

Landnutzung und Landentwicklung Teil 1, Kulturtechnik

Educational Material

Author(s):

Tobias, Silvia

Publication date:

2005

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005705702>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

LANDNUTZUNG UND LANDENT- WICKLUNG

Teil 1 Kulturtechnik

Silvia Tobias

Oktober 2005

IMPRESSUM

Titel: Landnutzung und Landentwicklung; Teil 1 Kulturtechnik
Unterlagen zur Vorlesung 103-0435G D-BAUG Studiengang Geomatik und
Planung, 5. Sem. BSc ETH Zürich
Oktober 2005

Lehrbeauftragte: Dr. Silvia Tobias, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Land-
schaft WSL

Bezug: www.wsl.ch/staff/silvia.tobias

INHALTSVERZEICHNIS

1. EINFÜHRUNG	4
1.1 Aktuelle Aufgaben der Kulturtechnik	4
1.2 Das Nachhaltigkeitsprinzip	4
1.3 Natürliche und anthropogene Standortfaktoren, die die Landnutzung bestimmen	6
2. EINGRIFFE IN DEN LANDSCHAFTSWASSERHAUSHALT	11
2.1 Bodenentwässerung	11
2.2 Bewässerung	18
3. INTENSIVIERUNG DER LANDWIRTSCHAFTLICHEN NUTZUNG	20
3.1 Mechanische Belastung, Bodenverdichtung	21
3.2 Erosion	32
3.3 Düngung und Pflanzenschutz	34
4. BAUTÄTIGKEIT, ROHSTOFFABBAU, ABFÄLLE	38
4.1 Bodenversiegelung	38
4.2 Grossbaustellen und Rohstoffabbau	38
4.3 Schadstoffe, Abfälle	43
4.4 Umnutzung und Ersatzstandorte	50
LITERATURVERZEICHNIS	52

1. EINFÜHRUNG

1.1 Aktuelle Aufgaben der Kulturtechnik

Die traditionelle Aufgabe der Kulturtechnik bestand in der Urbarmachung des Bodens und Bereitstellung der Flächen für die menschliche Nutzung. Heute geht es vermehrt darum, die Übernutzung der natürlichen Ressourcen zu verhindern und allfällige Schäden zu kompensieren oder zu sanieren. Da es in unseren Breiten kaum noch absolut ungenutzte Flächen gibt, besteht die heutige Aufgabe der Kulturtechnik vielmehr in der Wieder-Bereitstellung von Flächen für eine neue Nutzung. Dabei darf sich das Aktionsfeld nicht auf einzelne Parzellen beschränken, sondern es muss die Wirkungsbereiche aller betroffenen Umweltsysteme umfassen. Diese Aufgaben entsprechen einem **regionalen Flächenmanagement**.

Heute geht es um die optimale Verteilung und Umsetzung der Landnutzung, so dass eine nachhaltige Nutzung der Umweltressourcen innerhalb einer Region möglich ist. Hierbei sind verschiedene **Akteure** mit unterschiedlichen Nutzungsansprüchen beteiligt:

- direkte Landnutzer (z. B. Landwirte, Kiesabbauunternehmen)
- indirekte Nutzniesser (z. B. Konsumenten in regionalen Zentren, Verkehrsteilnehmer auf Strassen)
- betroffene Nachbarn (z. B. Anrainer von Kiesgruben, Hochleistungsstrassen).

Die Bedürfnisse der Akteure sind beim regionalen Flächenmanagement ebenso zu berücksichtigen wie diejenigen der Umwelt. Denn die genannten Akteure sind für die Umsetzung einer regionsübergreifenden nachhaltigen Landnutzung verantwortlich.

1.2 Das Nachhaltigkeitsprinzip

In der Ökonomie hat der 'Sustainability'-Begriff eine lange Tradition. Das Konzept der Nachhaltigkeit stammt ursprünglich aus der Forstwirtschaft, wo es eine Verpflichtung auf eine Waldbewirtschaftung kennzeichnet, bei der die Holzernte die Regenerationsfähigkeit des Waldes nicht überschreitet, so dass ein dauerhafter Schwund des Holzvorrates vermieden wird. In einem weiteren Sinn wird der Begriff der nachhaltigen Ernte in der Ressourcenökonomie für eine bestandserhaltende Nutzung von erneuerbaren Ressourcen verwendet (sustainable yield) (Ewers und Rennings 1996, S. 422). Seit den 1970-er Jahren wurde dieser Begriff auch auf die übrigen Wirtschaftsbereiche und alle Ressourcen der Umwelt ausgedehnt. Die erste weltweite Umweltschutzkonferenz der Vereinten Nationen fand bereits 1972 in Stockholm statt. An der zweiten internationalen Umweltschutzkonferenz der Vereinten Nationen 1992 in Rio de Janeiro wurde insbesondere das Konzept der nachhaltigen Entwicklung aufgestellt (Deutsches Institut für Fernstudienforschung Uni Tübingen 1997, S. 425-462).

*„Nachhaltig ist eine Entwicklung, wenn sie gewährleistet, dass die Bedürfnisse der heutigen Generation befriedigt werden, ohne die Möglichkeiten **künftiger Generationen** zur Befriedigung ihrer eigenen Bedürfnisse zu beeinträchtigen“* (Hauff 1987). Diese Definition der World Commission on Environment and Development (WCED) im sogenannten Brundtland-Bericht 'Our Common Future' von 1987 ist wohl die am meisten zitierte. Diese sehr allgemein formulierte Definition hat allerdings die grosse Schwäche, dass daraus kaum konkrete Ziele abgeleitet werden können. Die WCED geht davon aus, dass ohne ein permanentes wirtschaftliches Wachstum, was meistens mit einer Steigerung des Brutto-Sozialprodukts (BSP) gleichgesetzt wird, eine nachhaltige Entwicklung nicht möglich ist.

Dem Begriff der nachhaltigen Entwicklung wurden in Rio 1992 drei Schlüsselthemen zugeordnet. Er vereinigt folgende drei Aspekte in sich: die Entwicklung muss **sozial**, **ökonomisch** und **ökologisch** verträglich sein. Diese sogenannte **Retinität** der Nachhaltigkeit gilt als Kern des Leitbildes (vgl. Abb. 1).

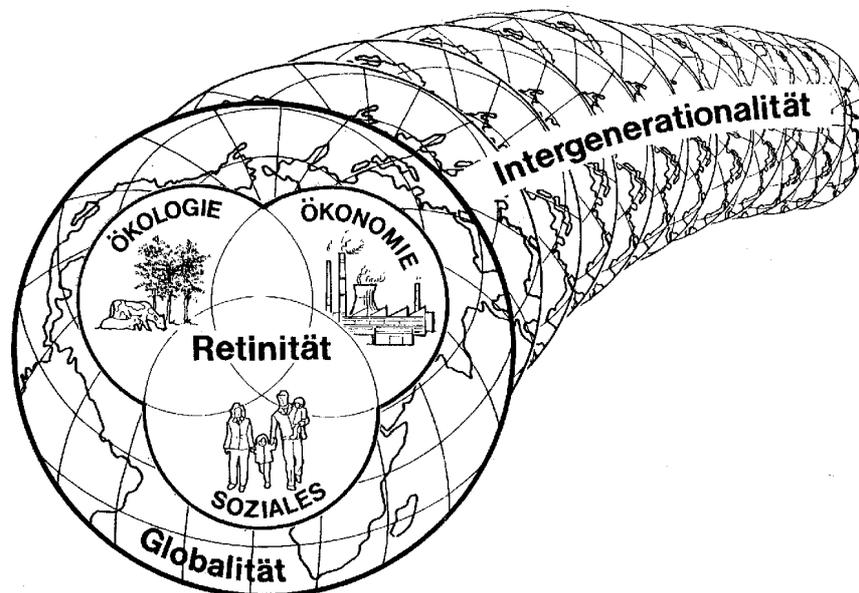


Abb. 1 Ethische Dimensionen des Leitbildes der nachhaltigen Entwicklung (Deutsches Institut für Fernstudienforschung Uni Tübingen 1997, S. 446)

Nachhaltigkeit muss demnach sehr umfassend verstanden werden. Am bekanntesten ist heute die ökologische Komponente, die auf die Vermeidung der Übernutzung der natürlichen Ressourcen abzielt. Nach wie vor ist aber auch die wirtschaftliche Nachhaltigkeit von Bedeutung, um die wirtschaftliche Existenz einzelner Individuen und ganzer Staaten zu erhalten. Schliesslich hat Nachhaltigkeit auch eine gesellschaftliche Komponente. Der anzustrebende Zustand ist in diesem Fall die soziale Gerechtigkeit in der Nutzung der Ressourcen.

Zu diesen drei Dimensionen der Nachhaltigkeit kommen noch die Dimensionen der Zeit und des Raumes. Als integraler Bestandteil der sozialen Verträglichkeit wird allgemein die **gerechte Verteilung der Ressourcen** und der zulässigen Umweltnutzungen erachtet. Dies sowohl **intragenerational**, d.h. innerhalb von Generationen, als auch **intergenerational**, d.h. zwischen verschiedenen Generationen. Das Gleichverteilungsprinzip hat also zwei Dimensionen. Zum einen sollen alle Menschen dieser Erde gleich viel Ressourcen verbrauchen dürfen, was beim heutigen Verbrauchsniveau der Industrieländer keineswegs ökologisch nachhaltig wäre. Zum anderen soll zukünftigen Generationen ein Ressourcenkapital weitergegeben werden, das zur Befriedigung ihrer Bedürfnisse ausreicht.

Der ökologischen Komponente im Konzept der Nachhaltigen Entwicklung kommt eine bedeutende Rolle zu, weil die Erhaltung der Lebensgrundlagen eine Voraussetzung ist für das Überleben auf unserem Planeten. Ohne Nachhaltigkeit im Sinne der ökologischen Sicherstellung der Lebensgrundlagen, also der relativen Stabilität der natürlichen Entwicklung, gibt es weder eine soziale noch eine ökonomische Dimension. Prinzipiell kommt der Ökologie erste Priorität zu. Von Fall zu Fall können allerdings soziale oder ökonomische Erfordernisse kurzfristig über die ökologischen das Übergewicht erhalten. Aber im langfristigen Horizont muss die ökologische Priorität gewahrt bleiben (Ruh 1997, S. 14).

Abgeleitet vom Postulat der globalen Nachhaltigkeit soll auch innerhalb einer Region auf lange Sicht eine ökologisch, ökonomisch und sozial nachhaltige Landnutzung gewährleistet sein. Dabei steht die Erhaltung beziehungsweise Wiederherstellung der Multifunktionalität der Flächen im Vordergrund, das heisst, es geht um die Erhaltung des grösstmöglichen (Nach-) Nutzungsspektrums.

Im Sinne der **Vorsorge** sollen Schäden an den Umweltsystemen durch die Landnutzung vermieden werden. Insbesondere sollen auf empfindlichen Flächen schonende Nutzungsformen gewählt werden. Flächen, auf denen die Multifunktionalität eingeschränkt ist, sollen entweder saniert werden oder über einen **regionalen Flächenausgleich** in den beeinträchtigten Funktionen kompensiert werden. Das heisst, in derselben Region sind andere Flächen für die nicht mehr möglichen Nutzungen bereitzustellen. Nur schon nach dem Postulat der wirtschaftlichen Nachhaltigkeit sind **brachliegende**, das heisst, ungenutzte Flächen zu vermeiden. Diese sind zu sanieren oder einer anderen Nutzung, die auch bei eingeschränkter Multifunktionalität möglich ist, zuzuführen. Darüber hinaus heisst nachhaltige Umweltnutzung auch die Erhaltung der Artenvielfalt, der menschlichen Gesundheit sowie der Sicherung von Luft-, Wasser- und Bodenqualitäten, die ausreichen, um das Leben und das Wohlergehen der Menschen sowie das Tier- und Pflanzenleben für alle Zukunft zu sichern.

Städte und Gemeinden erkennen an, dass eine Stadt oder Gemeinde es sich nicht leisten kann, Probleme in die weitere Umgebung oder in die Zukunft zu 'exportieren'. Daher müssen alle Probleme und Ungleichgewichte in einer Stadt zunächst intern auf lokaler Ebene ausgeglichen oder aber durch eine externe grössere Körperschaft auf regionaler oder nationaler Ebene aufgenommen werden. Dies ist das Prinzip der Problemlösung durch stufenweises Weitervermitteln nach aussen. Die Umsetzung dieses Prinzips gibt jeder Stadt viel Spielraum zur Bestimmung ihres Handelns.

Es geht also um die **Optimierung der Landnutzung** in ihrer Art und Verteilung innerhalb einer Region. Diese Optimierung der Landnutzung muss aber von den beteiligten **Akteuren** befürwortet werden, ansonsten werden sie sie nicht umsetzen (vgl. Kap. 1.1). Die Frage nach der Umsetzung einer nachhaltigen Landnutzung in einer Region ist schliesslich ein **Entscheidungsproblem**, denn alle Beteiligten suchen den grösstmöglichen Nutzen für sich selbst. Ein regionales Flächenmanagement soll dazu dienen, Entscheidungsgrundlagen und -verfahren zu entwickeln, um die Nachhaltigkeit der Landnutzung innerhalb einer Region integral zu fördern.

1.3 Natürliche und anthropogene Standortfaktoren, die die Landnutzung bestimmen

Die natürlichen Ressourcen der Umwelt lassen sich in die drei Elemente Boden, Wasser und Luft einteilen (Abb. 2). In jedem Umweltsystem sind immer alle drei Elemente vertreten. Aus der Wechselwirkung der Elemente untereinander ergeben sich die spezifischen Funktionen einzelner Umweltsysteme, die der Mensch nutzen kann. Beispielsweise für die land- oder forstwirtschaftliche Nutzung des Bodens ist ein geeigneter Bodenwasser- und -lufthaushalt von ausschlaggebender Bedeutung. Im Rahmen dieser Vorlesung beschränken wir uns auf die Nutzung der Ressource Boden. Diskutiert wird der Einfluss der Bodennutzung auf die folgenden wichtigen **Bodenfunktionen** (Tobias et al. 1999b, S. 2):

- Bioreaktor für den Abbau organischer Stoffe
- Standort für die natürliche Vegetation und 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
- Senke für Abfälle.

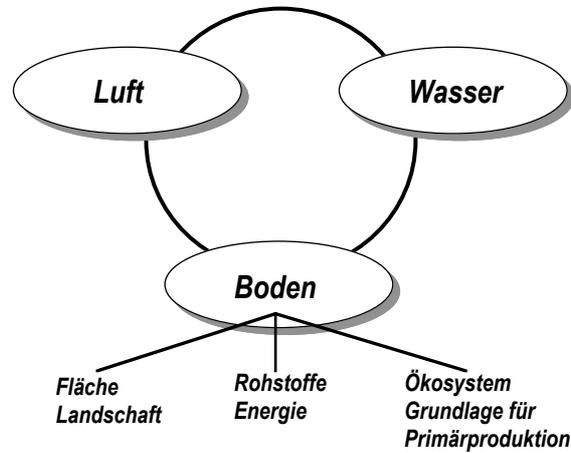


Abb. 2 Ressourcen unserer Umwelt

Im Gegensatz zu Luft und Wasser, stellt der Boden eine endliche Ressource dar. Es gibt keine Kreisläufe wie etwa den Wasserkreislauf oder den O₂-CO₂-Kreislauf, über die sich der Boden innerhalb überblickbarer Zeiträume erneuern könnte (Sojka und Upchurch 1999, S. 1041). Dies gilt auch für die verschiedenen Ressourcen, die sich aus dem Boden ergeben und die der Mensch direkt nutzen kann:

- Fläche
- Landschaft
- Rohstoffe
- Energie
- Ökosystem
- Grundlage für die Primärproduktion.

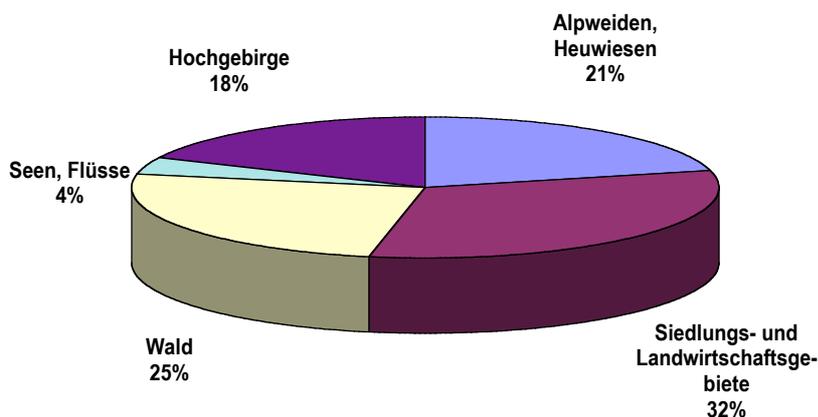


Abb. 3 Die Flächennutzung in der Schweiz (Häberli et al. 1991, S. 12)

Das Problem der Bodenknappheit verschärft sich durch die Tatsache, dass sich nicht alle Flächen gleich gut für die menschliche Nutzung eignen. Häberli et al. (1991, S. 12ff) stellten fest, dass sich das eigentliche Wirtschaftsleben der Schweiz auf nur einem Drittel der Lan-

desfläche abspielt (Abb. 3). Dies ergibt sich hauptsächlich aus der **Topographie**. Eine starke Neigung kann die Nutzung einer Fläche technisch verunmöglichen. Die ebenen Flächen, die für eine intensive Nutzung geeignet sind, beschränken sich auf das Mittelland und die alpinen Talsohlen. Dort konzentrieren sich die ertragreiche Landwirtschaft, die Industrie, Siedlungs- und Verkehrsflächen.

Ein weiterer natürlicher Standortfaktor, der die Landnutzung bestimmt, ist das **Potenzial** einer Fläche. Das Vorkommen von Bodenschätzen (in der Schweiz sind dies Kies, Sand und Lehm), die Ertragsfähigkeit für landwirtschaftliche Kulturen und auch die Exposition und Lage können die Flächennutzung vorgeben.

Einen ganz wesentlichen **anthropogenen Standortfaktor**, der die räumliche Verteilung der wirtschaftlichen Bodennutzung bestimmt, stellen **Infrastrukturanlagen** dar (Nowotny 1971, S. 18ff). Der Ausbau des Verkehrsnetzes um die wirtschaftlichen Zentren führt in den meisten Fällen zur Ausdehnung der Wohngebiete in den benachbarten Gemeinden, weil vermehrt Leute, die in der Stadt arbeiten, aufs Land ziehen. Gemäss den Daten der Volkszählung 2000 leben heute über 74% der Schweizer Bevölkerung in Agglomerationen. In einigen Fällen ermöglichen Infrastrukturanlagen überhaupt erst die Ausnutzung des eigentlichen Flächenpotenzials. So konnte die landwirtschaftliche Produktivität der nährstoffreichen Moorböden erst nach deren Entwässerung ausgenutzt werden. Daher rührt der Name „Bodenverbesserung“ oder „Melioration“ für kulturtechnische Massnahmen. Berühmte Beispiele grossflächiger Entwässerungen sind die Linth-Korrektion (1807-1816), die erste Jura-Gewässerkorrektion (1868-1891), die zweite Jura-Gewässerkorrektion (1962-1973) sowie die Korrektion des Alpenrheins im St. Galler Rheintal (Ende 18. Jahrhundert bis heute).

Ein Agglomerationseffekt wirtschaftlicher Zentren, der für die Landnutzung in einer Region ausschlaggebend ist, ist die Bildung spezifischer **Absatzmärkte**. Die stadtnahe Landwirtschaft produziert zu grossen Teilen Gemüse und Tafelobst, das heisst, Frischprodukte, die ohne weitere Verarbeitung direkt zu den Konsumenten gelangen. Andererseits werden auch aufgrund einzelner Verarbeitungsbetriebe landwirtschaftlicher Erzeugnisse bestimmte Kulturen in einem weiten Umkreis angebaut. Da die Produkte in der Regel frisch verarbeitet werden müssen (z. B. Konservenfrüchte, Zuckerrüben), wird die räumliche Ausdehnung der Zulieferer in erster Linie durch die benötigte Transportzeit eingeschränkt. Im Falle der Hero Lenzburg AG und der Hilcona AG, Schaan (FL), werden Anbauverträge für Frischprodukte mit Landwirten in einem Umkreis von 60 bis 120 km gemacht (Hr. Galmann, Einkäufer bei Hero Lenzburg AG, mündliche Mitteilung vom 16. 3. 2000).

Die Transportkosten limitieren auch den Absatzraum im Kiesmarkt (Abb. 4). Infolgedessen hat der Kiesmarkt eine sehr regionsspezifische Bedeutung. Die Absatzpreise können innerhalb einer Kiesregion unabhängig vom Globalmarkt festgelegt werden. Zudem finden sich oft kartellartige Zusammenschlüsse innerhalb einer Region, die den Preis bestimmen. Aufgrund des Distanzschutzes und der Kartellabsprachen können in der Kieswirtschaft immer noch verhältnismässig viele kleine und mittlere Unternehmen bestehen (Binswanger und Siegenthaler 1995).

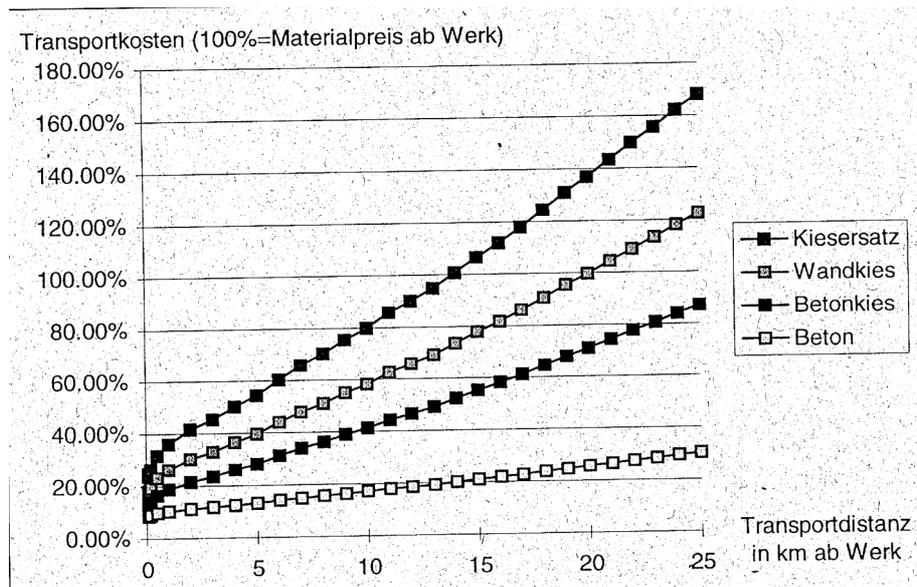


Abb. 4 Bedeutung der Transportkosten an den Materialkosten verschiedener Qualitäten in Abhängigkeit der Transportkosten (Binswanger und Siegenthaler 1995, S. 424)

Die Landnutzung kann die natürlichen Ressourcen wesentlich beeinflussen. Sie kann die Eigenschaften der Umweltsysteme dauerhaft verändern. Diese Veränderungen können positiv oder negativ gewertet werden, je nach dem, ob sie aus der Perspektive des Menschen oder der Umweltressourcen beurteilt werden. In den letzten Jahrzehnten wurde allerdings in vielen Fällen beobachtet, dass ab einem gewissen Ausmass auch positive Effekte der Landnutzung in negative umschlagen können. Gerade diese Wende vom Positiven zum Negativen soll im Sinne einer nachhaltigen Ressourcenbewirtschaftung vermieden werden.

Seit Mitte des 20. Jahrhunderts werden die negativen Agglomerationseffekte immer bedeutender. Ballungsräume kennzeichnen sich durch die Knappheit natürlicher Ressourcen, insbesondere der Bodenfläche, natürlicher Lebensräume und Naherholungsgebiete sowie zum Teil des (Grund-)Wassers. Dadurch verschärfen sich die Nutzungskonflikte in einer Region. Hinzu kommt die Belastung der Umweltressourcen durch die verschiedenen Arten der Landnutzung, einerseits mit Abfällen, die an die Luft, Gewässer oder den Boden abgegeben werden, andererseits durch Übernutzung.

Obschon es unbestritten ist, dass den negativen Ballungseffekten entgegen gewirkt werden muss, muss die ökonomische Nutzung der Ressourcen weiterhin gewährleistet sein. So schreibt der Staat ein ausgewogenes Verhältnis zwischen dem Schutz und der Nutzung der natürlichen Ressourcen vor (Art. 73 BV). Das Landwirtschaftsgesetz (Art. 1 LWG), das Waldgesetz (Art. 1 WaG) und Gewässerschutzgesetz (Art. 1 GSchG) betonen in den Zweckartikeln die Multifunktionalität der Nutzungsarten, das heisst, der **Ressourcenschutz** ist im wesentlichen **in die Nutzung zu integrieren**. Auch nach dem Vorsorgeprinzip des Umweltschutzgesetzes (Art. 1 Abs. 2 USG) geht die **Vermeidung** von Umweltschäden **vor** die **Sanierung**. Den gesetzlichen Auftrag für die räumliche Ausgewogenheit von Schutz und Nutzung der Ressourcen erteilt das Raumplanungsgesetz (Art. 1 RPG).

Die Umsetzung des gesetzlichen Auftrags zur nachhaltigen Nutzung der Umweltressourcen im Einzelfall verlangt geeignete Massnahmen von allen Disziplinen, die sich mit den einzelnen Ressourcen befassen, sowie ein reibungsloses Zusammenwirken an den Schnittstellen (Abb. 5). Dadurch wird die **Entscheidungsfindung zur optimalen Allokation der Landnutzung** zu einem äusserst komplexen Problem. Im Rahmen dieser Vorlesung werden die fundamentalen Grundlagen für die genannte Entscheidungsfindung erörtert.

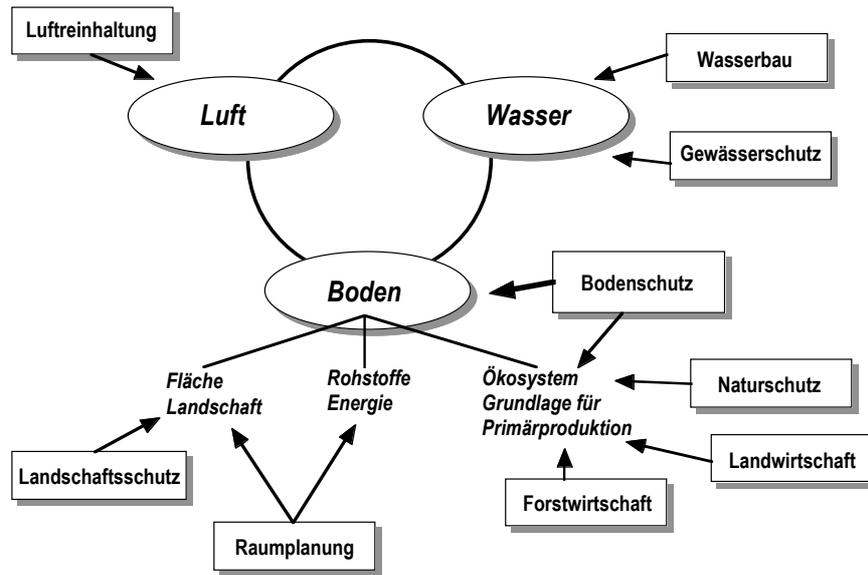


Abb. 5 Die verschiedenen Disziplinen, die die Bewirtschaftung der Umweltressourcen regeln

2. EINGRIFFE IN DEN LANDSCHAFTSWASSERHAUSHALT

Die umstrittensten kulturtechnischen Massnahmen sind Eingriffe in den Landschaftswasserhaushalt, weil sie sich in den meisten Fällen grossräumig, das heisst, über hydrologische Einzugsgebiete, auswirken. Darunter zählen die Be- und Entwässerung von Böden und Regulierung von Gewässern, die als Vorflut dienen. In humiden Klimabereichen, wie sie in Mitteleuropa grösstenteils vorkommen, spielt die Bewässerung von Böden eine untergeordnete Rolle, die Entwässerung ist aber umso bedeutender.

2.1 Bodenentwässerung

Zweck

Die Hauptziele der Bodenentwässerung sind die **Verbesserung des Bodenluft- und –wasserhaushalts** für die vorgesehenen landwirtschaftlichen Kulturen, insbesondere die Beseitigung von Bodenvernässungen. Der wesentliche Effekt der Entwässerung ist die Vergrösserung des Flurabstands zum Grundwasser, damit die durchwurzelte Schicht des Bodens nicht dauernd wassergesättigt ist. Angaben zur Wurzeltiefe verschiedener Kulturen und zum optimalen Flurabstand finden sich bei Muth (1991, S. 58f). Vor allem in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts war die Umwandlung von Grünland in Ackerflächen einer der Hauptgründe für Bodenentwässerungen. Die Absenkung des Grundwasserspiegels bewirkt in erster Linie eine verbesserte Durchlüftung des Wurzelraumes, was wesentlich zur Sicherung und zum Teil auch Steigerung der Erträge beiträgt. Durch die bessere Luftversorgung hat der Boden im Wurzelraum schneller und häufiger eine erhöhte Saugspannung. Dadurch erhöht sich auch die mechanische Stabilität des Bodens, der Boden ist übers Jahr häufiger bearbeit- und befahrbar. Zudem steigt infolge der verbesserten Sauerstoffversorgung die biologische Aktivität der Bodenorganismen. Den erhöhten Nahrungsbedarf decken sie dabei durch den Abbau von Bodenhumus. Beim Humusabbau werden die Nährstoffe im Boden mineralisiert, wodurch vor allem der Gehalt an pflanzenverfügbarem Stickstoff stark ansteigt (Blume 1992, S. 229). Je höher der Gehalt an organischer Substanz im Boden ist, umso mehr Nährstoffe können bei Entwässerungen freigesetzt werden. Aus diesem Grund galten die torfhaltigen, humusreichen Moorböden als besonders fruchtbar, was für die grossräumigen Sumpfentwässerungen den Ausschlag gab (z. B. Grosses Moos im Kanton Bern und andere Beispiele, auf die bereits im Kap. 1.3 hingewiesen wurde).

Die Ursachen der Bodenvernässung sind wesentlich für die Wahl geeigneter Entwässerungsverfahren. In Mitteleuropa kennt man die folgenden **Vernässungsursachen**:

- zu hoher Grundwasserstand (Grundnässe)
- Stauwasser (Staunässe)
- Fremdwasser (lokale Quellen oder Zuflüsse)
- Haftwasser (Haftnässe).

Das Ziel der klassischen Moorentwässerungen war die Herabsetzung des **Grundwasserspiegels**. Da die Torfböden in der Regel gut durchlässig sind, waren die Entwässerungen sehr erfolgreich. Allerdings zersetzt sich die organische Substanz bei Luftzufuhr sehr schnell, so dass diese Böden bis zu 2 cm pro Jahr an Höhe verlieren können (Kuntze et al. 1994, S. 334, Blume 1992, S. 229). Das führt zu grossräumigen Geländesetzungen, die als Torf- oder **Moorsackungen** bezeichnet werden. Dadurch kommen die Drainanlagen näher an die Bodenoberfläche zu liegen und können unter Umständen bei der Grundbodenbearbeitung vom Pflug beschädigt werden. Da die Mächtigkeit der Torfschicht in der Regel nicht über ein ganzes Drainageeinzugsgebiet gleich ist, ergeben sich räumliche Unterschiede in den Setzungen. Das kann bei einzelnen Drainageleitungen zu Gegengefälle oder gar zum Bruch führen.

In diesen Fällen ist die Entwässerungswirkung zumindest lokal nicht mehr gegeben. Heutzutage stellt sich für viele alte Drainagegebiete die Frage nach der Sanierung. Um die Bewirtschaftung der Flächen zu erhalten, müssen zu hoch gelegene Leitungen entfernt und durch neue, tiefer gelegene ersetzt werden. Dieser Vorgang kann solange wiederholt werden, bis man mit den Leitungen an der eigentlichen Stauschicht, die die Bildung des Moores überhaupt ermöglichte, angelangt ist. Dann hat man das Moor allerdings im wahrsten Sinne des Wortes „heruntergewirtschaftet“. Der Humus ist verbraucht und wird sich auch in geologischen Zeiträumen nicht wieder erneuern. Aus diesem Grund können die **Moorbodenkulturen**, die in Holland, Norddeutschland, aber auch in der Schweiz an Seen weit verbreitet waren, **nicht** als **nachhaltige** Landnutzungsform bezeichnet werden.

Zudem bedingt das wiederholte Tieferlegen der Drainageleitungen auch eine Absenkung des Vorflutgerinnes, damit die Draineinläufe nicht unter den Wasserspiegel des Vorfluters zu liegen kommen. Ansonsten käme es zum Rückstau in den Drainagen. Ist eine weitere Eintiefung nicht mehr möglich, muss das anfallende Drainagewasser auf das höhere Niveau des Vorfluters gepumpt werden.

Stauanässe kann sowohl natürlich als auch anthropogen verursacht sein. Das Wasser wird auf einer Stauschicht gestaut und hat in der Regel keinen Kontakt zum Grundwasser. Als Stauhohizont wirkt jeder abrupte Wechsel in Körnung oder Gefüge, der einen grossen Unterschied zwischen den Porendurchmessern der oberen und unteren Schicht bewirkt (**Porensprung**). In der Natur bilden Ton- oder Kieseinschlüsse oder Gefügeveränderungen, die durch die **Bodenbearbeitung** und –bewirtschaftung entstanden sind (siehe dazu Kap. 3.1), die Stauschichten. Stauanässe kann sehr lokal auftreten, etwa in einer Mulde, wo sich das Bodenwasser eines ganzen Gebietes sammelt, oder an stark befahrenen Stellen wie zum Beispiel Anhäupter und Feldzufahrten. Insbesondere bei Rekultivierungen (vgl. Kap.4.2) bildet Stauanässe das grösste Problem.

Fremdwasservernässungen werden durch äussere Zuflüsse verursacht. In den meisten Fällen treten sie mehr oder weniger lokal am Fusse eines Hanges oder neben Strassen, Gebäuden oder sonstigen Terrainverschiebungen auf. In der Regel kann dieses Fremdwasser auch mit einem oder wenigen **Fangdrains** abgeleitet werden, ohne eine grossflächige Anlage einzurichten.

Haftnässe tritt vor allem bei schluffreichen, tonarmen Böden auf. Anthropogene Bodenverdichtungen oder Strukturzerstörungen können die Haftnässe begünstigen. Haftnasse Böden sind aufgrund ihrer Feinkörnigkeit und Dichtlagerung nur sehr schwer entwässerbar. Das Wasser ist mit zu hohen Saugspannungen gebunden.

Technische Voraussetzungen

Ein **Drainagesystem** besteht aus Saugern, Sammlern und der Vorflut (vgl. Abb. 6). Die Sauger nehmen das Wasser aus dem Boden auf und leiten es weiter in die Sammler, die sich in den Vorfluter entwässern. Am Rande eines Entwässerungsperimeters werden je nach Fremdwasserzufuhr Fangdrains eingerichtet.

Drainagen funktionieren nach dem Gravitationsprinzip. Sie können demnach nur das **frei bewegliche Wasser** aus dem Boden ableiten, das heisst, das Wasser, das mit weniger als 6 kPa ($pF = 1.8$), gespannt ist (Abb. 7). Mit anderen Worten, es kann nur bis Feldkapazität entwässert werden. Die Feldkapazität ist konventionell festgelegt als Wassergehalt, den ein Boden zwei bis drei Tage nach Vollsättigung aufweist. Dies ist der primäre Grund, weshalb haftnasse Böden nicht entwässert werden können.

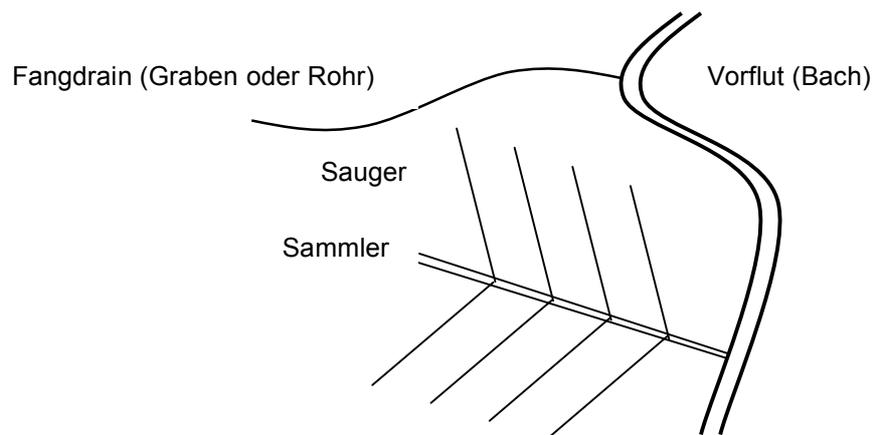


Abb. 6 Schematische Darstellung eines Entwässerungsextraktors

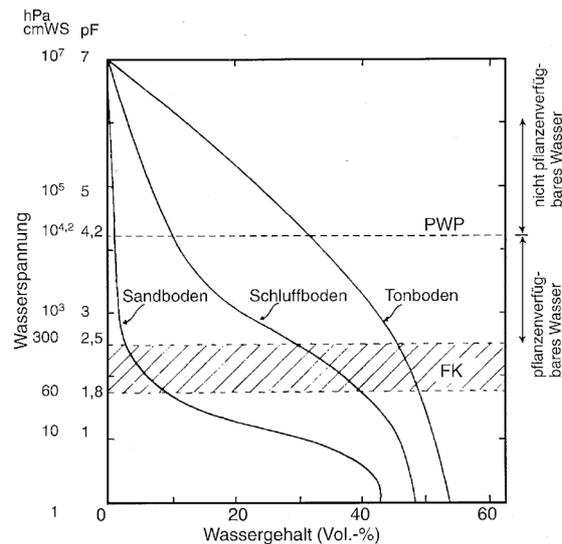


Abb. 7 Saugspannungskurven verschiedener Böden (cmWS = Zentimeter Wassersäule (entspricht 0.1 kPa); FK = Feldkapazität; PWP = Permanenter Welkepunkt) (Scheffer und Schachtschabel 1998, S.189)

Die **technische Ausführung** von Entwässerungsanlagen erfolgt entweder über offene Entwässerungsgräben oder unterirdisch durch Rohrleitungen, Kiespackungen oder sogenannte Erd- oder Maulwurfdrains. Rechtwinklige Netze geradliniger **Entwässerungsgräben** prägen viele Landschaften der Schweiz (z. B. die Linthebene). Da offene Gräben die Bewirtschaftung behindern, werden sie meistens nur in weiten Abständen als Vorfluter für die unterirdischen Drainagen angelegt. Sie müssen im Zuge von Drainagesanierungen oft eingetieft werden, weil die Drainagen in den umliegenden Böden tiefergelegt werden. **Rohrdrainagen** wurden früher aus gestossenen Tonrohren erstellt. Heute verwendet man in der Regel perforierte PVC-Rohre. Eine Alternative sind **Kiesschlitz**e, die mit Humus überdeckt werden. Auf Rekultivierungen werden zum Teil linienförmige Kiespackungen vor der Schüttung auf der Rohplanie angelegt (Rekultivierungen, siehe Kap. 4.2).

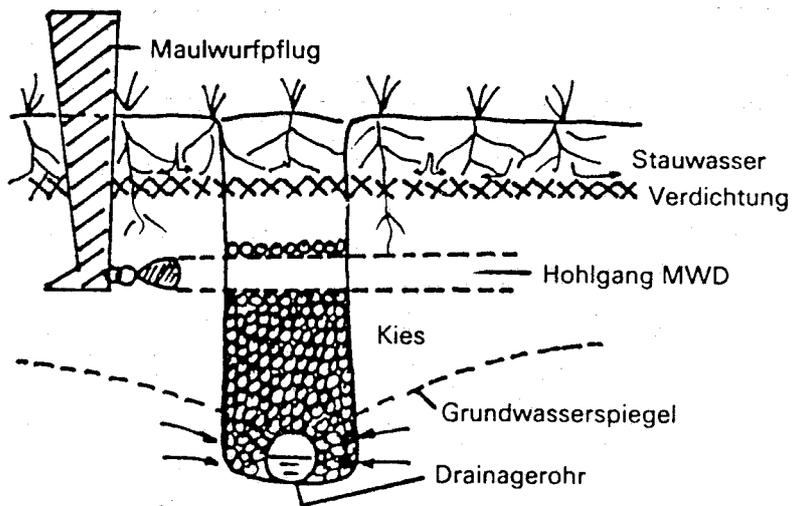


Abb. 8 Kombinierte Anwendung Rohr-Maulwurfdrainage (Müller, 1992)

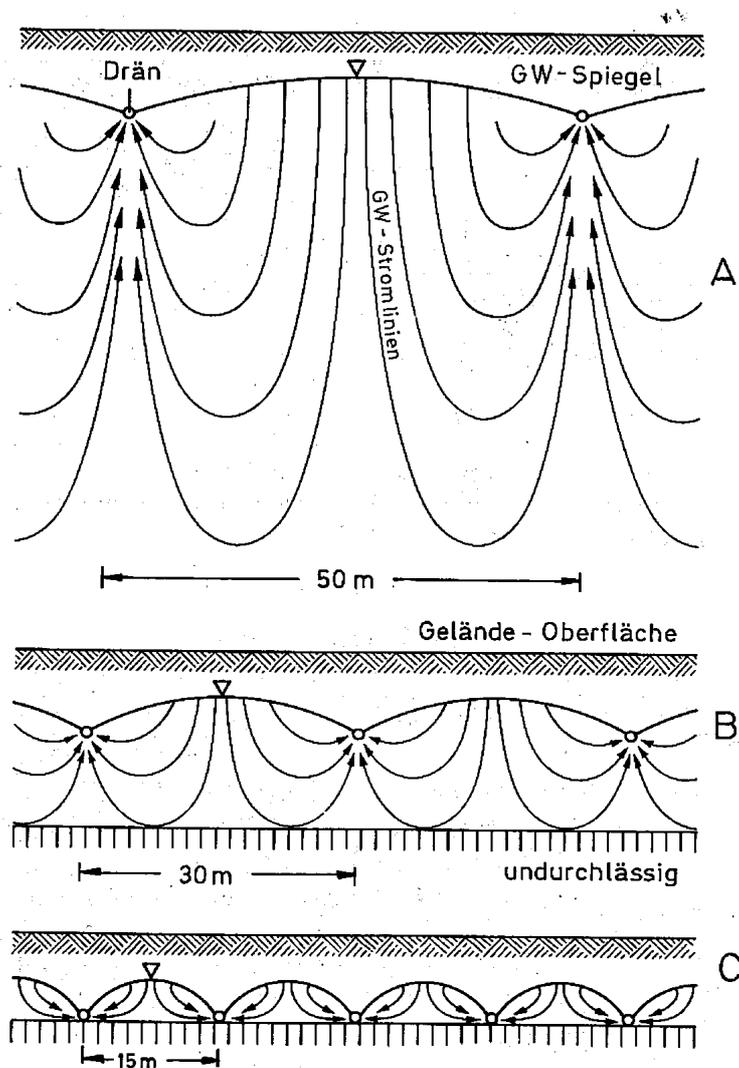


Abb. 9 Strömung des Wassers zum Drainrohr in Abhängigkeit von der Tiefe der undurchlässigen Schicht ($A > B > C$) (Kuntze et al. 1994, S. 345)

Bei der **Maulwurfdrainage** wird ein speziell geformter Presskopf durch den Boden gezogen, der so Kanäle formt. Diese Technik lässt sich allerdings nur in tonhaltigen Böden ohne grobe Steine anwenden. Andernfalls ist das Gewölbe aufgrund der mangelnden Kohäsion nicht stabil. Der Vorteil der Maulwurfdrainage ist, dass diese Technik aufgrund des relativ geringen Zugkraftbedarfs vom Landwirt mit dem eigenen Traktor ausgeführt werden kann. Den benötigten Maulwurfpflug kann er sich beim Maschinenring besorgen. Näheres zur technischen Ausführung von Entwässerungsanlagen ist bei Muth (1991, S. 74-79) nachzulesen.

Für den **Zustrom** des Bodenwassers zu den **Drainageleitungen** sowie für den nötigen Drainabstand ist die Tiefenlage der Stauschicht von ausschlaggebender Bedeutung (siehe Abb. 9). Je näher die Leitungen bei der Stauschicht sind, umso kürzer werden die Sickerwege, das heisst, umso schneller wird entwässert, umso enger muss aber auch gedrängt werden.

Es gibt verschiedene Ansätze zur Berechnung des Zustroms zu einem Drain. Sie sind bei Ritzema (1994, S. 263-304) hergeleitet und erklärt. Als Beispiel sei hier die Gleichung von Hooghoudt hergeleitet.

Hooghoudt - Gleichung

Annahmen

- Dränrohre verlaufen parallel; (ii) Stationärer Fliesszustand (Sickerraten und Wassergehalte sind konstant mit der Zeit); (iii) Der Wasserfluss verläuft entlang einer zu den Drainagerohren senkrechten vertikalen Ebene.

Berechnungsansatz

Formuliert man den Grundwasserfluss durch einen vertikalen Schnitt im Abstand x von einem Graben, so ergibt sich mit dem Darcy-Fliessgesetz:

$$q_x = Ky(x) \frac{dy}{dx} \quad (1)$$

worin: q_x Flussrate in x -Richtung

K Wasserleitfähigkeit

$y(x)$ Grundwasserspiegel am Ort x

$\frac{dy}{dx}$ Hydraulischer Gradient

Aus der Annahme, dass sich ein stationärer Fluss ausgebildet hat, folgt:

$$q_x = R \left(\frac{1}{2} L - x \right) \quad (2)$$

worin: R = Infiltrationsrate

L = Drainageabstand

Setzt man nun (1) in (2) ein, so folgt:

$$Ky(x)dy = R \left(\frac{1}{2} L - x \right) dx \quad (3)$$

Die Integration der Gleichung (3) mit folgenden Randbedingungen:

Bei $x = 0$ ist $y = D$

bei $x = 0.5L$ ist $y = H$

führt zur Gleichung (4):

$$q = R = \frac{4K(H^2 - D^2)}{L^2} \quad (4)$$

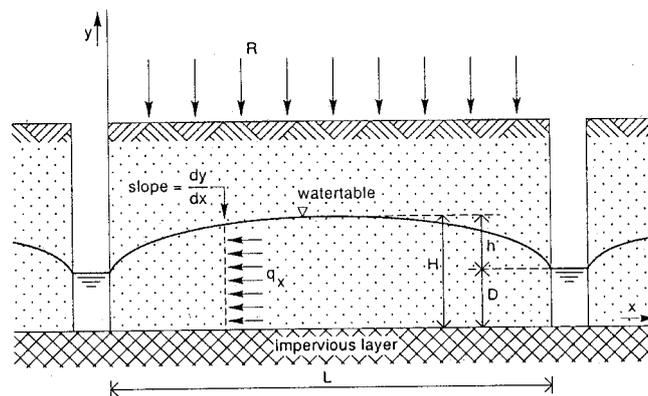


Abb. 10 Horizontale Fließzustände bei Drainagen über undurchlässiger Schicht (Ritzema, 1994).

Aus Abb. 10 geht hervor, dass $H-D=h$ und $H+D=2D+h$ ist. Die Höhe h stellt darin die Grundwasserspiegelüberhöhung über dem Drainwasserstand dar. Entsprechend kann Gleichung (4) umgeschrieben werden zu:

$$q = \frac{8KDh + 4Kh^2}{L^2} \quad (5)$$

Diese Gleichung (5) ist als Hooghoudt- oder auch Donnan-Gleichung bekannt. Liegt nun die Drainage direkt auf der undurchlässigen Schicht, also ist $D=0$, so reduziert sich Gleichung (5) auf:

$$q = \frac{4Kh^2}{L^2} \quad (6)$$

In diesem Fall erfolgt die Grundwasserströmung oberhalb des Drains zum Graben hin. Wird umgekehrt $D \gg h$, d.h. liegt die undurchlässige Schicht sehr tief, so kann der zweite Term von (5) vernachlässigt werden und es ergibt sich:

$$q = \frac{8KDh}{L^2} \quad (7)$$

Hier strömt der grösste Teil des Wassers unterhalb der Drainagespiegellage zum Graben. In manchen Fällen liegen die Drainrohre auf oder nahe einer Schichtgrenze zweier Materialien unterschiedlicher Durchlässigkeit. Diesem Umstand kann nun Rechnung getragen werden anhand der Überlegungen bei Gleichung (6) und (7). Entsprechend lautet dann die Hooghoudt-Gleichung:

$$q = \frac{8K_2Dh + 4K_1h^2}{L^2} \quad (8)$$

Dabei ist K_1 die Leitfähigkeit der oberen und K_2 die Leitfähigkeit der unteren Schicht. Wie aus Abb. 9 ersichtlich ist, erfolgt der Grundwasserzufluss zu einer rohrförmigen Drainage nicht gleich wie bei Drainagegräben. In der Umgebung der Drainageleitung kommt es zu einer Kontraktion der Stromlinien und zu einer radialen Deformation des Fließfeldes. Hooghoudt berücksichtigt diese radialen Anströmverluste zu einem Drainrohr, indem er die Schichtdicke D verkleinert. An Gleichung (5) hat dieser Ansatz nur zur Folge, dass anstelle von D der reduzierte Wert d eingesetzt wird. Man spricht bei d auch vom Äquivalentwert. Entsprechend ändert sich Gleichung (5) zu:

$$q = \frac{8K_2dh + 4K_1h^2}{L^2} \quad (9)$$

Der Äquivalentwert d ist abhängig vom Drainageabstand L , der Schichtdicke D und dem Radius des Drainagerohres r_0 . Hooghoudt hat dafür verschiedene Nomogramme

entwickelt. Um den Ansatz von Hooghoudt in Berechnungsmodellen einsetzen zu können, wurde folgende Funktion zur Berechnung des Äquivalentwertes entwickelt:

$$d = \frac{\frac{\pi L}{8}}{\ln\left(\frac{L}{\pi w_0}\right) + F(x)} \quad (10)$$

In Gleichung (7) ist x wie folgt definiert:

$$x = \frac{2\pi D}{L} \quad (11)$$

sowie:

$$F(x) = \frac{\pi^2}{4x} + \ln\left(\frac{x}{2\pi}\right) \quad \text{für } x \leq 0.5 \quad (12)$$

$$F(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4e^{-2nx}}{n(1 - e^{-2nx})} \quad \text{für } x > 0.5 \text{ und mit } n = 1, 3, 5, \dots \quad (13)$$

Wiederherstellung von Feuchtstandorten

Für die Wiederherstellung von **Feuchtbiotopen** muss Wasser das ganze Jahr über in grossen Mengen vorhanden sein. Es ist in erster Linie dafür zu sorgen, dass das Niederschlagswasser nicht abgeführt wird. Bestehende Drainagen sind zu unterbrechen oder einzustauen. Aus diesem Grund wird die Wiedervernässung von Feuchtgebieten häufig als Alternative zur Sanierung auffälliger Drainagesysteme durchgeführt. In selteneren Fällen werden intakte Drainagen aktiv eingestaut (z.B. Melioration Kloten).

Zur Wiederherstellung einer **Stauwasservernässung** muss eine Stauschicht vorhanden sein. Diese ist entweder der natürliche Stauer, der das ursprüngliche Feuchtgebiet verursacht hat, oder eine künstliche Abdichtung. Letzteres kann zum Beispiel mit der Ablagerung von Kieswaschschlamm bewerkstelligt werden (vgl. Kap. 4.4).

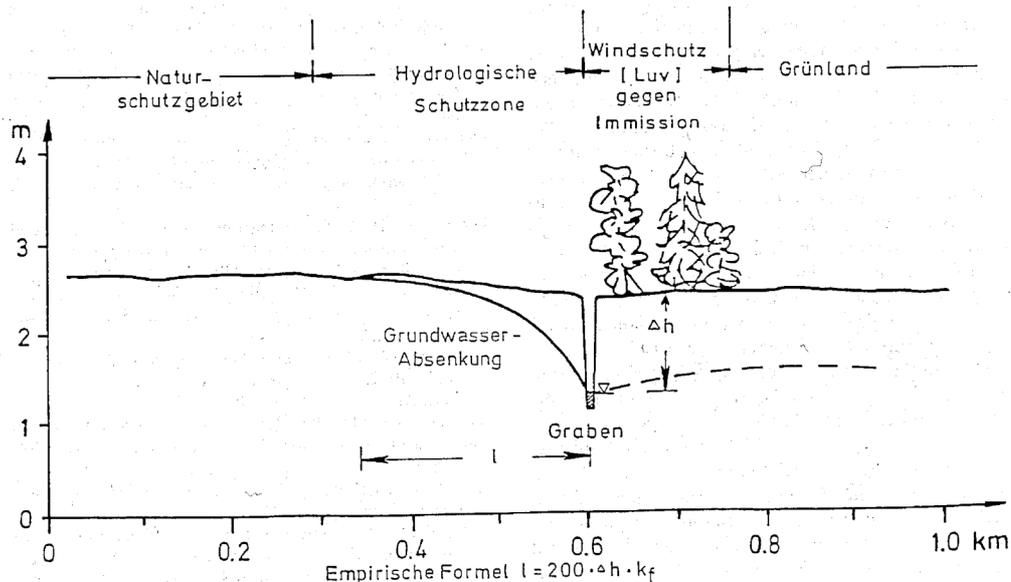


Abb. 11 Einrichtung von hydrologischen und Immissionsschutz zonen um renaturierte Feuchtgebiete (Blume 1992, S. 691)

Im Falle von **Grundwasservernässung** muss der Grundwasserspiegel im Feuchtgebiet gegenüber dem (landwirtschaftlich genutzten) Umland wieder angehoben werden. Daraus er-

gibt sich die Notwendigkeit einer **hydrologischen Schutzzone** zwischen dem eigentlichen Feuchtgebiet und dem landwirtschaftlichen Umland (vgl. Abb. 11).

Ebenso wichtig ist die **Verhinderung des Nährstoffeintrags** in renaturierte Feuchtgebiete. Gegen Immissionen aus der Luft empfiehlt sich eine Windschutzpflanzung an der Luv-Seite der Hauptwindrichtung. Werden Feuchtgebiete von Grundwasser aus dem Umland gespeist, sind auch zum Schutz vor Stoffeinträgen über das Grundwasser Vegetationsfilterstreifen vorzusehen (vgl. Kap. 3.3 Düngung und Pflanzenschutz). In Einzelfällen, wo die benötigte Fläche zur Einrichtung von hydrologischen (Immissions-) Schutzzonen fehlt, kann der Grundwasserhaushalt des Feuchtgebiets mit Hilfe von Spundwänden gegenüber dem Umland isoliert werden. Es muss dann allerdings auch künstlich (z.B. mit Pumpen) für die Nachlieferung von unbelastetem Wasser in das Biotop gesorgt werden.

Grundsätzlich ist zu beachten, dass eine Renaturierung in der Regel nur nach sehr langer Zeit (Jahrzehnte bis Jahrhunderte) einen Erfolg zeigt. Die Rückführung von Mooren ist nur bei Vorhandensein einer Torfschicht mittelfristig erfolgreich (Rettung der verbliebenen Torfschicht). Die Torfneubildung dauert mehrere Jahrtausende (Klötzli 1991). In stark zersetzten Torfen ist das Nährstoffangebot so hoch, dass der ursprüngliche magere Zustand des Biotops durch eine Wiedervernässung allein nicht erreicht werden kann. In der Praxis wird in solchen Fällen der nährstoffreiche Oberboden abgetragen (z.B. Steinmaurer Ried, Melioration Kloten, beide Kanton Zürich). Aber auch in weniger extremen Fällen, zum Beispiel bei der Umwandlung von Fettwiesen in weniger nährstoffreiche Stufen wie etwa Goldhaferwiesen (Frommentalwiesen), müssen die anfallenden Nährstoffe (Erntegut) stets wieder abgeführt werden. Dennoch wird eine Aushagerung auch in diesen Fällen Jahrzehnte beanspruchen. Angesichts der Düngung aus der Luft (siehe Kap. 3.3) ist die tatsächliche Wiederherstellung des ursprünglichen Zustands kaum zu erwarten.

2.2 Bewässerung

Zweck

In **ariden Klimabereichen** ist eine Bewässerung oft eine notwendige Voraussetzung für den Anbau landwirtschaftlicher Kulturen. In unseren Breiten wird in der Regel nur temporär **zu bestimmten Zeiten der Vegetationsperiode** bewässert, nämlich, wenn die angebauten Kulturen für ihr Wachstum mehr Wasser benötigen als ihnen aus dem Bodenwasservorrat zur Verfügung steht. Gerade bei sandigen Böden, die ein geringes Wasserspeichervermögen aufweisen, wird aus diesem Grund häufig bewässert. Dadurch können, insbesondere bei Gemüse, die Erträge stark gesteigert werden. Ein anderer Grund zur Bewässerung in humiden Klimaräumen ist die **Frostschuttbewässerung** zum Schutz der Blüten oder Knospen vor Spätfrösten im Frühling (bzw. zum Schutz der Jungpflanzen vor Frühfrösten im Herbst).

Technische Voraussetzungen

Es gibt verschiedene Bewässerungsverfahren, von der Berieselung/Überflutung über unterirdische Wassereinleitung über drainageähnliche Kanäle bis zur Besprengung mit Regnern. Die Verfahren sind bei Muth (1991, S. 207-270) ausführlich beschrieben. In den Industrieländern wird hauptsächlich beregnet, da den Pflanzen so das Bewässerungswasser am ähnlichsten zu den natürlichen Niederschlägen verabreicht werden kann. Insbesondere die Frostschuttbewässerung ist nur über die Beregnung möglich, da das zugeführte Wasser zu einem Eismantel um die empfindlichen Pflanzenteile gefrieren soll. Beim Gefrieren des Wassers wird Erstarrungswärme freigesetzt, die ausreicht, um eine Abkühlung des Zellsafts unter seinen Gefrierpunkt (-0.5°C) zu verhindern (Muth 1991, S. 267). Allerdings muss während

der ganzen Zeit des Frosts (z.B. die ganze Nacht bis Sonnenaufgang) beregnet werden, damit die Wärmezufuhr nicht unterbrochen wird.

Auch bei sorgfältiger Ausführung der Bewässerung ist das zugeführte Wasser nie vollständig pflanzenverfügbar. Das überschüssige Wasser muss unbedingt wieder abgeführt werden, um Beeinträchtigungen infolge Vernässung zu verhindern. So gehört **zu jeder Bewässerung auch eine Entwässerung**.

Bei schluffreichen Böden können insbesondere die Starkregneranlagen **Verschlämmungen** an der Bodenoberfläche herbeiführen (siehe auch Kap. 3.2 Erosion) (Blume 1992, S. 233). Ebenso sollten schwerdurchlässige Böden nicht bewässert werden, da sie natürlicherweise eher zu **Vernässung** neigen. Ist das Wasserrückhaltevermögen eines Bodens extrem klein (reine Sande), kann die Bewässerung sehr **ineffizient** werden (Muth 1991, S. 208).

In ariden Klimazonen ist die **Versalzung des Bodens** eines der grössten Folgeprobleme der Bewässerung. Die Salze aus dem Grundwasser werden in Trockenperioden durch kapillaren Aufstieg in höhere Bodenschichten transportiert und dort ausgefällt und angereichert. Da der Grundwasserspiegel dank der Bewässerung in vielen Fällen angehoben wurde, steigt das Kapillarwasser häufiger bis in den Wurzelraum. Insbesondere eine hohe Konzentration an Natriumionen ist problematisch, denn **Natriumionen** besitzen eine **hohe Hydratationsenergie**. Infolge des kleinen Ionenradiuses konzentriert sich die positive Ladung auf eine kleine Oberfläche. Die dipoligen Wassermoleküle werden stärker angezogen, so dass sich ein Wassermantel um die Natriumionen anlagert. Dadurch steigt das osmotische Potential des Bodenwassers, wodurch es weniger pflanzenverfügbar wird. Denn die Wasseraufnahme durch die Pflanzen wird grösstenteils durch den osmotischen Druck geregelt (passive Aufnahme). Hinzu kommt die Zerstörung der Bodenstruktur. Da das Natrium zwischen den Tonteilchen liegt, führt die Wasseranlagerung zur Quellung und schliesslich zur Dispersion der Tonteilchen. Solche versalzten Böden sind nur noch schwer durchlässig und mechanisch kaum mehr tragfähig.

3. INTENSIVIERUNG DER LANDWIRTSCHAFTLICHEN NUTZUNG

Die Primärproduktion, wozu die Land- und Forstwirtschaft zählen, verzeichnete in den Industrieländern im Gegensatz zum Industrie- und Dienstleistungssektor im 20. Jahrhundert einen massiven Rückgang der Arbeitskräfte. In der Schweiz nahm die Zahl der in der Landwirtschaft Erwerbstätigen von 1950 bis 1991 um mehr als 50% ab (Häberli et al. 1991, S. 86). In der früheren Bundesrepublik Deutschland nahmen die ständigen Arbeitskräfte in der Landwirtschaft von 5,87 Mio (1949) auf 1,308 Mio (1993) ab. Dabei lässt sich eine schrittweise Umwandlung von Vollerwerbs- zu Nebenerwerbsbetrieben und schliesslich zur gänzlichen Aufgabe der (Nebenerwerbs-) Betriebe feststellen. Die Vollerwerbsbetriebe nahmen in der Schweiz von 1939 bis 1990 von 177412 auf 62804, das heisst um mehr als die Hälfte ab. Die Nebenerwerbsbetriebe entwickelten sich im gleichen Zeitraum von 61069 zu 45492, das heisst, sie nahmen um ca. 25% ab (Baur 2000). In der alten Bundesrepublik wechselten zwischen 1979 und 1991 11,1% vom Haupt- zum Nebenerwerbsbetrieb, während im gleichen Zeitraum 21,6% der Nebenerwerbsbetriebe ganz aufgegeben wurden. Flächenmässig nahmen die einzelnen Betriebe dafür zu. (Deutsches Institut für Fernstudienforschung Uni Tübingen 1997, S. 204f).

Diese Verschiebung der Beschäftigungsverhältnisse ist einerseits eine Folge der Industrialisierung (was zu dem hohen Anteil an Nebenerwerbsbetrieben führte), andererseits des technischen Fortschritts in der Landwirtschaft selbst. Letzterer erlaubt die rationelle Bewirtschaftung des Bodens, ohne die die Landwirtschaft heute nicht mehr rentabel wäre. Dadurch spezialisiert sich die Landwirtschaft regional immer stärker, die Böden der einzelnen Regionen werden immer einseitiger genutzt (Abb. 12)

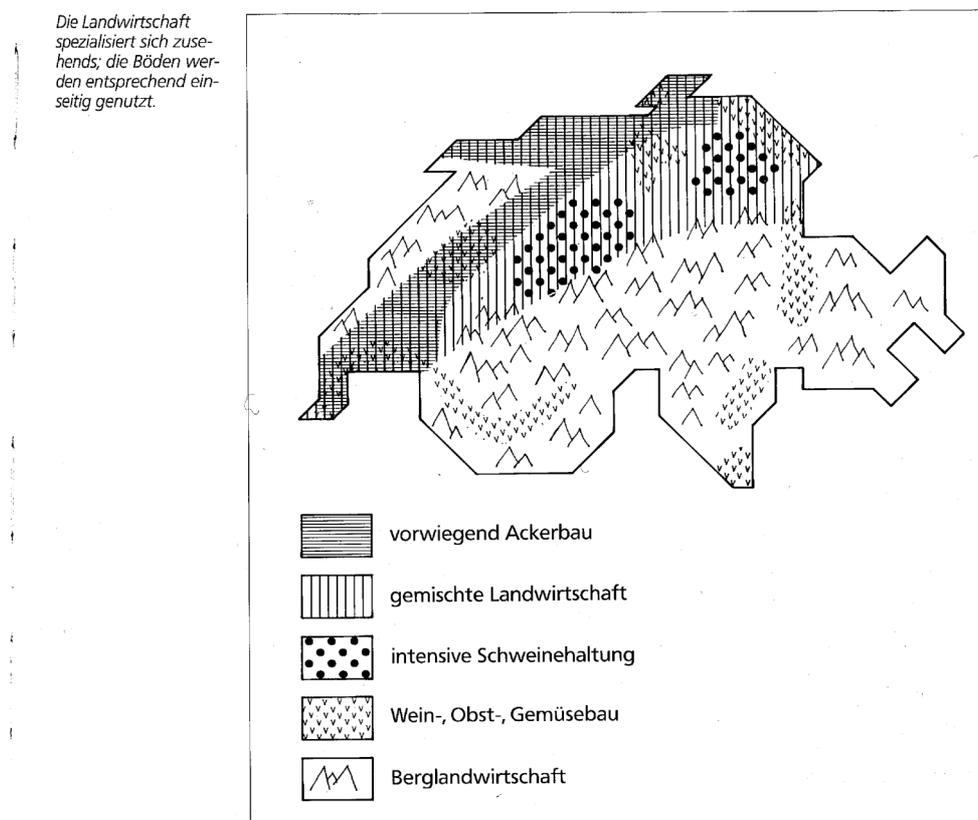


Abb. 12 Die Spezialisierung der Schweizer Landwirtschaft in verschiedenen geographischen Einheiten (Häberli et al. 1991, S. 89)

3.1 Mechanische Belastung, Bodenverdichtung

Mechanische Eigenschaften des Bodens

Jeder Boden besitzt eine gewisse **Eigenfestigkeit**, die sich im wesentlichen aus den Kontakten der Bodenpartikel untereinander ergibt. Je dichter ein Boden gelagert ist, das heisst, je mehr und je grösser die Kontaktflächen benachbarter Bodenteilchen sind, umso grössere Drücke (bzw. Spannungen) müssen aufgebracht werden, um die Teilchen von einander zu trennen oder noch näher aneinander zu rücken. Die Festigkeit des Bodens wird bodenmechanisch mit der **Scherfestigkeit** und der **Vorbelastung** beschrieben (näheres dazu bei Hartge und Horn 1991, S. 55-80, und Kézdi 1969, S. 169-206).

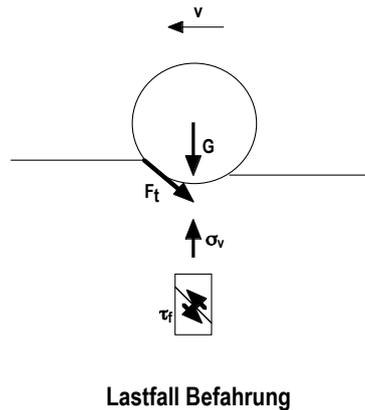


Abb. 13 Schematische Darstellung des Spannungszustands bei der Befahrung des Bodens. G : Radlast, σ_v : Vorbelastungswert, τ_f : Scherfestigkeit

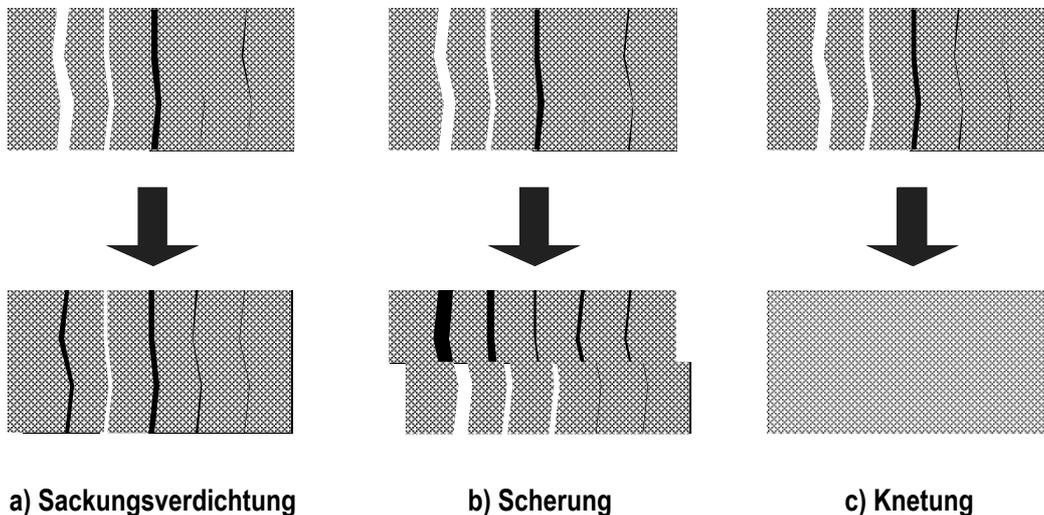


Abb. 14 a) **Sackungsverdichtung**: Eine Sackungsverdichtung führt zur Zerstörung von Grobporen. Dadurch nimmt das Porenvolumen gesamthaft ab, der relative Anteil an Mittel- und Feinporen kann aber erhöht werden.
 b) **Scherung**: Eine Scherung führt nicht in jedem Fall zur Erhöhung der Lagerungsdichte. Die Bodenporen werden jedoch abgeschert 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.
 (Quelle: Tobias et al., 1999b, S. 23)

Abb. 13 erläutert den Sachverhalt für den Lastfall der Befahrung. Ein Rad wirkt mit seiner Radlast G senkrecht auf den Boden ein. Ein Bodenteilchen in einer gewissen Tiefe erfährt die (teilweise abgebauten, vgl. weiter unten) Spannungen und wirkt mit seiner Eigenfestigkeit entgegen. Die maximale Normalspannung, die das Bodenteilchen aufzubringen vermag, entspricht seinem Vorbelastungswert σ_v . Die maximale Schubspannung, mit der es der Belastung entgegenwirken kann, entspricht seiner Scherfestigkeit τ_f . Überschreitet die Radlast die Eigenfestigkeit des Bodens (σ_v oder τ_f), kommt es zu bleibenden Verformungen bzw. zum Bruch. Der Boden wird zusammengedrückt (Sackungsverdichtung: Überschreitung von σ_v) oder die Partikel werden auseinandergeschert (Scherbruch: Überschreitung von τ_f). In der Nähe des Rades wird die Bodenstruktur verknetet, d.h. homogenisiert. Die Bodenaggregate werden zerstört, die Bodenstruktur wird zum Einzelkorn- oder Kohärentgefüge. Abb. 14 gibt einen schematischen Überblick über die verschiedenen Mechanismen.

Sackungsverdichtung / Vorbelastungswert

Wird ein Bodenzylinder zusammengedrückt, verformt er sich. Wenn er seitlich nicht eingespannt ist (wie beim sog. Einfachen Druckversuch) dehnt er sich zur Seite aus, ohne dass sein Ausgangsvolumen stark reduziert wird. In der Natur, d.h. im Boden (wie auch im Ödometerversuch), ist die seitliche Ausdehnung des betrachteten Zylinders aber behindert. Der Bodenzylinder kann sich nur in vertikaler Richtung verformen, was zur Reduktion des Volumens führt (Abb. 15).

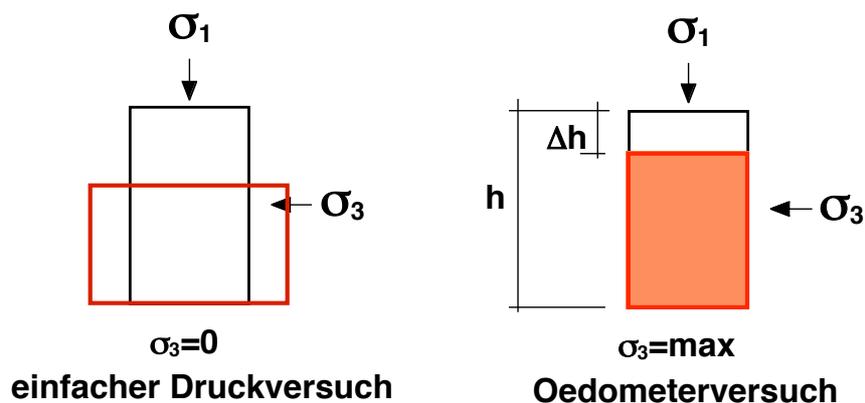


Abb. 15 Sackungsverdichtung (Konsolidation)

Diese Verformung ist elastisch, d.h. reversibel, solange die **Vorbelastung** des Bodens nicht überschritten ist. Bei Überschreitung dieses Vorbelastungswerts kommt es zu plastischen, d.h. bleibenden Verformungen. Der Vorbelastungswert wird aus Ödometerversuchen bestimmt. Dazu wird in der Drucksetzungskurve die (lineare) Volumenabnahme ε in Funktion des Zehnerlogarithmus (\log) der aufgetragenen Druckspannung aufgetragen (Abb. 16). Die halblogarithmische Darstellung der Drucksetzungskurve erlaubt die Unterscheidung zwischen einem Spannungsbereich elastischer Deformationen (Wiederbelastungskurve) und einem Spannungsbereich plastischer Deformationen (Erstbelastungsgerade). Der \log der Vorbelastungsspannung entspricht dem Wert auf der x-Achse bei der stärksten Krümmung der Drucksetzungskurve.

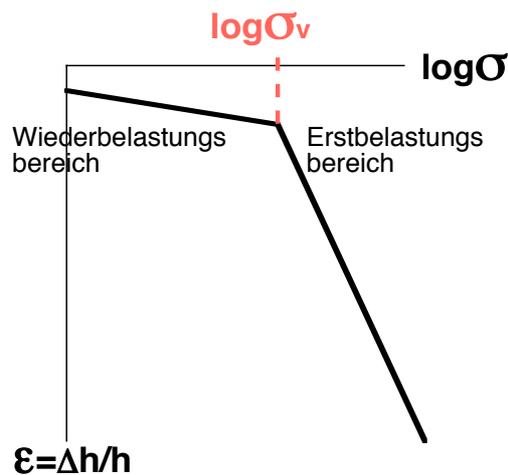


Abb. 16 Drucksetzungskurve

Scherung

Scherung bedeutet die Verschiebung von Bodenteilchen gegeneinander. Je nach Lagerung der Bodenteilchen kommt es zu einer Verdichtung (Volumenverminderung) oder zu einer Lockerung (Volumenvergrößerung) (Abb. 17). Dabei werden Schubkräfte wirksam, die die Scherfestigkeit (τ_f) des Bodens überschreiten.

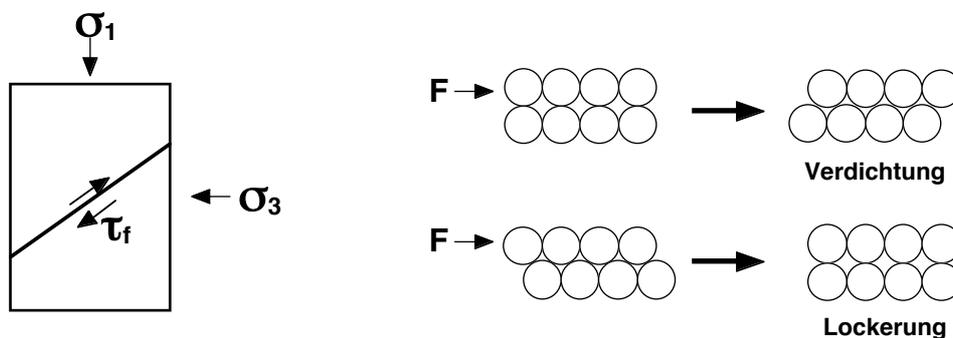


Abb. 17 Scherung

Die **Scherfestigkeit** wird aus Scherversuchen (triaxiale oder Direktscherversuche) bestimmt. Die Darstellung der Spannungen im Bruchzustand erfolgt im Spannungsdiagramm von Mohr. Abb. 18 zeigt verschiedene Bruchzustände für denselben Erdstoff. Die **Scherfestigkeit** τ_f ist der **Maximalwert der Schubspannungen** in der Bruchfläche. Diese Scherfestigkeit wird durch die Funktion der Umhüllenden aller Bruchkreise (sogenannte Mohr'sche Bruchkurve) definiert. Innerhalb des für das konkrete Problem massgebenden Spannungsbereiches kann die Mohr'sche Bruchkurve durch eine Gerade angenähert werden. Diese wird als Coulomb'sche Bruchgerade bezeichnet und durch folgende Gleichung definiert:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi$$

$\sigma \tan \varphi$ ist die Steigung der Bruchgeraden und c der Ordinatenabschnitt. φ wird in der Regel als **Winkel der inneren Reibung** und c als **Kohäsion** bezeichnet.

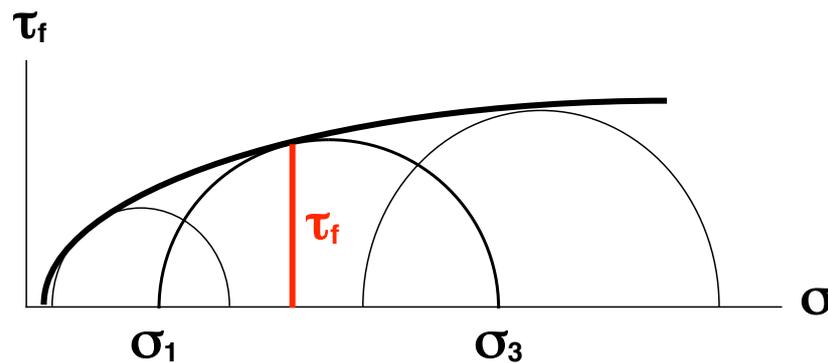


Abb. 18 Mohr'sche Kreise, Scherfestigkeitswert (τ_f)

Vorbelastung und Scherfestigkeit korrelieren sehr stark, daher treten meistens beide Bruchmechanismen, allerdings in lokal verschiedenen Zonen, auf. Zudem hängen die beiden Parameter stark von der Saugspannung ab, denn die Kapillarspannungen „ziehen“ die Teilchen näher aneinander, wodurch sich die Zahl der Kontaktpunkte erhöht. Vorbelastung und Scherfestigkeit sind daher keine Konstanten, sondern Zustandswerte, die stark von der Bodenfeuchte abhängen. Grundsätzlich erhöht sich die Eigenfestigkeit eines Bodens mit der Austrocknung.

Ursachen

Die Notwendigkeit der einzelnen Arbeitsschritte in der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung ergibt sich aus der Wahl der Fruchtfolge. Ein Grünlandumbruch geht dem Anbau von Ackerfrüchten voraus oder ist in Fruchtfolgen mit Kunstwiese oder Grünbrache periodisch zu wiederholen. Das Untermengen von Ernteresten oder organischen Düngern vergrößert einerseits den Nährstoffvorrat für die Folgefrucht, andererseits können auf diese Weise Wurzel- und Samenunkräuter mechanisch bekämpft werden. Die Bodenstruktur wird in einen Zustand gebracht, der das optimale Wachstum der erwünschten Frucht erlaubt. Die Ziele der einzelnen Verfahren sowie die dazu verwendeten landwirtschaftlichen Geräte sind Tab. 1 zu entnehmen. Neben der eigentlichen Bearbeitung kommt der Befahrung des Bodens mit landwirtschaftlichen Fahrzeugen beim Ausbringen von Dünger oder Pflanzenschutzmitteln oder bei der Ernte eine wesentliche Bedeutung zu. Besonders zu beachten ist der mehrmalige Schnitt innerhalb einer Vegetationsperiode beim Grünfütterbau.

Die Wahl der Fruchtfolge, bzw. der einzelnen **Kulturen**, ist von ausschlaggebender Bedeutung. Denn, wie bereits gesagt, bestimmt diese die nötigen Arbeitsschritte zur Pflege der Kulturen sowie den Zeitpunkt der Bodenbearbeitung (Abb. 19). Problematisch wird es vor allem, wo sich Landwirte über Anbauverträge mit Verarbeitungsbetrieben (z.B. Konservenfabriken) verpflichten, ihre Ernte in grossen Mengen zu bestimmten Terminen abzuliefern. Fallen die abgemachten Termine in eine Schlechtwetterperiode, haben die Landwirte keine Möglichkeit, aufgrund der verminderten Tragfähigkeit des Bodens ihre Ernte zurückzustellen. Zudem muss die Ernte wegen der Massenproduktion mit sehr schlagkräftigen Maschinen erfolgen (vgl. Kap. 1.3).

Bei der **landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung** geht es in erster Linie um die **Lockerung** des Bodengefüges durch Aufbrechen des Aggregatverbundes (Pflug, Grubber, Spatenmaschine) oder Zerkleinerung der Aggregate selbst (zapfwellengetriebene Fräsen und Eggen). Dadurch werden aber die Vorbelastung sowie die Scherfestigkeit des Bodens stark herabgesetzt, das heisst der Boden wird in einen sehr viel weniger tragfähigen Zustand übergeführt. Jede weitere Belastung fördert die Verdichtung und Homogenisierung der Bodenstruktur. In der Regel müssen landwirtschaftliche Böden nach der Lockerung mit Walzen oder Packern

künstlich verdichtet werden, da die Wurzeln nur sehr weniger Kulturpflanzen (z.B. Kartoffeln) in extrem lockeren Substraten Halt finden.

Tab. 1 Wesentliche Ziele verschiedener landwirtschaftlicher Bearbeitungsmassnahmen (Blume 1992, S. 156)

Maßnahme (Geräte)	Ziele
Stoppelbearbeitung: (Schälpflug, Schälgrubber, Kreiselgrubber, Scheibenegge, Spatenrollegge, Fräse)	<ul style="list-style-type: none"> - Auflockern oder Wenden der Bodenoberfläche zur Förderung der Infiltration u. Wasserspeicherung und Verminderung des Abflusses, - Verhinderung von Verdunstungsverlusten, - Einmischen von Ernterückständen u. org. Düngern und Förderung ihrer Verrottung, - Vernichtung vorhandener Unkräuter und Schaffung eines Saatbettes für Ausfallgetreide und Unkrautsamen, - Störung bzw. Vernichtung von Wurzelunkräutern.
Grundbodenbearbeitung: (Streichblechpflüge ggf. mit Packer, Scheiben-, Kreiselpflug, Spatenmaschine, Schwergrubber)	<ul style="list-style-type: none"> - Tiefgreifende Lockerung bzw. Wendung des Bodens, - Unterbringung von Ernterückständen u. org. Düngern, - Vernichtung vorhandener Unkräuter, insbesondere der Wurzelunkräuter, - Schaffung günstiger Voraussetzungen für gärefördernde Frostwirkungen, - Vermeidung von Verschlammungen und Bodenerosion während des Winters.
Saatbettherrichtung: (Feingrubber, Zinkeneggen, zapfwellengetriebene Eggen, Wälzegen, Walzen, Schleppen)	<ul style="list-style-type: none"> - Homogenisierung und Einebnung der Krume, - Rückverfestigung der Krume unterhalb der Saattiefe zur Sicherung der Keimwasserversorgung bei zu großer Lockerheit, - Auflockerung des Saathorizontes bei zu starker Dichtlagerung und Verschlammung während des Winters, - Krümelung der oberflächennahen Schicht bis zur Saattiefe je nach Anspruch der Folgefrucht.

Besonders ungünstig wirkt sich die Bearbeitung oder Befahrung **feuchter und nasser Böden** aus. In diesem Zustand hat der Boden generell eine geringe Vorbelastung und Scherfestigkeit, was bei Belastung und Bearbeitung zu starken plastischen (irreversiblen) Verformungen und zur Knetung führt. Für schweizerische Klima- und Bodenverhältnisse (in der Regel hohe Niederschläge und feinkörnige Böden) ist der Anbau von Hackfrüchten (Kartoffeln, Mais, Zuckerrüben) denkbar ungeeignet. Denn diese erfordern aufgrund ihrer langen Wachstumsperiode eine Saatbettbereitung im frühen Frühjahr bei vollem Bodenwasserspeicher und eine Ernte im Spätherbst bei erhöhter Bodenfeuchte infolge geringerer Evapotranspiration. Den zentralen Punkt bildet hier die **standortangepasste** Wahl der **Fruchtfolge**. Doch auch bei Getreide betonter Fruchtfolge lässt sich der Zeitpunkt der Bodenbearbeitung in Bezug auf den Bodenschutz noch optimieren. So empfiehlt es sich, möglichst viele Arbeitsschritte in den Herbst zu verlegen, wenn der Bodenwasserspeicher grösstenteils aufgebraucht ist.

Die grössten Probleme ergeben sich in **strukturempfindlichen Böden**. Die labilste Struktur weisen feinkörnige, nicht bindige (nicht tonhaltige) Böden auf. Diese bringen im Vergleich zu anders gekörnten Böden bei allen Feuchtegehalten den geringsten Scherwiderstand auf. Schluffe und Feinsande sind am stärksten vor Strukturschäden gefährdet. Zudem ist ein Überschuss an Natriumionen gegenüber Kalziumionen sehr ungünstig. Böden mit hohem

Ca⁺⁺-Gehalt weisen ein weitaus stabileres Gefüge auf als Böden, bei denen Na⁺ vorherrscht (vgl. Kap. 2.2).

Verdichtungsgefährliche Bodenzustände ergeben sich also insbesondere bei:

- starker Lockerung (Gefügezerstörung, Verminderung der Vorbelastung)
- hoher Bodenfeuchte (verminderte Scherfestigkeit)
- feinkörnigen, nicht bindigen Böden (Schluffböden: geringe Scherfestigkeit mangels echter Kohäsion)
- ungünstiger Kationenadsorption der Tonminerale (Na-Böden anstelle hoher Ca-Sättigung).

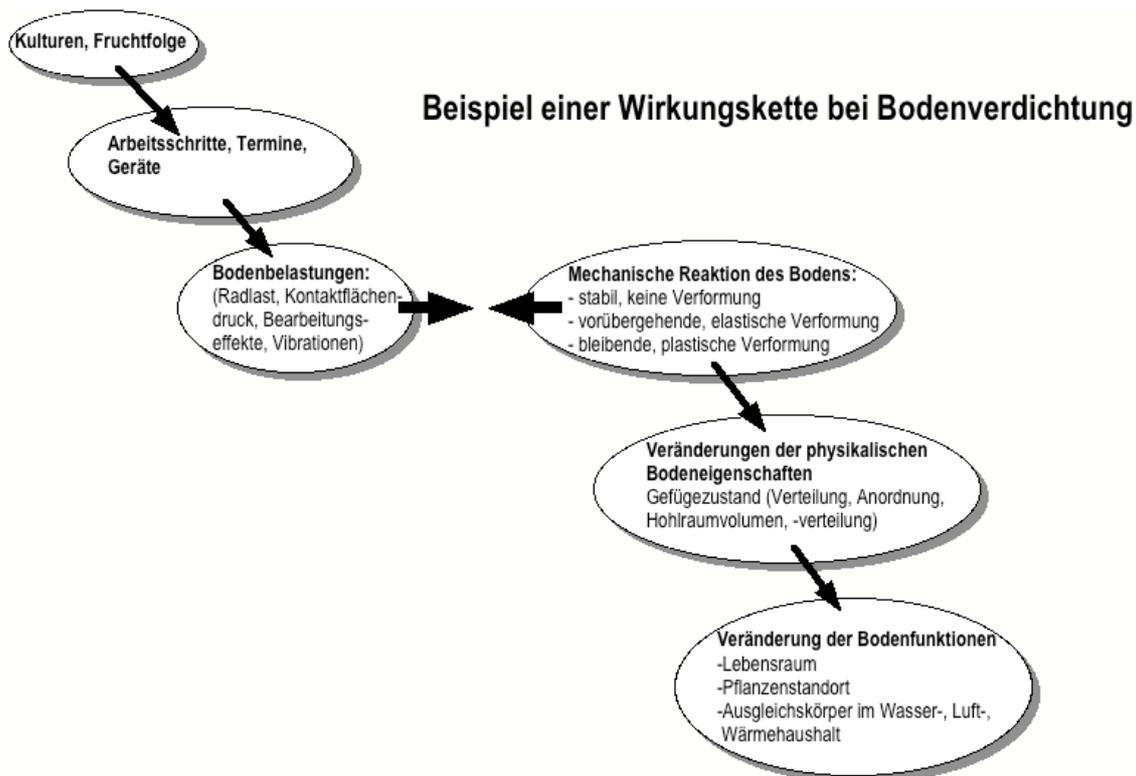


Abb. 19 Beispiel einer Wirkungskette bei Bodenverdichtungen

Das Ausmass der Bodenverdichtungen hängt aber nicht nur von der Strukturempfindlichkeit der Böden selbst ab, sondern auch weitgehend von der Bewirtschaftungstechnik. Ein hoher **Kontaktflächendruck** führt zu hohen Spannungen und infolgedessen starken Verdichtungen und Knetungen unmittelbar unter der Aufstandsfläche. Mit der Leistungssteigerung landwirtschaftlicher Fahrzeuge und Maschinen seit 1950 hat deren Gewicht massiv zugenommen (vgl. Abb. 20). Durch Vergrößerung der Aufstandsflächen, zum Beispiel mit Zwillingreifen oder extra breiten Terrareifen, kann aber der Kontaktflächendruck der Geräte gering gehalten oder teilweise sogar vermindert werden. Die Vergrößerung der Aufstandsfläche hat jedoch Verdichtungen in grösseren Tiefen zur Folge, da sich der **Druck zwiebelförmig** unter der Aufstandsfläche ausbreitet (vgl. Abb. 21). Die Befahrung und Bearbeitung des Bodens mit schweren Maschinen führt zu Verdichtungen des Unterbodens, welche umso schwerwiegender sind, als sie der Landwirt mit seinen zur Verfügung stehenden Geräten kaum selbst beheben kann.

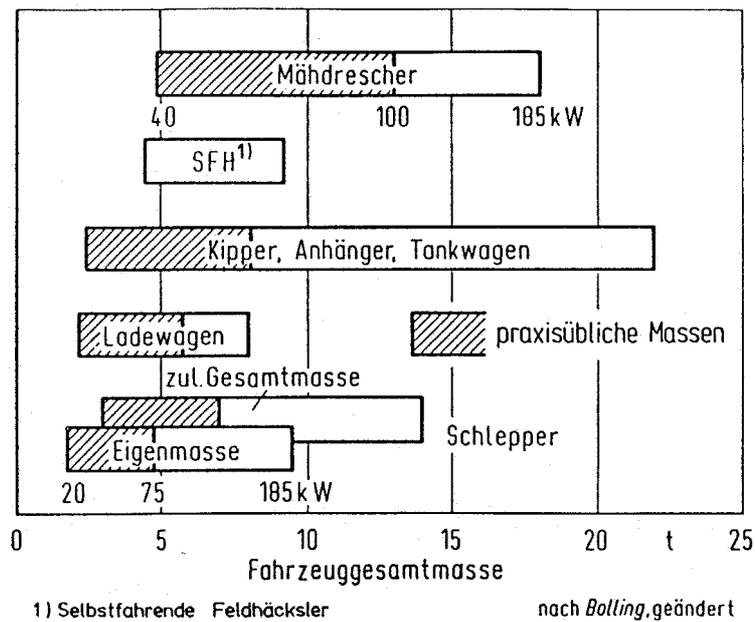


Abb. 20 Bandbreite der zulässigen Gesamtmasse für in der Bundesrepublik Deutschland angebotene Fahrzeugtypen (Sommer und Hartge 1991, S. 107)

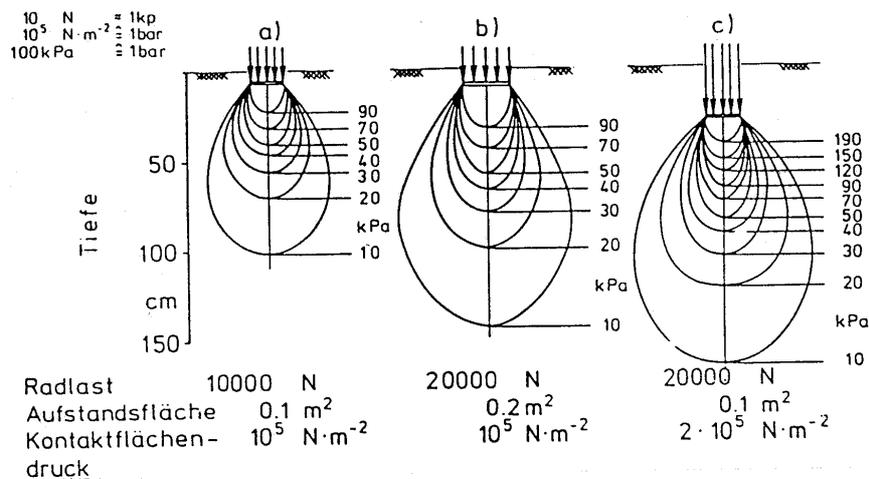


Abb. 21 Druckzwiebeln in drei verschiedenen Spuren (Sommer und Hartge 1991, S. 108)

Die **Art und Häufigkeit** der Befahrung hat ebenso einen grossen Einfluss auf die Schadensbilder und deren Ausmass. Abb. 22 veranschaulicht die Effekte auf den Boden beim Pflügen. Während der Oberboden gelockert wird (einhergehend mit einer Verringerung der Vorbelastung und Scherfestigkeit), wird der Unterboden durch das in der Pflugfurche fahrende Rad des Traktors stark verdichtet. Diese Technik führt zur weitverbreiteten Erscheinung der **Pflugsohle**. Die einfachste und wirkungsvollste Massnahme zur Vermeidung der Pflugsohle ist der Verzicht auf das Fahren in der Pflugfurche. Einzelne Betriebe setzen bereits sogenannte **Onland-** (oder **Offset-**) **Pflüge**, bei denen der Traktor mit allen vier Rädern auf dem ungepflügten Boden fahren kann, ein (Abb.23).

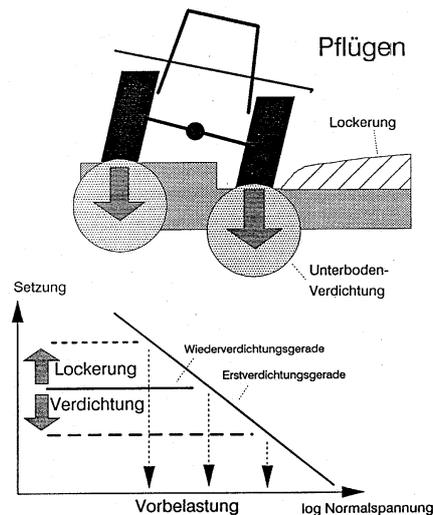


Abb. 22 Änderung der Vorbelastung durch die Pflugarbeit (Sommel und Horn 1994, S. 45)

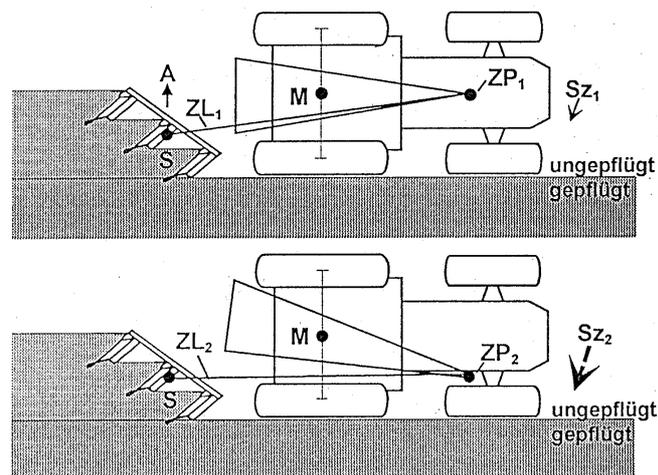


Abb. 23 Lage der Angriffspunkte der Zugkraft bei Onland- (bzw. Offset-) Pflügen
Oben: "Zugpunkt Mitte": Der Zugpunkt (ZP₁) ist zentriert, der Traktor fährt mit leichtem Seitenzug (Sz₁), weil die Zuglinie nicht durch die Hinterachsmittelpunkt (M) verläuft. Die schräge Zuglinie (ZL₁) führt zu einem erhöhten Druck der Pflulanlagen gegen die Furchenwand (A), was den Zugkraftbedarf erhöht.
Unten: "Zugpunkt Gepflügt": Die Zuglinie (ZL₂) liegt gerade, der Zugkraftbedarf wird dadurch vermindert. Der Seitenzug wird grösser, weil die Zuglinie (ZL₂) weiter von der Hinterachsmittelpunkt (M) entfernt durchläuft. (Anken 1996, S. 6)

Mehrmaliges Befahren derselben Flächen führt zur Ausdehnung von **Verdichtungszone**n in die **Tiefe**. Verdichtete Horizonte reagieren auf Belastungen wie steife Platten, sie leiten die Spannungen ohne nennenswerte Reduktion weiter in Schichten, die die Spannungen absorbieren können indem sie sich verformen, das heisst ebenfalls verdichtet werden. Schliesslich trägt auch der **Schlupf** der Antriebsräder zur Schädigung des Bodengefüges bei, denn er bewirkt die Knetung des Bodens. Schlupf entsteht bei zu geringer Zugkraft, insbesondere in nassen Böden. Durch zapfwellenangetriebene Geräte lässt sich der Schlupf stark herabsetzen, da die Kraft zur Bodenbearbeitung nicht allein vom Zugfahrzeug aufgebracht werden

muss. Allerdings zerschlagen die zapfwellengetriebenen Maschinen die Aggregate stärker, wodurch die Homogenisierung des Bodens wiederum gefördert wird.

Ökologische Folgen der Bodenverdichtung

Eine Bodenverdichtung erfolgt in erster Linie auf Kosten der **Grobporen**, der Anteil an Feinporen nimmt zu. Auch die Mittelporen nehmen ausser bei groben Sanden ab. Zudem wird durch das Verschieben der Bodenpartikel gegeneinander die Kontinuität der Poren unterbrochen. Dementsprechend verändert sich der **Wasser- und Lufthaushalt** des Bodens. Der Gasaustausch mit der Atmosphäre wird stark gehemmt, nicht nur mengenmässig infolge des Verlusts an Grobporen, auch die Diffusion ist wegen der mangelnden Porenkontinuität stark eingeschränkt. Unterhalb verdichteter Horizonte kann die Sauerstoffdiffusion so weit abnehmen, dass reduzierende Verhältnisse entstehen. Das **Infiltrationsvermögen** eines Bodens wird durch Verdichtung stark herabgesetzt, was zu erhöhtem Oberflächenabfluss führt. Gleichzeitig kann ein verdichteter Boden weniger rasch drainieren, es kommt zur **Vernäsung**.

Durch den Verlust luftführender Poren erhöht sich die **Wärmekapazität und -leitfähigkeit**. Somit erwärmen sich verdichtete Böden langsamer, kühlen sich aber auch langsamer ab, so dass die lockernde Wirkung des Frosts (Frostgare) nur selten eintreten kann.

Auch der **Nährstoffhaushalt** wird beeinträchtigt. Mangan, Eisen und Schwefel werden unter anaeroben Bedingungen reduziert und somit weniger pflanzenverfügbar. Nitrat kann bis zu elementarem Stickstoff reduziert werden (Denitrifikation), der dann in die Atmosphäre entweicht.

Verdichtungen schränken den **Wurzelaum** ein, da verdichtete Horizonte den Wurzeln einen weitaus höheren Eindringwiderstand bieten. Verdichtete Schollen oder Aggregate werden von den Wurzeln nicht durchdrungen, sondern umwachsen. Daraus folgt, dass in verdichteten Böden die Wurzeln hauptsächlich entlang von Schwundrissen wachsen. Die in den Schollen gespeicherten Nährstoff- und Wasservorräte können so kaum erschlossen werden. Schliesslich verändern (Zucker-) Rüben in verdichteten Böden ihre Wuchsform. Sie bilden mehrere Spitzen ("Beine") aus, die bei der Ernte leicht abbrechen und so zu Verlusten führen.

Sanierung von Bodenverdichtungen

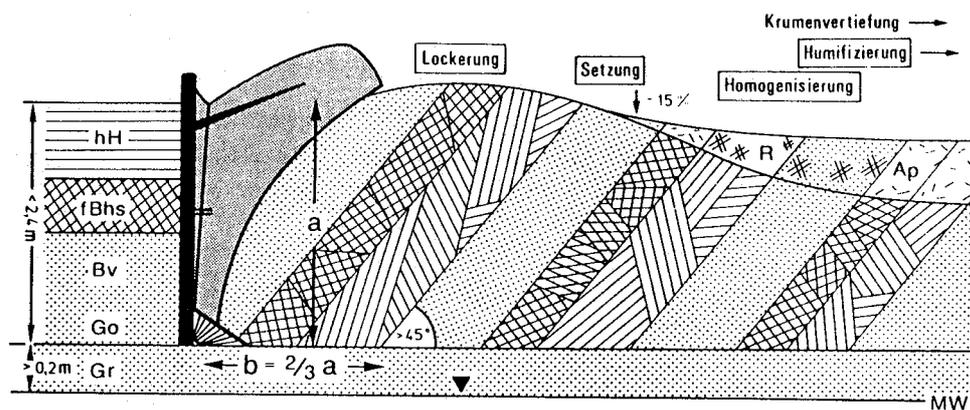
Die Sanierung verdichteter Böden beinhaltet zwei Aspekte: Erstens geht es um die Lockerung verdichteter Horizonte, zweitens um die Stabilisierung des gelockerten Gefüges. Die eigentlichen meliorativen Eingriffe sind meist von verhältnismässig kurzer Dauer verglichen mit der Zeit, die ein derart stark gelockertes Gefüge braucht, um durch natürliche Setzung und wieder aufkommende biologische Aktivität ein neues Gleichgewicht zu finden (Horn et al. 1995). Zur Sanierung von Verdichtungen sollte daher auch die **schonende Folgenutzung** nach dem technischen Eingriff mitgezählt werden. Das bedeutet, der Boden kann während mehrerer Jahre nicht im üblichen Ausmass landwirtschaftlich genutzt werden. Bodenbearbeitung und -befahrung sind auf ein absolutes Minimum zu reduzieren (z.B. extensives Grünland mit höchstens einem Schnitt im Jahr). Weidegang ist auszuschliessen. Wird der gelockerte Boden in der Folge nicht entsprechend schonend bewirtschaftet, besteht die Gefahr erneuter Verdichtungsschäden, die ein weitaus grösseres Ausmass haben können als die ursprünglichen. Aber die technischen Sanierungsmassnahmen sind sehr teuer und eine extensive Folgenutzung wirft nur wenig Ertrag ab. Somit bleibt die Wertschöpfung aus sanierten Flächen über mehrere Jahre hinweg gering. Dieses Problem ist wiederum auf agrar-

politischer Ebene zu lösen. Hieraus ergibt sich aber auch die wesentliche Bedeutung der Schadensprävention.

Lockerung

Bei der Sanierungslockerung geht es um das Aufbrechen verdichteter Schichten, die Lockerungstiefe ist dabei in der Regel tiefer als bei der gewöhnlichen landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung. Man unterscheidet zwischen **meliorativer Bodenbearbeitung** (gelegentliches tieferes Pflügen oder Lockern unter der Krumentiefe) und **Unterbodenmelioration** (einmaliger Eingriff in grosser Tiefe, das heisst 50-80 cm). Die Übergänge sind jedoch fließend.

Die Unterbodenmelioration beinhaltet grundsätzlich zwei Verfahren, die sich in ihrer Wirkung prinzipiell unterscheiden: **Tieflockerung** und **Tiefumbruch** (Abb. 24). Bei der Tieflockerung wird die Schichtung der Bodenhorizonte beibehalten. Dadurch kann vermieden werden, dass ungünstiges Material (zu stark bindiges oder saures Bodenmaterial, skelettreiche Schichten) aus der Tiefe mit dem Oberboden vermischt wird. Beim Tiefumbruch oder Tiefpflügen hingegen wird der Boden in grosser Tiefe umgebrochen und die Horizonte durchmischt. Dies empfiehlt sich vor allem bei physikalisch und chemisch günstigerem Material im Unterboden. Zudem werden stauende Horizonte steiler gestellt, was die Wasserdurchlässigkeit erhöht.



Unterbodenlockerung

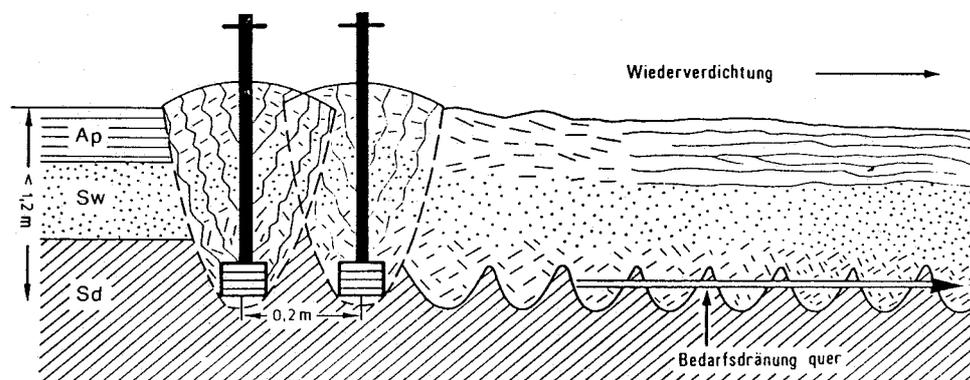


Abb. 24 Mischende und lockernde Unterbodenmelioration bei Tiefumbruch bzw. Tieflockerung (Kuntze et al. 1994, S.352)

Der Erfolg einer Unterbodenmelioration hängt allerdings auch weitgehend von den **Bodeneigenschaften** und -zuständen ab. Böden, die zu labilen Gefügen neigen, insbesondere tonarme Schluffböden, Böden mit geringem Gehalt an organischer Substanz oder Na-

gesättigte Böden (vgl. Kap. 2.2 Bewässerung), sind nicht lockerungsfähig, da sie anschließend verschlämmen und sich noch stärker verdichten. Zudem darf der Boden nicht zu feucht sein. Er darf nicht mehr plastisch verformbar sein, sondern er sollte sich in lockere Aggregate aufbrechen lassen. Der Boden muss bis in die gewünschte **Bearbeitungstiefe abgetrocknet** sein. Das Arbeitsprinzip verschiedener Tieflockerungsschare ist aus Abb. 25 ersichtlich.

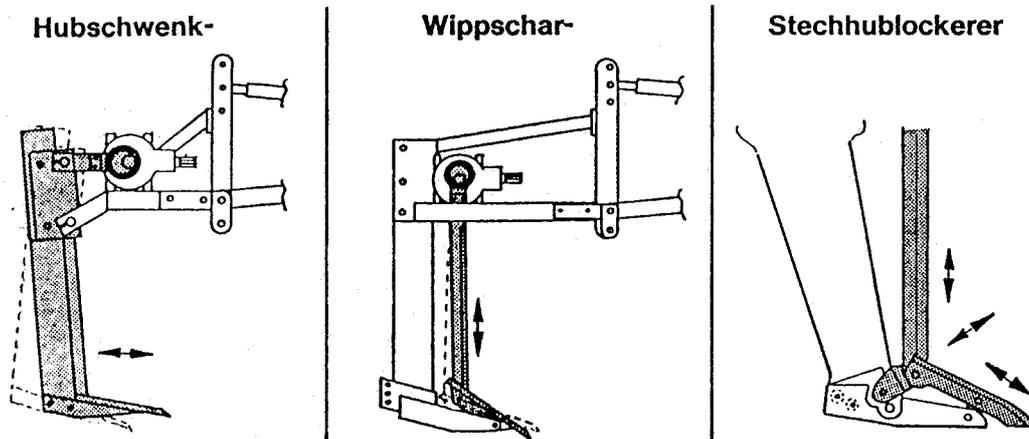


Abb. 25 Arbeitsprinzip von beweglichen Unterbodenlockern (Schulte-Karring 1976; in Kuntze et al. 1994, S. 353)

Stabilisierung

Die künstliche Gefügestabilisierung erfolgt durch **Zugabe von Zusätzen** mit biologischer, mechanischer oder chemischer Wirkung, häufig im Zusammenhang mit einer Unterbodenmelioration.

Zersetzte **organische Substanz** wirkt als Kittstoff, sie fördert die Aggregatbildung und verleiht so dem Boden zusätzliche Kohäsion, was die Scherfestigkeit erhöht. Mit der Zugabe organischer Dünger oder der Einarbeitung von Vegetationsresten wird infolge der anschließenden Zersetzung durch Mikroorganismen und Bodentiere eine Anreicherung der organischen Substanz erzielt.

Abbauresistente organische Stoffe haben hingegen kaum einen Einfluss auf die Aggregatbildung. Sie können lediglich als **Stützstoffe** dienen, indem sie grössere Hohlräume ausfüllen und durch die gröbere Körnung als die Bodenpartikel den Anteil an Grobporen örtlich erhöhen. Als Beispiel sei die Zugabe von Kunststoffteilchen bei der Unterbodenmelioration erwähnt. Dieselbe mechanische Stützwirkung erzielt man auch bei der Zugabe von Sand, wie es etwa bei norddeutschen und holländischen Sandmischkulturen auf Moorböden praktiziert wird (Kuntze et al. 1994, S. 335).

Mit der **Kalkung** soll in erster Linie auf die Kationenbelegung der Tonminerale Einfluss genommen werden. Durch Erhöhung der Ca-Konzentration soll die Aggregation gefördert werden. Ausserdem führt CaCO_3 auch zu einer Verkittung der Primärteilchen. Die Zugabe von CaO bewirkt chemische Reaktionen mit den Silikaten. Es bilden sich Calciumsilikate, die so tragfähig sind, dass diese Technik auch im Strassenbau zur Untergrund- und Kofferstabilisierung zur Anwendung kommt.

Vor allem in der Vergangenheit wurde auch Kompost aus Klärschlamm oder Hauskehricht zur Bodenstabilisierung verwendet. Diese Massnahme führte aber aufgrund des Schadstoff-

gehalts der Abfälle zu einer diffusen Verteilung chemisch belasteter landwirtschaftlicher Flächen (vgl. Kap. 4.3).

3.2 Erosion

Ursachen

Mit Erosion bezeichnet man den Abtrag von Bodenpartikeln durch Wasser oder Wind. Grundsätzlich ist Erosion ein natürliches Ereignis, dass auf unbedeckten Bodenflächen entstehen kann. In Mitteleuropa gibt es allerdings kaum Flächen, die natürlicherweise unbedeckt sind. Daher tritt Erosion hier hauptsächlich als Folge der menschlichen Nutzung auf, nämlich wo die Vegetation zeitweise fehlt oder vermindert ist. Dies trifft vor allem im Wein- und Ackerbau zu. Abb. 26 gibt die Wirkungszusammenhänge bei der Erosion wieder.

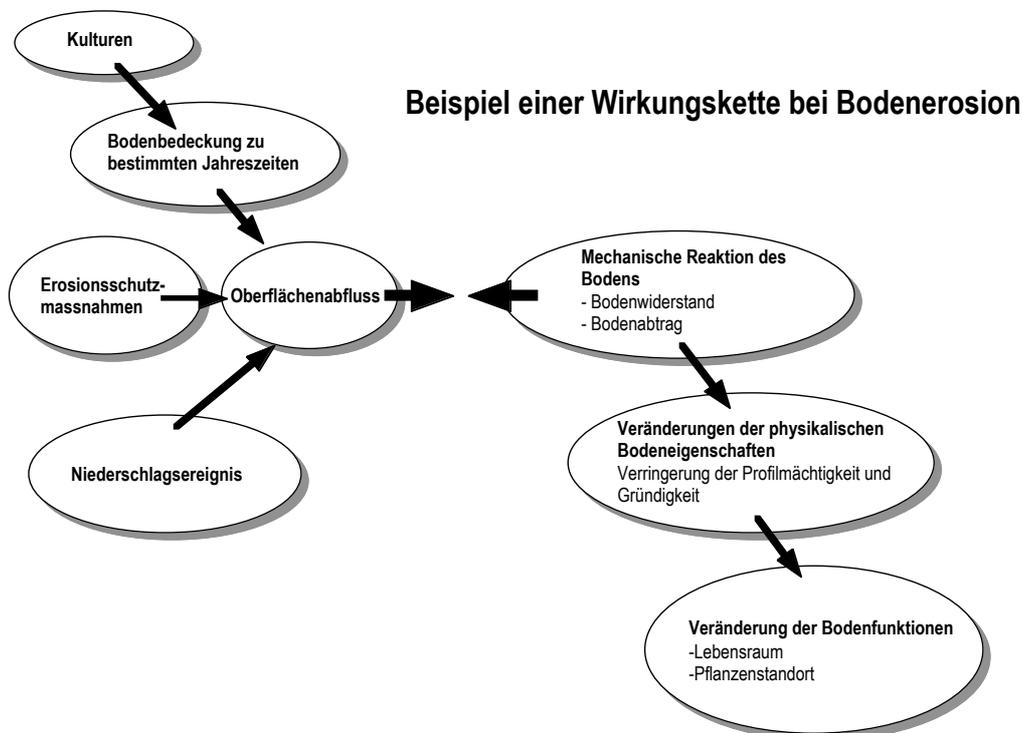


Abb. 26 Beispiel einer Wirkungskette bei Bodenerosion

Winderosion ist in unseren Regionen ein untergeordnetes Problem, von Bedeutung ist in einigen Regionen allerdings die **Wassererosion**. In der Regel stehen Erosionsereignisse im Zusammenhang mit **Starkregen**. Durch den Aufprall der Regentropfen werden einzelne Bodenteilchen gelöst und mit dem infiltrierenden Wasser in den Boden geführt. So verstopfen sie jedoch die Grob- und Mittelporen nahe der Bodenoberfläche. Es kommt zur **Verschlammung**, das Infiltrationsvermögen des Bodens ist drastisch herabgesetzt. Wasser staut sich an der Bodenoberfläche, in Hanglagen kommt es zusätzlich zu **Oberflächenabfluss**. Bei hohen Fließgeschwindigkeiten werden infolge der Schleppekraft des Wassers zusätzliche Bodenpartikel mitgerissen und verlagert.

Beim **flächenhaften Abtrag** verläuft die Erosion gleichmässig über die Bodenoberfläche. Diese Erscheinung ist typisch für die Winderosion, tritt bei Wassererosion aber wesentlich seltener auf. Häufiger ist die **Rillen-** oder **Rinnenerosion**, wo sich das Wasser in linienhaften Vertiefungen (Traktorspuren, Saatrillen) sammelt und so konzentriert talwärts fließt. Die fortgesetzte Eintiefung der Rillen kann zu regelrechten **Talwegen** führen.

Auf der erodierten Fläche macht sich der **Abtragungsschaden** als Verlust des Bodens bemerkbar. Ebenso gravierend sind aber auch die **Auflandungsschäden** in den unterliegenden Gebieten. Flurwege und Strassen werden übersart, Kanalisationen verstopfen, Rückhaltebecken und Teiche verlanden. Hinzu kommen **Belastungen durch Stoffe**, die den Bodenteilchen anhaften (vgl. Kapitel 3.3 Düngung und Pflanzenschutz).

Heute existieren verschiedene Modellansätze, um die **Ersionsgefährdung** und die **potenziellen Abtragungsmengen** abzuschätzen. Einer der bekanntesten Ansätze ist die „universal soil loss equation“ (USLE), die von Wischmeier und Smith (1978) für topografische und klimatische Verhältnisse der USA erarbeitet wurde. Schwertmann et al. (1987) passten diesen Ansatz für Bayern an. In dieser Form fand er im mitteleuropäischen Raum unter dem Namen „allgemeine Bodenabtragungsgleichung“ (ABAG) weite Verbreitung.

Die USLE bzw. die ABAG gibt auf der Grundlage von Klima-, Boden-, Relief- und Bewirtschaftungs-Kennwerten das Erosionsrisiko in Form der im langjährigen Mittel zu erwartenden jährlichen Bodenabtragsrate im Flächenmittel einer in Bezug auf die erwähnten Faktoren einheitlichen landwirtschaftlichen Einzelparzelle an. Dieses Abtragsrisiko wird durch Multiplikation von sechs Faktoren berechnet, die mit Hilfe von Tabellen, Nomogrammen und Bestimmungsgleichungen auf relativ komplizierte Weise aus den einzelnen Eingangsgrößen ermittelt werden müssen. Die USLE bzw. ABAG lautet:

A=RKLSCP

mit	A	=	langjähriger, mittlerer jährlicher Bodenabtrag [t/ha]
	R	=	Niederschlags- und Oberflächenabflussfaktor für die geograph. Lage
	K	=	Bodenerodierbarkeitsfaktor
	L	=	Hanglängenfaktor
	S	=	Hangneigungsfaktor
	C	=	Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor
	P	=	Erosionsschutzfaktor

Technische Voraussetzungen für einen wirkungsvollen Erosionsschutz

Wie bei der Bodenverdichtung sind die **feinkörnigen, strukturlabilen Böden** (Schluffe, Feinsande) am meisten der Erosion ausgesetzt. Solche Böden sollten in Hanglagen nur für den Grünfütterbau genutzt werden. Der breiten Umsetzung dieses Postulats standen bis vor Kurzem die Prämien für Hangackerbau und die Regelung der Milchkontingente entgegen (Tobias et al. 1999a, S.175).

Die Zerkleinerung der Aggregate und **Überlockerung** des Bodens bei der Saatbettbereitung (vgl. Kap. 3.1) macht den Boden ebenfalls erosionsanfällig und sollte daher vermieden werden. Bereits heute wird von verschiedenen Landwirten die Technik der **Frässaat** angewendet. Dabei wird ein Schlitz in den Boden gefräst, in den die Samen eingelegt werden. Dank der Stoppeln der vorangehenden Kultur ist der Boden zu jedem Zeitpunkt bedeckt. Eine weitere Möglichkeit zur flächenhaften Bodenbedeckung sind **Rasenuntersaaten**, was heute immer öfter im Wein- und Maisanbau praktiziert wird.

Da die Erosion aber ein gebietsübergreifendes Problem ist, sollten die räumlichen Produktionsstrukturen so eingerichtet werden, dass sie der Erosion entgegenwirken. Insbesondere sind die Formen der **Ackerschläge** so anzulegen, dass die Bewirtschaftung in hangparalleler Richtung am effizientesten wird. Auch das **Wegnetz** darf die Erosion nicht begünstigen. Wegstücke in Richtung der Falllinie dienen dem Wasser oft als Schussrinnen, so dass es bei Abzweigungen zu massiven Erosionsschäden im unterliegenden Feld kommt.

Weitere **Erosionsschutzmassnahmen** sind Fangdämme und Retentionsbecken, um den Abfluss zu brechen. Windschutzpflanzungen sollen diesen Zweck bei der Winderosion erfül-

len. Ausführlicheres zum Thema Bodenerosion ist bei Blume (1992, S. 182-224) und Kuntze et al. (1994, S. 359-366) nachzulesen. Eine für die Schweiz grundlegende Arbeit über Bodenerosion wurde von Mosimann et al. (1991) verfasst.

Obschon der Schutz vor Erosion grundsätzlich nur präventiv wirksam ist, werden oft erst dann Massnahmen zum Erosionsschutz getroffen, wenn bereits sichtbare Schäden eingetreten sind. Offenkundige Erosionsschäden sind abgerutschte Hangpartien (Massenversatz) und Anrissstellen an Gewässern. Solange es sich dabei um **flachgründige Rutsche** handelt, das heisst, die Gleitfläche nicht tiefer als der Hauptwurzelbereich der standortgerechten Vegetation liegt, ist eine Sanierung mit lebenden Pflanzen möglich. Die Verbauung von Erosionsstellen mit lebenden Pflanzen wird **Ingenieurbiologie** genannt. In der Regel werden dazu Pionierpflanzen, die sich vegetativ (über Stecklinge) vermehren lassen, verwendet. Pionierarten können sich an diesen unwirtlichen Orten ansiedeln, ist doch häufig der Oberboden abgeschwemmt. Durch die Vermehrbarkeit über Steckhölzer lässt sich das lebende Baumaterial oft erst in genügender Menge bereitstellen. Bei steilen Böschungen (die sich aus dem Platzmangel infolge Nutzungskonflikten ergeben) werden Verbauungen mit lebenden Pflanzen meistens in Kombination mit Stützbauwerken aus Beton, Eisen oder Holz erstellt. Zum Thema Ingenieurbiologie liegen separate Unterrichtsunterlagen vor (Tobias 2003). Darin wird auch auf weiterführende Literatur hingewiesen.

3.3 Düngung und Pflanzenschutz

Zweck

Durch das Abführen der Ernte werden dem Boden Nährstoffe entzogen, die dem Boden in Form von **Dünger** wieder zugeführt werden müssen, um langfristige Erträge zu sichern. Dabei geht es im wesentlichen um die Zufuhr der Pflanzennährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kalium. Traditionellerweise wird Hofdünger, das heisst, Mist und Gülle, ausgetragen. Mit der Intensivierung der Landwirtschaft wird vermehrt Mineraldünger eingesetzt. Die Steigerung der Erträge seit 1950 soll zu 40-60% auf die Mineraldüngergaben zurückzuführen sein (Deutsches Institut für Fernstudienforschung Uni Tübingen 1997, S. 213). Im Gegensatz zum Hofdünger sind die Nährstoffe beim Mineraldünger praktisch direkt pflanzenverfügbar. Bei Stallmist müssen sie erst durch die Bodenorganismen zersetzt werden.

Der grossflächige Anbau einzelner Ackerkulturen sowie das Heranzüchten von Hochleistungssorten machte einen vermehrten Einsatz von **Pflanzenschutzmitteln** zur Verhinderung epidemischer Krankheits- und Schädlingsbefälle nötig. Im Rahmen dieser Vorlesung soll aber nicht auf die Wirkungen der einzelnen Stoffe eingegangen werden. Für das regionale Flächenmanagement bedeutend sind hauptsächlich die Transportwege, über die sich Pestizide oder deren Abbauprodukte räumlich verlagern können. Dabei geht es im Prinzip um dieselben Vorgänge, die im nächsten Kapitel an den Beispielen von Stickstoff und Phosphor erläutert werden. Einzelheiten über die ökologischen Auswirkungen des Pflanzenschutzes können bei den angegebenen Quellen nachgelesen werden (Deutsches Institut für Fernstudienforschung Uni Tübingen 1997, S. 210-213; Blume 1992, S. 325-352; Scheffer und Schachtschabel 1998, S. 3312f).

Technische Voraussetzungen für einen wirkungsvollen Düngereinsatz

Die nötige Nährstoffzugabe kann prinzipiell aus dem **Vorrat im Boden** und den zu erzielenden Erträgen berechnet werden. Können die Pflanzen zum Beispiel aufgrund der Witteungsverhältnisse nicht alle zugeführten Nährstoffe aufnehmen, kommt es zu einem Nährstoffüberschuss im Boden. Einer Nährstoffanreicherung kann, vor allem bei Stickstoff, mit

zeitlich gestaffelten Düngergaben, die auf die Bedürfnisse der Pflanzen in ihrer aktuellen Wachstumsphase abgestimmt sind, entgegengewirkt werden. Nitrat und Phosphat verlagern sich aber leicht, wodurch es zu Belastungen von Umweltsystemen ausserhalb der gedüngten Flächen kommt.

Da die Düngemittel relativ billig sind, wird der maximale Gewinn bei intensiver Düngung und entsprechend hohen Erträgen erzielt. Durch eine Verteuerung des Düngers, zum Beispiel über Stickstoffabgaben, würde sich das Gewinnmaximum in Richtung eines reduzierten Düngemittleinsatzes verschieben. Häberli et al. (1991, S. 87) schätzen, dass eine Verteuerung der Düngemittel um 50-100% nötig wäre, um einen sparsameren Düngereinsatz auszulösen. Die Überproduktion mineralischer Dünger könnte allerdings erst bei einer Verteuerung von 400-500% eingedämmt werden. Abb. 27 veranschaulicht diesen Sachverhalt für das Beispiel Stickstoff.

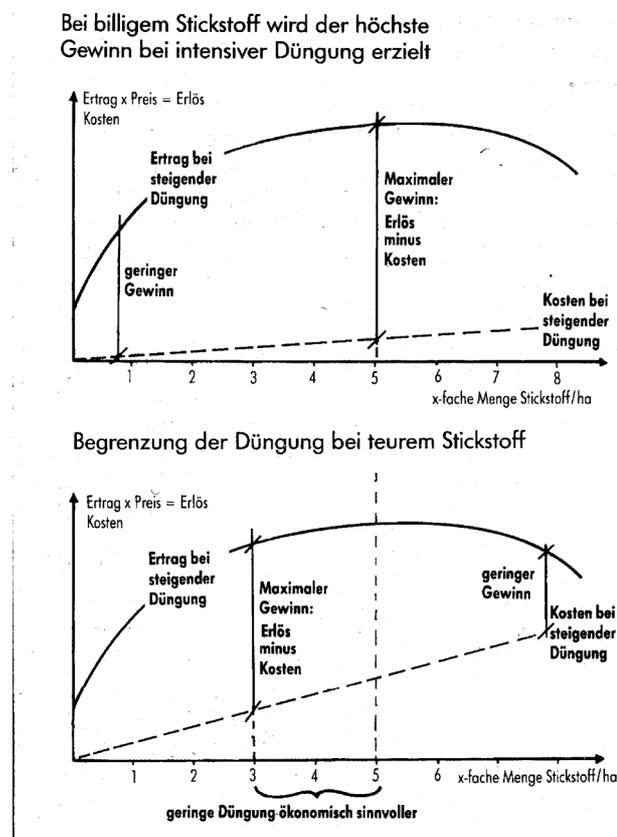


Abb. 27 Erwartete Begrenzung der Düngung durch die Einführung einer Stickstoffabgabe (Deutsches Institut für Fernstudienforschung Uni Tübingen 1997, S. 239)

In den meisten Böden ist **Stickstoff** ein Begrenzungsfaktor, so dass aus Angst um die Erträge oft übermässige Stickstoffgaben verabreicht werden. Der nicht verbrauchte Stickstoff wird dann aber in gelöster Form als Nitrat (NO_3^-) oder Ammonium (NH_4^+) mit dem Bodenwasser verfrachtet. Besonders ungünstig ist eine Verlagerung ins Grundwasser, insbesondere, wenn es sich dabei um Trinkwasser handelt. Nitrat kann im Mund mikrobiell zu Nitrit umgewandelt werden. Gelangt das Nitrit ins Blut, kann es das Zentralatom des Hämoglobins oxidieren, wodurch dieses seine Fähigkeit zum Sauerstofftransport verliert. Bei Säuglingen kann dies zum Tod führen (Blume 1992, S. 250).

In vielen Fällen gelangt Nitrat über landwirtschaftliche **Drainagen** in die **Oberflächengewässer** und führt dort zu einer **Eutrophierung**. Es kommt zur Algenblüte in den oberen Gewässerschichten. Die Algen brauchen die Nährstoffe auf und produzieren Sauerstoff infolge Assimilation. Abgestorbene Pflanzenteile sinken ab und werden unter Sauerstoffzehrung mikrobiell abgebaut. Dadurch werden die Nährstoffe für ein erneutes Algenwachstum wieder freigesetzt. In stark eutrophierten Gewässern kann es in Zeiten starker Sauerstoffzehrung zu akuten Fällen von Fischsterben kommen. Die Eutrophierung wird begünstigt, wenn neben den Nährstoffen organische Substanz, deren Abbau wiederum Sauerstoff verbraucht, ins Gewässer gelangt. Besonders problematisch wird es bei **entwässerten organischen Böden** (Mooren). Durch den Abbau der organischen Substanz infolge Durchlüftung (vgl. Kap. 2.1) wird zusätzlicher Stickstoff freigesetzt, der ebenfalls mit dem Bodenwasser verlagert werden kann.

Abb. 28 fasst schematisch die **Pfade** zusammen, über die der Stickstoff in den Boden gelangt, sich dort verlagert und schliesslich wieder ausgetragen wird. Nicht zu unterschätzen ist dabei der Eintrag über die **Niederschläge**. Die bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehenden Treibhausgase enthalten oft die Pflanzennährstoffe Kohlenstoff, Stickstoff und Schwefel in pflanzenverfügbarer Form. Zum Teil können sie schon als Gase von den grünen Pflanzenteilen aufgenommen werden (CO_2 , NO_2 , NH_3 , SO_2). Andernfalls werden sie im Boden umgewandelt, so dass sie von den Wurzeln aufgenommen werden können (Scheffer und Schachtschabel 1998, S. 316). Diese Düngung aus der Luft führt zur **grossräumigen Belastung oligotropher Ökosysteme**. Dadurch verändern sich die natürlichen Pflanzengesellschaften zugunsten konkurrenzstarker, stickstoffliebender Arten (vgl. auch Kap. 2.1) (Klötzli 1991, S. 36).

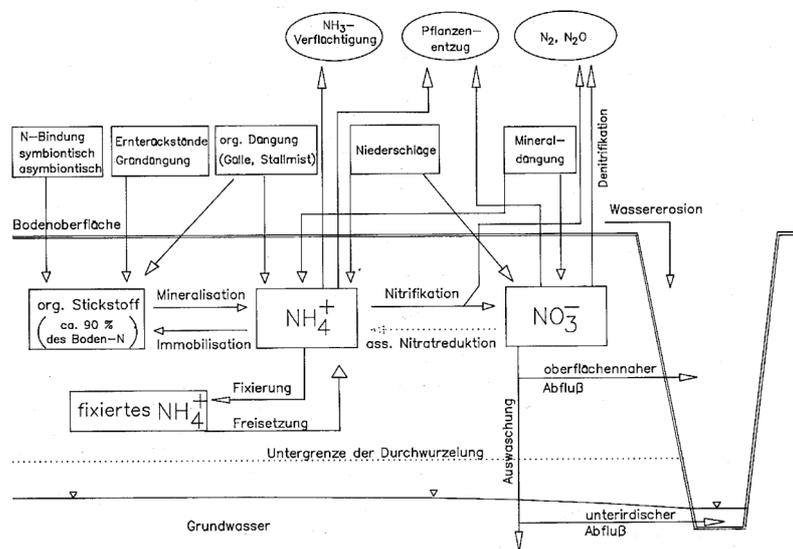


Abb. 28 Pfade des Stickstofftransports im Boden (Blume 1992, S. 239)

Phosphor ist als Phosphat an Bodenpartikel gebunden. So sind letztlich nur 60% des aus-gebrachten Phosphats pflanzenverfügbar (Deutsches Institut für Fernstudienforschung Uni Tübingen 1997, S. 215). Der Rest reichert sich im Boden an. **Bodenerosion** kann nun zu einer Verlagerung von Phosphat führen. Seit dem Einsatz phosphatfreier Waschmittel in den 1980-er Jahren, führt die Bodenerosion zu den höchsten Phosphateinträgen in die **Fließgewässer** (Scheffer und Schachtschabel 1998, S. 311). Die Folge ist wiederum die Eutrophierung (siehe oben). Zu beachten ist, dass überschüssiges Phosphat in die Sedimen-

te am Gewässergrund eingelagert wird. Unter reduzierenden Verhältnissen (insbesondere bei Sauerstoffmangel) wandelt sich das eingelagerte Phosphat in lösliche Formen um und steht erneut als Nährstoff zur Verfügung. Daraus folgt, dass sich überdüngte Gewässer erst längere Zeit nach dem Stopp des Phosphoreintrags erholen können (Scheffer und Schachtschabel 1998, S. 312).

Um dem Nährstoffeintrag in oligotrophe (nährstoffarme) Ökosysteme und Gewässer vorzubeugen, sind angrenzend an diese **Vegetationsfilterstreifen** (Pufferzonen) vorzusehen. Diese Streifen müssen mehrere Meter breit sein und dürfen auf keinen Fall gedüngt werden. Flächen, die für den ökologischen Ausgleich in der Landwirtschaft stillgelegt werden, erhalten oft die Funktion solcher Filterstreifen. In den Filterstreifen selbst herrschen allerdings in der Regel nährstoffliebende Arten vor. Ihre ökologische Bedeutung ergibt sich demnach aus ihrer Funktion und nicht aufgrund ihres Artenbestandes.

4. BAUTÄTIGKEIT, ROHSTOFFABBAU, ABFÄLLE

4.1 Bodenversiegelung

Von 1950 bis 1990 hat sich die überbaute Fläche der Schweiz mehr als verdoppelt (Häberli et al. 1991, S. 14f). Auch von 1986 bis 1996 nahm die versiegelte Fläche von 168665 ha auf 213421 ha, das heisst, um gut 25% zu (Bundesamt für Statistik 1986 und 1996). Darunter fallen Wohn-, Gewerbe- und Industrieflächen sowie Verkehrswege. Durch die Versiegelung gehen wichtige **ökologische Regelfunktionen** des Bodens verloren.

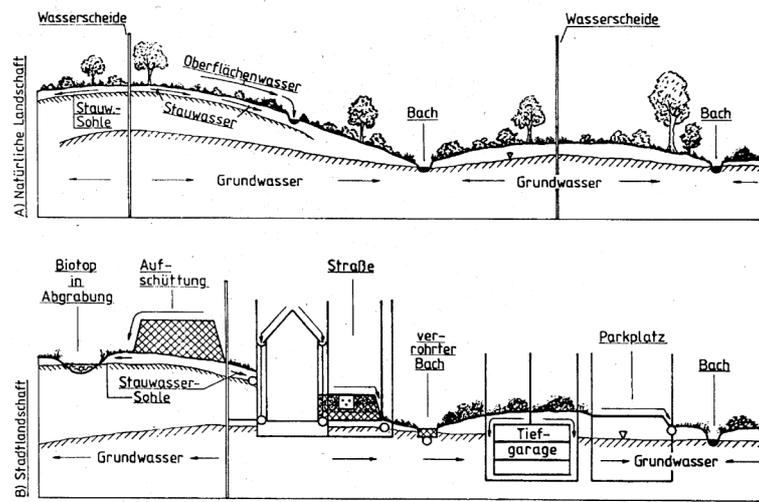


Abb. 29 Veränderungen des Gebietswasserhaushalts durch verschiedene Formen der Bodenversiegelung (Deutsches Institut für Fernstudienforschung an der Universität Tübingen 1997, S. 303)

Der Boden ist als **Pflanzenstandort** nicht mehr oder nur bedingt (z. B. als Garten über einer Tiefgarage) nutzbar. Gravierende Störungen erfährt auch der **Gebietswasserhaushalt**, wie Abb. 29 veranschaulicht. Der Oberflächenabfluss wird stark erhöht, es treten vermehrt Hochwasser auf. Die noch vorhandenen Sickerwege durch den Boden sind drastisch verkürzt. Das führt einerseits zu erhöhten Schadstoffbelastungen der Vorflutgewässer, andererseits ist die natürliche Grundwasserneubildung stark vermindert.

Eine **zielgerichtete (über-)regionale Raumplanung** soll die übermässige Ausdehnung der versiegelten Flächen verhindern. Dazu sollten jedoch auf Richtplanstufe die räumlichen Abgrenzungen der verschiedenen Nutzungseinheiten konkreter formuliert werden. Ansonsten bleibt der Richtplan zu abstrakt und wird in der Praxis bei der Nutzungsplanung zu wenig umgesetzt (Häberli et a. 1991, S. 53). Im übrigen sei auf die Vorlesungen zur Raum- und Umweltplanung (Institut für Raum- und Landschaftsentwicklung, NSL, ETH Zürich) hingewiesen.

4.2 Grossbaustellen und Rohstoffabbau

Kontext der Rekultivierungen

Baustellen und der Rohstoffabbau sind zeitlich begrenzte Flächennutzungen. Allerdings bedeuten sie trotzdem starke Eingriffe in das Bodenökosystem, da sie die Entfernung der belebten Bodenschicht voraussetzen. An Rohstoffen werden in der Schweiz nur Kies, Sand

und Lehm in nennenswerten Mengen abgebaut. Dies geschieht entweder im Tagbau oder in Fluss- oder Seebaggerungen. Im Rahmen dieser Vorlesung wird auf Letztere jedoch nicht weiter eingegangen. Abbauflächen und Baustellengelände sollen nach diesen temporären Nutzungen wieder einer anderen bzw. der ursprünglichen Nutzung zugeführt werden. Dies sind in der Regel die Land- oder Forstwirtschaft oder die Nutzung als naturnaher Lebensraum. Hierzu muss die abgetragene Bodenschicht in der Regel wieder rekultiviert werden. Da das Bauen auf Waldflächen wegen der Pflicht zur Ersatzaufforstung häufig vermieden wird, verstärkt sich der Druck auf das Landwirtschaftsland. Der Konflikt wird dadurch noch verschärft, dass die Böden über den abbauwürdigen Kiesvorkommen in der Regel auch für die Landwirtschaft hohe Erträge einbringen und deshalb dort häufig als Fruchtfolgeflächen (RPV 1989) ausgeschieden und erhalten werden sollen (vgl. z.B. Richtplan des Kantons Zürich; Kanton Zürich 1995).

Grossflächige Baustellen ergeben sich bei der Erstellung von Infrastrukturanlagen, zum Beispiel bei Verkehrswegen und Leitungen für Energieträger. Insbesondere der Strassenbau nimmt neben den eigentlichen Verkehrsflächen grosse Flächen für Installations- und Werkplätze sowie für allfällige Baupisten ein. Diese Flächen müssen nach Beendigung der Bauarbeiten wieder rekultiviert werden. Die immer bessere Eingliederung von Verkehrswegen in die Landschaft zieht zudem immer ausgedehntere Geländeverschiebungen und deshalb grosse Rekultivierungsflächen nach sich (z.B. die A4 durch das Knonauer Amt). Zur Abflachung einer Böschung beispielsweise von 2:3 auf 1:10 erstrecken sich Auffüllungen oder Einschnitte über siebenmal grössere Flächen, die rekultiviert werden müssen. Auch die Erstellung von Tunnels im Tagbau ist mit dem Abtrag und der Wiederaufschüttung des durchwurzelbaren Bodens verbunden. Einen Spezialfall linienhafter Baustellen bildet das Verlegen von unterirdischen Rohrleitungen mit grossen Durchmessern (40-90 cm), zum Beispiel Erdgashochdruckleitungen. Der Eingriff auf den gewachsenen Boden beschränkt sich dabei auf eine relativ kleine Fläche (langer, aber maximal 10 m breiter Baustreifen) und eine kurze Zeit (Abschluss aller Arbeiten an einem Ort innerhalb ein bis zwei Monaten). Dennoch bedeutet dieser Eingriff eine starke Störung des Bodengefüges und auch der Bewirtschaftung. Denn derartige Leitungen werden möglichst krümmungsfrei verlegt, was oft dazu führt, dass sie, ohne Rücksicht auf die Bewirtschaftungsrichtung, quer über die Felder der Landwirte verlaufen.

Technische Voraussetzungen für den Rekultivierungserfolg

Aufgrund verschärfter Nutzungskonflikte wird die Rekultivierung von Böden sowohl ökologisch und ökonomisch, als auch flächenmässig immer bedeutender. Je nach der vorgesehenen Nachnutzung werden unterschiedliche Ansprüche an die Art und Mächtigkeit der rekultivierten Bodenhorizonte gestellt. Für landwirtschaftlich genutzte Flächen wird heute in der Regel eine mindestens 1 m mächtige Rekultivierungsschicht vorgeschrieben. Diese soll aus ca. 80 cm Unterboden (Verwitterungsmaterial, B-Horizont) und ca. 30 cm Oberboden (Humus, A-Horizont) bestehen. Waldstandorte benötigen keine Humusaufgabe, der Wurzelraum von Bäumen dehnt sich aber auf ca. 2 m Tiefe aus. Einen Sonderfall bilden Rekultivierungen zur Erstellung naturnaher Lebensräume. Wenn es um die Schaffung von Ruderalstandorten oder Feuchtbiotopen geht, insbesondere in Kiesgruben, fällt die Schüttung des Bodens oft weg.

Abb. 30 zeigt schematisch den **Aufbau eines rekultivierten Bodens**. Die Rohplanie ist entweder die Deponieabdeckung (siehe Kap. 4.3) oder die Planie, auf der die Baustellenfahrzeuge gefahren sind. Sie ist in den meisten Fällen praktisch wasserundurchlässig. Daher sollte sie eben und mit einer Neigung von mindestens 4% angelegt werden, um örtliche Stauwasserbildung in der Rekultivierungsschicht zu vermeiden. Auf grossflächigen Rekultivierungen, insbesondere bei langen Schlägen in Richtung der Fallinie, empfiehlt sich der

Einbau einer Sickerhilfe immer. Diese kann als Röhrendrainage, lineare Kiespackungen (vgl. Kap. 2.1 Bodenentwässerung) oder als flächenhafte Kiesdecke angelegt werden. Am verbreitetsten sind auch hier PVC-Rohre, die allerdings, wegen der befürchteten Bruchgefahr, häufig erst nach Fertigstellung der Rekultivierung eingebaut werden. Darüber liegt die eigentliche Rekultivierungsschicht aus Unter- und ev. Oberboden, je nach vorgesehener Nachnutzung (s. oben).

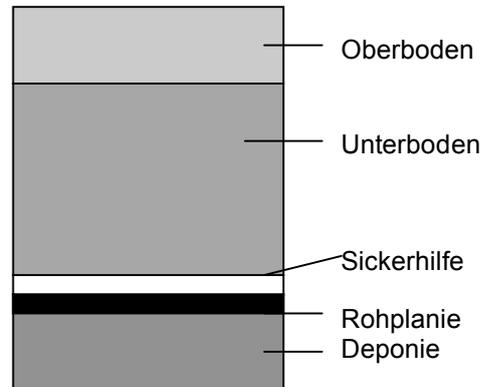


Abb. 30 Bodenaufbau nach der Rekultivierung auf Landwirtschaftsflächen

Der **Abtrag** und die **Schüttung** des Bodens bedeuten starke mechanische Eingriffe auf das Bodengefüge. Damit die einzelnen Bodenaggregate (insb. Krümelaggregate) nicht zerstört werden, dürfen diese Arbeitsschritte nur bei **abgetrocknetem Boden** durchgeführt werden. Dies gilt auch für die Schüttung beziehungsweise den Abtrag von Zwischendepots (s. unten). Frisch geschütteter Boden ist überlockert und darf deshalb nicht befahren werden. Es gibt zwei grundsätzlich verschiedene Schüttverfahren: Flächenhafte oder streifenweise Schüttung. Die Wahl des Verfahrens geschieht hauptsächlich nach technischen Gesichtspunkten (Ausdehnung und Form der Rekultivierungsfläche, Art und Menge des verfügbaren Schüttmaterials, zur Verfügung stehende Maschinen).

Bei der **flächenhaften Schüttung** wird der Unterboden von der Rohplanie aus auf der ganzen Rekultivierungsfläche geschüttet. Dann lässt man den Unterboden setzen, bevor ein halbes bis ein ganzes Jahr später der Oberboden aufgetragen wird. Zur Förderung der Strukturbildung und zum Schutz vor Erosion wird der Unterboden mit einer tiefwurzelnden winterharten Zwischenfrucht (z.B. Futterraps, Rüben, Gelbsenf) eingesät. Für das Humusieren werden meistens Raupenfahrzeuge mit niedrigen Bodendrücken (z.B. Mohrraupe, <200 kPa) verwendet. Das hohe Gewicht der beladenen Schüttfahrzeuge führt dennoch in vielen Fällen zu Verdichtungen in den obersten 10 cm des Unterbodens. Wird der Humus mit Baggern, insbesondere mit Draglinien, ausgeworfen, lässt sich das direkte Befahren des Unterbodens vermeiden. Wegen der beschränkten Reichweite der Bagger kommt diese Praxis aber nur auf sehr kleinen Flächen in Frage.

Bei der **streifenweisen Schüttung** werden Unterboden und Oberboden in Streifen von ca. 3–5 m Breite mit Baggern in einem Arbeitsgang geschüttet. Bei diesem Verfahren kann das Befahren des Unterbodens vermieden werden, allerdings wird der Unterboden unmittelbar nach der Schüttung mit dem Humus belastet. Auf streifenweise rekultivierten Flächen wurden im Vergleich zum flächenhaften Verfahren ungleichmäßigere Setzungen beobachtet. Bei beiden Schütttechniken ist der Oberboden unmittelbar nach der Schüttung einzusäen.

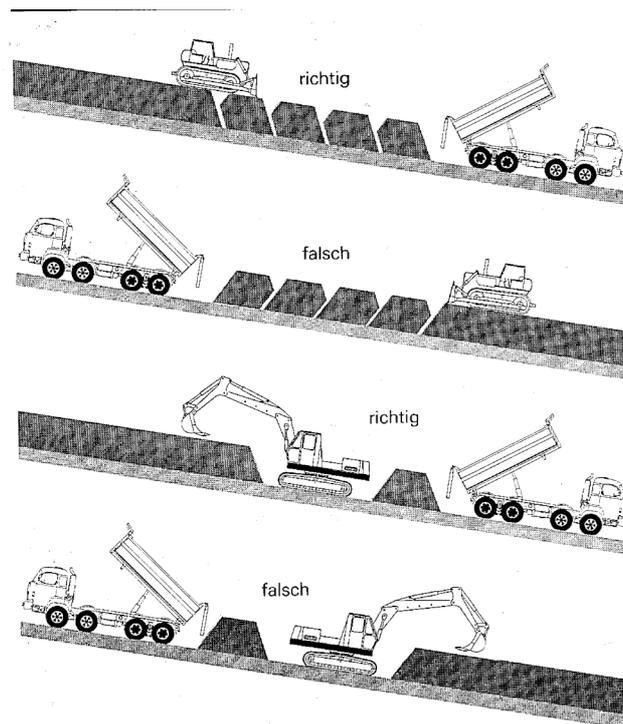


Abb. 31 Auftrag des Unterbodens (Eidg. Forschungsanstalt für landwirtschaftlichen Pflanzenbau FAP Reckenholz und Schweiz. Fachverband für Sand und Kies FSK 1987, S. 18)

Grundsätzlich sollte der Boden nach dem Abtrag möglichst sofort umgelagert und an seinem endgültigen neuen Platz rekultiviert werden. Man erspart sich so die **Bodenzwischenlager**, die einerseits relativ grosse Flächen beanspruchen, und andererseits auch nur bei trockenen Verhältnissen abgebaut werden dürfen. In Kiesgruben, die während 20 bis 50 Jahren ausgebeutet werden, wird der Abbau zeitlich und flächenhaft etappiert. Dies sollte die unmittelbare Bodenumlagerung von einer Etappenfläche auf die andere weitgehend ermöglichen. Bei kurzfristigen Baustellen (Gasleitungsbau) wird der Boden praktisch immer unmittelbar neben dem ausgehobenen Graben zwischengelagert und anschliessend auf seinem ursprünglichen Ort rekultiviert. Auf Strassenbaustellen, wo Installationsplätze zum Teil über 5 bis 10 Jahre angelegt werden, sind die Depotflächen sorgfältig auszuscheiden, damit nach Beendigung der Bauarbeiten noch genügend rekultivierungsfähiger Boden übrig bleibt. Die Depots können als Mieten, Wälle oder flächenhaft über Kulturland (nur Oberbodendepots) angelegt werden.

Den grössten Streitpunkt bildet die Höhe der Zwischenlager, da diese für den Flächenbedarf ausschlaggebend ist. Grundsätzlich sollte der Boden nicht von seinem Eigengewicht zusammengedrückt werden. Je feinkörniger ein Boden ist, umso weniger tragfähig ist er (s. Kap. 3.1) und darf dementsprechend weniger hoch geschüttet werden. Harris et al. (1996, S.70f) beobachteten allerdings in allen Bodendepots anaerobe Verhältnisse im Kern (Abb. 32). Das Ausmass dieses anaeroben Kerns hängt von der Körnung des Material und von der Schütthöhe ab (Abb. 33).

Für Oberbodendepots werden Höhen von 1,5 m bis 2,5 m empfohlen (FSK 2001). Für Unterbodendepots werden je nach Körnung des Materials Höhen von 5 bis 10 m angegeben (Umweltministerium Baden-Württemberg 1991). Flächenhafte Oberbodendepots sollten so hoch sein, dass sie zusammen mit dem gewachsenen Oberboden nicht mehr als 50 cm ausmachen, um die Luftzirkulation in den darunterliegenden Unterboden zu gewährleisten (Salm 1996). Diese Depots können bewirtschaftet werden, wodurch die Nutzungseinschrän-

kungen gemildert werden. Allerdings sollte man sich auf eine extensive Bewirtschaftung beschränken.

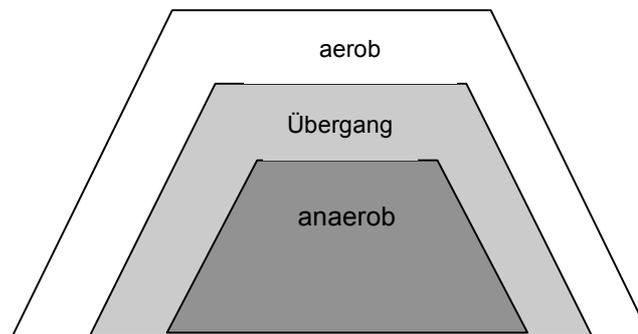


Abb. 32 *Aerobe und anaerobe Zonen in einem Bodenzwischenlager (nach Harris et al. 1996, S. 71)*

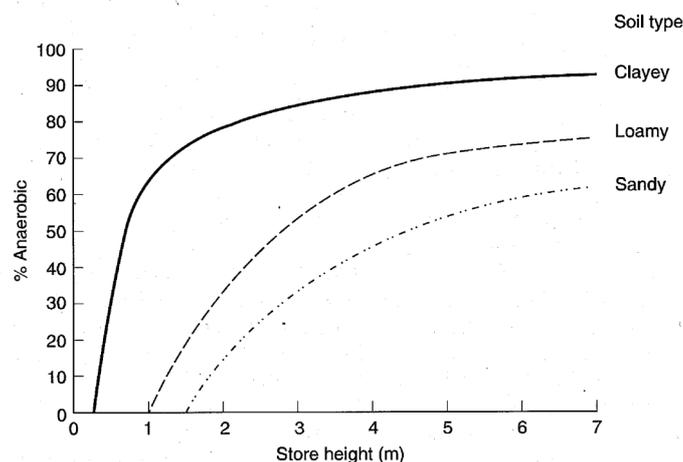


Abb. 33 *Prozentualer Anteil der anaeroben Zone innerhalb eines Bodenzwischenlagers in Abhängigkeit der Körnung des Materials und der Schütthöhe (Harris et al. 1996, S. 71)*

Zur Technik der Rekultivierung gibt es heute verschiedene **Richtlinien**, Leitfäden und Merkblätter, die laufend überarbeitet werden. Die folgenden Veröffentlichungen sind in der Schweiz am verbreitetsten:

FSK-Schweiz. Fachverband für Sand und Kies (Hrsg.), 2001. Kulturland und Kiesabbau. Richtlinie für den fachgerechten Umgang mit Böden. Haller u. Jenzer, Burgdorf, 77 S.

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

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

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

Technische Verordnung über Abfälle TVA vom 10. Dez. 1990

Genauso wichtig wie die Rekultivierung ist auch eine schonende **Folgebewirtschaftung** des Bodens. Über die zeitliche Entwicklung der mechanischen Belastbarkeit rekultivierter Böden ist heute noch sehr wenig bekannt. In der Regel wird empfohlen, während der ersten drei bis fünf Jahre die Bewirtschaftung stark einzuschränken (extensives Grünland ohne Beweidung). Doch auch später empfiehlt sich eine Fruchtfolge mit Getreide und Kunstwiese, ohne Hackfrüchte. In vielen Fällen werden diese Empfehlungen von den Landwirten aber nicht befolgt. Insbesondere bei relativ kurzfristigen Fremdnutzungen wie für Infrastrukturbauten (Strassen, Eisenbahnlinien, Leitungen) garantieren die Unternehmer nur für wenige Jahre Entschädigungen für den Ausfall landwirtschaftlicher Erträge. Bis vor Kurzem wurden Entschädigungszahlungen umso höher, je teurer die Ernte hätte verkauft werden können, weshalb oft schon im ersten Jahr nach der Rekultivierung wieder Mais angebaut wurde.

Neben groben Steinen im Oberboden sind **Vernässungen** infolge Verdichtung die häufigsten Probleme, die Landwirte auf Rekultivierungen beklagen. 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 Anhäuptern, wo der Traktor wendet, oder bei Einfahrten für Landwirtschafts- oder Rekultivierungsfahrzeuge.

4.3 **Schadstoffe, Abfälle**

Schadstoffe aus diffusen Quellen

Viele industriell hergestellte Produkte (insbesondere Kunststoffprodukte, Mineraldünger, Treibstoffe) enthalten **Schwermetalle** oder **organische Verbindungen**, die bei der Zersetzung oder Verbrennung der Produkte freigesetzt werden und so neue Bindungen (z.B. Dioxine) eingehen können. Schadstoffe in der **Abluft** von Kehrlichtverbrennungsanlagen, chemischen oder Metall verarbeitenden Betrieben und von Verbrennungsmotoren gelangen in die Luft und von dort mit den Niederschlägen auf und in den Boden. In der Nachbarschaft von **Industriebetrieben** und **Strassen** kommen Schwermetalle oder schwer abbaubare organische Verbindungen im Boden zum Teil in hohen Konzentrationen vor. Die Einführung von Rauchgaswaschanlagen und Katalysatoren bei Benzinmotoren brachte zwar eine starke Reduktion der Immissionen in den Boden. Der bereits vorhandene Gehalt an diesen oft toxischen Stoffen im Boden wurde dadurch allerdings nicht reduziert.

Viele Schadstoffe stammen von **Klärschlämmen**, die zur Düngung landwirtschaftlicher Flächen ausgebracht wurden. In den Klärschlämmen konzentrieren sich die Schadstoffe aus den Abwässern. Problematisch sind vor allem die Fälle, wo sich Landwirte in Abnahmeverträgen zur Abnahme von Klärschlamm verpflichteten. Diese Felder wurden regelmässig kontaminiert und weisen heute zum Teil Schwermetallkonzentrationen auf, bei denen vermutet wird, dass die Bodenfruchtbarkeit langfristig nicht mehr gewährleistet ist. Wegen der hohen Schadstoffkonzentrationen in städtischen Klärschlämmen in der Vergangenheit weigern sich heute die Landwirte zum Beispiel im Raum Zürich, weiterhin die Schlämme der Stadt Zürich abzunehmen. Dies stellt die Stadt vor Entsorgungsprobleme, da sie den Klärschlamm nun verbrennen und die schadstoffhaltige Schlacke als Sondermüll deponieren muss (NZZ vom 19./20.2.2000).

Weitere Schadstoffquellen sind Industrieareale, auf denen Abfälle nicht hinreichend gegen die Umwelt abgedichtet wurden, Unfallstandorte (Unfälle von Tanklastzügen, Lecks in Lagereinrichtungen) und Kugelfänge von Schiessanlagen. Derartige Standorte werden als **Altlasten** bezeichnet. Die Schadstoffkonzentrationen in Altlasten sind oft mehrere Größenordnungen höher als in den Böden der diffus belasteten Flächen, die weiter oben erwähnt wurden.

Viele **Schwermetalle** sind lebenswichtige Spurenelemente (z.B. Cu, Fe, Mn, Zn). In höheren Dosen wirken sie jedoch toxisch auf die meisten Organismen. Andere Schwermetalle erfüllen keinen physiologischen Zweck und sind schon in kleinen Mengen giftig (z.B. Cd, Hg, As). Schwermetalle im Boden können nicht abgebaut werden. Sie werden jedoch zu gewissen Anteilen nach dem Mechanismus des **Kationenaustausches** (Abb. 34) adsorbiert und so im Boden gebunden. Die Ionenaustauscher sind negativ geladene Bodenteilchen, das heisst, vor allem Tonteilchen und Huminstoffe.

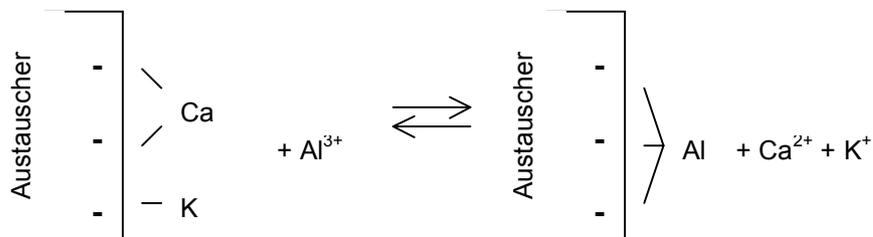


Abb. 34 Prinzip des Kationenaustausches im Boden (nach Scheffer und Schachtschabel 1998, S. 93)

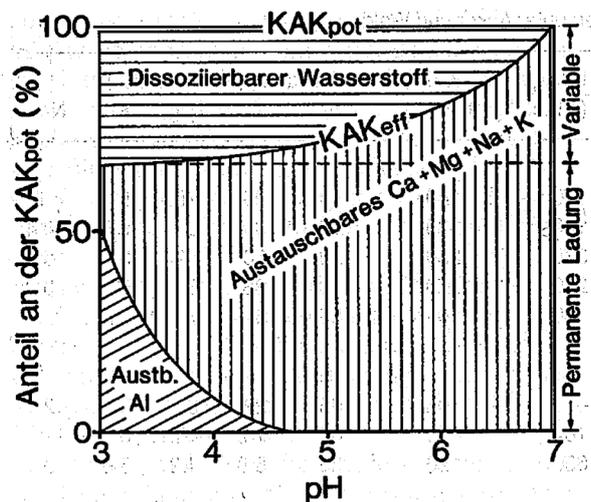


Abb. 35 Schematische Darstellung der Abhängigkeit von KAK_{eff} und Kationenbelag (in % von KAK_{pot}) vom pH-Wert in einem Boden (Scheffer und Schachtschabel 1998, S. 102)

Der Anteil adsorbierter Schwermetalle hängt von der **Kationenaustauschkapazität** (KAK) ab. Diese ist definiert als die Summe aller austauschbaren Ca, Mg, Na, K-Ionen (näheres über den Kationenaustausch bei Scheffer und Schachtschabel 1998, S. 100-103). Die Kationenaustauschkapazität ist abhängig vom pH-Wert des Bodens. Bei pH 7 erreicht sie ihr Ma-

ximum. Dieses wird als potentielle Kationenaustauschkapazität (KAK_{pot}) eines Bodens bezeichnet. Die effektive Kationenaustauschkapazität (KAK_{eff}) nimmt mit sinkendem pH ab (Abb. 35). Sie entspricht der KAK beim aktuellen pH eines Bodens und ist daher massgebend für die tatsächlich ablaufenden Prozesse.

Auf diese Weise wirkt der Boden als **Puffer** und reduziert den Anteil der Schwermetalle in der Bodenlösung. Gelöste Schwermetalle können von den Pflanzen aufgenommen werden und so in die Nahrungskette gelangen. Das Verhältnis von gelösten zu adsorbierten Ionen lässt sich mit Adsorptionsisothermen beschreiben (Abb. 36).

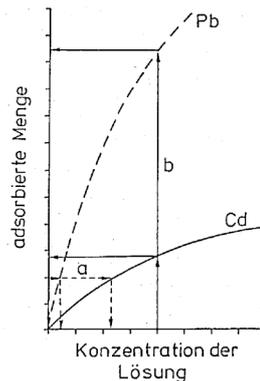


Abb. 36 Schematische Darstellung von Adsorptionsisothermen für Cd und Pb (Blume 1992, S. 296)

Bei der Beurteilung der Schwermetallbelastung von Böden unterscheidet man daher zwischen dem **Totalgehalt** an Schwermetallen und dem **Gehalt gelöster Anteile**. Der Totalgehalt entspricht der Summe aus den gelösten und adsorbierten Anteilen. Die gelösten Schwermetalle stellen eine akute Gefahr dar, da sie unmittelbar pflanzenverfügbar sind. Die adsorbierten Schwermetalle bilden jedoch eine latente Gefahr, da sie bei abnehmendem pH infolge Mangel an austauschbarem Ca, Mg, Na und K wie Al in Lösung übergehen können (vgl. Abb. 35), wobei auch Al für die Pflanzen toxisch ist. Dieser Sachverhalt ist von hoher Bedeutung, da mit der Emission von SO_2 und NO_x (sowie Ammonium in Gebieten mit Massentierhaltungen) starke Säuren in den Boden eingetragen werden.

Die Komplexbildung der Metalle mit **löslichen organischen Substanzen** im Boden hat ebenso einen grossen Einfluss auf deren Pflanzenverfügbarkeit. Gelöste organische Substanzen setzen nicht nur Schwermetalle, sondern auch schwerlösliche organische Schadstoffe wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) oder Reste von Pflanzenschutzmitteln frei. Näheres zum Verhalten von Stoffen in der Bodenlösung ist bei Scheffer und Schachtschabel 1998, S. 123-133, nachzulesen.

Die Adsorption organischer Schadstoffe im Boden geschieht hauptsächlich über organische Liganden. Im Rahmen dieser Vorlesung soll aber nicht weiter auf das Verhalten organischer Schadstoffe im Boden eingegangen werden. Es wird auf Blume 1992, S. 263-431, verwiesen.

Deponien

Ausgebeutete Rohstoffabbaugebiete müssen in der Regel wieder aufgefüllt werden. Deshalb sind sie neben den natürlichen Geländemulden bevorzugte Orte für die Ablagerung von Abfall, Abraum und Aushub. Die Technische Verordnung über Abfälle (TVA 1990) unterscheidet drei **Deponietypen** nach der chemischen Reaktionsfähigkeit der Inhaltstoffe:

- *Inertstoffdeponien* dürfen nur gesteinsähnliche Materialien, die keinerlei chemische Reaktionen eingehen, beinhalten. Hierunter fallen vor allem Kiesgruben.
- Auf *Reststoffdeponien* dürfen Stoffe abgelagert werden, die soweit inert beziehungsweise chemisch abgebaut sind, dass keine Schadstoffe mobilisiert werden und somit in die Umwelt gelangen können.
- *Reaktordeponien* enthalten schliesslich Abfälle, deren Zersetzung noch im Gang ist, und dadurch Schadstoffe infolge chemischer Reaktionen freigesetzt werden können (Hausmüll, Schlacke und Filterasche aus Kehrrechtverbrennungsanlagen, Bauabfälle). Diese Kategorie entspricht in etwa den ehemaligen 'Multikomponentendeponien'.

Ausgebeutete Ton- und Lehmgruben bieten nicht selten gute Voraussetzungen für Reststoff- oder sogar Reaktordeponien (dichter Untergrund zur Vermeidung von Grundwasserkontaminationen). Abfalldeponien wurden bereits in der Vergangenheit aus hygienischen Gründen abgedeckt. Anhang 2 der TVA schreibt nun nach der Deponieauffüllung die Rekultivierung vor. Diese ist naturnah zu gestalten, so dass sie land- oder forstwirtschaftlich beziehungsweise als naturnaher Lebens- und Erholungsraum genutzt werden kann. Immissionsträchtige Deponien sind gegen kapillaren Wasseraufstieg und das Eindringen von Wurzeln speziell abzudichten. Der Kanton Zürich schreibt in der Regel auch höhere Mächtigkeiten der Rekultivierungsschicht als den Wurzelhorizont vor. Tatsächlich haben Untersuchungen auf einer (unabgedichteten) Deponie mit radioaktivem Abfall im Südosten von Idaho (USA) gezeigt, dass grabende Säugetiere bei einer Abdeckung von 60 cm Boden 173 g/m² Bodenmaterial aus dem Untergrund an die Oberfläche brachten, bei einer Abdeckmächtigkeit von 180 cm aber lediglich 1.4 g/m². Dabei war die Konzentration der Radionukleide im abgelagerten Boden signifikant höher als an der ursprünglichen Oberfläche der Abdeckung (Arthur und Markham 1983 in Forrer 1993). Ebenso schützt eine mächtige Rekultivierungsschicht mineralische Abdichtungen vor Austrocknung und Rissbildung. Auf der Deponie Georgswerder bei Hamburg wurden unter einer nur 60 cm dicken Rekultivierungsschicht bereits drei Jahre nach dem Einbau bis zu 30 cm tiefe Schwundrisse in der mineralischen Dichtung beobachtet. In den Klüften konnte auch ein reges Wurzelwachstum bis in diese Tiefe nachgewiesen werden (Dr. S. Melchior, Institut für Bodenkunde, Universität Hamburg, mündliche Mitteilung vom 15. Jan. 1996).

Auffüllungen zur Aushubentsorgung

Während die vorhin genannten Arten von Auffüllungen weitgehend bewilligungspflichtig und somit auch behördlich überwachbar sind, sind kleinräumige **landwirtschaftliche Auffüllungen** zu Meliorationszwecken oder wilde Deponien meistens schwer zu erfassen. Auffüllungen in Muldenlagen zur Behebung von Vernässungen werden oft im Zusammenhang mit der Entledigung von relativ kleinen Mengen (wenigen Lastwagenfulen) an Bauabfällen ausgeführt. Derartige landwirtschaftliche Auffüllungen sind im Kanton Zürich sehr zahlreich und diffus über das ganze Kantonsgebiet verteilt. In vielen Fällen handelt es sich dabei aber um unsachgemässe Rekultivierungen. Oft wurde nur der Humus abgetragen und der Bauschutt auf den Unterboden deponiert. Einige Bauabfälle enthalten zudem Schadstoffe, die mobilisiert werden können (s. oben). Ausserdem wird mit dem Aufbringen einer zusätzlichen Humuslage auf vernässten Stellen nicht die Ursache, sondern nur das Symptom bekämpft.

Bei der Überbauung landwirtschaftlich genutzter Flächen in der Bauzone fallen grosse Mengen kulturfähigen Bodens an, die aus Platzgründen nicht oder nur zu einem kleinen Teil auf denselben Parzellen wieder aufgebracht werden können. Der Boden wird abgeführt und anderswo für Rekultivierungszwecke verwendet. Hierbei besteht die **Gefahr des Schadstofftransfers** von stärker auf weniger stark belastete Böden, vor allem bei Bauten in der Nachbarschaft von Emittenten (Industrieanlagen, Kehrrechtverbrennungsanlagen, Strassen). Be-

steht der Verdacht einer Kontamination, ist der Boden im Rahmen des Baugesuchs beziehungsweise der Umweltverträglichkeitsstudie auf seinen Schadstoffgehalt hin zu untersuchen (VSBo Mitt. 4, zur Zeit in Überarbeitung). Für kontaminierte Böden ist ein Bestimmungsort zu suchen, der dieselben oder höhere Schadstoffgehalte aufweist. Im Rahmen des Baugesuchs ist daher auch der Schadstoffgehalt des Bestimmungsorts nachzuweisen.

Bodenreinigung von stofflichen Belastungen

Unter Bodenreinigung wird einerseits die **Eliminierung** von Schadstoffen, andererseits deren **Immobilisierung** beziehungsweise Umwandlung in unschädliche Derivate verstanden. Im Rahmen dieser Vorlesung soll nur ein grober Überblick über die Prinzipien verschiedener Bodenreinigungsverfahren gegeben werden. Für eine Vertiefung sei auf die umfangreiche Fachliteratur verwiesen (z.B. Blume 1992, S. 697-726; Stegmann 1996; Zeitschrift Terratech).

Die Reinigungsverfahren können nach verschiedenen Gesichtspunkten unterschieden werden, entweder nach der Art der Verfahren oder nach dem Ort der Reinigung. Man unterscheidet zwischen mechanischen, chemischen, biologischen und thermischen Reinigungsverfahren. Gewisse Verfahren können den Boden vor Ort in seiner natürlichen Lagerung reinigen (in situ-Verfahren), für andere muss der Boden ausgehoben werden (ex situ-Verfahren). Ex situ-Verfahren können zum Teil vor Ort (on site) ausgeführt werden. Häufig muss der Boden aber in spezielle Reinigungsanlagen geführt werden (off site-Verfahren).

Flüchtige Stoffe können mittels **Bodenluftabsaugung** eliminiert werden, wasserlösliche durch Bodenwasserentnahme und anschließende Reinigung des Wassers. **Mechanische** Verfahren wie die Bodenwäsche und die Magnetabscheidung eignen sich nur für mineralische Bestandteile des Bodens, und auch dort nur für gröbere Fraktionen als Schluff und Ton. Bei **thermischen** Verfahren werden die Schadstoffe verbrannt (organische Schadstoffe) oder unter sehr hohen Temperaturen immobilisiert („Verglasung“). Nach der Erhitzung ist der Boden sterilisiert, das heisst, die Bodenlebewesen sind zerstört. Somit eignen sich diese Verfahren nicht für die durchwurzelbare Schicht. Bei **chemischen** Verfahren sollen mittels Zugabe von Reagenzien die Schadstoffe entweder immobilisiert oder deren Löslichkeit für eine Extraktion mit dem Bodenwasser erhöht werden. Häufig sind diese Methoden aber mit einer starken Erhöhung der Bodentemperatur und/oder pH-Wert-Verschiebung verbunden, so dass die Bodenfruchtbarkeit durch die Verfahren selbst beeinträchtigt wird. Unter den **biologischen** Verfahren ist der Einsatz von Mikroorganismen zum Abbau organischer Schadstoffe am weitesten entwickelt. Meistens müssen die Lebensbedingungen der Mikroorganismen durch Belüftung oder Nährstoffzugabe verbessert werden, um die Effizienz der Verfahren zu steigern. In gewissen Fällen werden spezialisierte Organismen eingepflanzt. Zur Zeit laufen Forschungsarbeiten über die Züchtung hyperakkumulierender Pflanzen zur Extraktion von Schwermetallen aus dem Boden (Neubauer et al. 1999). Eine Übersicht über die verschiedenen Verfahren und deren Nebenwirkungen gibt die Tab. 2.

Tab. 2 Verfahren zur Sanierung und Sicherung kontaminierter Böden sowie Nebenwirkungen (Blume 1992, S. 697f)

Verfahren	Nebenwirkungen
Sanierungsmaßnahmen Einsatz: <i>ex situ</i>	
mechanische Verfahren – Absiebung – magnetische Abtrennung – Dichte-Klassierung – Hochdruckwäsche	Veränderung des Gefüges Zerstörung des Gefüges, Veränderung der Lagerungsdichte u. der Bodenbiologie, Schluff- u. Tongehalt wird entfernt, pH-Wert-Verschiebung
chemische Verfahren – Wäsche in Reaktoren mit Lösemitteln/Tensiden	Zerstörung des Gefüges, Schluff- u. Tongehalt werden entfernt, pH-Wert-Verschiebung
thermische Verfahren – Pyrolyse (Verschmelzung ohne sauerstoffhaltige Atmosphäre) – Verbrennung (mit sauerstoffhaltiger Atmosphäre)	Sterilisierung und damit Einschränkung der Multifunktionalität des Bodens
Einsatz: <i>ex situ und in situ</i>	
chemische Verfahren – Immobilisierung durch Verfestigung, z.B. Vermörtelung, Vitrifikation, Verdichtung – Immobilisierung/pH-Wert-Verschiebung, z.B. durch Kalkung	Zeitliche Verlagerung der Problemlösung, Behinderung späterer Sanierung Gefahr der Überschuldosierung, Nitratmobilisierung, ständiger Wiederholungsbedarf

Sanierung und Sicherung kontaminierter Böden und Substrate

5.7

Fortsetzung Tab. 5.7/1

Verfahren	Nebenwirkungen
biologische Verfahren – mikrobieller Umbau/Abbau – Entzug durch Pflanzen	verstärkter Humusabbau, Erhöhung der Bodentemperatur und der Nährstoffgehalte, Gefährdung durch Abbauprodukte, Geruchsbelästigung bei ex situ Anwendung Thermische Nachbehandlung u. Deponiebedarf für Biomasse
Einsatz: <i>in situ</i> (stets on site)	
mechanische Verfahren – Bodenluftabsaugung/Zwangsentgasung – in situ-Strippen – Auslaugung durch Grundwasserentnahme/-reinfiltration – Verdünnung durch Verteilung/Vermischung, Pflügen – Hochdruckwäsche mit und ohne Hüllrohr – Spaltenbildung durch Hochdruckflüssigkeitsinjektion	Bodenschumpfungen/-setzungen durch Austrocknung Bodensetzungen, Trockenschäden an Pflanzen, Verockerung durch Reinfiltration Nur anwendbar wenn unkritische Restgehalte erreicht werden Zerstörung des Gefüges, Veränderung der Lagerungsdichte u. der Bodenbiologie, Erschütterungen durch Ein- u. Ausbau des Hüllrohres Veränderung des Gas- u. Wasserhaushaltes
chemische Verfahren – Elektrolyse – Auslaugung durch Grundwasserentnahme und Reinfiltration unter Zugabe von Reagentien – Oxidation durch Sauerstoffinjektion	Erhöhung der Temperatur u. der Durchlässigkeit des Bodens Bodensetzungen, Trockenschäden an Pflanzen, Verockerung des Bodens durch Reinfiltration Verockerung im wassergesättigten Boden
Sicherungsmaßnahmen (stets in situ und on site)	
Einsatz: <i>Sicherung gegen äußere Einflüsse</i>	
– Oberflächenabdichtung mit und ohne Bepflanzung – Sohlabdichtung – Vertikalabdichtung – Fassung und Ableitung/Umleitung von Wasser (Oberflächen- und/oder Grundwasser)	Häufig Gasfassung u. -behandlung erforderlich, Störung der mikrobiellen Aktivität Nur sinnvoll in Kombination mit Vertikalabdichtung, Dichtmaterial kann auslaugen, Dichtigkeit nicht prüfbar Ständige Wasserhaltung u. -aufbereitung erforderlich, ständige Betriebskosten Gefahr von Bodensetzungen, ständige Betriebskosten
Einsatz: <i>Sicherung gegen Schadstoffausbreitung</i>	
– Fassung und Ableitung von Schichtwasser/Sickerwasser – Fassung und Ableitung von Bodenluft/Deponiegas – Verfestigung – Immobilisierung durch chemische Behandlung	Wasseraufbereitung erforderlich, ständige Betriebskosten, Gefahr von Bodensetzungen Gasaufbereitung erforderlich, ständige Betriebskosten, Setzungen durch Austrocknung Behinderung späterer Sanierung Gefahr der Überschuldosierung, pH-Wertverschiebung, Störung der Bodenbiologie

4.4 *Umnutzung und Ersatzstandorte*

Die Intensivierung der Landnutzung führte, wie in Kap. 2.2 beschrieben, zur Zerschneidung und Ausräumung der Landschaft sowie zur grossräumigen Veränderung des Gebietswasserhaushalts. Dadurch wurde der Lebensraum vieler empfindlicher Pflanzen- und Tierarten bis auf letzte Inseln eingeschränkt, so dass sie heute vom Aussterben bedroht sind (sogenannte Arten der „Roten Liste“). Um dieser Entwicklung entgegen zu wirken, werden heute in vermehrtem Mass natürliche Lebensräume wiederhergestellt, das heisst, Flächen renaturiert. In den meisten Fällen handelt es sich um die Wiederherstellung von Extremstandorten (extrem trocken oder feucht). Derartige Flächen sind für die land- oder forstwirtschaftliche Nutzung allerdings nicht geeignet. Daraus ergeben sich häufig Konflikte mit den Eigentümern der betreffenden Flächen, zum Beispiel auf Flächen, die für den Kiesabbau genutzt wurden. Aus diesem Grund finden viele Renaturierungen erst nach einer Landumlegung, bei der die öffentliche Hand (Kantone oder Gemeinden) die betreffenden Flächen erwerben konnte, statt.

Offene Kiesgruben bilden **Ruderalstandorte**, die durch Rohboden (C-Horizont) und meist extreme Trockenheit gekennzeichnet sind. Es sind typische Standorte von Pionierökosystemen, und daher wertvolle Refugien für konkurrenzschwache Arten. Pionierökosysteme zeichnen sich jedoch durch eine hohe Dynamik aus, werden sie doch innert weniger Jahrzehnte von Sukzessionsgesellschaften abgelöst. Die absoluten Pionierökosysteme lassen sich nicht konservieren. Daher ist es sinnvoll, sogenannte „Wanderbiotope“ (sich räumlich verschiebende Biotope) einzurichten. Dies kann zum Beispiel durch eine gezielte Etappierung des Kiesabbaus erreicht werden. Zum Teil müssen ursprüngliche Ruderalbiotope auch in ihren Sukzessionsstadien unterhalten werden, insbesondere, wenn einige wenige konkurrenzstarke Arten Überhand gewinnen. Dabei geht es im wesentlichen um die Verhinderung der Verbuschung oder die Bekämpfung fremder Arten, die am Standort keine natürlichen Feinde haben (z.B. Grosse Goldrute = *Solidago altissima*).

Mit Kieswaschschlammern kann auch eine Stauschicht für stauwasservernässte Feuchtstandorte hergestellt werden. So können offene Kiesgruben zu sehr abwechslungsreichen naturnahen Standorten umgestaltet werden, weshalb sich gerade Umweltschutzorganisationen oft gegen eine Auffüllung und Rekultivierung solcher Gruben wehren. Allerdings sind auch die Feuchtbiotope in den Kiesgruben häufig in frühen Pionierstadien, die nur über Wanderbiotope längerfristig aufrecht erhalten werden können.

Heutzutage wird für schadstoffbelastete und sanierungsbedürftige Flächen vermehrt eine Umnutzung in Erwägung gezogen. Durch eine Umnutzung erspart man sich in der Regel den Aufwand einer Totalsanierung. Auf kontaminierten Flächen reicht häufig eine Sicherung der Altlast zur Vermeidung einer Gefährdung der Umwelt. Aktuell ist die Diskussion der Umnutzung von **Industriebrachen**, insbesondere, da die Freiheit in der Nutzungswahl von der Zonenordnung der jeweiligen Gemeinde abhängt. In diesen Fällen geht es im Wesentlichen um die Einsparung von Sanierungskosten. Eine Umnutzung zur **Gefahrenabwehr** bedeutet den Wechsel von einer empfindlichen Nutzung (z.B. Familiengarten) zu einer weniger empfindlichen Nutzungsart (z.B. Parkplatz).

Auch Extensivierungen in der **Landwirtschaft** können als Umnutzung bezeichnet werden. Die Wiedervernässung ehemaliger Drainagegebiete stellt beispielsweise den Wechsel von der intensiven landwirtschaftlichen zu einer naturnahen Nutzung dar.

Umnutzungen und Renaturierungen von Biotopen werden häufig im Sinne einer **räumlichen Kompensation** intensiv genutzter Flächen durchgeführt. Im Vordergrund steht dabei die Erhaltung der Fläche, auf der die Multifunktionalität des Bodens (weitgehend) gewährleistet ist (**Flächenschutz**). Nicht nur ökologische Ausgleichsflächen in der Landwirtschaft dienen der räumlichen Kompensation, sondern auch bei der Erweiterung von Infrastrukturanlagen

werden solche Gelegenheiten in vermehrtem Mass genutzt. Gerade im Zusammenhang mit dem Neu- oder Ausbau von Strassen werden oft Bäche ausgedolt und Feuchtbiotope renaturiert. In einzelnen Fällen werden alte Strassenabschnitte, die in ihrer Funktion durch Neubaustrecken ersetzt worden sind, abgebrochen und zu Ruderalstandorten renaturiert (z.B. A4 Hettlingen, Kanton Zürich).

Derartige räumliche Kompensationsmassnahmen sind sehr zu begrüessen, um das Gleichgewicht zwischen naturnahen und mehr oder weniger naturfremden Flächen innerhalb einer Region aufrecht zu erhalten. Allerdings ist die **Vernetzung** der naturnahen Flächen ebenso wichtig wie deren Ausmass. Räumliche Kompensationsmassnahmen sollen nicht nur einen quantitativen Flächenausgleich darstellen, sie sind auch sinnvoll anzuordnen, damit die ökologische Qualität einer Region ebenso gefördert wird. Praktische Instrumente zur Steuerung einer sinnvollen Arrondierung verschiedener Nutzungsformen und –intensitäten bilden die **Landschaftsentwicklungskonzepte** (LEK) und Vernetzungsprojekte nach Ökoqualitätsverordnung (ÖQV). Da die LEK im Gegensatz zu den Vernetzungsprojekten nicht auf eine gesetzliche Grundlage abstützen, haben sie heute jedoch erst empfehlenden Charakter, und ihre konkrete Umsetzung hängt stark von der Einstellung der jeweiligen Eigentümer oder Bewirtschafter der einzelnen Flächen ab. Extensivierungen finden, wie bereits weiter oben gesagt, häufig nur auf Grundstücken öffentlicher Körperschaften statt.

LITERATURVERZEICHNIS

- Anken, T. (1996). Onland-Pflüge schonen den Unterboden. *Agrarforschung* **3**: 5-7
- Baur, P. (2000). "Agrarstrukturwandel - das Ergebnis von Druck oder Sog?" *Agrarforschung* **7**(2): 76-81.
- Binswanger, H. C., C. P. Siegenthaler (1995). Ökologische und ökonomische Rahmenbedingungen der Kiesbewirtschaftung. *Eclogae geol. Helv.* **88/2**: 421-434.
- Blume, H.-P., (Hrsg.) (1992). Handbuch des Bodenschutzes. Bodenökologie und -belastung, Vorbeugende und abwehrende Schutzmassnahmen. ecomed, Landsberg/Lech. 794 S.
- Bundesamt für Statistik (BFS), (Hrsg.) (1986). Statistisches Jahrbuch der Schweiz 1986.
- Bundesamt für Statistik (BFS), (Hrsg.) (1996). Statistisches Jahrbuch der Schweiz 1996.
- BV, Bundesverfassung der Schweizerischen Eidgenossenschaft vom 18. April 1999 (SR 101)
- Deutsches Institut für Fernstudienforschung an der Universität Tübingen, (Hrsg.) (1997). Veränderung von Böden durch anthropogene Einflüsse. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag. 663 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.
- 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
- Ewers, H., K. Rennings (1996). Quantitative Ansätze einer rationalen umweltpolitischen Zielbestimmung. *ZfU* 4/1996. Frankfurt a. Main: 413-439
- Forrer, J. (1993). Stofftransfer aus einer Deponie in den darüberliegenden rekultivierten Böden und in die Biosphäre. 71 S.
- 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 häusliche Nutzung des Bodens in der Schweiz. Verlag der Fachvereine, Zürich. 192 S.
- Harris, J. A., P. Birch, J. Palmer (1996). Land Restoration and Reclamation: Principles and Practice. Singapore, Addison Wesley Longman Ltd. 230 S.
- Hartge, K. H., R. Horn (1991). Einführung in die Bodenphysik. Stuttgart, Ferdinand Enke Verlag. 303 S.
- Hauff, V. (1987). Unsere gemeinsame Zukunft (Our Common Future). Greven.
- Horn R., Domzal H., Slowinska-Jurkiewicz A., C. Van Ouwerkerk (1995). Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment, *Soil & Tillage Research* **35** (1995): 23-36

Kanton Zürich (1995). Kantonaler Richtplan. Kantonsratsbeschluss (KRB) vom 31. Jan.

- Klötzli, F. A. (1991). "Renaturierung in Mitteleuropa." *Garten und Landschaft* 101(2): 35-46.
- Kuntze, H., G. Roeschmann, G. Schwerdtfeger (1994). *Bodenkunde*, 5. Aufl. Stuttgart, Ulmer.
- Lal, R. (1994). *Sustainable Land Use Systems and Soil Resilience*. *Soil Resilience and Sustainable Land Use*. D. J. Greenland, I. Szabolcs (eds.). Wallingford, CAB International: 41-67.
- LWG, Bundesgesetz über die Landwirtschaft vom 29. April 1998 (SR 910.1)
- Mosimann, T., A. Maillard, A. Musy, J.-A. Neyroud, M. Rüttimann, P. Weisskopf (1991). *Erosionsbekämpfung in Ackerbaugebieten. Ein Leitfaden für die Bodenerhaltung*. Liebefeld-Bern. 187 S.
- Müller, U. (1992). *Bodenschutz und Kulturtechnischer Wasserbau (Teil Bodenmelioration)*, ehemalige Vorlesungsbeilage.
- Muth, W. (1991). *Wasserbau. Landwirtschaftlicher Wasserbau, Bodenkultur*. Düsseldorf, Werner. 276 S.
- Neubauer, U., A. Kayser, K. Wenger, G. Furrer, H.R. Felix, S. Gupta, R. Schulin (1999). "Sanierung schwermetallbelasteter Böden mit Pflanzen." *TeraTech* 6: 49-51.
- Nowotny, E. (1971). *Regionalökonomie - Eine Übersicht über Entwicklung, Probleme und Methoden*.
- Ritzema, H. P., (Hrsg.) (1994). *Drainage Principles and Applications*. ILRI Publication. Wageningen, International Institute for Land Reclamation and Improvement / ILRI. 1125 S.
- Rosenkranz, D., G. Bachmann, G. Einsele, H.-M. Harress, (Hrsg.) (1988). *Bodenschutz. Engänzbare Handbuch der Massnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser*. Berlin, Erich Schmidt Verlag.
- RPG, Bundesgesetz über die Raumplanung vom 22. Juni 1979 (SR 814.12)
- RPV, Verordnung vom 2. Okt. 1989 über die Raumplanung (SR 700.1)
- Ruh, H. (1997). Dem Begriff alle Zähne gezogen. *energie & Umwelt* 1/97: 14-15
- Salm Ch. (1996). *Bodenschutz beim Bauen (Handbuch)*. Bern. 73 S.
- Sattelmacher, B., A. Stoy (1992). *Düngung von Böden. Handbuch des Bodenschutzes. Bodenökologie und -belastung, Vorbeugende und abwehrende Schutzmassnahmen*. B. H.-P. Landsberg/Lech, ecom(Hrsg.) 2. Aufl.: 235-262.
- Scheffer, F., P. Schachtschabel (1998). *Lehrbuch der Bodenkunde*. Stuttgart, Ferdinand Enke. 494 S.
- Schwertmann, U., W. Vogl, M. Kainz (1987). *Bodenerosion durch Wasser: Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmassnahmen*. Stuttgart, Ulmer Verlag. 64 S.
- Semmel H., R. Horn (1994). *Spannungen und Spannungsverteilungen in Ackerböden aufgrund von Befahrungen - Überlegungen zur Druckfortpflanzung und der mechanischen Belastbarkeit von Böden*. *Landbauforschung Völkenrode* 147, Mitt. d. Bundesforsch.anst. f. Landwirtsch. Braunschweig-Völkenrode (FAL):41-76
- Sojka, R. E., D. R. Upchurch (1999). "Reservations Regarding the Soil Quality Concept." *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1039-1054.
- Sommer C., K.-H. Hartge. (1991). *Verdichtung und Befahrbarkeit von Ackerböden - Probleme und Auswege*. Ber. über Landwirtsch., Zeitschr. f. Agrarpolitik u. Landwirtsch. 204: 104-117
- Stegmann, R., (Hrsg.) (1996). *Neue Techniken der Bodenreinigung*. Hamburger Berichte. Bonn, Economica Verlag. 514 S.
- Tobias, S., P. Weisskopf, D. Schaub, P. Marty (1999a). "Chancen bodenschonender Bewirtschaftungstechniken in der Schweiz." *Agrarforschung* 5: 173-176.
- Tobias, S., R. Schulin, D. Schaub, P. Weisskopf, B. Buchter, S. Zimmermann, F. Borer, U. Vökt (1999b). *Physikalischer Bodenschutz - Konzept zur Umsetzung der rechtlichen Vorgaben im Umweltschutzgesetz (USG) und in der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBö)*. Dietikon, Juris Druck und Verlag. 32 S. und Anhang
- Tobias, S. (2003). *Einführung in die Ingenieurbiologie*. Skriptum. Zürich.

Umweltministerium Baden-Württemberg, 1991: Erhaltung fruchtbaren und kulturfähigen Bodens bei Flächeninanspruchnahmen. Luft-Boden-Abfall, Heft 10
USG, Bundesgesetz über den Umweltschutz vom 7. Oktober 1983 (SR 814.01)
VBBo, Verordnung über Belastungen des Bodens vom 1. Juli 1998 (SR 814.12)
WaG, Bundesgesetz über den Wald vom 4. Okt. 1991 (SR 921.0)
Wischmeier, W. H., D. D. Smith (1978). Predicting rainfall erosion losses – A guide to conservation planning. Washington D.C. 58 S.