigen Bearbeitungsschritte und deren Terminierung in bezug auf die Jahreszeiten und damit auf den voraussichtlichen Feuchtigkeitsgehalt bzw. die Stabilität eines Bodens. Technische Grenzwerte sind Einschränkungen der Mechanisierung bei vorgegebenen Randbedingungen wie Bodenfeuchtigkeit oder Bodenstabilität (z. B. Beschränkung von Radlasten, Kontaktflächendrücken in Abhängigkeit der Belastbarkeitsgrenzen des Bodens).

### **3. Anwendung der Richtwerte und Belastbarkeitsgrenzen für Bodenverdichtungen**

Richtwerte und Belastbarkeitsgrenzen in bezug auf Bodenverdichtungen sollen Kontrollgrößen für die praktische Umsetzung des physikalischen Bodenschutzes nach dem Vorsorgeprinzip darstellen. Einerseits sollen sie den Praktikern in der Land-, Forst- und Bauwirtschaft als Instrument zur Beurteilung des Bodenzustands sowie zur Beurteilung der Bodenverträglichkeit ihrer Bewirtschaftungsweise dienen. Andererseits sollen sie auch ein Instrument für die Behörden zur Überwachung des Bodenzustands sowie eine Entscheidungsgrundlage für den Erlass von Nutzungsvorschriften bilden.

Die Richtwerte zur Beurteilung der Funktionalität des Bodens sollen die Minimalbedingungen physikalischer Bodenkennwerte zur nachhaltigen Erfüllung der Bodenfunktionen Lebensraum, Pflanzenstandort und Ausgleichskörper im Wasser-, Luft- und Wärmehaushalt repräsentieren. Wird eine oder mehrere dieser Bedingungen (Richtwerte) an einem Standort nicht erfüllt, so ist einerseits abzuklären, ob die Ursachen für die reduzierte Funktionalität auf natürlichen Standortgegebenheiten beruhen oder durch die Nutzungsweise entstanden sind. Andererseits sind die nutzungsbedingten Immissionen auf diesen Standort in Zukunft einzuschränken, und zwar sowohl bei natürlichen als auch bei anthropogenen Ursachen für die reduzierte Funktionalität.

Die Belastbarkeitsgrenzen bzw. die Bodenempfindlichkeit gegenüber mechanischen Belastungen repräsentieren die Strukturstabilität des Bodens und sollen der Beurteilung der Bodenverträglichkeit von mechanischen Belastungen dienen. Entspricht an einem Standort die Eigenfestigkeit nicht den Belastungen, so sind diese entsprechend zu reduzieren, d. h. die Bewirtschaftungsweise, Anbau-technik oder Mechanisierung sind standortgemäss anzupassen.

Da die Richtwerte und Belastbarkeitsgrenzen in bezug auf Bodenverdichtungen verschiedenen Akteuren in sehr unterschiedlichen Situationen als Entscheidungsgrundlagen dienen sollen, müssen sie auch verschiedene Anforderungen im Hinblick auf die Genauigkeit, Reproduzierbarkeit, Eindeutigkeit und den Messaufwand erfüllen. Daher wird es nicht möglich sein, für den Schutz vor Bodenverdichtungen einige wenige, universell anwendbare Bodenkennwerte als Richtwerte oder Belastbarkeitsgrenzen zu definieren. In diesem Konzept vorgeschlagene Bodenkennwerte liefern zum einen eindeutige Aussagen, sind mit hoher Genauigkeit bestimmbar und reproduzierbar. Dafür erfordert ihre Erhebung oft einen relativ grossen Aufwand. Zum ändern geben die vorgeschlagenen

Bodenkennwerte lediglich Hinweise zur Funktionalität bzw. Empfindlichkeit des Bodens. In vielen Fällen können sie keine eindeutige Aussage machen, lassen sich aber häufig schnell und mit einfachen Mitteln erheben oder schätzen. Die Aussagekraft, Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Erhebung müssen allerdings so hoch sein, dass in keinem Fall aufgrund einer Fehleinschätzung eine Handlungsweise gewählt wird, die dem Boden dauerhafte Verdichtungsschäden zufügt.

Es können drei klassische Fälle unterschieden werden, wo Richtwerte und Belastbarkeitsgrenzen in bezug auf Bodenverdichtungen als **Beurteilungs- und Entscheidungsgrundlage** für verschiedene Handlungsweisen Anwendung finden können:

- Selbstkontrolle für Praktiker bei der Planung und Ausführung der Bodenbewirtschaftung
- Überwachung des Bodenzustands durch die Behörden und Erlass von Nutzungsvorschriften
- Nachweis von Schäden und Verantwortlichkeiten in Streitfällen.

### **a) Selbstkontrolle**

Praktiker in der Land-, Forst- und Bauwirtschaft müssen auch kurzfristig vor der Bodenbearbeitung beurteilen können, ob der geplante Arbeitsschritt nicht zu dauerhaften Verdichtungsschäden führt. Hierzu benötigen sie mit wenig Aufwand bestimmbare Indikatoren oder Schätzgrößen, die es ihnen erlauben, zu entscheiden, ob ein Risiko von Bodenverdichtungen infolge der vorgesehenen Arbeiten besteht oder nicht. Auch Richtlinien und Wegleitungen zur „guten fachlichen Praxis“ sollen in erster Linie auf Schätzgrößen aufbauen, da sie sonst in der Praxis nicht umgesetzt werden können.

### **b) Überwachung des Bodenzustands und Nutzungsvorschriften**

Bei der (behördlichen) Überwachung des Bodenzustands sollen die Anforderungen an die Bodenkennwerte sowie die Erhebungsintervalle an die Dynamik der entsprechenden Kennwerte angepasst werden. Bodenkennwerte, die sich im Laufe der Zeit natürlicherweise nur wenig verändern (d. h. eine geringe Dynamik aufweisen) können in längeren Zeitintervallen erhoben werden. Sie sollten aber eindeutige Aussagen liefern und exakt bestimmbare und reproduzierbare Parameter sein. Ein relativ grosser Messaufwand ist in diesen Fällen vertretbar. Stichprobenhafte Erhebungen rasch ändernder Bodenkennwerte (hohe Dynamik) geben keine Auskunft über den generellen Zustand des Bodens. Sinnvoll sind diese Erhebungen in der Bodenüberwachung nur, wenn sie unter standardisierten Randbedingungen (z. B. Vorbelastung bei einer bestimmten Saugspannung) durchgeführt werden.

Bei Verdacht auf unnatürlich rasche Annäherung der beobachteten physikalischen Bodeneigenschaften an die Richtwerte wird empfohlen, in kürzeren Zeitintervallen einfacher mess- oder schätzbare Indikatoren (Zeiger) der Bodenfunktionalität zu erheben. Dadurch soll das rechtzeitige Treffen von Bodenschutzmassnahmen ohne übermässigen Erhebungsaufwand möglich sein.

Da rechtskräftige Nutzungsvorschriften stets eine gewisse Eigentumsbeschränkung bedeuten, sind sie aufgrund von eindeutigen, exakt messbaren und reproduzierbaren Parametern zu erlassen. Nutzungsempfehlungen ohne unmittelbare Rechtskraft (z. B. in Richtlinien, Wegleitungen) können auf Indikatoren und Schätzgrößen basieren. In beiden Fällen müssen für die Praktiker die Kontrollgrößen zur Einhaltung der Vorschriften bzw. Empfehlungen schnell und einfach erfassbar sein.

### **c) Nachweis von Schäden und Verantwortlichkeiten**

Bei der Schadensermittlung ist es unter Umständen wirtschaftlicher, stufenweise vorzugehen. Werden an einem Ort Schäden infolge anthropogen verursachter Bodenverdichtungen vermutet, kann im Sinne eines Screenings eine rasche Voruntersuchung, die auf qualitativen Beobachtungen abgestützt ist, durchgeführt werden. Wird durch diese Voruntersuchung der Verdacht auf Verdichtungsschäden erhärtet, so ist in einer detaillierten Untersuchung der Schaden anhand von eindeutigen, quantitativen und reproduzierbaren Messgrößen nachzuweisen. Für den Nachweis der Verantwortlichkeit für den Schaden müssen zudem die Wirkungsketten, die dem Schaden eindeutig die Ursachen zuordnen können, bekannt sein.

## **4. Vorschläge für Richtwerte und Belastbarkeitsgrenzen in bezug auf Bodenverdichtungen**

Die Plattform Bodenschutz der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz (BGS) erachtet folgende physikalischen Bodenkennwerte als geeignet zur Definition von Richtwerten und Belastbarkeitsgrenzen für Bodenverdichtungen:

<b>Richtwerte zur Beurteilung der Funktionalität des Bodens</b>	<b>Belastbarkeitsgrenzen zur Beurteilung der Empfindlichkeit des Bodens</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>- Grobporenvolumen</li><li>- Leitfähigkeit für Luft oder Wasser</li> <li>- Infiltrationsrate</li><li>- Durchwurzelungstiefe</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Vorbelastung (bei Feldkapazität)</li><li>- Scherfestigkeit (bei Feldkapazität)</li> <li>- Saugspannung</li><li>- Eindringwiderstand</li><li>- Spurtiefe (Deformation)</li><li>- plastisches Verhalten (Ausrollbarkeit) des Bodens</li><li>- Skelettgehalt</li></ul>

## Konzept für die Definition von Richtwerten für Bodenerosion

### 1. Einleitung

Die Herleitung von Richtwerten für Bodenerosion dient demselben Zweck wie das entsprechende Konzept bezüglich Bodenverdichtung. Im Mittelpunkt stehen die Bodenfunktionen als eigentliche Schutzgüter und die Umsetzung des Vorsorgeprinzips als Ziel des Schutzes vor Bodenerosion. In ähnlicher Weise wie für Bodenverdichtung lässt sich eine Wirkungskette für Bodenerosion darstellen (Fig. A2.1), womit sich die gleichen definitorischen Fragen von Richtwert und Grenzwert, sowie Ursachen- und Wirkungsseite stellen. Zur Erläuterung dieser konzeptionellen Grundlagen sei daher auf die entsprechenden Kapitel des Konzeptes für die Definition von Richtwerten bezüglich Bodenverdichtung verwiesen.

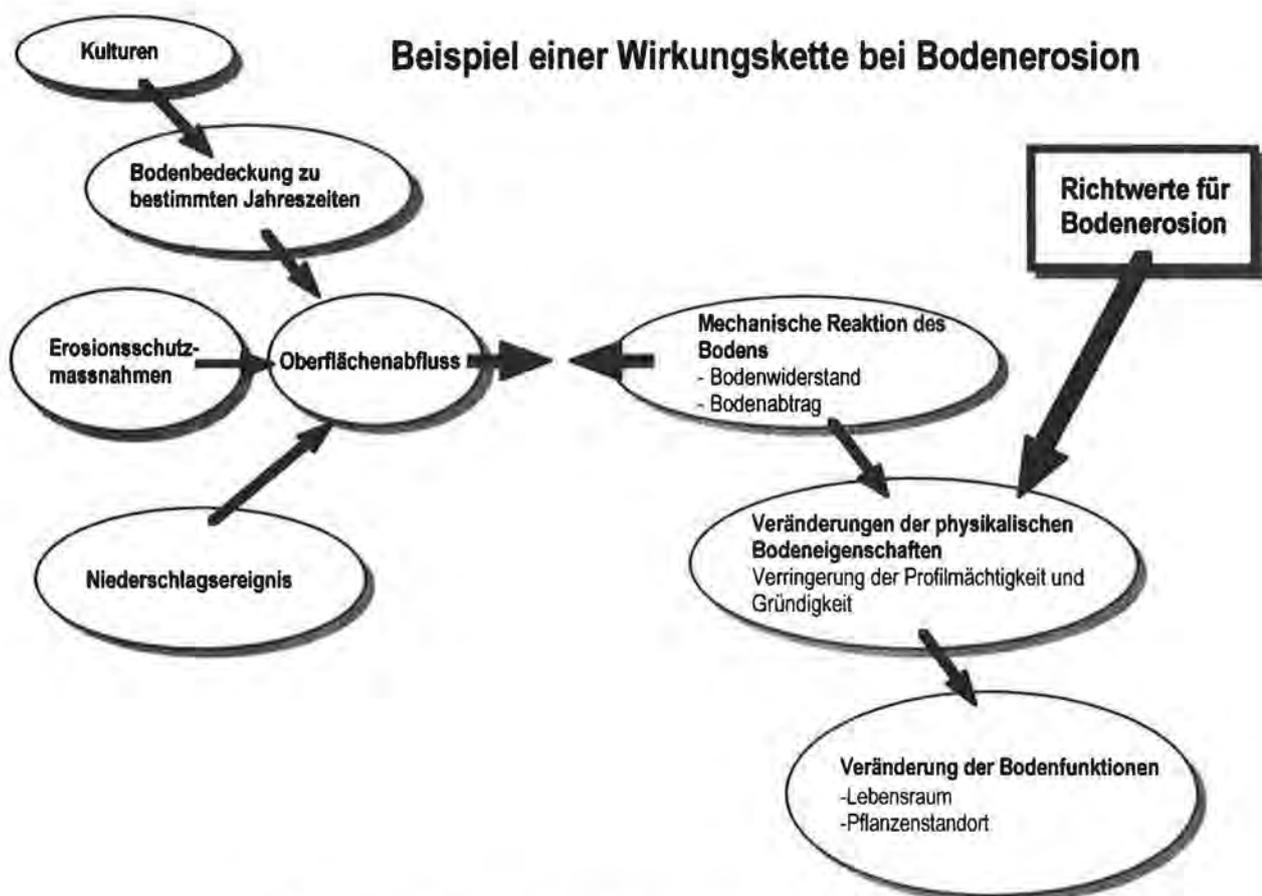


Fig. A2.1: Beispiel einer Wirkungskette bei Bodenerosion

Erosion ist zwar ein natürlicher Prozess. Auf Hängen mit vollständiger Vegetationsbedeckung findet aber unter mitteleuropäischen Klimaverhältnissen kein messbarer Bodenabtrag statt (vgl. Bork

1988). Feststellbare Bodenerosion ist daher die Folge von Nutzungseingriffen, bei welchen die Vegetation zeitweise fehlt oder vermindert ist. Flächenhaft am verbreitetsten trifft dies auf Ackerland zu; es können jedoch auch Rodungsgebiete, Waldbrandflächen, überweidete Areale oder Flächen nach baulichen Eingriffen (planierte Skipisten, Rekultivierungsflächen, Strassenborde) erodieren. Neben der langfristigen Schädigung der Bodenfruchtbarkeit können durch das Ausspülen oder die Zusedimentierung von Pflanzen auch kurzfristig Schäden an Kulturen oder natürlicher Vegetation entstehen, ebenso wie Schäden an Infrastrukturbauten. Bodenerosion verursacht aber nicht nur Schäden am Entstehungsort, sondern auch in benachbarten Arealen oder Ökosystemen. Diese Fernwirkung ist bei der Definition von Richtwerten miteinzubeziehen. Gelangt erodiertes Material ins Gewässernetz kommt es dort wegen der mitgeführten Düngestoffe oder Pflanzenschutzmittel zu einer Beeinträchtigung der Wasserqualität. Daher sind zur Verminderung von Erosion auch Vorschriften des Gewässerschutzes zu beachten.

Bodenerosion wird durch fließendes Wasser oder Wind ausgelöst. Grössere und flächenhaft verbreitete Schäden durch Winderosion sind in der Schweiz nicht bekannt, allerdings gibt es diesbezüglich bisher auch keine detaillierten Untersuchungen. Bei den Schadensbildern ist zu unterscheiden zwischen flächenhafter Erosion durch schichtartigen oberflächlichen Abfluss und linearen Formen (Rillen), die durch Konzentration des oberflächlichen Abflusses entstehen (Prasuhn et al. 1990). Winderosion führt immer zu flächenhaften Formen der Erosion.

## **2. Die vorhandene Datengrundlage**

Wegen des episodischen Auftretens der Bodenerosion sind direkte Messungen sehr zeitaufwendig. Langfristige Aufnahmen liegen in der Schweiz für Gebiete im lössbedeckten Hochrheintal (Möhlin AG) und im Tafeljura (Oberes Ergolzthal) vor, kurzfristige für das Napfgebiet, das zentrale Mittelland (Lyss BE) und das Plateau vaudois. Eine ausführliche Zusammenstellung dieser Resultate findet sich bei Schaub und Prasuhn (1998). Die durchschnittlichen jährlichen Bodenabträge liegen im Lössgebiet zwischen 3.0 und 5.0 t/ha Ackerfläche, in den übrigen Gebieten zwischen 0.5 und 1.0 t/ha. Von einer flächenhaften Erosionsgefährdung kann daher nur im Löss gesprochen werden. Die Durchschnittsangaben verdecken allerdings den Umstand, dass auf einzelnen Schlägen deutlich höhere Abträge auftreten. So wurden im Tafeljura jährliche Spitzenwerte bis 66 t/ha gemessen, im Mittelland und Hochrheintal sogar bis 95 t/ha. Solche Schäden entstehen meist in Muldenlagen, wo flächenhafter Abtrag an den Flanken und lineare Erosion in der Tiefenlinie („Talwegerosion“) zusammenwirken. Ein wichtiges erstes Ziel des physikalischen Bodenschutzes ist die Identifikation und Sanierung dieser besonders gefährdeten Standorte.

Es ist davon auszugehen, dass die Bodenerosionsschäden mit der Ausdehnung der Maisanbaufläche und der generellen Intensivierung des Ackerbaus seit dem Ende des zweiten Weltkriegs deutlich zugenommen haben. Seit gut zehn Jahren wird dem Problem auch in der landwirtschaftlichen Beratung stärkere Beachtung geschenkt. Eine Studie des Kantons Basel-Landschaft (BUDBL 1994) zeigt jedoch, dass der Erfolg beschränkt blieb. Die Gefährdungssituation hat sich trotz dieser Bemühungen nicht vermindert. Erosionsvermindernde Massnahmen bei der Bewirtschaftung (Änderungen der Fruchtfolge, reduzierte Bodenbearbeitung etc.) setzen sich nur langsam durch und ihre Wirkung wird durch andere Entwicklungen (Vergrösserung der Ackerschläge und dadurch Zunahme der erosiven Hanglänge) teilweise wieder aufgehoben. Die neue Landwirtschaftspolitik 2002 ist hier gefordert.

### 3. Grundlage für Richtwerte

Bei kaum einem anderen Prozess wird die Gefährdung der Bodenfruchtbarkeit derart anschaulich wie beim Substanzverlust durch Bodenerosion. Trotzdem fehlen quantitative Angaben über die Auswirkungen der aktuellen Abtragsraten auf alle Aspekte der Bodenfruchtbarkeit bisher noch weitgehend. Selbst der Zusammenhang zwischen Bodenerosion und Ernteerträgen ist nur in Ausnahmefällen quantifizierbar (Becher und Stürmer 1982), denn die Erträge werden auch von anderen Faktoren beeinflusst. Dies erschwert das Festlegen von eindeutig belegbaren Richtwerten.

Der einfachste Ansatz zur Definition eines Betrages an tolerierbarem Bodenabtrag geht davon aus, dass im Durchschnitt nicht mehr Boden abgetragen werden darf als sich neu bildet. Die Bestimmung der aktuellen Bodenneubildungsrate ist allerdings äusserst schwierig (vgl. Schwer 1994). Es kann davon ausgegangen werden, dass auch geringe Bodenabträge die Bodenneubildung deutlich übertreffen und langfristig eine Degradation der landwirtschaftlichen Produktionsgrundlage bewirken (Sammel 1995). **Im eigentlichen Sinne des Vorsorgeprinzips müsste daher ein Richtwert für Bodenerosion von Null festgelegt werden.** Schwertmann et al. (1987, 12-13) schlugen für Bayern tolerierbare Abtragswerte in Abhängigkeit der Bodengründigkeit vor, bei denen nach den heutigen Kenntnissen „das natürliche Ertragspotential in einem Zeitraum von etwa 300-500 Jahren nicht entscheidend geschwächt wird“. Dieses Konzept wurde von Mosimann et al. (1991) für die Schweiz übernommen, wobei die Beträge der tolerierbaren Abtragswerte gegenüber den bayerischen verringert wurden. Diese Zahlen wurden auch in die VBBo übernommen. Die in der VBBo genannten Richtwerte sind daher als Kompromiss zu betrachten, weil mit den heute noch mehrheitlich praktizierten landwirtschaftlichen Anbautechniken Bodenerosion nicht vollständig vermeidbar ist. Sie entsprechen nicht in allen Punkten dem Anliegen einer nachhaltigen Nutzung des Bodens. Anzuführen bleibt, dass die Gründigkeit des Bodens, von der die Höhe des Richtwertes abhängt, auch von bodenkundlich geschulten Personen oft nicht einheitlich angesprochen wird, insbesondere bei Böden auf Lockersedimenten (Löss, periglaziale Deckschichten etc.).

### 4. Anwendung der Richtwerte bezüglich Bodenerosion

Die Wirkung der Bodenerosion lässt sich auch am Bodenprofil selbst, an der Kappung der Horizonte, erkennen. Unbekannt ist jedoch in den meisten Fällen, in welchem Zeitraum dieser Abtrag stattgefunden hat. Ein grosser Teil der schweizerischen Ackerbauregionen hat eine Nutzungsgeschichte von mehreren hundert Jahren. Ebenso sind Phasen verstärkter Erosion aus historischer Zeit bekannt. Direkte Messungen auf offenen und geschlossenen Testparzellen oder mittels Schadenskartierungen benötigen wegen der zeitlichen Variabilität des Auftretens der Schäden langjährige Beobachtungen (vgl. Kap. 2). Eine Ableitung von Abtragsdaten aus der Schwebstoffführung von Fließgewässern ist selbst bei hochaufgelösten Messungen zu unsicher, weil neben der Bodenerosion auch noch andere Sedimentquellen beteiligt sind (Schaub et al. 1997). Eine vielversprechende Methode ist die Bestimmung der aktuellen Abtragsrate aus der Tiefenverteilung bestimmter künstlich in den Boden eingetragener Stoffe (z.B. Radionuklide). Damit wird neben der eigentlichen Bodenerosion auch die Pflugerosion und der Bodenverlust durch die Ernte erfasst. Allerdings ist diese Technik heute noch nicht völlig ausgereift.

Wegen diesen messtechnischen Problemen wurden zur raschen Abschätzung der Abträge eine Vielzahl von mathematischen Verfahren („Modelle“) entwickelt (Bork und Schröder 1996). Keines dieser Modelle konnte bisher jedoch abschliessend anhand von Messdaten geprüft werden. Ein

Überblick über die Praxis in anderen Ländern zeigt, dass sehr unterschiedliche Modell-Ansätze angewandt werden (Bayern: ABAG; Sachsen: EROSION 3D; Süd-Limburg (NL): LISEM; USA: WEPP). Für die Anwendung der verschiedenen Verfahren werden die benötigten regionalen naturräumlichen Grundlagen (Klima- und Bodendaten) mitgeliefert, weil die Bestimmung der Eingabedaten sehr aufwendig ist.

Einfache Indikatoren für die Gefährdung eines Standortes durch Bodenerosion sind sichtbare Schadensformen (Verschlammung oder Verspülung der Bodenoberfläche, Erosionsrillen). Im Falle von Rillenerosion kann auch das Ausmass des Abtrags zumindest näherungsweise bestimmt werden. Ansonsten kann die Erosionsgefährdung eines Standortes aus den fünf Prozessfaktoren

- Niederschlag („Erosivität“)
- Bodenwiderstand („Erodibilität“)
- erosive Hanglänge
- Hangneigung
- Bodenbedeckung

abgeleitet werden. Die oben erwähnten Abschätzverfahren enthalten verschiedene Ansätze zur Quantifizierung der Prozessfaktoren. Zu beachten ist, dass nur die beiden Faktoren erosive Hanglänge (durch die Schlageinteilung) und Bodenbedeckung (durch die praktizierte Fruchtfolge) über die Landnutzung beeinflussbar sind, also Ansätze für Erosionsverminderungsmassnahmen bieten.

Wie im Falle der Bodenverdichtung können drei Fälle unterschieden werden, wo Richtwerte als Beurteilungs- und Entscheidungsgrundlage für verschiedene Handlungsweisen anzuwenden sind:

- Selbstkontrolle durch Praktiker bei der Planung und Ausführung der Bodenbewirtschaftung
- Überwachung des Bodenzustands durch die Behörden und Erlass von Nutzungsvorschriften
- Nachweis von Schäden und Verantwortlichkeiten in Streitfällen.

### **a) Selbstkontrolle**

Für Praktiker aus der Landwirtschaft existiert in der Schweiz ein einfaches Abschätzverfahren auf der Basis der ABAG („Bodenerosion selber Abschätzen. Ein Schlüssel für Betriebsleiter und Berater“ von Terragon Ecoexperts, Bubendorf BL). Dem vergleichsweise geringen Aufwand für die Bestimmung der Parameterwerte steht dabei die eine beschränkte Genauigkeit der Prognosen bei bestimmten Standortdispositionen gegenüber.

### **b) Überwachung des Bodenzustands und Nutzungsvorschriften**

Entsprechende Kennwerte für die Bodenerosion sind die Niederschlagserosivität, die Bodenerodibilität und die Hangneigung. Detaillierte Angaben zur Erodibilität fehlen heute noch für den grössten Teil der Schweiz ebenso wie solche zu den Jährlichkeiten der für die Auslösung von Bodenerosion entscheidenden kurzfristigen (5- bis 30-minütigen) Niederschlagsereignisse. Angaben zur Hangneigung sind aus der Landesvermessungen ableitbar, sollten aber im Zweifelsfall in unruhigem Gelände für den jeweiligen Standort nachgeprüft werden. Für die rasch ändernden Kennwerte Fruchtfolgen und Schlageinteilung (erosive Hanglänge) sind Auswertungen der Agrarstatistik und ergänzende Kartierungen (ggf. mittels Fernerkundungstechniken) heranzuziehen.

Da rechtskräftige Nutzungsvorschriften stets eine gewisse Eigentumsbeschränkung bedeuten, sind sie aufgrund von exakten und reproduzierbaren Parametern zu erlassen. Bezüglich Bodenerosion fehlt im Moment noch ein verfügbares Abschätzverfahren zur Überprüfung der Einhaltung der Richtwerte, das diesen Anforderungen wirklich entspricht. Nutzungsempfehlungen ohne unmittelbare Rechtskraft (z. B. in Richtlinien, Wegleitungen) können dagegen auf dem unter a) erwähnten Erosionsschlüssel basieren.

### **c) Ermittlung von Verdachtsflächen, Nachweis von Schäden und Verantwortlichkeiten**

Der Nachweis einer anhaltenden Überschreitung des Grenzwertes für Bodenerosion ist nur durch eine langjährige Dokumentation der aufgetretenen Schäden möglich. Eine wichtige Grundlage zur Ermittlung von Verdachtsflächen kann dabei die IP-Kontrolle spielen, weil hier das Auftreten von Erosion vermerkt werden muss. Schwierigkeiten beim Erkennen von Erosionsschäden können durch einfache Hilfsmittel (z.B. Fotodokumentation der vorkommenden Schadensbilder) und Schulung stark vermindert werden. Meist lassen sich aus den Schadensbildern auch die Schadensursachen und dadurch die Verantwortlichkeiten erkennen, insbesondere im Falle von Talwegerosion (vgl. auch Herweg 1987). Eine genaue Quantifizierung des Bodenabtrags auf solchen Verdachtsflächen bedingt allerdings wiederum direkte Erosionsmessungen.

## **5. Sonderformen**

Neben der Bodenerosion im engeren Sinne können beträchtliche Bodenverlagerungen und damit massive Substanzverminderungen auch durch die Wirkung des Pflügens („Pflügerosion“) und wegen des Verlustes des an den Ernteprodukten haftenden Bodens (v.a wenn die unterirdische Biomasse geerntet wird, wie bei Zuckerrüben oder Kartoffeln) zustandekommen. Diese Effekte sind daher beim vorsorglichen Schutz der Bodenfruchtbarkeit einzubeziehen. Es fehlen im Moment allerdings noch detaillierte Kenntnisse über die Höhe von Bodenverlagerungen in dieser Form unter schweizerischen Verhältnissen. Entsprechende Untersuchungen sind daher angebracht.

## **6. Literatur:**

Becher, H.H., H. Stürmer, 1982: Maiserträge auf erodierten Lössstandorten. Bayer. Landw. Jahrb., 6, 735-747.

Bork, H.-R., 1988: Bodenerosion und Umwelt - Verlauf, Ursachen und Folgen der mittelalterlichen und neuzeitlichen Bodenerosion, Bodenerosionsprozesse, Modelle und Simulationen. Landschaftsgenese und Landschaftsökologie, Bd. 13, Braunschweig, 249 S.

Bork, H.-R., A. Schröder, 1996: Quantifizierung des Bodenabtrags anhand von Modellen. In: Handbuch des Bodenschutzes, 2. Lieferung, S. 1-44.

- BUDBL (Bau- und Umweltschutzdirektion Kanton Basel-Landschaft) (Hrsg.), 1994: Bodenerosion im Kanton Basel-Landschaft. Aktueller Stand, Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit, Thesen zur Erhaltung der Böden, weiteres Vorgehen. Liestal, 31 S.
- Herweg, K., 1987: Die Geomorphologische Karte (GMK) als Instrument bei der Bodenerosionsbekämpfung. *Natur und Landschaft*, 62, 434-439
- Mosimann, T.; Maillard, A.; Musy, A.; Neyroud, J.-A.; Rüttimann, M., P. Weisskopf, 1991: Erosionsbekämpfung in Ackerbaugebieten. Ein Leitfaden für die Bodenerhaltung. Liebefeld, 187 S.
- Prasuhn, V., Schaub, D., E. Unterseher, 1990: Vorschlag zur Klassifikation und Nomenklatur von Erosionsformen. *Mitt. Dt. Bodenkdl. Ges.*, 61, 39-42.
- Schaub, D., V. Prasuhn, 1998: A map on soil erosion on arable land as a planning tool for sustainable land use in Switzerland. *Advances in GeoEcology*, 31, (in print)
- Schaub, D., C. Wüthrich, C. Seiberth, 1997: Einfluss der Boden-erosion auf den Stoffhaushalt in unterschiedlichen schweizerischen Agrarlandschaften. *Mitt. Dt. Bodenkdl. Ges.*, 83, 463-466.
- Schwer, P., (1994): Untersuchungen zur Modellierung der Boden-neubildungsrate auf Opalinuston des Basler Tafeljura. *Physiogeographica, Basler Beiträge zur Physiogeographie*, Bd. 18, Basel, 190 S.
- Schwertmann, U., W. Vogl, M. Kainz, 1987: Bodenerosion durch Wasser: Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmassnahmen. Ulmer Verlag, Stuttgart, 64 S.
- Semmel, A., 1995: Holozäne Bodenbildungs-raten und „tolerierbare Bodenerosion“ - Beispiele aus Hessen. *Geol. Jb. Hessen*, 123, 125-134.

### **BODENDEFINITION (Was ist Boden?)**

**Boden ist die äusserste Schicht der Erdkruste, die durch Lebewesen geprägt wird. Im Boden findet ein reger Austausch von Stoffen und Energie zwischen Luft, Wasser und Gestein statt. Als Teil des Ökosystems nimmt der Boden eine Schlüsselstellung in lokalen und globalen Stoffkreisläufen ein.**

#### **Entstehung**

Boden besteht aus festen Bestandteilen, aus Wasser und aus Luft. Er entsteht durch sehr langsam ablaufende Prozesse. Unter dem Einfluss von Klima und von Lebewesen verwittert das Gestein; die mineralischen Teile werden verändert, mit organischen Stoffen angereichert und neu zusammengefügt. Das Bodenleben, d.h. Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen, wandelt dieses Gemisch in ein Gefüge aus Krümeln und durchgehend verbundenen Hohlräumen um. Steine, Sand, Schluff, Ton und Humus bilden das Gerüst des Bodens.

#### **Aufbau**

Im Laufe der Zeit bilden sich im Boden Schichten mit unterschiedlichen Eigenschaften und in der Regel charakteristischen Farbtönen heraus:

- < der Oberboden als meist dunkel gefärbte, intensiv belebte, stark durchwurzelte, mit Humus angereicherte, lockere und krümelige Schicht,
- < der oft hellere, eher weniger stark verwitterte, weniger belebte und schwächer durchwurzelte Unterboden,
- < der Untergrund aus dem kaum oder nicht verwitterten Gestein.

Der Boden reicht so tief, wie Lebewesen, bzw. Anzeichen von Verwitterung feststellbar sind, oder wie er durch Pflanzenwurzeln erschlossen werden kann. Den oft sehr unterschiedlichen Standortverhältnissen entsprechen auch ähnlich viele verschiedene Böden.

#### **Funktionen**

Gesunder Boden ist ein System mit grosser Selbsterhaltungskraft. Er erfüllt Regelungsfunktionen für den Lebensraum und dessen Bewohner, sofern genügend Fläche und ein ausreichendes Volumen vorhanden sind. Von elementarer Bedeutung ist der Boden als Standort und Medium für den Aufbau der Biomasse, für den Abbau organischer Stoffe und deren Umwandlung in dauerhafte Humusstoffe sowie als Filter für das Sickerwasser. Ungestörter Boden ist widerstandsfähig gegenüber Verdichtung und Erosion.

#### **Nutzung und Gefährdung**

Der Mensch nutzt Boden als Produktionsstandort für Nutzpflanzen und als Genreserve. Er braucht und verbraucht den Boden zur Gewinnung von Baustoffen, als Grundlage für Wohnen, Arbeit, Freizeit und Verkehr sowie als Deponie für Abfälle verschiedenster Art. Boden ist kulturelles Gut und unverzichtbarer Teil der Landschaft. Durch falsche und zu intensive Nutzung wird er beschädigt oder gar zerstört. Boden ist grundsätzlich nicht vermehrbar.

## ERLÄUTERUNGEN

### Konzept und Aufbau der vorliegenden Definition

Wirtschaftliche, gesellschaftliche und rechtliche Entwicklungen haben grossen Einfluss auf die Nutzung, die Schädigung sowie die Zerstörung von Boden. Ethische Überlegungen, das Vorsorgeprinzip unserer Umweltschutzgesetzgebung sowie eine gewisse Ernährungssicherung verlangen die Erhaltung einer möglichst grossen Fläche intakter Böden in unserem Land. Der Bodenschutz hat noch keineswegs die Bedeutung erlangt, die ihm von der Problemlage her zustehen würde.

Es braucht daher ein wacheres Bewusstsein breiter Kreise zum Zustand unserer Böden. Dazu gehört auch eine Beschreibung des Objektes "Boden". Die Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz verfügte bisher über keine eigene Definition von Boden. Keine andere Organisation ist befugter als die BGS, den Boden als Naturobjekt und als Schutzgut zu definieren. Es geht nicht darum, dem Gesetzgeber vorzuschreiben, wie er Boden zu verstehen habe. Hingegen sollen sich die Mitglieder der BGS auf die von der Gesellschaft verabschiedete Definition stützen und damit argumentieren können.

Adressaten der vorliegenden Definition sind somit nebst den Bodenkundlern und -kundlerinnen, wissenschaftlichen Fachleuten oder dem Gesetzgeber, interessierte Laien, Bürgerinnen und Bürger, die mit Boden zu tun haben, Landwirte, Förster, Lehrerinnen und Lehrer, Schülerinnen und Schüler ab Oberstufe, und viele andere mehr.

Das heute rechtskräftige Umweltschutzgesetz verfügt über keine eigene Definition von Boden. Im neu revidierten Gesetz wird unter Artikel 7, Abs. 4bis folgender Satz eingeführt: "*Als Boden gilt nur die oberste, unversiegelte Erdschicht, in der Pflanzen wachsen können*". Die nun vorliegende Bodendefinition der BGS kann somit als präzisierende Ergänzung zu diesem kurzen Satz verstanden werden.

Die Definition ist zweigeteilt: der erste Absatz ist eine Kernumschreibung von Boden; sie darf als Kurzversion verwendet werden, solange auf die dazugehörige ausführlichere Beschreibung verwiesen wird.

Die weiteren vier Abschnitte sollen verdeutlichen, dass eine statische Definition von Boden heute nicht mehr genügen kann, sondern dass natürlicher Boden als System zu verstehen ist, in welchem Prozesse ablaufen, die für den Boden und seine Entwicklung, aber auch für das ganze terrestrische Oekosystem von entscheidender Bedeutung sind.

### Was ist Boden?

Es handelt sich um die Kernaussage; es ist zulässig, diesen verkürzten Abschnitt als "Definition" zu verwenden. Es ist jedoch immer ausdrücklich darauf hinzuweisen, dass die eigentliche Definition umfassender ist.

Boden ist ein Teil der Umwelt und damit ein Schutzgut, wie Luft und Gewässer. Der erste Satz beschreibt mit dem Ausdruck "Schicht" die flächenhafte, globale Ausdehnung; es handelt sich um eine globale Betrachtungsweise.

Anstelle der präziseren Fachausdrücke "Atmosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre" werden der besseren Verständlichkeit halber die Ausdrücke "Luft, Wasser und Gestein" verwendet. Die "Biosphäre" wird durch den Ausdruck "Lebewesen" wiedergegeben. Diese Vereinfachung wird bewusst hingenommen: "Atmosphäre" ist nicht gleich "Luft", und "Hy-

rosphäre" ist nicht gleich "Wasser" zu setzen. Auch die "Pedosphäre" wird nicht erwähnt, da es sich um einen Fachausdruck handelt.

Der Boden ist streng genommen kein eigenes Oekosystem, da eine Primärproduktion fehlt. Er ist aber Teil des gesamten terrestrischen Oekosystems. Die Schlüsselstellung in globalen Stoffkreisläufen ist für die Elemente C, S, P, sowie für N gegeben; Boden spielt hier u.a. eine zentrale Rolle als Bioreaktor sowie als Reserve oder Lager.

### **Entstehung**

Dieser Abschnitt beschreibt den Prozess der Bodenbildung, die Entstehung von Boden (Pedogenese). Der Ausdruck "sehr langsam ablaufende Prozesse" widerspiegelt den Jahrtausendaspekt in ungenügender Weise. Auf Jahresangaben wird dennoch verzichtet. Anstatt des Fachausdruckes "Aggregat" wird vereinfachend "Krümel" gesetzt. Nicht jede Struktur ist eine Krümelstruktur, Dennoch ist auf die grosse Bedeutung des Bodenlebens für die Bildung der Krümel hinzuweisen.

Der Ausdruck Skelett wird bewusst nicht verwendet, weil zu verwirrend (Skelett = Gesamtheit der Körner über 2 mm). Der Begriff Gerüst wird eingeführt, weil er assoziiert an "Knochengerüst" und so bildlich die tragende Stützfunktion vermittelt. Das Gerüst ist nicht starr, sondern bis zu einem gewissen Grad durchaus beweglich. *Korrekterweise müssten auch die Krümel/Aggregate erwähnt werden, da sie je nach Feuchtezustand auch Gerüstfunktionen übernehmen können.*

Das Relief als Bodenbildungsfaktor ist unter dem Begriff der Verwitterung subsummiert.

### **Aufbau**

Der dritte Abschnitt beschreibt den Aufbau eines Bodens anhand einiger morphologischer Merkmale, die für viele der bei uns typischen und verbreiteten Bodentypen, wie die Braunerden oder die Parabraunerden, gelten.

Selbstverständlich gibt es Böden, die nicht dieser allgemeinen Beschreibung entsprechen. Dem wird sprachlich durch die Begriffe "meist" und "in der Regel" entsprochen. Im Zusammenhang mit der Biodiversität ist darauf hinzuweisen, dass seltene Böden besonderen Wert haben und eines hohen Schutzes bedürfen. Nicht nur agronomisch wertvolle Böden sind in erster Linie zu schützen, sondern auch solche mit speziellen Merkmalen oder Eigenheiten.

Der Begriff "Schichten" ist für Fachleute nicht korrekt, weil es sich nicht um einen Entstehung in Form von Auftragung eines Materials handelt. Leider fehlt in der deutschen Sprache ein treffender Ausdruck, welcher die "Ausdifferenzierung von Horizonten" adäquat beschreiben könnte. Der Vorschlag, dies mit "Bereich" zu bezeichnen, ist noch weniger zutreffend, als "Schichten".

Auf die in der Bodenkunde üblichen Horizontbezeichnungen, wie z.B. A, B oder C wird nicht eingegangen. Die Nomenklatur ist diesbezüglich uneinheitlich ( z.B. S für B in der Romanie).

Es wird bewusst auf eine Tiefenangabe verzichtet, obwohl hier ein wesentlicher Streitpunkt unter geologischen und pedologischen Fachleuten liegt. Es ist aber von bodenkundlicher Seite darauf hinzuweisen, dass der Einfluss der Lebewesen auf die Bodenbildung die Bedeutung der rein chemisch-physikalischen Prozesse übertrifft. Bodenmikroorganismen sind beispielsweise im Grundwasser wie auch im kaum angewitterten Gestein nachweisbar; somit kann die Bodenbildung in grosse Tiefen hinabreichen.

In manchen Richtlinien oder Merkblättern wird dem Boden willkürlich eine bestimmte Tiefe zugeordnet. Dies ist bodenkundlich nicht haltbar. Vielmehr ist in jedem Fall abzuklären oder festzulegen, welche Tiefe dem Boden am betreffenden Standort vernünftigerweise zuge-

messen werden kann. Die Verwitterung und/oder die Durchwurzelung sind hierzu geeignete, sichtbare Merkmale für die Festlegung der Bodenmächtigkeit an einem bestimmten Standort.

### **Funktionen**

Hier geht es u.a. darum, den Boden als System, als momentanen Zustand von Prozessen darzustellen. Die Selbsterhaltungskraft ist dabei relativ zu verstehen. So tendieren die Prozesse im Boden auf Fließgleichgewichtszustände mit minimaler Entropieproduktion hin. Boden, bzw. das Bodenleben, "sucht" optimale Zustände für die eigene Erhaltung.

Dieses System übernimmt in seiner Ganzheit sehr verschiedene Funktionen, von denen die Wichtigsten erwähnt werden. Die Erfüllung einer Funktion ist nicht möglich, wenn (zu) kleine Teile eines Bodens betrachtet werden. Es ist eine minimale Menge, bzw. Mächtigkeit und/oder Fläche an natürlichem Boden notwendig, um einer Funktion gerecht zu werden. Es ist schwierig, das Ausmass der Einhaltung oder auch der Störung von Funktionen wahrzunehmen; dies ist letztlich auch nicht messbar.

Es ist auch darauf hinzuweisen, dass eine Pflanzenproduktion ohne Boden, sei es in der Fläche oder als Volumen, nicht auskommt. Auch die "Hors sol"-Produktion braucht und zerstört Boden!

### **Nutzung und Gefährdung**

Es wäre realitätsfern, den heute meist negativen Einfluss des Menschen auf den Boden, seine Fläche und seine Fruchtbarkeit, nicht zu erwähnen. Viele Böden sind anthropogen derart verändert, dass sie nur noch Teile der oben erwähnten Funktionen übernehmen können. Weltweit sollen gemäss FAO nur noch auf 11% der Fläche ungestörte, fruchtbare Böden vorhanden sein. Die Schädigung und Zerstörung von Boden ist für den Menschen ein Wahrnehmungsproblem, da er nur mittelbar Konsument von Boden ist - im Gegensatz zu Wasser und Luft - und daher auch nur indirekt betroffen wird.

Diese Definition umfasst daher auch stark vom Menschen beeinflusste und gestörte Böden, selbst wenn sie vielleicht nicht mehr alle Kriterien erfüllen können. Die Bodenwissenschaft wird sich daher, gewollt oder ungewollt, mehr und mehr mit anthropogen beeinflussten und nur noch bedingt natürlichen und fruchtbaren Böden beschäftigen müssen.

Die Bedeutung des Bodens als Teil der Landschaft schliesst auch das geogene Erbe (z.B. in Form von Geotopen) mit ein.

Die Erwähnung der Unvermehrbarkeit von Boden steht ganz absichtlich am Schluss der Definition und bildet eine Klammer um die ganze Definition herum. Hinweise auf die erfolgreiche Rekultivierung von (kleinen) Flächen ändern nichts an der Aussage dieses letzten Satzes.

## Anhang 4: Für den Bodenschutz relevante Artikel des Umweltschutzgesetzes und der Verordnung über Belastungen des Bodens

Definition zu ‚Bodenbelastungen‘ und ‚Boden‘

---

### Rechtsgrundlagen aus dem Umweltschutzgesetz (USG) vom 7. Okt. 1983 (Stand 21. Okt. 1997)

*Art. 7, Abs. 4<sup>bis</sup>*

**Bodenbelastungen** sind **physikalische**, chemische und biologische Veränderungen der natürlichen Beschaffenheit des Bodens. Als **Boden** gilt nur die oberste, unversiegelte Erdschicht, in der Pflanzen wachsen können.

*Art. 33, Abs. 2*

Der Boden darf nur so weit **physikalisch belastet** werden, dass seine Fruchtbarkeit nicht nachhaltig beeinträchtigt wird; dies gilt nicht für die bauliche Nutzung des Bodens. Der Bundesrat kann über Massnahmen gegen physikalische Belastungen wie die Erosion oder die Verdichtung Vorschriften oder Empfehlungen erlassen.

### Rechtsgrundlagen aus der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) vom 1. 7. 1998

*Art. 2, Abs. 4*

**Physikalische Bodenbelastungen** sind Belastungen des Bodens durch künstliche Veränderung der Struktur, des Aufbaus oder der Mächtigkeit des Bodens.

*Art. 6, Abs. 1*

Wer Anlagen erstellt oder den Boden bewirtschaftet, muss unter Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften und der Feuchtigkeit des Bodens Fahrzeuge, Maschinen und Geräte so auswählen und einsetzen, dass **Verdichtungen** und andere Strukturveränderungen des Bodens vermieden werden, welche die Bodenfruchtbarkeit langfristig gefährden.

*Art. 6, Abs. 2*

Wer Terrainveränderungen vornimmt oder den Boden bewirtschaftet, muss mit geeigneter Bau- und Bewirtschaftungsweise, insbesondere durch erosionshemmende Bau- oder Anbautechnik, Fruchtfolge und Flurgestaltung, dafür sorgen, dass die Bodenfruchtbarkeit nicht durch **Erosion** langfristig gefährdet wird. Sind dazu gemeinsame Massnahmen mehrerer Betriebe nötig, so ordnet der Kanton diese an, insbesondere bei der Erosion durch konzentrierten Oberflächenabfluss (Talwegerosion).

*Art. 7, Abs. 1*

Wer **Boden aushebt**, muss damit so umgehen, dass dieser wieder als Boden verwendet werden kann.

*Art. 7, Abs. 2*

Wird ausgehobener Boden **wieder als Boden verwendet** (z. B. für Rekultivierungen oder Terrainveränderungen), so muss er so aufgebracht werden, dass:

- a. die Fruchtbarkeit des vorhandenen und die des aufgebrachten Bodens durch physikalische Belastungen höchstens kurzfristig beeinträchtigt werden;
- b. der vorhandene Boden chemisch nicht zusätzlich belastet wird.







