Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation / Bundesamt für Strassen

Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie e la communication / Office fédéral des routes

Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni / Ufficio federale delle strade

Umgang mit Boden im Tiefbau

Manipulation des sols en génie civil

Terre AG, Egliswil

Christoph Salm, Ing. Agr. HTL
Stephan Häusler, dipl. Geologe

Forschungsauftrag 28/94 und 10/98 auf Antrag der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS)

425

Januar 1999

425

Bundesamt für Strassen • Office fédérale des routes

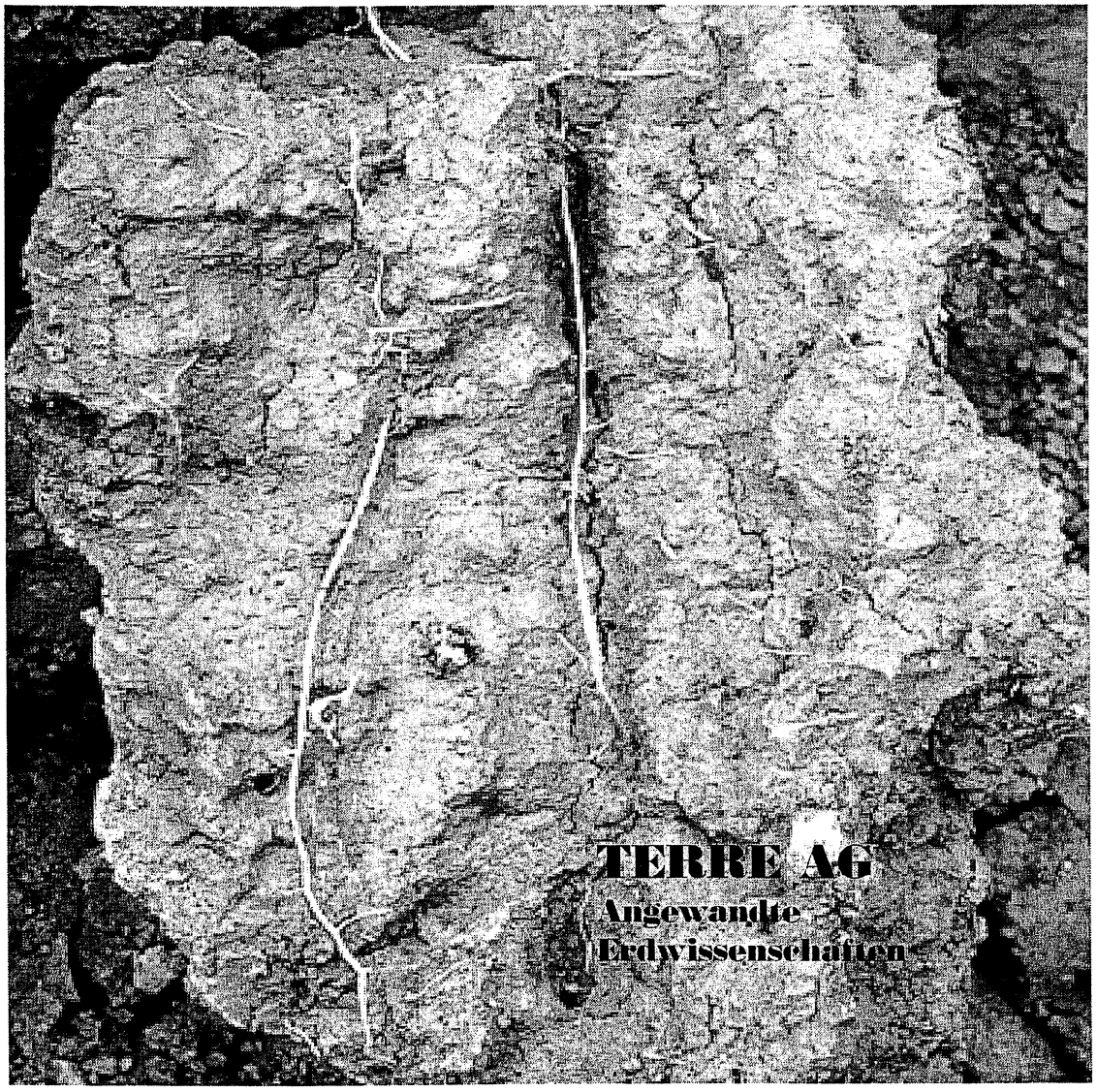
Ufficio federale delle strade • Uffizi federal da las vias

Vereinigung
Schweizerischer
Strassenfachleute

FORSCHUNGSAUFTRAG 28/94 und 10/98

Umgang mit Boden im Tiefbau
Manipulation du sol en génie civil

Januar 1999



Inhalt		Seite

1	**Einführung**	**4**
1.1	Ziel und Zweck	4
1.2	Anwendungsbereich	4
2	**Begriffe**	**6**
2.1	Definition Boden	6
2.2	Bodenfruchtbarkeit	6
2.3	Bodenaufbau	7
2.4	Bodentyp	7
2.5	Bodenart	8
3	**Ausgangszustand**	**9**
3.1	Kartierungsmethoden	9
3.2	Bodenanalysen	13
3.3	Physikalische Messungen	16
3.4	Interpretation für den Bau	18
4	**Der Eingriff in den Boden**	**19**
4.1	Belassen und Befahren des Oberbodens	19
4.2	Eingriffe in den Boden klein halten	20
4.3	Boden abtragen	21
4.4	Praktischer Umgang mit belastetem Boden	25
5	**Zwischenlager**	**27**
5.1	Unter- und Oberboden	27
5.2	Anlage, Schütthöhen	28
5.3	Begrünung, Unterhalt, Kontrolle	29
6	**Wiederherstellung**	**30**
6.1	Rohplanie	30
6.2	Entwässerung	31
6.3	Auftrag von Unterboden	32
6.4	Zwischenbegrünung	34
6.5	Auftrag von Oberboden	35
6.6	Endbegrünung	36
6.7	Folgebewirtschaftung	36
6.8	Schlussabnahme (Spatenprobe)	37
6.9	Rückgabe an die normale Bewirtschaftung	38
7	**Bodenschutzmassnahmen**	**41**
7.1	Verdichtungsempfindlichkeit aufgrund des Bodentyps	41
7.2	Befahrbarkeit von Boden (Saugspannungsmessung)	42
7.3	Einfluss des Gewichtes und der Flächenpressung	45
7.4	Druckverteilung/Pisten	46
8	**Richtlinien und Methoden**	**53**
8.1	Klassierung der Böden nach Empfindlichkeit	53
8.2	Probenahme, Aufbereitung, Untersuchungen	59
8.3	Weiterverwendung des Bodenaushubes	60
8.4	Saugspannungsmessung und Interpretation	63
8.5	Maschinenlisten	65
9	**Bodenkundliche Baubegleitung**	**66**
9.1	Anforderungsprofil	67
9.2	Pflichtenheft	68
9.3	Orientierung der Bauleute	69
9.4	Vollzug des Bodenschutzes auf der Baustelle	70
9.5	Organisatorische Einbindung und Befugnisse	71

1 Einführung

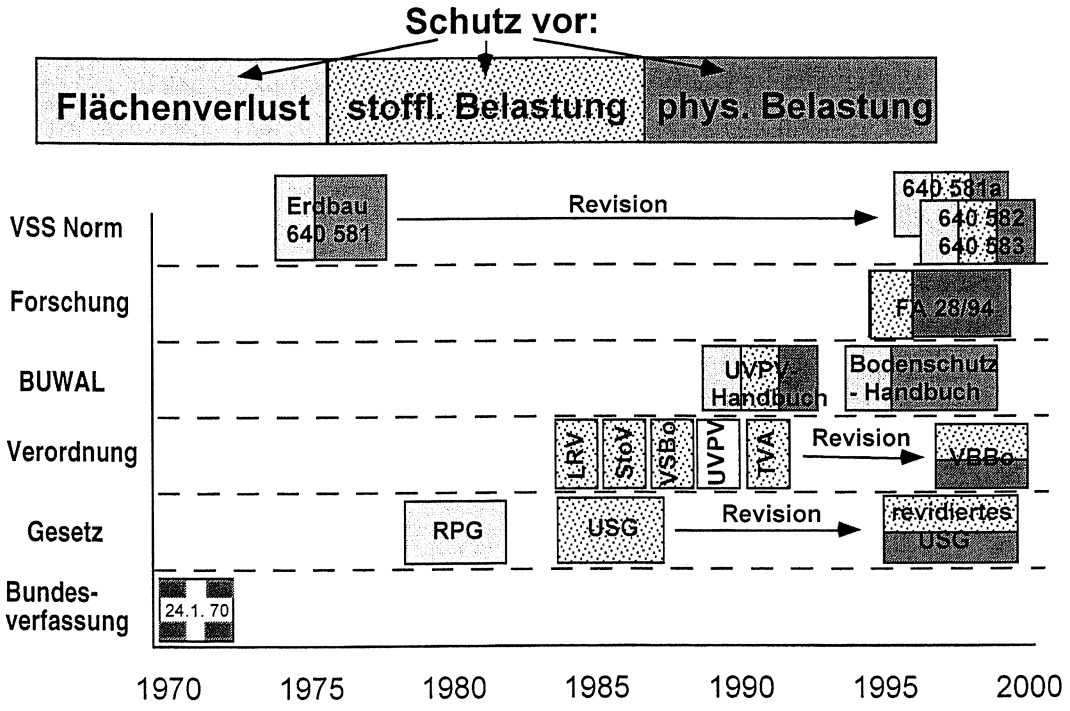
1.1 Ziel und Zweck

Der vorliegende Forschungsbericht Boden (FB) soll dazu beitragen, das Verständnis für die Zusammenhänge im praktischen Bodenschutz zu erleichtern. Der Boden muss in Zukunft besser vor unnötigen Eingriffen und Belastungen geschützt, ein pfleglicher Umgang mit ihm erreicht werden. Der Schutz des Bodens und seiner natürlichen Fruchtbarkeit ist ebenso wichtig wie der Schutz von Luft und Wasser. Der FB bietet Grundlagen für die Neubearbeitung von entsprechenden Normen.

1.2 Anwendungsbereich

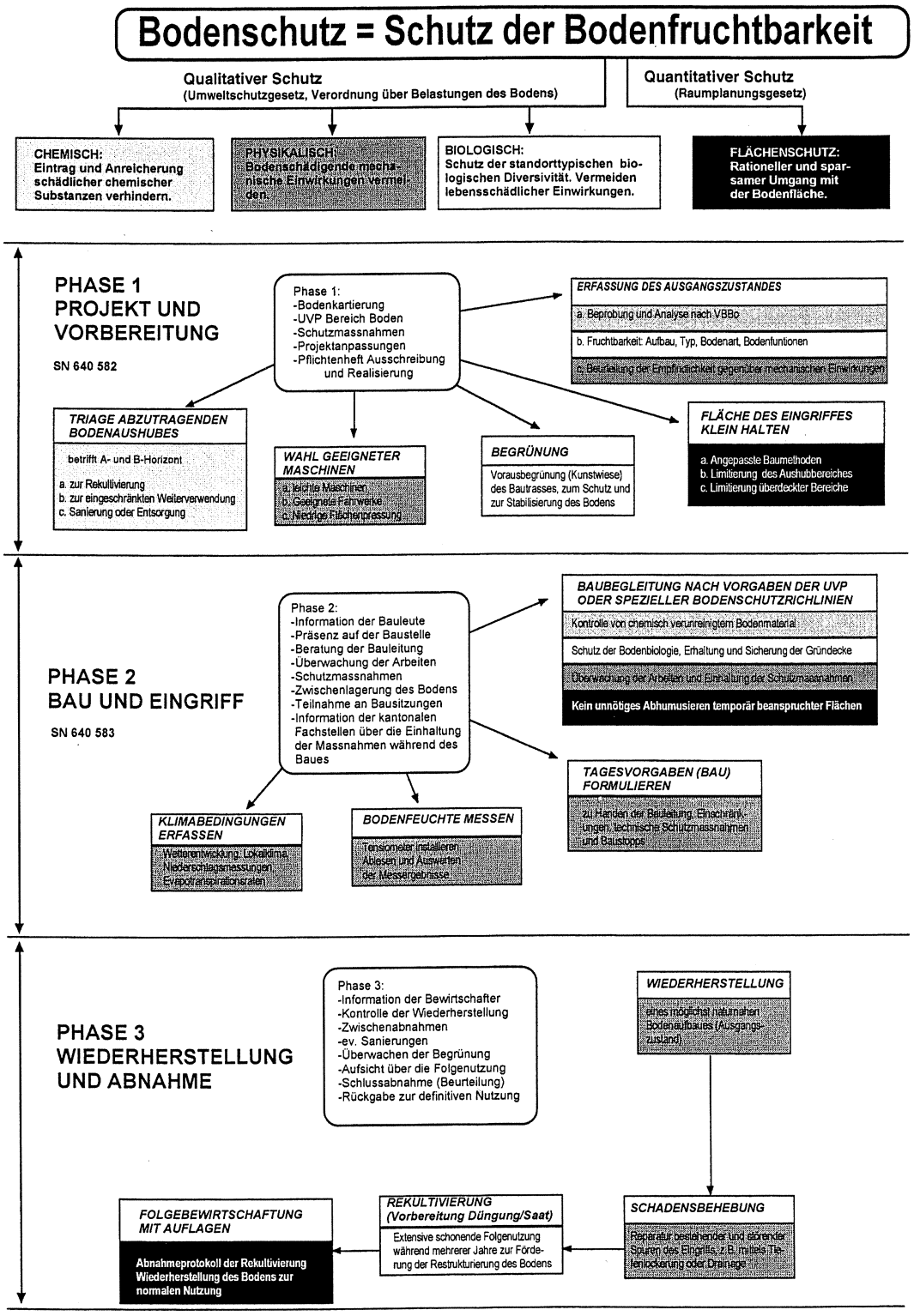
Die gesetzliche Grundlagen zum Schutze des Bodens sind aber auf mehreren Ebenen angelegt.

- Der quantitative Schutz des Bodens, die Erhaltung der Fläche, ist Leitgedanke des RPG (Raumplanungsgesetz).
- Der qualitative Schutz beschränkte sich bisher auf die Schadstoffbelastung nach VSBo (Verordnung über Schadstoffe im Boden)
- Heute ist er, deutlich umfassender, in der Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) geregelt.



Mit dieser ab 1.7.97 gültigen Änderung des USG wird der Schutz des Bodens vor physikalischen Belastungen und Einwirkungen auf die Bodenbiologie erweitert und der Schutz der Bodenfruchtbarkeit besser abgestützt. Dieser FB soll die Umsetzung der Gesetzesbestimmungen aufzeigen. So müssen beispielsweise die Probleme mit chemisch belasteten Böden vor der Bauphase gelöst, die Aspekt des Bodenschutzes beim Bau bereits in der Planungsphase geregelt werden.

Das nachstehende Schema zeigt den Vollzug des Bodenschutzes, von der Projektphase über den Bau bis zur Schlussabnahme eines Objekts. Die gerundeten Felder fassen die Aufgaben der bodenkundlichen Baubegleitung innerhalb der Projektphasen zusammen.

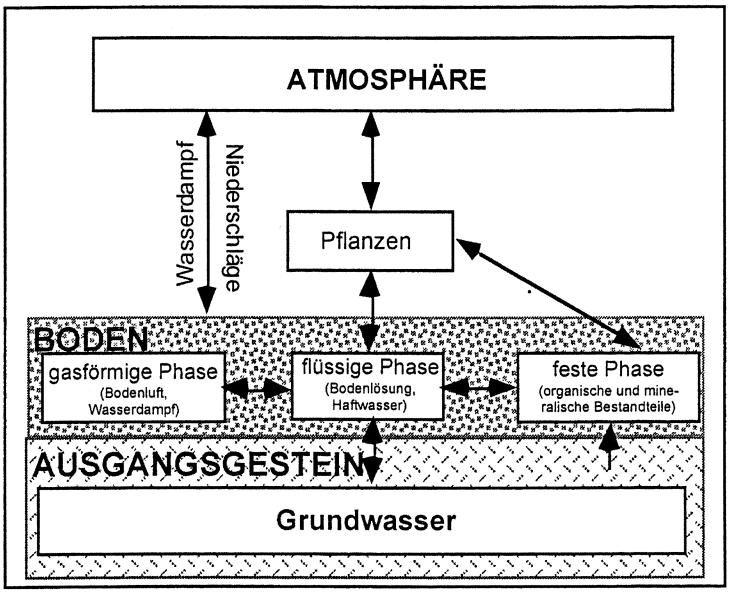


2 Begriffe

2.1 Definition Boden

Der Boden ist Teil der obersten Erdkruste. Er ist nach unten durch festes oder lockeres Gestein, nach oben durch eine Pflanzendecke oder den Luftraum begrenzt, während er zur Seite in benachbarte Böden übergeht.
Der Boden ist ein integrales Bestandteil terrestrischer Ökosysteme. Hierbei ist der zentrale Begriff des Ökosystems noch keineswegs klar gefasst. Boden kann auch aufgrund seiner Funktion definiert werden:

- Der Naturkörper Boden ist die Schnittstelle zwischen dem festen (Lithosphäre) und dem gasförmigen Teil der Erde (Atmosphäre).
- Der Boden speichert das Niederschlagswasser, reinigt dieses und ist damit zu einem bedeutenden Teil auch an der Neubildung sauberen Trinkwassers beteiligt.
- Der Boden dient unzähligen Organismen als Lebensraum. Die wenigsten davon sind uns bekannt. Der weitaus grösste Teil, sowohl Arten- als auch zahlenmässig, sind von Auge nicht sichtbar.



2.2 Bodenfruchtbarkeit

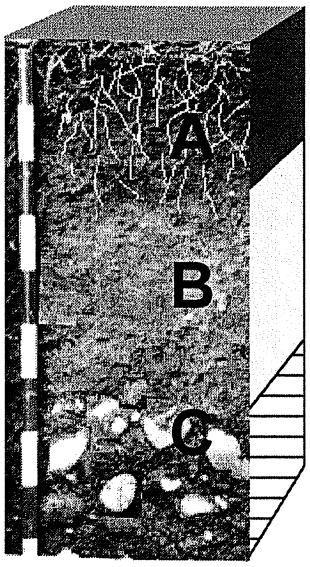
Jeder Boden hat als lebendiges System und als Pflanzenstandort seine ihm eigene, natürliche Fruchtbarkeit. Der Boden ist fruchtbar, wenn er:

- eine artenreiche und biologisch aktive Tier- und Pflanzenwelt, eine für seinen Standort typische Struktur und eine ungestörte Abbaufähigkeit besitzt,
- das ungestörte Wachstum und die Entwicklung natürlicher und vom Menschen beeinflusster Pflanzen und Pflanzengesellschaften ermöglicht und ihre charakteristischen Eigenschaften nicht beeinträchtigt,
- gewährleistet, dass pflanzliche Erzeugnisse eine gute Qualität aufweisen und für Menschen und Tiere gesundheitlich verträglich sind,
- gewährleistet, dass Tiere und Menschen durch seine Aufnahme bei üblicher Nutzung nicht gefährdet werden.

Bodenfruchtbarkeit ist von vielen Faktoren abhängig. Die natürliche Bodenfruchtbarkeit wird bei jedem tiefbaulichen Eingriff, zumindest für die Fläche, auf welcher der Boden aus seiner natürlichen Lage ausgehoben wird, zerstört. Nach der Wiederherstellung von Böden bilden die fehlende Struktur, das unterbrochene Porensystem sowie ungleichmässige Lagerungsdichte die häufigsten Mängel. Mit einer optimalen Rekultivierungsmethode und einer guten Folgebewirtschaftung können diese Mängel behoben und die Produktivität wieder hergestellt sein. Der stabile Zustand (Klimax), welcher in Jahrhunderten, bzw. Jahrtausenden mit der Bodenentstehung für einen Standort aufgebaut wurde, kann mit der besten Wiederherstellung nicht herbeigeführt werden.

2.3 Bodenaufbau

Im Zusammenhang mit dem tiefbaulichen Eingriff und der nachträglichen Wiederherstellung eines Bodens muss der Bodenaufbau in seinen wichtigsten Teilen bekannt sein. Wegen der Vielfalt der möglichen Bodentypen und der darin enthaltenen Bodenarten wird der Aufbau in diesem Rahmen nur schematisch und generell beschrieben. Ein gut entwickelter Boden besteht, vereinfacht dargestellt, aus drei Schichten:



- A = Oberboden: Dunkel gefärbt aufgrund der organischen Substanz (Humus), meist krümelig locker in der Struktur, sehr fein durchwurzelt.
- B = Unterboden: Heller gefärbt, weniger durchwurzelt. Bildet die verwitterte, wertvolle Übergangsschicht zum unverwitterten Ausgangsmaterial. Meist deutlich erkennbare Struktur.
- C = Unverwittertes Ausgangsmaterial: Fels, Kies, Sand, Lehm, Ton oder ein Gemisch unterschiedlicher Zusammensetzung, je nach Herkunft. Dieses Material ist nicht strukturiert und biologisch nicht erschlossen.

Entwicklungsbedingt müssen nicht alle Böden einen verwitterten B-Horizont aufweisen. Bei Rohböden beispielsweise liegt der bewachsene Oberboden direkt auf dem unverwitterten Ausgangsmaterial.

2.4 Bodentyp

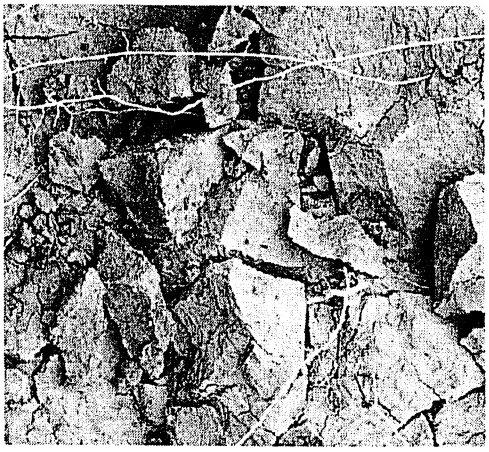
Der Bodentyp bezieht sich auf die Entstehungsgeschichte des Bodens. Durch die Einwirkung von Wasser und Frost werden Steine gesprengt, erste Pflanzen wachsen und sterben ab. Bodenorganismen zersetzen abgestorbene Pflanzenteile. Durch die Ausscheidungen von Wurzeln werden die mineralischen Teile des Bodens immer weiter aufgeschlossen. Regenwürmer nehmen grosse Mengen feinster Bodenteile und abgestorbene Pflanzenreste auf und scheiden sie verdaut, als Kothäufchen, an der Bodenoberfläche wieder aus. Je günstiger die klimatischen Voraussetzungen sind, umso besser kann sich ein Boden entwickeln. In den wärmeren Lagen des Schweizer Mittellandes sind deshalb tiefgründig entwickelte Böden zu finden. Sie weisen meistens einen mit der Abbildung unter 2.3 dargestellten Aufbau mit drei Haupthorizonten auf. Unter weniger günstigen Verhältnissen, z.B. in sehr trockenen Gebieten, in rauhen, kalten Lagen und bei dauerndem Wassereinfluss erfolgt die Bodenentwicklung langsamer. Fehlendes Wasser und tiefe Temperaturen hemmen die biologische Tätigkeit ebenso wie fehlender Sauerstoff im Boden, z.B. in ständig wassergetränkten oder überfluteten Böden. In Kuppen- und Hanglagen wird der Boden abgetragen, er ist dort deshalb oft nur flachgründig. In Mulden und Tälern wird der erodierte Boden angesammelt. Vom Wind angewehter Boden (Löss) kann mehrere Meter mächtig sein.
In den gemässigten klimatischen Verhältnissen der Schweiz dominiert der Wasserhaushalt die Bodenbildung. Wir unterscheiden deshalb zwischen:

- **Durchlässigen Böden** mit einer Wasserdurchlässigkeit > 100 mm/Tag. Dazu gehören alle Rohböden auf durchlässiger Unterlage (*Regosole)* sowie *Braunerde, Parabraunerde und Podsol.*

- **Staunasse Böden** (*Pseudogleye*) sind Böden mit gehemmter Durchlässigkeit bis vollständig undurchlässige Böden. Meist sind sie sehr dicht gelagert und weisen klare Spuren von Wechselnässe auf (Rostflecken, Mangankonkretionen).
- **Grundnasse Böden** (*Gleye*) werden auch als fremdnasse oder hydromorphe Böden bezeichnet, weil sie periodisch oder ständig unter Fremdwassereinfluss stehen (Grundnässe, Hangnässe).
- **Überflutete Böden** werden *Aueböden* genannt. In der Schweiz sind die Aueböden infolge der Gewässerkorrekturen und Flussverbauungen (Hochwasserschutz, Stromproduktion, Landgewinnung) fast vollständig verschwunden.
- **Organische Nassböden** oder *Moorböden* bestehen aus nicht abgebauten Pflanzenresten und sind oft mehrere Meter mächtig. Moorböden sind in der Schweiz durch Entwässerung und Torfabbau grösstenteils zerstört worden oder im Zerfall begriffen.

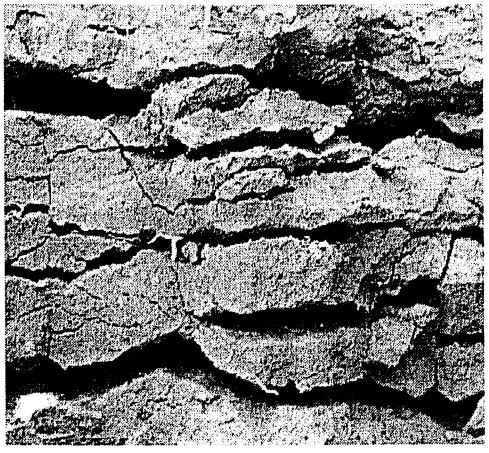
2.5 Bodenart

Die Bodenart wird weitgehend durch das Ausgangsmaterial geprägt und entsprechend der Zusammensetzung der Feinerde (ø < 2 mm) benannt. Die grösseren Bestandteile (≥ ø 2 mm) wie Kies und Steine, werden bodenkundlich als Skelett bezeichnet. Die Feinerde wird bezüglich ihrer Korngrösse in drei Hauptfraktionen unterteilt, jede dieser Fraktionen verleiht einem Boden seine typischen Eigenschaften.



(T) **Ton,** ist die feinste Fraktion mit einem Korndurchmesser < 0.002 mm. Ton vermag zu schwinden und zu quellen und weist dank seiner grossen Oberfläche eine hohe chemische Austauschfähigkeit auf. Böden mit mehr als 30 % Ton sind sehr bindig und schwer bearbeitbar. Sie sind in feuchtem Zustand plastisch verformbar und verdichtungsempfindlich. Tonige Böden entstehen vor allem aus der Verwitterung von Kalk und Glimmer. Sie weisen im bearbeiteten und im verwitterten Horizont eine typische prismatische Struktur auf.

(U) **Schluff,** hat einen Korndurchmesser von 0.002 bis 0.05 mm. Schluffige Böden sind vor allem im Löss zu finden (= aeolische oder windverfrachtete Böden). Hoher Schluffgehalt macht den Boden instabil und damit auch erodierbar. Schluffige Böden neigen deshalb auch zu Verschlämmung und verkrusten. Der bearbeitete Oberboden ist meist feinkörnig und nur schwach strukturiert. Die Krümel sind wenig stabil. Schluffböden sind leichter bearbeitbar als Tonböden, sie sind aber ebenso empfindlich und weisen ein sehr schlechtes Regenerationsvermögen auf. In der Grobstruktur dominieren die horizontalen Risse.



(S) **Sand,** hat einen Korndurchmesser von 0.05 bis 2 mm. Reine Sandböden weisen eine lose Einzelkornstruktur auf. Sie sind sehr leicht zu bearbeiten, trocknen dank ihrer hohen Durchlässigkeit aber auch rasch aus. Da sie keine chemischen Austauscheigenschaften aufweisen, sind sie nicht imstande, Nährstoffe zu binden. Letztere werden deshalb grossenteils ausgeschwemmt.
Sandböden entstehen vor allem in Flussniederungen. Die weiten Ebenen werden oft intensiv genutzt (Frühgemüseanbau). Im Sommer ist für Intensivkulturen eine Bewässerung nötig. Neben dem hohen Wasserverbrauch resultiert aus der intensiven Nutzung solcher Böden auch eine erhebliche Grundwasserbelastung (Ausschwemmung von Nitrat und Pestiziden)

Lehm: Reine Sand-, Schluff- oder Tonböden kommen selten vor. Meist sind die drei Fraktionen gemischt vertreten. Eine solche Mischung wird dann als Lehm bezeichnet, wenn sie entweder < 50% Ton, < 80 % Sand oder < 80% Schluff enthält. Je nach Zusammensetzung kann Lehm die eine oder andere Grobstruktur entwickeln. In tonarmem, schluffreichem, sandigem Löss beispielsweise, kann aus der losen Kleinstruktur ein Kohärent- oder Massivgefüge entstehen. Solche Gefüge werden, falls sie nicht zu hart d.h. zu dicht gelagert sind, von Wurzeln und Bodentierchen durchdrungen und durchgraben. Damit entsteht mit der Zeit eine poröse Struktur im Unterboden. Sie wird beim Befahren des feuchten Bodens mit schweren Maschinen zerstört.

3 Ausgangszustand

3.1 Kartierungsmethoden

Art und Umfang eines Vorhabens bestimmen die Methoden zur Aufnahme des Ausgangszustandes. In der Tabelle sind die verschiedenen Verfahren umschrieben und ihre Einsatzmöglichkeiten erläutert.

Übersicht der Kartierverfahren, der Probenahme und Analyse

Vorhaben / *Massnahme*	*Klassische Kartierung*	*Strecken-kartierung*	*Spatenprobe (Vergleich)*	*Boden-analysen*	*Physikalische Messungen*
Grossbaustellen (Strasse/Bahn)	a			a	
Abbaustätten (Kies, Fels, Ton)	a			a	
Deponien und Auffüllungen	a			a	
Erdverlegte Leitungen		a			a
Wiederherstellung			e	e	a
Grosse Geländeanpassungen			e		
Feststellung von Altschäden			e		e
Bewirtschaftungsschäden					e
Zufuhr von Boden/Substraten				a	
Abfuhr von Bodenmaterial				a	

a — Die Aufnahme des Ausgangszustandes bzw. eines Ist-Zustandes ist in der Regel bereits im Rahmen eines UVP/PGV gefordert oder kann zum Beispiel für die Beweissicherung verlangt werden.
Bei Neubauvorhaben im Strassenbau wird die Bodenkartierung im Rahmen des Landumlegungsverfahrens gemacht.

e — Diese Massnahmen sind als Ergänzung, als gesamthaft bessere Bewertung, als gängige Methode zur Beweissicherung oder als Vergleichsmöglichkeit empfehlenswert.

Die klassische Kartierung

Die klassische Kartierung umfasst die detaillierte Erkundung der Böden eines definierten Gebietes (Perimeter) und die flächenhafte Darstellung der Böden und ihrer Verteilung auf Bodenkarten. Diese Kartierung wird im Rahmen der Umwelt-Abklärung bei UVP-pflichtigen Vorhaben, sowie bei langfristigen Eingriffen wie Deponien, Materialabbau, Grossbaustellen und daraus bedingten Landumlegungsverfahren, durchgeführt.

Vorgehensweise

Der Boden wird gemäss Methode Reckenholz, „Klassifikation der Böden der Schweiz" (BGS und FAP 1992) kartiert. Die Ergebnisse werden, in einem dem Projekt angepassten Maßstab, in der Regel 1:5000, kartographisch dargestellt. Diese Aufnahme ist die aufwendigste Methode

und kann nur von Spezialisten durchgeführt werden, welche über entsprechende Ausbildung und Erfahrung verfügen. Vier Arbeitsschritte werden durchgeführt:

- *Festlegung der morphologischen Einheiten,* meist als Luftbildauswertung, ev. unter Beizug geologischer Karten.
- *Beschreibung der morphologischen Einheiten* anhand ausgehobener Bodenprofile (Baggerschlitze).
- *Flächige Erfassung der jeweiligen Einheit*: Arbeit mit dem Handbohrstock, je nach Verhältnissen und Maßstab zwischen 10 und 20 Bohrungen pro ha. Erstellen von Feldprotokollen.
- *Übertragung der Resultate* Erstellen der Bodenkarte.

Der Aufwand dieser Erfassungsarbeit gestaltet sich je nach Gebiet, Verteilung und Grösse der morphologischen Einheiten sehr unterschiedlich. Für die landwirtschaftliche Bewertung müssen zusätzliche Parameter wie Klimazone und Hangneigung berücksichtigt werden.

Die Streckenkartierung

Diese Methode wurde vor allem für den Bau von erdverlegten Leitungen entwickelt. (Richtlinien zum Schutze des Bodens beim Bau unterirdisch verlegter Rohrleitungen" BEW 1997).
Diese Kategorie Bauten hat eine relativ kurze Baudauer. Die Frist zwischen dem Entfernen (Abhumusieren) und dem Wiederanlegen des Oberbodens (Humusieren) beträgt in der Regel weniger als ein Jahr. Streckenkartierungen erfolgen im Rahmen der Umweltabklärungen bei UVP-pflichtigen Vorhaben und bei grösseren Leitungsprojekten gemäss Pflichtenheft sowie den Richtlinien der Umweltschutz-Fachstelle.

Vorgehensweise

Für linienförmige Bauten wird der Baustreifen kartiert und die Ergebnisse werden auf den Streckenplänen eingetragen. Die Kartierung erfolgt in der bereits zitierten Methode Reckenholz, ist aber den speziellen Bedürfnissen angepasst und beschrieben. Sie ist auf den Schutz des Bodens beim Bau und bei der Wiederherrichtung der beanspruchten Flächen ausgerichtet. Es gilt folgende Fragen zu beantworten:

- *Topographie*: Ist ein Niveauausgleich für die Verlegearbeit nötig, oder sind sogar spezielle Bauverfahren angesagt?
- *Bodenaufbau*: Wie gross ist die Mächtigkeit des Oberbodens (abhumusieren)? Ist der Boden tiefgründig oder flachgründig (mechanische Empfindlichkeit)? Steht ein fester Horizont (Fels, Kies) im Tiefenbereich der Handbohrung an?
- *Wasserhaushalt*: Trocknet ein Boden rasch ab, ist er staunass oder grundwasserbeeinflusst? Sind Schutzmassnahmen in jedem Fall zu berücksichtigen, oder bloss vorzusehen?
- *Bodenart:* Welche Empfindlichkeit weist der Boden aufgrund seiner Kornverteilung und seines Skelettgehaltes gegenüber mechanischen Einwirkungen auf?
- *Steingehalt*: Ist ein natürlicher, hoher (die Bearbeitung bzw. Nutzung) störender Steinanteil im abzutragenden Oberboden vorhanden oder aus der darunter angrenzenden Schicht zu erwarten?

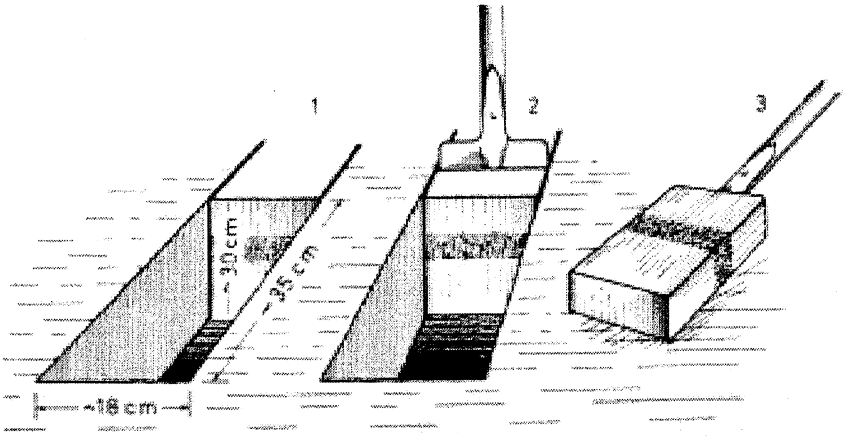
In den Streckenkarten werden Abschnitte vergleichbarer Beschaffenheit (Bodeneinheiten) zusammengefasst und beschrieben. Je ein Standardprofil zur jeweiligen Bodeneinheit in Form einer Profilskizze oder -abbildung ermöglicht eine gezielte Bauausschreibung. Der Unternehmer kann sich über die Bodenverhältnisse bzw. über die Empfindlichkeit der Böden ins Bild setzen. Der Kartierer sollte über tiefbauliche Kenntnisse und Einsicht in die geplanten Bauabläufe verfügen, damit er realisierbare Massnahmen zum Schutze des Bodens vorschlagen kann.

Die Spatenprobe

Die Spatenprobe dient der aktuellen Zustandserfassung. Sie kann für alle Untersuchungen eingesetzt werden, bei denen der Oberboden gestört wird.

Vorgehensweise:

Mit einem Langspaten (Drainagespaten) wird aus einem vorgegrabenen Loch ein Erdbalken (Spatenbreite, ca. 10-15cm dick) auf möglichst tief am Stück ausgebrochen. Damit der Boden am Stück bleibt, auch die Seiten des Erdbalkens vor dem Ausbrechen vorstechen. Beim Ausheben ist darauf zu achten, dass der Boden nicht verquetscht wird.



Zum Ausheben wird das abgetrennte Bodenstück durch einen Helfer an den Spaten gedrückt.

Die Abbildung zeigt die drei Arbeitsschritte:Vorstechen (1) Abtrennen (2) und Ausheben (3) der Spatenrobe.

Am ausgehobenen Erdbalken werden, der natürlichen Schichtung des Bodens folgend, in 5 cm-Abständen folgende Parameter im Feld untersucht:

- *Genereller Bodenzustand:* Zuerst wird der Gesamteindruck festgehalten. Möglicherweise ist schon beim Ausgraben einiges aufgefallen, zum Beispiel eine starke Verdichtung oder Vernässung des Bodens. Hauptfrage: Wie fühlt sich der Boden an? Sind Unterschiede in der Bodenbeschaffenheit von oben nach unten im Profil auszumachen?
- *Geruch:* Schlechter Geruch weist auf Luftmangel, verursacht durch Bodenverdichtungen, oder dauernde Vernässungen hin. In krassen Fällen schlägt einem schon beim Ausgraben ein Klärschlammgeruch (Methangas aus Faulprozessen) entgegen.
- *Farbe:* Die Bodenfarbe wird im Oberboden durch den Humusgehalt, im mineralischen Unterboden vor allem durch das Eisen bestimmt. Gleichmässige, warme Farben weisen auf gute Durchlüftung, Flecken (Rost) auf Wassereinfluss und graue, fahle Färbung auf Luftmangel hin (das Eisen ist reduziert). Mangankonkretionen als braunschwarze Punkte verschmieren entlang des Spatenstiches und mit Fingernagelstrich.
- *Struktur:* Wie ist der Zusammenhalt des Bodens? Welche Form haben die kleinsten Teile beim sorgfältigen Auseinanderbrechen? Ist die Struktur für diesen Boden typisch, oder zeigt sie eine mechanische Schädigung an?
- *Biologie:* Die biologische Erschliessung des Bodens geschieht durch Wurzeln der Pflanzen einerseits, und durch eine grosse Anzahl von Bodenlebewesen andererseits. In der Spatenprobe wird nur ein kleiner (sichtbarer) Teil davon festgestellt. Gelbliche Wurzelspitzen weisen auf Störungen hin. Beschränkt sich das Wurzelwachstum auf die Zwischenräume, oder durchdringen die Wurzeln auch Bodenaggregate?

Werden alle Bodenmerkmale wie Bodenfarbe, Geruch, Struktur, Dichte, Brechbarkeit, Durchwurzelung, Wurmtätigkeit u.a. systematisch, Schicht für Schicht untersucht, so ergibt sich ein breiter Anwendungsbereich :

- *Vergleich zweier Böden*, z.B. vom Eingriff betroffener oder nicht betroffener Abschnitte.
- *Beurteilung der Rekultivierung* sowie der Wirksamkeit der zum Schutz des Bodens getroffenen Massnahmen (Vergleich).
- *Beurteilung der Entwicklung* (Restrukturierung) eines Bodens in zeitlichen Abständen nach erfolgten Eingriff.
- *Auffinden von Ursachen* für Störungen im Pflanzenwachstum oder ungleichmässiger Entwicklung von Kulturen.
- *Feststellen von Bewirtschaftungs- und Bearbeitungsfehlern,* Eingrenzen oberflächennaher Verdichtungen.
- *Feststellen verdichtungsbedingter Störungen* (Verfärbung, Geruch, Stauwasser etc.) im Wurzelbereich.

3.2 Bodenanalysen

Bodenanalysen aus lose entnommenen Erdproben (Mischproben) liefern die labormässige Bestätigung der Beurteilung im Feld, vor allem von Untersuchungen im Bodenprofil. Es werden sowohl physikalische (Korngrössenverteilung), wie auch chemische (pH, org. Substanz, Nährstoffe), seltener biologische Parameter (mikrobielle Aktivität, Veratmung, ATP etc.), untersucht. Die Untersuchung nach VBBo beinhaltet im chemischen Bereich vor allem die Feststellung der Belastung mit Schadstoffen, wie Schwermetalle und organische Verbindungen.

Zusatzuntersuchungen zur Bodenkartierung

Hier werden vor allem die wenig variablen Werte (Kennwerte des Bodens) ermittelt und horizontweise festgehalten, am häufigsten werden folgende Parameter gemessen:

- *Kornverteilung* Messung der prozentualen Anteile von Ton, Schluff und Sand in der Feinerde (Korn-Ø < 2 mm).
- *Organische Substanz*: Nichtmineralischer Anteil des Bodens, woraus auch der Humusgehalt rechnerisch ermittelt wird (Einteilung in mineralische und organische Böden).
- *pH:* Bodenazidität, Laborbestimmung, wenn z.B. die Genauigkeit der colorimetrischen Feldmessung (Hellige) nicht genügt (Achtung: nur Resultate von Messungen in gleicher Lösung sind vergleichbar)
- *KAK:* Kationenaustauschkapazität und Basensättigung des Bodens und deren Verteilung im Profil.

Untersuchungen für die Nährstoffversorgung

Die Bestimmung der vorhandenen Hauptnährstoffe hat hier den Vorrang. Dabei spielt die Verfügbarkeit der Nährelemente für die Pflanzen und nachfolgend für die angepasste Düngung eine wichtige Rolle.

- *Bodenart:* Körnung und Humusgehalt werden aus preislichen Gründen oft nur noch taktil, d.h. durch die Fühlprobe oder Fingerprobe, abgeschätzt.
- *Nährelemente:* in der Regel werden Stickstoff, Phosphor, Kalium, zusätzlich oft Magnesium, Bor, Mangan, Eisen etc. gelöst (Wasserextrakt) und als Vorrat (EDTA-Extrakt) gemessen.

Eine Vereinheitlichung der Untersuchungsmethoden auf europäischer Ebene wird seit längerer Zeit diskutiert. Damit wäre eine gewisse Vergleichbarkeit der Resultate gegeben.

Untersuchung der Belastungssituation (nach VBBo)

Diese wird verlangt, wenn Bodenaushub entfernt und anderswo wieder angelegt werden soll. Auf die Untersuchung der Belastung kann verzichtet werden, wenn diese aufgrund der lokalen Situation ausgeschlossen werden kann.
Entlang vielbefahrener Strassen muss eine Belastung, besonders durch Blei, angenommen werden. Weitere mögliche Emmitenten sind beispielsweise auch Verbrennungsanlagen, Giessereien, Krematorien.
Verdacht auf Altlasten besteht für Böden unter Lagerplätzen, Gaswerkarealen, Imprägnieranstalten, Umschlagplätzen für Brenn- und Treibstoffe, Schiessplätzen etc.
Es werden normalerweise folgende Elemente (kursiv = häufig) untersucht:

- *Schwermetalle: Blei, Cadmium, Zink, Kupfer*, Chrom, Nickel, Quecksilber, Kobalt, Molybdän, Thallium und Fluor
- *Organika:* Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe *(PAK),* polychlorierte Benzyle *(PCB*), aromatische Verbindungen und *Mineralöle*
- *Spezifische Verdachtsstoffe* (Dioxin etc)

Bewertung der Wiederverwendbarkeit von Aushubmaterial

Für die Weiterverwendung des Bodens gelten **Richt-** und **Orientierungswerte**.

- Befinden sich die gemessenen Gehalte innerhalb der Richtwerte, so kann das Material uneingeschränkt wieder verwendet werden **(Aushub Kategorie 1).**
- Werden die Richtwerte zwar überschritten, liegen die Resultate jedoch innerhalb der Orientierungswerte, so gilt der Boden als leicht belastet und darf nur mit Einschränkungen wieder verwendet werden, **(Aushub Kategorie 2**). So nicht auf Flächen, die der Futter- und Nahrungsproduktion dienen, nicht in Hausgärten und Kinderspielplätzen, nicht in Wald- und Naturschutzgebieten
- Liegen die Messungen ausserhalb der Orientierungswerte, so muss das weitere Vorgehen mit der zuständigen Behörde, unter Beizug der Bodenschutzfachstelle abgesprochen werden.

EINTEILUNG	Aushub Kategorie 1		Aushub Kategorie 2	
Schwermetalle	Totalgehalt	Löslicher Gehalt	Totalgehalt	Löslicher Gehalt
Blei	50	1.0	300	1.5
Cadmium	0.8	0.03	2.0	0.05
Chrom	75	0.04	200	0.06
Kupfer	50	0.7	100	1.4
Nickel	50	0.2	100	0.4
Zink	200	0.5	350	1.0
Quecksilber	0.8		1.2	
Org. Verbindungen		Indikatorverbindungen		Analysemethode
PAK	1.0	16 gemäss E.P.A. Prioritätenliste (USA)	5.0	Blankenhorn 1992 ISO 190 13 16
PCB	0.05	PCB-IUPAC Nr. 28,52, 101,118,138,153,180	0.25	Berset FAC 1993
Aromatische Verbindungen	0.7	Benzol, Ethylbenzol, Toluol und Xylole	7	ISO 190 SC3 WG6 N43
Mineralöle	50	Mineralöle insgesamt	300	ISO 190 SC3 N113

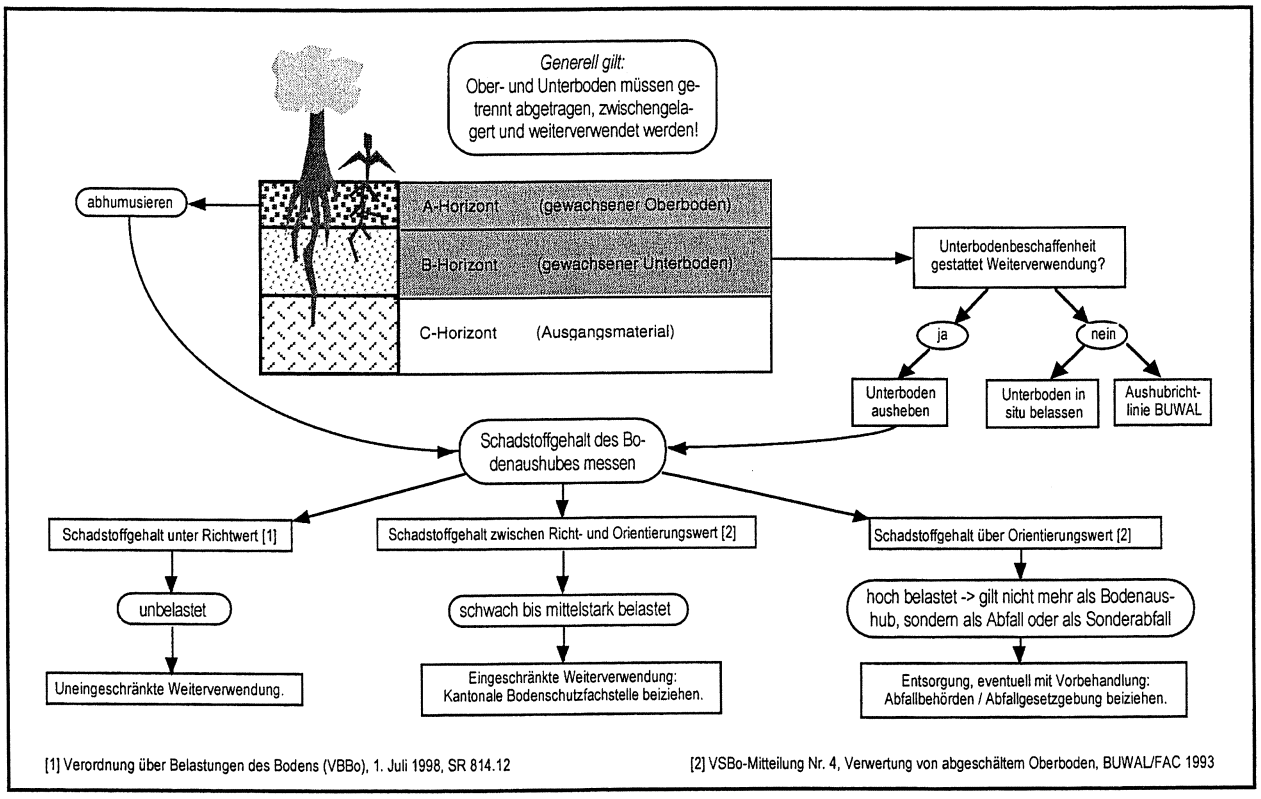
Triage von Bodenaushub

Die Triage des Bodenaushubes (Ober- und Unterboden) muss vor Inangriffnahme der Arbeiten organisiert werden. Sobald bei Bodenaushub einzelne oder mehrere Werte erreicht oder überschritten sind, ist die kantonale Fachstelle beizuziehen.
Bei Belastungen aus der Luft*) ist vor allem die Oberbodenschicht (A-Horizont) betroffen. Da Ober- und Unterboden getrennt abgetragen und zwischengelagert werden, ist die getrennte Analyse von Ober- und Unterboden vor allem in Gebieten mit hoher Belastung (z.B. entlang einer Autobahn) angezeigt. Aufgrund der schematischen Darstellung der Triage von Bodenaushub gilt folgendes Vorgehen:

Unbelasteter Aushub (alle Werte < Kategorie 1) mit uneingeschränkter Weiterverwendung bietet, abgesehen von allfälligem Transportaufwand, keine Probleme.

Für schwach bis mittelstark belastetes Material (Werte > Aushub Kategorie 1 und ≤ Aushub Kategorie 2) müssen, in Zusammenarbeit mit den zuständigen kantonalen Fachstellen, Möglichkeiten für eingeschränkte Wiederverwendung gesucht werden.

Hoch belastetes Bodenmaterial (Werte ≥ Kategorie 2) darf nicht mehr als Aushub, sondern muss als Abfall behandelt werden.



*) Die meisten chemischen Belastungen des Bodens entstehen aus menschlicher Tätigkeit. Gewisse Schadstoffe werden über grosse Strecken verfrachtet d.h. eine mögliche Belastung kann nicht immer aufgrund der Nähe eines Emittenten angenommen oder ausgeschlossen werden.
Daneben ist bekannt, dass Schadstoffe im Boden auch aufgrund der Bodenentstehung vorhanden und, je nach Gehalt des verwitternden Ausgangsgesteins, in relativ hohen Konzentrationen auch im Unterboden (B-Horizont) vorkommen können.

3.3 Physikalische Messungen (Feldmethoden)

Physikalische Messungen werden sowohl im Feld, als auch im Labor (Zylinderproben) am ungestörten Bodenkörper durchgeführt. Aufgrund der Unterschiede im Bodenkörper müssen die Messungen für eine gesicherte Aussage immer mehrmals wiederholt werden, was dieser Verfahren entsprechend zeitaufwendig und kostspielig macht. Die Verfahren, welche z.T. aus der Bodenmechanik (Strassenbau) stammen, sind nur bedingt für bodenkundliche Untersuchungen verwendbar. Der Entwicklungsbedarf für gut handhabbare Methoden ist durch die Einführung des mechanischen Bodenschutzes im USG gegeben.

Saugspannungsmessung

verwendetes Gerät	Haupteinsatzgebiet	Praktischer Einsatz	praktische Bewertung
Tensiometer mit keramischer Saugkerze und Manometer oder Ablesung über Einstichzapfen.	Messung des pflanzenverfügbaren Wassers. Steuerung von Bewässerungsanlagen.	Beurteilung der Befahrbarkeit eines Bodens. Bodenschutz auf Grossbaustellen.	Einfach in der Handhabung. Mindestens 5 Geräte pro Meßstelle. Regelmässige Kontrolle und Wartung (entlüften).

Die Saugspannungsmessung ist weitverbreitet und gut durchführbar (siehe auch Bodenschutzrichtlinien BEW 1997). Die praktischen Erfahrungen im Gasleitungsbau sind durchwegs positiv. Die Saugspannung wird einheitlich in einer Tiefe von 35 cm gemessen und der Median aus 5 Ablesungen ermittelt. Die Ablesung soll immer um die gleiche Tageszeit erfolgen, am besten frühmorgens. Das saubere Vorbohren und Versetzen, sowie die regelmässige Kontrolle der Tensiometer, vor allem bei trockenem Boden, ist äusserst wichtig.

Messung der Wasserleitfähigkeit

Verwendetes Gerät	Haupteinsatzgebiet	Praktischer Einsatz	Praktische Bewertung
pF-Doppelring-infiltrometer	Messen der Wasserleitfähigkeit im gesättigten Zustand.	Nachkontrolle (QS) nach Eingriffen (Verdichtungen, Rekultivierungen) mit Vergleichsmessungen	Zeitaufwendig, wenn der Boden vorerst gesättigt werden muss. Mehrere Messungen nötig.
Permeameter Guelph	do. Messung in verschiedenen Tiefen im Bohrloch möglich	Ähnlich pF- Doppelringmethode, Messungen sind aber auch in tieferen Schichten möglich.	Zeitaufwendig in Böden mit gehemmter Sickerung. Geräte relativ teuer und nicht sehr robust.

Die Messung ist sowohl von der Instrumentierung wie auch von der Handhabung her nicht ganz einfach und wird deshalb, ausserhalb wissenschaftlicher Versuche, nicht oft eingesetzt. Für die Wassersättigung müssen zudem oft beträchtliche Mengen Wasser herbeigeschafft werden. Eher zu Demonstrationszwecken kann mit dem einfachen **Ringinfiltometer** (Bau und Vertrieb: Landw. Beratungszentrale Lindau) mit sichtbarer Wassersäule stark reduzierten Durchmessers der Unterschied der Versickerungsgeschwindigkeit an verschiedenen Standorten im Feld gut dargestellt werden (Folgen von Bodenverdichtung).

Messung der Dichte

Verwendetes Gerät	Haupteinsatzgebiet	Praktischer Einsatz	Praktische Bewertung
Ballon-Densitometer	Tiefbau	Messung eines Aushubvolumens zur Bestimmung der Lagerungsdichte im Feld.	Relativ schwere und teure Apparatur, jedoch ziemlich einfach in der Handhabung.
Sandmethode	Tiefbau	dito	Sehr einfache und plausible Methode für die Volumenbestimmung des Aushubes mittels gemessener Einfüllmenge Sand.

Die Bestimmung der Dichte im feldfeuchten Zustand kann auch mit der einfachen Sandmethode ohne Beizug fremder Geräte durchgeführt werden. Durch Ofentrocknen der entnommenen Probe und nochmaliger Wägung kann die scheinbare Dichte (D_s) gemessen, sowie nach Abzug vom Frischgewicht auch der Wassergehalt der Probe festgestellt werden.

Messung des Eindringwiderstandes

	Haupteinsatzgebiet	Praktischer Einsatz	Praktische Bewertung
Farnell-Penetrometer	Tiefbauliches Gerät für die Tragfähigkeitsbestimmung (CBR%).	Messung der erreichten oder vorhandenen Verdichtung od. Befahrbarkeit.	Schnelle und einfache Messung an der Oberfläche.
Federpenetrograph	Bodenkundliche Entwicklung zum Feststellen verdichteter Zonen im Boden.	Graph. Darstellen von Verdichtungen, ev. auch Vernässungen im Boden.	Misst und zeichnet direkt auf bis 70cm Tiefe. Funktioniert nicht in steinigen Böden.
Rammsonde	Tiefbau Baugrundabklärungen Geotechnik.	In verfeinerter Ausführung (PDL) können auch Messungen hoher Auflösung im lockeren Bodenbereich gemacht werden.	In spezieller Ausführung (PANDA-Sonde) sehr benutzerfreundlich und relativ steinunempfindlich, jedoch ziemlich teuer.

Der Eindringwiderstand gestattet, immer mit Berücksichtigung des Bodenfeuchte, Aussagen über den Verdichtungszustand und die Tragfähigkeit eines Bodens, nicht aber über die plastische Verformbarkeit (Drucksetzungsverhalten). Die aus dem Tiefbau bekannten Methoden (ME-Plattenversuch oder die Deflektionsmessung) können auf natürlich gewachsenem Boden mit den vorhandenen Geräten in der Regel nicht angewendet werden. Oedometerversuche im Labor sind ebenfalls sehr arbeitsaufwendig und werden deshalb nur in Ausnahmefällen für bodenkundliche Abklärungen, z.B. für das Messen bestehender Vorverdichtungen, eingesetzt.

3.4 Interpretation für den Bau

Damit eine Interpretation möglich ist, müssen im Ausgangszustand die Parameter umfassend, methodengleich und auf die jeweilige Fragestellungen ausgerichtet, erfasst werden (siehe Übersichtstabelle Zustandserfassung). Deshalb sollte die Bodenfachperson bereits in einem möglichst frühen Projektstadium beigezogen werden. Nachstehend sind die wichtigsten, auf Baustellen häufigen Fragen, welche zu Interpretationsbedarf im Bereich Boden führen können, stichwortartig alphabetisch aufgelistet und zusammengefasst:

- *Abtragsmächtigkeit:* Erfassung der Mächtigkeit von Oberboden und verwittertem Unterboden. Berechnung der anfallenden Mengen und des Platzbedarfs für Zwischenlager.
- *Befahrbarkeit*: Messung des aktuellen Zustandes (Saugspannungsmessung mit Tensiometern bei täglicher Auswertung vor Arbeitsbeginn).
- *Bodenbelastung:* Die Belastung mit Schadstoffen (mach VBBo) ist so zu erfassen, dass das Bodenmaterial bezüglich seiner Weiterverwendung im Voraus klassierbar ist.
- *Beweissicherung:* Bei allen grossflächigen Eingriffen lohnt sich eine angepasste Beweissicherung. So kann ein tiefbaulicher Eingriff z.B. Auswirkungen auf den oberflächennahen Grundwasserhaushalt haben.
- *Höhen von Zwischenlagern:* Für Ober- und Unterboden, sind abhängig von Bodenart, (Textur, Humusgehalt), Lagerdauer und Schütttverfahren, angepasste Maximalhöhen zu wählen.
- *Kennwerte* (Ober- und Unterboden) ev. inkl. Nährstoffversorgung (nur Oberboden) müssen immer erfasst sein, wenn Wiederherstellungen geplant sind. Kennwerte (Textur) sind oft bereits für die Bauphase nützlich.
- *Maschinenlisten*: Für alle im Projekt vorkommenden Maschinen (mit Ausnahme stationär vorinstallierter Anlagen) muss eine Einteilung bezüglich der zulässigen Saugspannung aufgrund des Maschinengewichtes und der Flächenpressung erfolgen (siehe Kap.7).
- *Profilaufnahme:* Die Profilaufnahme macht den Bodenaufbau sichtbar, gibt klare Einsicht in die Abtragsmächtigkeit und erlaubt die korrekte Beprobung für die Erfassung der Kennwerte in den einzelnen Bodenschichten.
- *Standfestigkeit:* Die *Stabilität* und die *Erosionsanfälligkeit* von Schüttungen können aus der Kornverteilung (Textur und Skelettgehalt) abgeleitet werden. Bei gewachsenem Boden wird die *mechanische Belastbarkeit* beispielsweise mit Rammsondierungen ermittelt. Für den oberflächennahen Bereich (0-3 m) ist der Einsatz der PANDA-Sonde (tragbares Handgerät mit elektronischer Auswertung auf dem Platz) besonders geeignet.
- *Vorverdichtung* von Böden müssen mit dem Ödometerversuch nachgewiesen werden. Diese Untersuchungen sind sehr zeitaufwendig, müssen also vor Baubeginn durchgeführt und ausgewertet sein, wenn damit die Befreiung von Massnahmen zum Schutze des Bodens umgesetzt werden sollen.

Hinweis: Sämtliche hier zusammengefassten Begriffe und Untersuchungen und deren praktische Interpretationen, sind in den nachfolgenden Hauptkapiteln 4 bis 7, in den entsprechenden Untertiteln, detailliert beschrieben.

4. Eingriff in den Boden

Grundsätzlich muss festgestellt werden, dass jede Störung des natürlichen Bodenaufbaues den Boden in seiner Fruchtbarkeit gefährdet oder gar zerstören kann. Die belebte Oberbodenschicht, die in einer Mächtigkeit von meist 20-30 cm aufliegt, weist eine hohe Fähigkeit zur Selbstregenerierung auf. Sie umfasst die Hauptwurzelzone und wird bei ackerbaulicher Nutzung regelmässig bearbeitet und umgelagert. Dank der Grabtätigkeit der Bodentiere und des Wurzelwachstums der Pflanzen kann sich ein mechanisch strapazierter Oberboden relativ schnell, d.h. in der Regel innerhalb eines Jahres, erholen, indem neue Hohlräume entstehen, Luft und Wasser eindringen können und die Bodenstruktur vor allem durch die rege Wurmtätigkeit und die damit verbundene Ton-Humuskomplexbildung laufend erneuert wird.
Demgegenüber sind Verdichtungsschäden im Unterboden ab ca. 30 cm Tiefe kaum mehr regenerierbar. Die biologische Tätigkeit nimmt mit zunehmender Tiefe rasch ab, die Wurzeln dringen infolge zunehmenden mechanischen Widerstandes weniger in den Boden ein, die Aufbruchwirkung von Frost-Tau-Wechseln erreicht diese Tiefe oft während Jahren nicht. Der geringere Sauerstoffgehalt der tieferen Bodenschichten bewirkt generell eine Verlangsamung aller bodenbildenden und regenerierenden Prozesse.

4.1 Belassen und Befahren des Oberbodens

Das Abtragen von Oberboden (Abhumusieren) hat Tradition. Für allerkleinste Eingriffe werden oft grosse Flächen zur Schüttung einer Zufahrt oder zum Zwischenlagern von Bodenmaterial abgetragen. Grunsätzlich rechtfertigt sich das Abhumusieren nur dort, wo der Eingriff stattfindet, also auch Unterboden ausgehoben wird sowie bei längerdauernden Provisorien wie Installationsplätzen oder Umfahrungsstrassen.

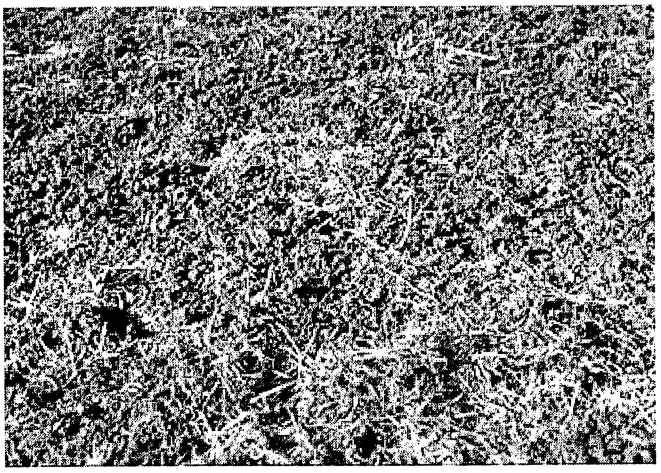
Wenn die von Bau und Transport beanspruchten Flächen rechtzeitig als Wiese durchgehend begrünt werden, so sind sie strapazierfähig genug, auch grössere Materialtransporte zu ertragen, natürlich mit angepassten Transportmitteln. Lastwagen werden durch leichte Raupentransporter ersetzt (Bild). Auch wenn vom Grasbesatz nach beendeter Arbeit nicht mehr viel sichtbar ist, wächst die Wiese aus dem noch vorhandenen Wurzelwerk rasch wieder nach.

Es macht wenig Sinn, für das Zwischenlagern von Ober- und Unterboden oder Aushub den Boden flächig abzuhumusieren, wie das auf dem Bild rechts (Gasleitungsbau) der Fall ist.

Die damit verbundene, unnötig grossflächige Zerstörung der Grasnarbe hat zwei ganz gewichtige Nachteile:

- Verlust der Schutzfunktion und der Lastverteilung dank einer durchwurzelten (armierten) Bodenschicht gegenüber dem empfindlichen Unterboden
- Wegfall der Verdunstungsleistung lebender Pflanzen (bis 5 mm Wasser pro m^2 und Tag) was ein schlechtes Abtrocknen des Bodens zur Folge hat.

Auch wenn nach Rückbau vom ursprünglich vorhandenen Grasbestand nicht mehr viel übrigbleibt:



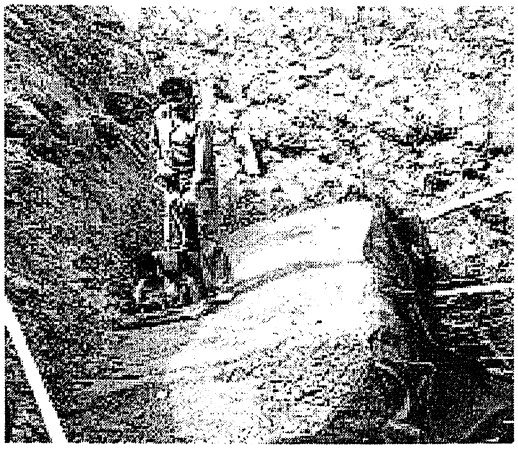
- Das abgestorbene Pflanzenmaterial hat eine sichtbare Trennschicht hinterlassen (Bild rechts).
- Der maschinelle Rückbau wird durch diese Trennschicht erleichtert
- Auf den Einsatz von teurem und wenig umweltfreundlichem Vlies konnte verzichtet werden

Anwendungsbereich

Der Verzicht auf das flächige entfernen der Vegetationsdecke soll vor allem bei den folgenden, meist kurzfristigen, d.h. innerhalb weniger Tage und Wochen zum Abschluss gelangenden Eingriffen durchgesetzt werden:

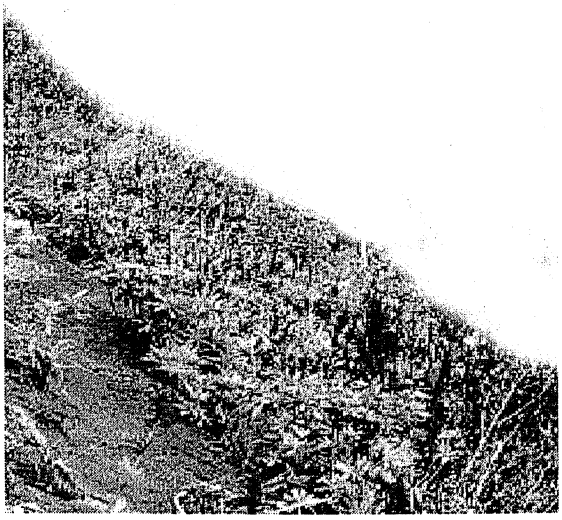
- Gasleitungsbau
- Wasser-, Abwasser- und Fernwärmeleitungen
- Bau von Hochspannungsleitungen
- Seilbahnbau und damit verbundener Materialtransport
- Anlegen von temporären Transportpisten

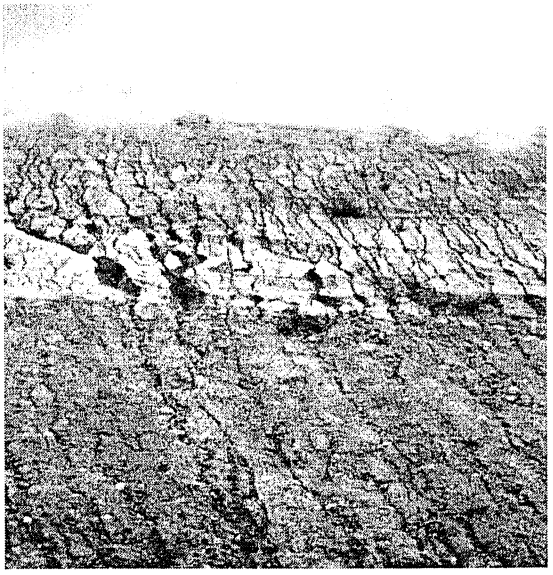
4.2 Eingriffe in den Boden klein halten



Damit ein möglichst umfassender Schutz des gewachsenen Bodens erreicht wird, soll das Bauverfahren so gewählt werden, dass sich der Abtrag der Vegetationsschicht grundsätzlich auf die Fläche des Eingriffes konzentriert. (Bild links)

Je exponierter ein Boden ansteht, umso wichtiger ist es den Oberboden nur punktuell abzutragen.
Die lose Krautschicht vermag den Steilhang (Bild unten links) nachhaltig zu schützen, während ein grossflächiges Abtragen der Vegetationsschicht, auch wenn diese spärlich erscheint, sehr rasch zu Erosion führen kann (Bild unten rechts).





Es ist oft besser, die aufwendigere Vefahrensvariante zu wählen als später vor einem fast unlösbaren Sanierungsproblem zu stehen. In Hanglagen mit unstabilen Böden, aber vor allem in klimatischen Grenzlagen, ist die Wiederherstellung der schützenden Vegetationsdecke oft kaum zu bewerkstelligen.

Anwendungsbereich

Der Grundsatz, den Eingriff möglichst klein zu halten, gilt für alle tiefbaulichen Vorhaben. Die Erfüllung dieser Anforderung muss im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung verifiziert werden. Das gezeigte Vorgehen kommt vor allem im Berggebiet und in Steillagen zum Einsatz, wo das Objekt schwer zugänglich ist und ein schwerer Maschineneinsatz ohnehin nicht in Betracht kommt. So zum Beispiel bei:

- Bergstrassen und Wegunterhalt,
- Pistensanierungen,
- Wasserbau,
- Hangstabilisierung.

4.3 Boden abtragen

Das Abtragen von Boden muss rechtlich als tiefbaulicher Eingriff bewertet werden, weil damit Boden aus seiner natürlichen Lagerung herausgeholt wird. Damit wird die Fruchtbarkeit des Bodens erheblich berührt, was dem Grundsatzgedanken des Zweckartikels USG zuwiderläuft.
Durch das Entfernen des schützenden, belebten Oberbodens wird auch der Schutz des Bodens vor mechanischer Beeinträchtigung erheblich verschlechtert. Der mechanische Bodenschutz ist neu im USG aufgenommen und zu beachten (Änderungen vom 7.Juni 1993).
Der Abtrag von Boden (Abhumusieren) geht den meisten bewilligungspflichtigen Bautätigkeiten voraus. Auch reine Terrainveränderungen ab einer gewissen Grösse gelten als Bauten und unterstehen darum ebenfalls der Bewilligungspflicht. Die nachstehende Tabelle zeigt mögliche Vorgehen beim Bodenabtrag mit Bezug zum jeweiligen Objekt auf.

Art des Bodenabtrags (Oberboden) Eingriff/Massnahmen	Boden begrünen, nicht abtragen	Boden abtragen, zwischenlagern	Boden abtragen und direkt wiederanlegen	Boden abtragen und abführen
Materialabbau nicht etappiert (Zwischenbegrünung)		≤ Schütthöhe 2 m, nicht befahren sofort begrünen.	Nur auf zwischenbegrünten Unterboden anlegen.	
Materialabbau etappiert (Direktumschlag)			Auf fertige Etappe (Unterboden angelegt) auftragen u. begrünen.	
Grossbaustellen: Strasse, Bahn etc.		Aushub- und Pistenbereich. Depotfläche nicht abhumusieren.		Von überbauten Flächen, soweit er überschüssig ist.
Aushubdeponien, Auffüllungen		Aushub- u. Zufahrtsbereich, Depotfläche nicht abhumusieren.		
Erdverlegter Leitungsbau	Kein Abtrag ausser im Grabenbereich.	Oberboden und Aushub direkt auf die Grasnarbe legen.		
Leitungsbau, Mastenbau	Piste direkt auf das Gras legen, punktueller Bodenabtrag im Bereich der Fundamente.			
Strassen- und Bahnausbau, belasteter Nahbereich			Belastetes Material im kontaminierten Nahbereich wiederanlegen.	Wiederverwendung durch Belastung ev. eingeschränkt
Sanierung von Altlasten			Sofern Werte (VBBo) nicht überschritten sind.	Ev. Triage und teilweise Wiederverwendung möglich.

Zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit gilt der Grundsatz, dass ohne Vorliegen einer rechtskräftigen Baubewilligung kein Oberboden abgetragen werden darf, und dass die Notwendigkeit, auch bei kurzfristigen Eingriffen wie Leitungsbau, nachgewiesen werden muss. Wird Oberboden nicht an Ort und Stelle wieder eingebaut, oder besteht der Verdacht der Kontamination, ist dieser, zumindest stichprobenweise, zu untersuchen. (VBBo, TVA)

Voraussetzungen für den Bodenabtrag

Bodenfeuchte

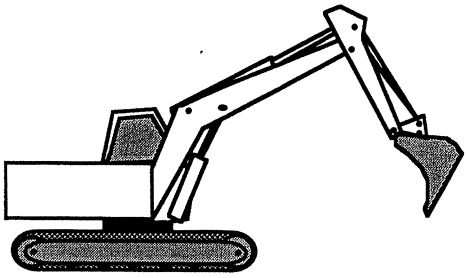
Abtragen darf nur bei gut abgetrocknetem Boden erfolgen, damit dieser nicht bereits beim Abtrag geschädigt wird. Feucht an Lager aufgeschüttet, trocknet Boden erfahrungsgemäss kaum mehr ab. Normalerweise wird die zulässige Feuchte, in Abhängigkeit der Bodenart festgelegt und in Form der Saugspannung mit Tensiometern gemessen. (s. Kap 7.1)

Wenn keine Tensiometer Auskunft über die Saugspannung geben, muss die Fühlprobe beigezogen werden.

- Rieselt der Boden locker aus der Hand (wie Abb.), ist er sicher trocken genug.
- Lässt er sich ohne zu brechen verformen, ist er meistens zu feucht, es soll noch einige Tage zugewartet werden.
- Wenn Boden an der Hand klebt (abhängig vom Tongehalt) oder die Handflächen nass werden, ist sein Wassergehalt immer zu hoch.

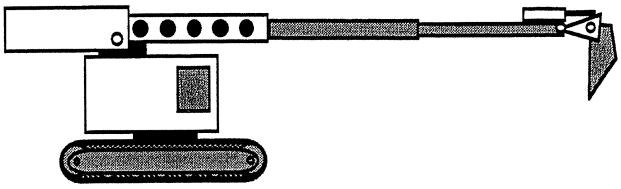
Maschinen- und Verfahrenswahl

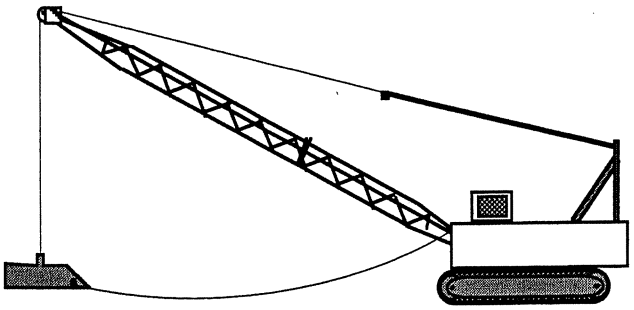
Bei Saugspannungen unter 10 Cb oder < pF 2 soll Boden grundsätzlich weder umgelagert noch befahren werden. Bei empfindlichen Böden (Tongehalt > 30 %) sind + 10 Cb Zuschlag erforderlich.
In hydromorphen Böden und in Gebieten mit viel Niederschlägen muss mit angepassten Maschinen gearbeitet werden. Es ist in erster Linie auf möglichst geringes Gewicht und auf einen kleinen Flächendruck, also entsprechend breite und lange Fahrwerke, zu achten.



Kleine und mittlere Hydraulikbagger der Kategorie unter 10 Tonnen, resp. unter 20 Tonnen, aber mit Moorfahrwerk, sind für das Abhumusieren und lose Anlegen an Depots geeignet. Spezielle ungezahnte und breite Humuslöffel erlauben ein sauberes und schnelles Arbeiten.

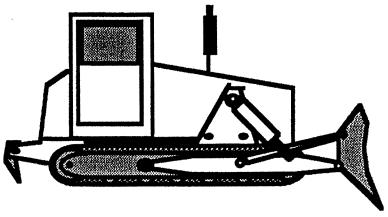
Eine Variante mit grösserer Reichweite stellt der Teleskopbagger dar. Ältere Modelle sind zu schwer und unhandlich, moderne und leichte Geräte mit geeignetem Fahrwerk aber nur in geringer Zahl vorhanden,

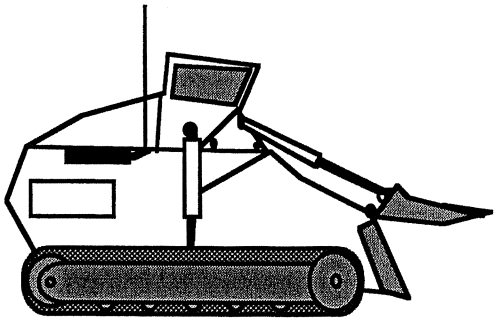




Ähnlich selten sind Seilbagger (Draglines) anzutreffen. Infolge des hohen Gewichts atbeiten diese Maschinen ausschliesslich auf Baggermatrazen, müssen aber dank ihrer grossen Reichweite nur wenig umgesetzt werden.

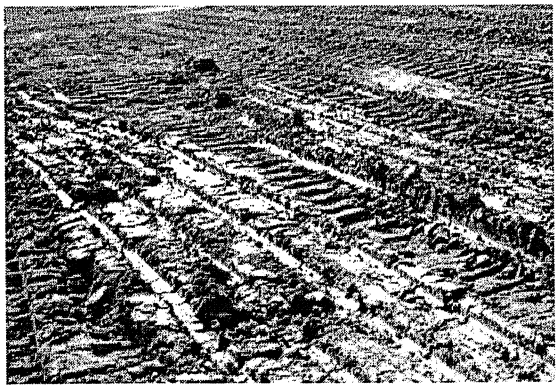
Leichte Moordozer der Kategorie unter 15 to sind mit Vorsicht einzusetzen. Ein Nachteil dieser Maschine ist, dass mit dem Planierschild der Boden oft über zu lange Strekken zusammengestossen und dabei verpresst wird.





Schürfraupen weisen eine hohe Leistung auf. Sie sind für grossflächige Arbeiten wirtschaftlich, da sie sich fahrenderweise beladen und entladen. Weil dabei sowohl Unterboden als auch die Deponie befahren wird ist es wichtig, dass wirklich nur bei gut trokkenem Boden gearbeitet und nur die geeignete Maschine eingesetzt wird. Die SR 85 von Menck hat ein Fassungsvermögen von 8.5 m^3 bei 18 to Leergewicht, die SR 2000 weist aber bei gleichem Fassungsvermögen 28 to Leergewicht auf.

Fahrspuren beachten!



Anhand der Spuren wird die Bodenverträglichkeit eines Einsatzes, zumindest oberflächlich, gut sichtbar. Schwierig wird die Beurteilung der Tragfähigkeit bzw. der Verdichtungsgefährdung, weil dafür der Zustand, dh, die Feuchte der tieferliegenden Bodenschichten massgebend ist. Deutliches Einsinken ist ein untrügliches Zeichen ungenügender Tragfähigkeit des Bodens für die eingesetzte Maschine. „Glänzende" Flächen wie im Bild rechts weisen oft auf zu nassen Boden hin. Locker-brüchige Fahrspuren (Bild links) zeigen, dass die befahrene Bodenoberfläche trocken ist

4.4 Praktischer Umgang mit belastetem Boden

Die Bodenuntersuchung nach VbBo (Kap.3.23) wird verlangt, wenn Oberboden und Aushubmaterial entfernt und anderswo wieder angelegt werden soll. Bisher sind folgende rechtliche Grundlagen und die darin enthaltenen Richt- und Orientierungswerte, (in Tabelle Kap. 3.2), gültig:

- Verordnung über Schadstoffe im Boden (VBBo) Juli 1998
- Mitteilungen zum qualitativen Bodenschutz und zur VSBo, Nr. 4 (1993)
- Wegleitung für Probnahme und Analyse von Schadstoffen im Boden (BUWAL/FAC)

4.5 Neue Beurteilungsgrundlagen

Mit der Revision des USG trat 1998 die VBBo (Verordnung über die Belastung des Bodens) in Kraft. Das Bewertungssystem der VBBo basiert auf :

- Richtwerten
- Prüfwerten
- Sanierungswerten

sowie der Einführung von Bestimmungen zum physikalischen Bodenschutz, welcher grundsätzlich als Auslöser für diese Forschungsarbeit steht. Der physikalische Teil dazu ist vor allem in den Kapiteln 6-9 verarbeitet.

Richtwerte

Richtwerte haben zum Ziel, Boden als Ökosystem und Lebensgrundlage langfristig zu erhalten und in seiner Fruchtbarkeit zu schützen. Mit vorsorglichen Emmissionsbegrenzungen durch den Bund und weitergehende Emmissionsbegrenzungen durch die Kantone, steht damit der Schutz der Gesundheit von Mensch, Tier und Pflanze bzw. die Abwehr deren Gefährdung, im Vordergrund. Aufgrund neuester Erkenntnisse der Wirkungspfade und -mechanismen einzelner Schadstoffe wurden die Werte bei einzelnen Schwermetallen geändert, Elemente aus der Liste gestrichen und auf der Seite der organischen Schadstoffe zusammengefasst. Damit werden die Untersuchungen vereinfacht und auf die wesentlichen Faktoren konzentriert. Die untenstehenden Gehalte, für Schwermetalle angegeben in mg/kg Trockensubstanz (= Gramm Schadstoff pro Tonne luftgetrockneten Bodens) , gelten für Böden bis 15% Humus in mg/kg TS, höher 15 % Humus in mg/dm^3)

Schadstoffe	Blei	Cadmium	Chrom	Molybdän	Kupfer	Nickel	Quecksilber	Zink	Fluor
Bisher: Total	50	0.8	75	5	50	50	0.8	200	400
Gehalt löslich	1	0.03	-	-	0.7	0.2	-	0.5	
Neu: Total	50	0.8	50	5	40	50	0.5	150	700
Gehalt löslich	-	0.02	-	-	0.7	0.2	-	0.5	20

Dioxine (PCDD) Furane (PCDF)	in ng I-TEQ (internationale Toxizitätsäquivalente)	5

Prüfwerte

Prüfwerte haben zum Ziel, die Grenze der tolerierbaren Belastung festzulegen, innerhalb welcher eine Schädigung durch Aufnahme von Nahrungspflanzen (Mensch) und durch Futterpflanzen (Tier) sowie durch orale Aufnahme von Boden (vor allem bei Kindern) nicht zu befürchten ist. Die Prüfwerte lösen die Orientierungswerte, wie sie in den Mitteilungen zur VSBo Nr. 4 (1993) enthalten sind, ab. Werden Prüfwerte überschritten, so ist, im Gegensatz zur Richtwertüberschreitung, eine Nutzungsgefährdung möglich und eine Nutzungsbeschränkung, ev. Sanierung, nötig. (Gehaltsangaben in den Tabellen bei Schwermetallen: Gramm pro Tonne lufttrockenen Bodens.)

Nutzungsarten:	Pb tot	Pb lösl.	Cd tot.	Cd lösl.	Cu tot.	Cu lösl.	Zn tot.	Zn lösl.
Nahrungspflanzen	200	-	2	0.02	-	-	-	-
Futterpflanzen	200	-	2	0.02	150	0.7	700	1
Orale Bodenaufnahme	300	-	10	-	-	-	-	-

Dioxine (PCDD) Furane(PCDF)	in ng I-TEQ (internationale Toxizitätsäquivalente)	20

Sanierungswerte

Sanierungswerte zeigen an, dass eine Nutzungsgefährdung vorhanden ist und deshalb ein generelles Nutzungsverbot erlassen werden muss. Sind die Sanierungswerte überschritten, muss der belastete Boden saniert werden und darf weder zur Pflanzenproduktion, noch als Haus- und Familiengarten oder als Kinderspielplatz genutzt werden. Gehaltsangaben in den untenstehenden Tabellen bei Schwermetallen: Gramm pro Tonne lufttrockener Boden.

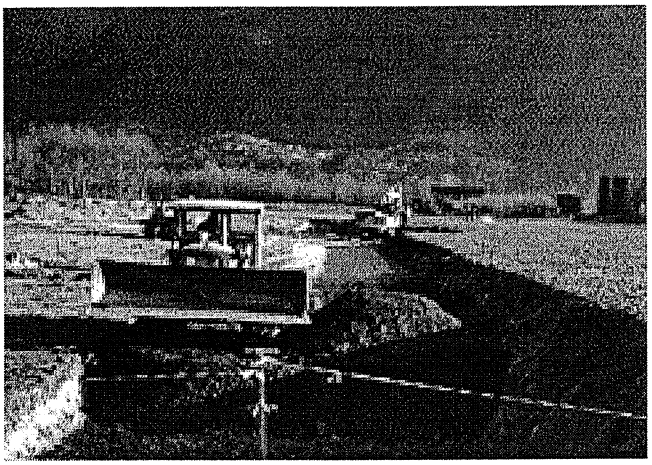
Nutzungsarten:	Pb tot	Pb lösl.	Cd tot.	Cd lösl.	Cu tot.	Cu lösl.	Zn tot.	Zn lösl.
Landw. u. Gartenbau	2000	-	30	0.1	1000	4	2000	5
Forstwirtschaft	-				-	-	-	-
Haus/Familiengärten	1000	-	20	0.1	1000	4	2000	5
Kinderspielplätze	1000	-	20	-	-	-	-	-

Nutzungsarten:	Dioxine (PCDD) und Furane (PCDF)	
Kinderspielplätze	ng I-TEQ	100
Landwirtschaft, Gartenbau Forstwirtschaft, Haus- und Familiengärten	ng I-TEQ	1000

Der praktische Umgang mit belastetem Boden muss den neuen gesetzlichen Grundlagen angepasst werden. In Zweifelsfällen ist der Beizug der kantonalen Bodenschutzfachstelle angezeigt.

5. Zwischenlager

Das Zwischenlagern von Bodenmaterial kann notwendig werden, wenn ein Boden nach erfolgtem baulichem Eingriff zu Rekultivieren, d.h. als land- oder forstwirtschaftliche Nutzfläche wiederherzustellen ist. Das direkte Umlagern des Bodens ist dem Anlegen von Zwischendepots wo immer möglich, vorzuziehen. Das gilt etwa beim Kiesabbau, wo die Rekultivierung einer abgebauten Fläche zeitlich mit dem „Abräumen" einer neuen Abbauetappe gekoppelt ist oder, wie im Bild rechts, wo mit Fräsgut des vom Bau Morettina-Strassentunnels ein sehr oft überschwemmter Teil der Magadinoebene (Kulturland) durch Anheben saniert wird.



Methode: Direktumlagerung mit dem Bagger im sog. Streifenverfahren, in welchem der Untergrund oder das Einfüllgut, nie aber der Bodenbereich befahren wird. Im Vordergrund wird das Einfüllgut im Aushubbereich des Bodens planiert, im Bildhintergrund legt der Bagger ausgehobenen Boden direkt an.

5.1 Unter- und Oberboden

Grundsätzlich soll sowohl der Oberboden (Humus) als auch der darunter anstehende, verwitterte Unterboden möglichst vollständig, jedoch auf separaten Deponien, zwischengelagert werden. Das Umlagern kann auf den Boden verschiedene Auswirkungen haben:

- Der Boden wird aus seiner natürlichen Lagerung entfernt und zwangsläufig vermischt.
- Die gewachsene Struktur wird durch die gestört, kohärente Strukturen werden aufgebrochen.
- Boden wird, je nach Textur (Kornverteilung, Bodenart) und Feuchtezustand verformt, verschmiert und verpresst.
- Boden wird auf zu hohen Depots einem grösseren (als dem in natürlicher Lage vorkommenden) Druck ausgesetzt (das Eigengewicht von Boden liegt zwischen 1.3-1.8 t/m^3).
- Der Boden im Fussbereich des Zwischenlagers ist oft vernässt.
- Das Bodenleben wird durch die Umlagerung gestört, die natürliche Umsetzungsprozesse, z.B. aerober Abbau organischer Substanz, verlaufen unterdrückt.
- Die organische Substanz des Bodens wird durch mangelnde Luftzufuhr reduziert (erstickt) der Boden verfärbt sich graublau und riecht nach Klärschlamm (Methan=Faulgas).
- Nitrat wird freigesetzt und ausgewaschen (Gewässerbelastung).

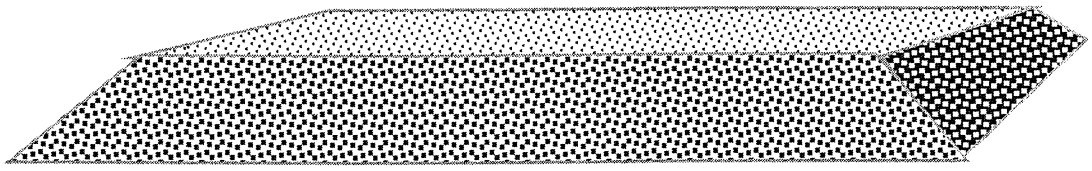
Diese Auswirkungen können vermindert werden durch:

- Sauber getrennte Behandlung und Lagerung von Ober- und Unterboden, notfalls klare Festlegung des Trennbereiches (Tiefe des Abhumusierens) durch erfahrenen Pedologen.
- Reduktion der Umschlagvorgänge und der dadurch dem Boden zugefügten Belastungs-,Verpressungs- und Entlastungsphasen.
- Ausführung aller Arbeiten nur bei genügend trockenem Boden. Ideal sind Saugspannungen über 25 Cb bei leichten und mittelschweren, bzw. 35 Cb bei tonigen Böden.

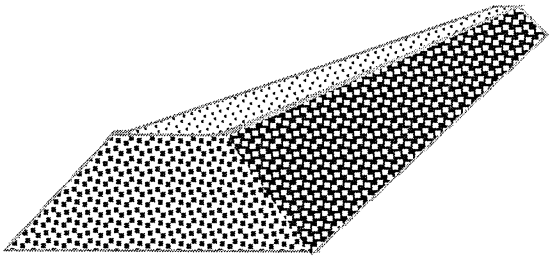
- Ableiten des Oberflächenwassers, Zwischenlager auf entwässernder (durchlässiger oder erhöhter) Unterlage errichten.
- Lockeres Anlegen des Oberbodens (Humus) mit Begrenzung der Schütthöhe unter Mitberücksichtigung der Bodenart.
- Sofortiges Begrünen der Unter- und Oberbodenzwischenlager, vorzugsweise mit Leguminosen (Luzerne und Kleearten)

5.2 Anlage, Schütthöhen

Beim Anlegen ist dem Unterboden und dem Oberboden die gleiche Sorgfalt zu widmen, nie sollte der angelegte Boden durch Baumaschinen und Transportfahrzeuge befahren werden. Eine Ausnahme bildet das direkte Abtragen und Wiederanlegen mit der Schürfkübelraupe unter optimalen Einsatzbedingungen (leichter Maschinentyp wie Menck SR 85 für Kulturlandeinsatz, absolut trockener Boden und speziell geschultes Bedienungspersonal).
Das Material, Ober oder Unterboden, die Bodenart, die Schüttform, aber auch die Dauer der Zwischenlagerung und die Niederschlagsmenge sind für die Festlegung der zulässigen Schütthöhe mit massgebend:

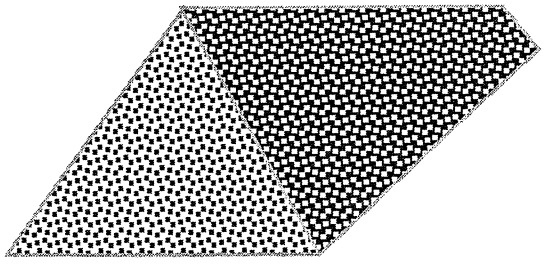


Flächig angelegter Oberboden, meist für längere Zwischenlagerung, sollte grundsätzlich nie höher als 1.5 m, zugleich die erreichbare, durchwurzelte Tiefe, geschüttet werden. Bei korrekter Begrünung mit speziell tiefwurzelnden Pflanzen wie Luzerne ist damit eine genügende Durchwurzelung, Stabilisierung und auch Entwässerung noch gewährleistet.

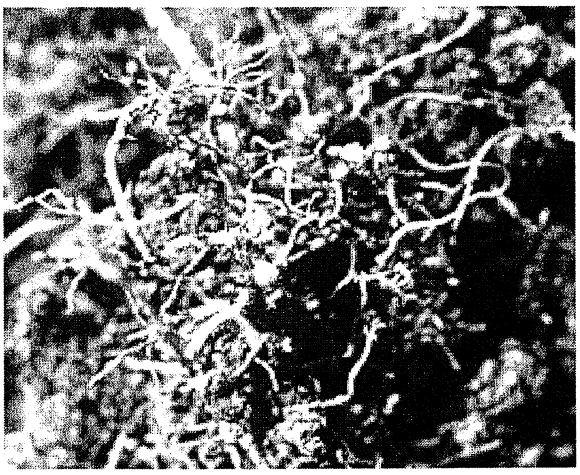


Trapezförmige Schüttungen in Walmen können, geeignetes Material vorausgesetzt, etwas höher geschüttet werden, weil hier von den Seiten bis gegen die Mitte Luft eintreten kann und die Wurzeln nicht nur von oben, sondern auch seitlich eindringen. Vorausgesetzt ist auch hier eine sofortige und dauerhafte Begrünung.

Streifenförmige Zwischenlager, wie sie beim Abhumusieren von Linienbaustellen und für das Anlegen von Werkpisten auf unverwittertem Untergrund (Tiefe max. 1 m) entstehen, werden in der Regel direkt mit dem Tieflöffel auf die erforderliche Höhe angelegt. Dauert es bis zur Wiedereindeckung mehr als zwei Monate ist, soll begrünt werden. Für kurzfristige Zwischenlagerung kann eine schnellwachsende und kostengünstige Gründüngungsmischung verwendet werden. Diese wirkt nicht nur als Schutz gegen Erosion, sie unterdrückt auch aufkeimende, unerwünschte Beikräuter.



5.3 Begrünung, Unterhalt, Kontrolle

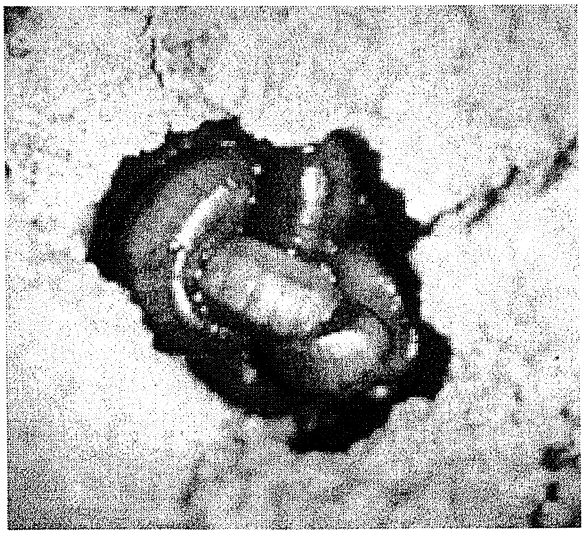


Die sofortige Begrünung von Ober- und Unterbodenlagern ist aus folgenden Gründen wichtig:

- Sie vermindert die Vernässungsgefahr (durch Wasserverdunstung von bis zu 5 l/m^2 pro Tag) einerseits, das Austrocknen der Oberfläche und Erosionsgefahr anderseits,
- Sie stabilisiert und aktiviert das zwischengelagerte Bodenmaterial.
- Sie unterdrückt das Überhandnehmen unerwünschter Beikräuter.
- Sie vermindert die Gefahr der Nitratauswaschungen.

Die Makroaufnahme einer Kleewurzel verdeutlicht, wie dicht und intensiv die Durchwurzelung des Bodens sein kann. Leguminosen (Luzerne, Kleearten) sind in der Lage, dank sog. Knöllchenbakterien grosse Mengen Stickstoff aus der Luft zu binden. (bis 170 kg N pro ha und Jahr) Sie wurzeln zudem bedeutend tiefer als die Gräser.

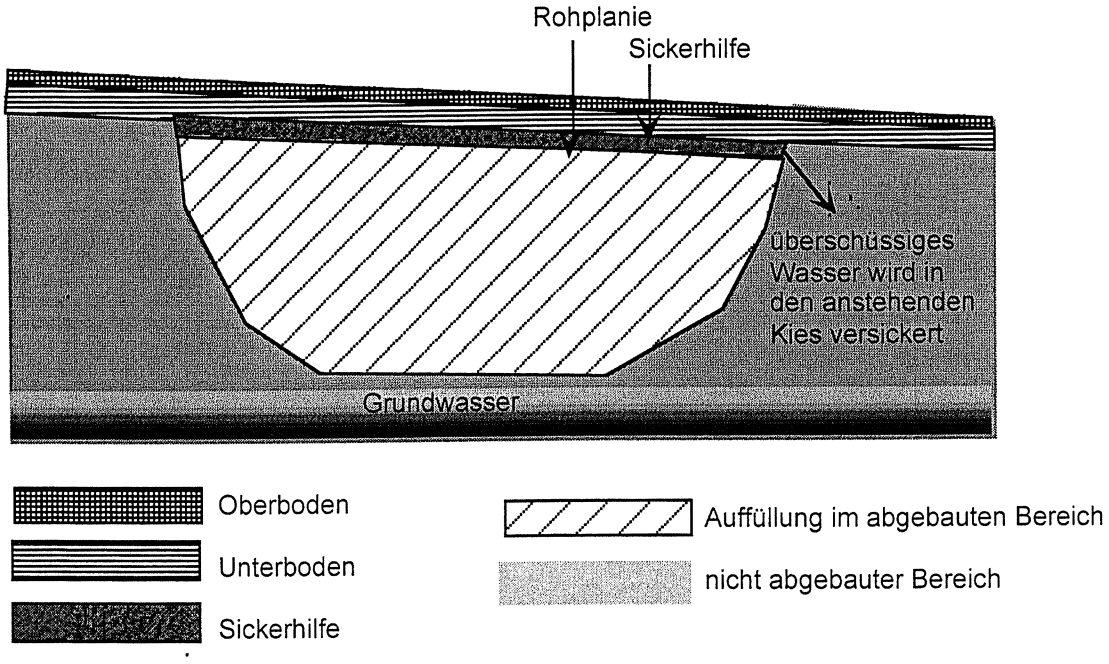
Dieses Bild zeigt ein flächig angelegtes Oberbodenzwischenlager einer grossen Kiesgrube, welches zwischenzeitlich, im abgebildeten Beispiel seit über zehn Jahren, futterbaulich genutzt wird.
Bei genügend trockenem und tragfähigem Boden wird sogar täglich eingegrast. Der Bewirtschafter achtet dabei auf geringes Fahrzeuggewicht breite Bereifung von Traktor und Ladewagen.



Der nützliche Regenwurm ist der wichtigste Helfer im Boden und muss geschont werden. Bei trockenem, warmem Wetter gräbt er sich in den Boden ein und schützt sich in enger Verknotung (=Verkleinern der Oberfläche) vor dem Austrocknen. Herbizideinsätze und ätzende Jauche vertragen die Regenwürmer schlecht, Die Beikrautkontrolle sollte deshalb in Form von Säuberungsschnitten erfolgen. Wird das Grüngut gemäht und liegengelassen, so bildet es eine feuchte Rotteschicht, und gleichzeitig eine wichtige und gerne angenommene Nahrungsquelle für Würmer und andere Bodenlebewesen, welche im geschützten Mikroklima dieser Rotteschicht dauernd aktiv bleiben und sich so schneller vermehren können.

6 Wiederherstellung

Das Ziel der Rekultivierung besteht darin, Böden wieder so aufzubauen, dass sie dem aufgenommenen Ausgangszustand möglichst nahekommen und auch weiter landwirtschaftlich genutzt werden können. Dieser Teil beschreibt die Massnahmen für die Wiederherstellung nach längerfristigen Eingriffen, sowie die Behebung von Altschäden, vor allem von gut entwickelten, tiefgründigen und produktiven Böden (im Bereich der tieferen Lagen). Die Rekultivierung umfasst den Wiederaufbau der Bodenschichtfolge über der fertigen Rohplanie (Auffüllung), gegebenenfalls nach Einbau einer Sickerhilfe.



6.1 Rohplanie

Ein guter Boden kann sich nur über einer wasserdurchlässigen Unterlage entwickeln und erhalten. Auch im natürlichen Zustand ist ein Boden, welcher unter Stauwassereinfluss steht, in seiner Eigenschaft als Pflanzenstandort, und damit auch in seiner Nutzungsmöglichkeit, immer mehr oder weniger eingeschränkt. Wiederherzustellende Böden lagen ursprünglich oft über durchlässiger Unterlage (Kies) und haben sich dort zu fruchtbaren Braunerden bzw. Parabraunerden entwickeln können. Deshalb ist die korrekte Rekultivierung sehr schwierig. An die Rohplanie müssen zumindest zwei Anforderungen gestellt werden:

Gut abgesetzte Auffüllung

Besonders beim Verkippen über die Halde entsteht unterschiedliche Verdichtungen zwischen oft (Zufahrtspisten) und kaum befahrenen Bereichen.

Saubere Oberflächengestaltung

Die Rohplanie muss so gestaltet sein, dass der optimale Wasserabfluss gewährleistet ist. Beim schichtweisen Planieren ist frühzeitig auf Gefälle und Abflussrichtung zu achten.

6.2 Entwässerung

In niederschlagsreichen Gebieten und dort, wo anlässlich der Schneeschmelze grosse Wassermengen in kurzer Zeit anfallen, ist eine gute Wasserleitfähigkeit des Bodens besonders wichtig. Wenn dass Wasser nur oberflächlich abfliessen kann, werden Erosion und Hochwasser begünstigt und die Versorgung des Grundwassers gemindert.

Versickerung (ohne Baumassnahmen)

Liegt unter der Rohplanie eine Auffüllung mit nicht gewässergefährdendem Inertmaterial und ist dies aufgrund seiner Zusammensetzung genügend durchlässig, so kann ein Auflockern der verdichteten Oberfläche ev. bereits genügen, um überschüssiges Sickerwasser abfliessen zu lassen. Versickerungsversuche müssten k Werte von $\geq 10^{-3}$ (entspricht $\geq$ 86 cm/Tag) ergeben.

Renaturierung (statt Kulturland)

In gewissen Fällen erweist sich die erfolgreiche Rekultivierung aufgrund der äusseren Gegebenheiten bei näherer Betrachtung im voraus als ziemlich aussichtslos. Wenn z.B. eine Rohplanie nicht durchlässig gestaltet werden darf, so muss festgestellt werden, ob überschüssiges Wasser abgeleitet und weiterversickert werden kann. Bietet sich aufgrund der bestehenden Oberflächengestaltung keine Lösung an (Beispiel abflusslose Muldenlage), sollte die Renaturierung ins Auge gefasst werden, weil sich der Aufwand für eine Rekultivierung unter den gegebenen Voraussetzungen in keinem Verhältnis zum erreichbaren Nutzen befindet.

Flächige Entwässerung (Sickerschicht)

Praktische Erfahrungen zeigen, dass die direkte Versickerung nur wenigen Fällen mit sehr günstigen Voraussetzungen vorenthalten bleibt. Bisher wurde deshalb versucht, das Wasser auf der mit Gefälle versehenen Rohplanie durch eine flächig ausgebrachte Sickerschicht abzuleiten. Erfahrungen haben jedoch gezeigt, dass der **Porensprung** zwischen aufgetragenem Unterboden und der Sickerschicht zu gross ist und die Saugspannung deshalb abbricht. Das hat zur Folge, dass das Wasser über der eingebrachten Sickerschicht hängen bleibt. Flächige Sickerschichten aus meist zu grobem Material funktionieren zudem oft nicht, weil

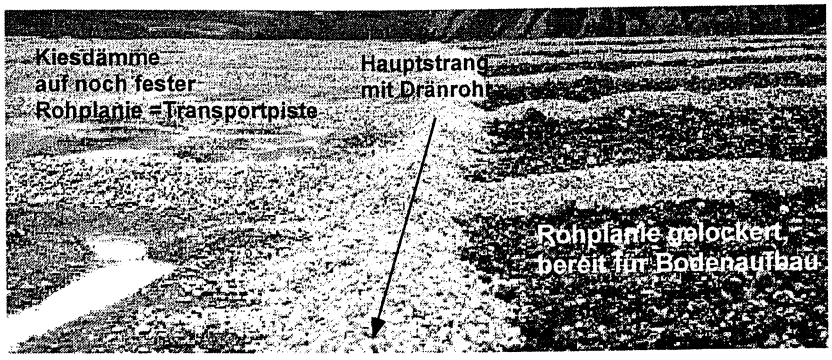
- die zu überwindende Strecke zu gross ist **(Fliesswiderstand),**
- das Gefälle ungleichmässig ist **(Fliessunterbruch),**
- das aufgebrachte Bodenmaterial instabil ist **(Verschlämmung).**

Zudem ist der Materialaufwand gross, es wird unnötig wertvolles Rohmaterial verschleudert.

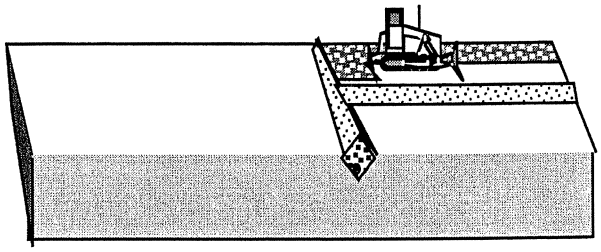
Streifenentwässerung (Einbau vor Bodenaufbau)

Der vorgängige Einbau einer weniger materialaufwendigen Sickerhilfe in Form eines Entwässerungssystems, wie es für landwirtschaftliche Drainagen gebräuchlich ist (nachstehende Abbildung), hat sich in der Praxis bereits bewährt. Voraussetzung ist eine gut abgesetzte und sauber gestaltete Rohplanie mit genügend Gefälle in Richtung der geplanten Wasserabfuhr (Versickerungsmöglichkeit). Ebenso müssen die Sammelstränge mit einem spülbaren Sickerrohr (PE-Stangenmaterial verwenden) versehen sein.

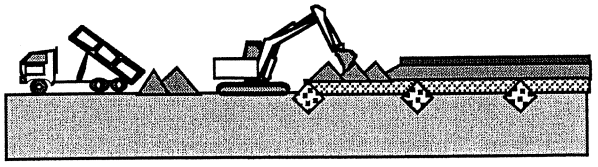
***Praktisches Vorgehen**: (schematisch)*



In einem ersten Schritt werden auf einem Teil der Rohplanie Kiesdämme in vorgeformte Gräben gelegt. In die Hauptgräben, welche zur Versickerungsseite führen, wird ein Drainagerohr eingelegt. (eher kleine Durchmesser verwenden) In einem zweiten Schritt wird zwischen den Kiesdämmen die Oberfläche aufgelockert.



Auf dem noch unbehandelten Teil der Rohplanie wird das Material (Unter- und Oberboden) zugeführt. Ein Bagger baut den Boden über der gelockerten Fläche und den Kiesdämmen auf, ohne dieselbe je zu befahren.



6.3 Auftrag von Unterboden

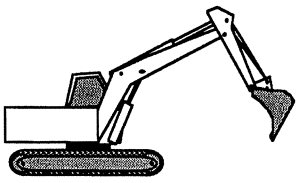
Mit Ausnahme der direkten Umlagerung, dem sog. Streifenverfahren, wie es bei grösseren Geländeanhebungen zur Anwendung kommt, muss Unterboden meistens zugeführt werden. Je nach Verfahren und Transportdistanz wird der Unterboden mit Lastwagen, Dumper oder Schürfkübelraupe angeführt und mit Bagger, Dragline oder dem Moordozer verteilt.

Folgende Grundsätze sind zu beachten:

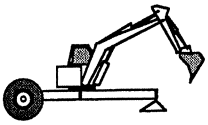
- Die Anfuhr des Materials darf nicht auf bereits gelockertem Boden erfolgen.
- Die Anfuhrwege sind nach Gebrauch kontinuierlich, sorgfältig und vollständig zu lockern, bevor sie mit Unterboden überschüttet werden.
- Unterbodenauftrag ist keine Aushubdeponie! Es ist wichtig, dass nur oberflächennah abgetragenes, verwittertes, gut strukturiertes und durchlässiges Bodenmaterial verwendet wird. Boden mit zu hohem Tonanteil oder torfiges Material sind beispielsweise ungeeignet.
- Der künstliche Aufbau des Bodens darf nur bei genügender Abtrocknung erfolgen. Grundsätzlich gilt: Je höher die Maschinengewichte und die Anzahl der Überfahrten sind, umso trockener muss der Boden sein.

Einbau bei schlecht abtrocknenden Verhältnissen

Nachstehend aufgeführte Maschinen eignen sich für niederschlagsreiche Gebiete und für empfindliche, zB. stark tonhaltige (> 30 %) sowie grund- oder stauwasserbeeinflusste, schlecht abtrocknende Böden.

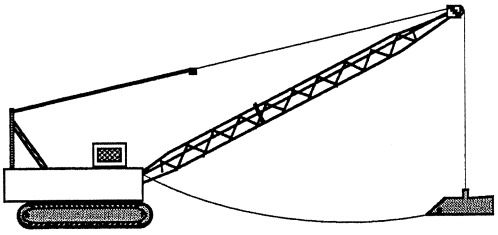


Bagger: Gewicht < 20 t
Flächenpressung < 400 g/cm^2

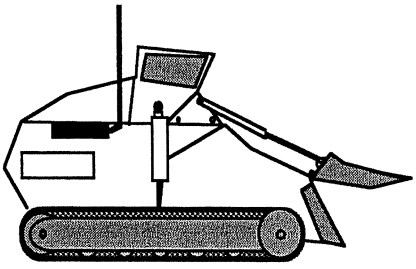


Schreitbagger: Kleineinsätze, Arbeiten in steilen Lagen

Dragline: Stationär, oder streifenweise auf Matratzen, bzw. Piste arbeitend.



Einbau bei günstigen Verhältnissen



Der Einsatz der Schürfraupe kann bei sicheren Witterungsverhältnisse und rasch abtrocknenden Böden, normal bis wenig empfindlichen Böden geplant werden. Schürfraupen beladen und entladen sich selbst und eignen sich zum gleichzeitigen Planieren. Sie bringen bei kurzen und mittleren Transportdistanzen, z.B. innerhalb eines Kiesgrubenareals für die direkte Bodenumlagerung wie auch das Anlegen ab Depot, eine sehr hohe Tagesleistung. Vielerorts wird jedoch die notwendige Saugspannung von 25 bzw. 35 Centibar auch im Sommer nur an wenigen Tagen erreicht. Eine zu optimistische Einschätzung der Lage kann bedeuten, dass die Maschine infolge bodenschutzbedingter Baueinstellung während längerer Perioden ausser Betrieb ist. Es ist wichtig auf den Maschinentyp zu achten. So weist die Menck SR 85 gegenüber dem japanischen Konkurrenzmodell SR 2000 bei gleichem Fassungsvermögen fast 10 Tonnen weniger Leergewicht auf, kann also unter Umständen bedeutend länger eingesetzt werden.

Auftragsmächtigkeit

Die Mächtigkeit der angeschütteten Unterbodenschicht bestimmt die späteren Standorteigenschaften (Wasserspeicher, nutzbarer Wurzelraum, Nährstoffspeicher etc.) massgeblich mit. Für eine vielseitige ackerbauliche Nutzung ist ein stauwasserfreier Wurzelraum von mind. 80 cm anzustreben. Dies wird erfahrungsgemäss mit +30% Schütthöhe (je nach Bodenart) etwa erreicht. Damit kann als Faustregel gelten, dass ≥ 80 cm Unterboden und ≥ 30 cm Oberboden (lose Schüttmasse) aufzubringen sind.

6.4 Zwischenbegrünung

Damit sich der Unterboden nach dem Anlegen optimal restrukturieren kann, ist eine Zwischenbegrünung des Unterbodens vor dem Anlegen des Oberbodens von Vorteil. Bei direkter Umlagerung (Streifenschüttverfahren), wo Unter- und Oberboden gleichzeitig separat angelegt werden, wird auf die Zwischenbegrünung verzichtet.

Vorbereitung und Saat

Der locker geschüttete Unterboden wird bei trockenen Verhältnissen mit landwirtschaftlichen Geräten (Doppelbereifung oder Terrareifen) vorbereitet und angesät. Das Saatbeet sollte nicht fein bearbeitet werden, weil Unterboden stark zum Zerfallen und zur Verschlämmung neigt. Die dabei entstehende Verkrustung der Bodenoberfläche kann das Aufkommen der Saat verhindern. In der relativ groben Schüttung geht jedoch ein Teil der Samenkörner verloren, indem letztere zu tief zwischen die Schollen versinken. Deshalb muss für die Saat auf Unterboden zur empfohlenen Saatmenge ein Zuschlag von ca. 50 % gemacht werden (Ergebnis div. Feldversuche 1986-91). Die Zusammensetzung der Zwischensaat wird aufgrund der klimatischen Lage des Objekts sowie der Bodeneigenschaften (Wasserhaushalt, pH etc) spezifisch festgelegt.

Saatmengen

Nachstehend aufgeführte Pflanzen stellen eine Auswahl dar. Sie sind mit lat. Namen aufgeführt, da sie zum Teil wenig bekannt sind. 150% Normalsaatmenge in g/Are

Alexandriner/Perserklee	Trifolium alexandrinum/persicum)	500
Buchweizen	Fagopyrum esculentum	1200
Bitterlupine	Lupinus angustifolius	2250
Luzerne	Medicago sativa	450
Oelrettich	Raphanus sativus	375
Phacelia	Phacelia tanacetifolia	240
Chinakohlrübsen	Brassica rapa	225
Hirse	Sorghum	600
Sonnenblumen	Heliathus annuus	450
Steinklee (Gelb)	Melilotus officinalis	525
Winterwicken	Vicia villosa	1500

Wahl der Pflanzen

Nebst bekannten Gründüngungspflanzen wie Oelrettich, Gelbsenf und Chinakohlrübsen, können bei geeignetem Klima und Boden die raschwüchsigen Sonnenblumen oder Sorghum (Hirse), Grünmalve oder Buchweizen, zur Stickstoffbindung Leguminosen wie Lupinen, Pferdebohnen, Luzernen, Steinklee, eingesetzt werden. Nachstehende Tabelle zeigt einen Vergleichsanbau mit drei Wiederholungen in dem einige weniger bekannte Pionierpflanzen getestet wurden. Standortdaten:

CH-Mittelland 400 müM.
Mittl. Jahresniederschlag >1000mm
Bodenart: Lehm (22% T 21% U 57% S)
Steinanteil 60%, pH 7.5, Karbonat 3.3%

Folgende Zusammenstellung zeigt, dass nicht nur bekannte Bodenverbesserer und Tiefwurzler, sondern auch eher unbekannte Pflanzen durch überraschende Leistung auffallen.

Gemessene Werte nach Pflanzenart	Nach 4 Wochen gemessen		Nach 10 Wochen gemessen		Nach 14 Wochen gemessen	
	Wuchshöhe in cm	Bodenbdeckung in %	Hauptwurzeln Tiefe in cm	Feinwurzeln Tiefe in cm	Grünmasse in kg/are	Trockensubstanz (ohne Wurzeln)
Alexandrinerklee	12	40	30	60	275	46
Buchweizen	**60**	**90**	15	40	165	44
Bitterlupine	35	65	25	55	160	28
Luzerne	20	40	30	60	100	23
Oelrettich	30	80	25	50	225	35
Phazelia	25	75	10	30	55	17
Chinakohlrübse	25	75	20	80	80	18
Sorghum	**70**	**85**	35	80	360	88
Sonnenblume	55	70	30	70	**520**	**217**
Steinklee	15	75	**40**	**80**	175	35
Winterwicke	15	55	25	75	320	45

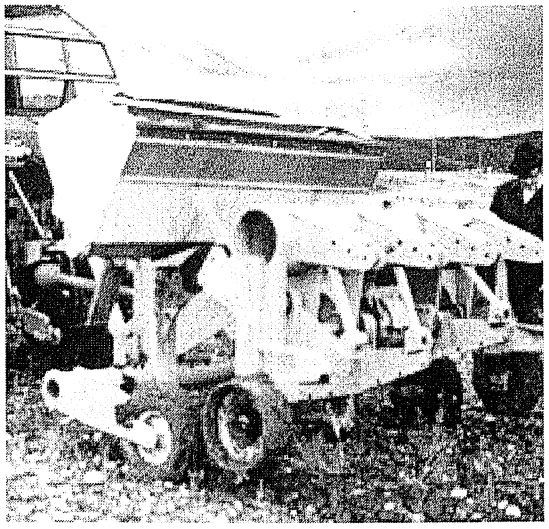
6.5 Auftrag von Oberboden

In der Regel erfolgt der Auftrag des Oberbodens im Jahr nach der Zwischenbegrünung bei gut abgetrocknetem Boden, im Zeitraum zwischen Juni und August. Bei Verwendung winterharter Zwischenbegrünung, (Winterwicke, Steinklee, Chinakohlrübsen, Luzerne) muss zu stark aufgewachsenes Material eventuell geschnitten und zerkleinert liegengelassen werden (Schlegelmäher, Mulchmäher) Abgefrorene, nicht winterharte Pflanzen (Sorghum, Sonnenblume, Buchweizen, Oelrettich) müssen nur dann zerkleinert werden, wenn die Stengel nicht brüchig verwittert sind. Auf das Abführen des Pflanzenmaterials kann in der Regel verzichtet werden, wenn die Saatbeetzubereitung nach dem Auftrag des Oberbodens in Form einer tiefen Durchlüftung geschieht (Spatenpflug, MM100, Grubber). Anhäufungen von Pflanzenmaterial sind zu verteilen, damit sich nachher unter dem aufgetragenen Oberboden keine Schicht aus unzersetzten Pflanzenresten bildet.

Anführen und Verteilen des Oberbodens

Der voraktivierte und durch Wurzeln erschlossene Unterboden soll möglichst wenig und nur in trockenem Zustand befahren werden. Für diese Arbeit sind beispielsweise leichte Schürfkübelraupen, wie Menck SR 85, geeignet. Anfuhr, Verteilung und Planierung erfolgen in einem Arbeitsgang. Wird Oberboden mit Fahrzeugen angeführt, so können zum Vermeiden von Druckschäden prov. Pisten (Baggermatratzen) ausgelegt werden. Wird auf dem Unterboden gefahren, muss der verdichtete Bereich separat aufgelockert werden. Die Verteilung erfolgt in diesem Falle immer mit leichtem Moordozer (Bild) oder streifenweise mit Bagger, eventuell auch mit der Dragline, wo aber zur Druckverteilung Baggermatratzen einzusetzen wären.

Auftragsmächtigkeit



Die aufgetragene Oberbodenschicht soll Luft bis zum organisch aktivierten Unterboden vordringen lassen. Deshalb ist eine zu grosse Mächtigkeit (> 30 cm) eher kritisch zu beurteilen. Die lose Schüttung soll nicht mehr als 35 cm betragen. Sie muss auf einer gelockerten Unterbodenschicht liegen.
Eine nachträgliche Verzahnung von Ober- und Unterboden kann notfalls mittels Grubber, besser durch ein Spezialgerät (MM100), erfolgen. Der Grubbereinsatz ist vor allem dort problematisch, wo sehr skelettreiches Unterbodenmaterial vorliegt (Gefahr des Emporarbeitens von Steinen und unerwünschtes Durchmischen des Bodenmaterials). Das abgebildete Gerät (MM 100) ist mit aufgebautem Düngerstreuer für Tiefendüngung versehen.

6.6 Endbegrünung

Nach der Überschüttung müssen Saatbettzubereitung und Saat unmittelbar erfolgen. Die Oberfläche darf nicht fein bearbeitet werden. Jedes unnötige Befahren der frischen Schüttung ist strikte zu meiden. Sehr geeignet sind Saatkombinationen mit angebauter Packereinrichtung. In der Regel wird eine Luzerne-Kleegrasmischung angesät und mindestens drei Jahre schonend bewirtschaftet.
Der späteste Saatzeitpunkt für eine erfolgreiche Endbegrünung liegt in tieferen Lagen vor Ende August, in höheren Lagen entsprechend früher. Saaten nach diesem Zeitpunkt gewähren in kritischen Jahren keine genügende Entwicklung vor dem Winter. Wird dieser Zeitpunkt verpasst, so muss dennoch begrünt werden, dies ist etwa mit Grünroggen noch bis im Oktober möglich. Im kommenden Sommer wird dieser Roggen abgemäht und die Grasmischung ohne weitere Bodenbearbeitung, mittels Direktsaat eingebracht.

6.7 Folgebewirtschaftung

Die Dauer der schonenden Folgebewirtschaftung richtet sich nach den Gegebenheiten des Projektes: Je länger ein Eingriff gedauert hat, d.h. je länger der Boden aus seiner natürlichen Lage entnommen blieb, umso länger braucht er, um sich wieder zu restrukturieren. Eine Luzernewiese entwickelt ihre volle Durchwurzelungskraft erst etwa im zweiten bzw. dritten Standjahr. Da aber ein wichtiger Teil dieser Restrukturierung von Bodentieren, vor allem von Regenwürmern geleistet wird, ist der Wiederaufbau einer genügend starken Population frühestens nach drei bis fünf Jahren zu erwarten. Wenn davon ausgegangen wird, dass eine Restpopulation von 10 % sich pro Jahr unter günstigen Verhältnissen und mit der entsprechenden Unterstützung durch eine gezielte Folgebewirtschaftung verdoppelt, so leuchtet ein, dass zum Zeitpunkt, wo das Land in der Regel wieder unter den Pflug genommen wird, die Entwicklung einer wirksamen Wurmdichte erst richtig einsetzen würde.

Abgesehen von den örtlichen Gegebenheiten gelten für die Folgebewirtschaftung immer folgende Grundregeln:

- Boden nie im feuchten Zustand befahren.
- Leichte Maschinen und breite Bereifung einsetzen.
- Keine Weidenutzung und kein Jauche ausbringen (Luzerne und Würmer schonen).
- Später, nicht zu tiefer Schnitt, Dürrfutternutzung (Blattverluste für Würmer willkommen).
- Keinerlei Bodenbearbeitung vor Ablauf der Folgebewirtschaftungsphase.
- Regenerierung des Bodens steht vor Nutzen und Ertrag.

6.8 Schlussabnahme (Spatenprobe)

Die Abnahme der Rekultivierungsarbeit (Bau) sowie die Schlussabnahme erfolgen im Beisein des Unternehmers und des zukünftigen Bewirtschafters. Je nach Grösse und Bedeutung des Objekts sind auch die bodenkundliche Baubegleitung sowie Vertreter des Kantons beizuziehen.

Abnahmeprotokoll (Bau)

Der Befund der Abnahme wird protokolliert und von allen Beteiligten unterzeichnet. Die Folgebewirtschaftung und deren Dauer werden anlässlich dieser Abnahme festgelegt und ebenfalls protokolliert. Die Auflagen müssen darin klar formuliert und die Entschädigungsfrage geregelt sein. Ebenso wird die Behebung noch anstehender Mängel festgelegt. Damit wird die rekultivierte Fläche mit klaren Auflagen für die Folgebewirtschaftungsdauer dem Bewirtschafter anvertraut.

Schlussabnahme und Erfolgskontrolle

Erst nach Ablauf der vorgegebenen Folgebewirtschaftungsfrist wird die eigentliche Schlussabnahme durchgeführt. Sie erfolgt analog zur Aufnahme des Ausgangszustandes. Erst jetzt besteht die Möglichkeit, den Erfolg bzw. die Qualität einer Rekultvierung zu bewerten.
Fällt die Schlussabnahme positiv aus, so steht der Regelung der Weiterbewirtschaftung im Rahmen des Nutzungsziels nichts im Wege. Ist diese trotz Einhaltung aller Grundsätze einer korrekten Rekultivierung und Folgebewirtschaftung nicht erreicht worden, so muss der Grad der Wertverminderung beurteilt und ev. ein Wertausgleich geschaffen werden.

Zwischenabnahme (zur Mängelbehebung)

Zeigen sich bei der Abnahme bereits äusserlich feststellbare Mängel schlechter Wuchs, lückiger Bestand, Unterschiede in Entwicklung und Zusammensetzung, so wird diese als Zwischenabnahme durchgeführt, bei welcher die zu treffenden ergänzenden Massnahmen festzulegen sind. Diese Zwischenabnahme wird oft auch dann notwendig, wenn die Rekultivierung nicht mit der nötigen Sorgfalt oder Sachkenntnis durchgeführt wurde. Häufig getroffene Massnahmen sind Tieflockerung und Entwässerung in Form von selektiver Drainage.

Tieflockerung

Von der Tieflockerung werden Ober- und Unterboden erfasst. Es handelt sich um eine meliorative Bearbeitungsmassnahme, die nur zum Erfolg führt, wenn sie angepasst geplant und durchgeführt wird. Tieflockerungen sind in Fachkreisen sehr umstritten, weil die bisher verfügbare Methode der Aufbruchlockerung die Situation nachträglich oft verschlechtert hat. Mit der neuentwickelten Abbruchlockerung konnten die verfahrensbedingten Mängel zwar weitgehend behoben werden. Aber auch die Abbruchlockerung führt momentan zu einer unnatürlich hohen Hohlraumbildung (Überlockerung) und damit grosser Empfindlichkeit des Bodens, z.B. auch gegenüber Verlagerungsverdichtungen (Akkumulation eigeschwemmter Feinerde).

Selektive Drainage

Sie wird besonders zur Behebung lokaler Verfassungen, durch selektives Ableiten des überschüssigen Sickerwassers, zB. in Mulden über undurchlässigem Untergrund, eingebaut. Drainagen bergen immer ein gewisses Risiko für die Gewässer. Es muss deshalb vor allem darauf geachtet werden, dass die Grabensickerung in genügender Tiefe aufgezogen wird.

WICHTIG: Sowohl nach Tieflockerungen wie nach dem Einbau von Drainagen muss eine neue Folgebewirtschaftungsfrist zur Stabilisierung und Restrukturierung des flächig und lokal überlockerten und somit labilen Bodengefüges angesetzt und auf strikte Einhaltung der nutzungseinschränkenden Auflagen geachtet werden.

6.9 Rückgabe an die normale Bewirtschaftung

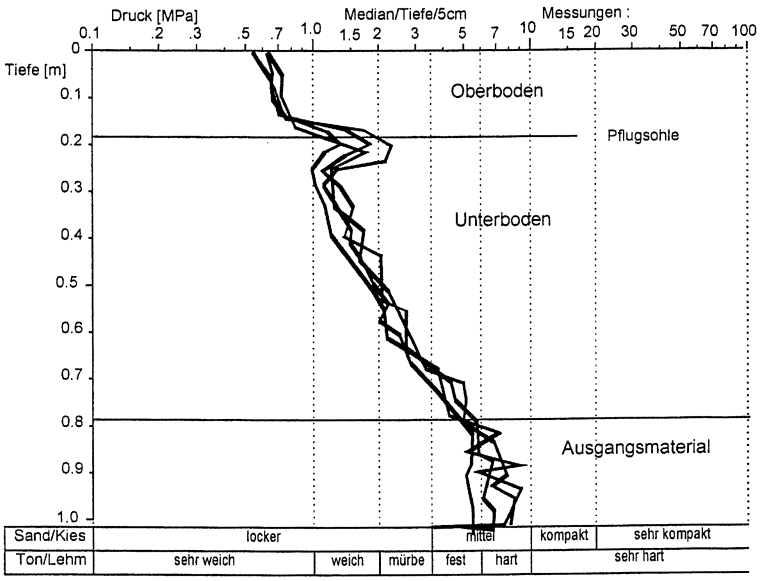
Die Rückgabe an die normale Bewirtschaftung kann erst dann erfolgen, wenn der Boden genügend restrukturiert und biologisch aktiv ist, um eine mechanische Bewirtschaftung ertragen zu können. Dazu gehören nebst den Eigenschaften als Pflanzenstandort u.a. die gleichmässige Setzung und eine natürliche Lagerungsdichte, d.h. auch eine normale Befahrbarkeit. Der mechanische Bodenschutz ist noch jung, entsprechend fehlen Feldmethoden und Erfahrungswerte, um die „Normalität" eines Bodens festzustellen. Wir sind darauf angewiesen, einfache Messungen für einige wenige, aber wichtige Parameter beizuziehen. Dabei sind wir nicht nur auf Zahlen, sondern auch auf Vergleiche in ähnlichen Böden im ungestörten Zustand angewiesen, um den jeweils erreichten Zustand einer Wiederherstellung in Relation zu den örtlichen pedologischen Gegebenheiten beschreiben zu können.

Feststellen der Setzungsdichte und der Homogenität

Die Setzungsdichte kann mit der Spatenprobe nicht festgestellt werden, da diese auf die Tiefe des Bodenaufbaues hinunterreichen und an mehreren Stellen gemessen werden muss.
Die Messung erfolgt mit der Aufzeichnung des Eindringwiderstandes. Dazu werden sog. Penetrometer eingesetzt. Die bisher verwendeten Federpenetrometer haben den Nachteil, dass sie in steinhaltigen Böden nicht eingesetzt werden können. Eine für die Geotechnik neu entwickelte, elektronische Rammsonde scheint diese Schwierigkeit zu überwinden. Sie wird für pedologische Anwendungen zur Zeit getestet. Die dreijährige Forschungsserie wird 1999 beendet und die Ergebnisse werden dannzumal statistisch ausgewertet vorliegen (FABO ZH 1997-99).

Auf der horizontalen Diagrammachse ist der Eindringwiderstand (Druck in MPa) aufgetragen, die vertikale Diagrammachse zeigt die Tiefe (in m) Zur groben Einordnung der Messwerte dienen die sog. Von Moos-Klassen aus der Geotechnik. Die Anwendung des Eindringwiderstandes für den pedologischen Berreich verlangt eine angepasste Methode der Messung, Interpretation und Auswertung. Bodentyp, Wassergehalt und Skelett können das Ergebnis stark beeinflussen. Für quantitative Aussagen ist deshalb die Aufnahme von Profilgruben parallel zur Messung oft unerlässlich.

Diagramm 2 Weizenfeld Dettenberg

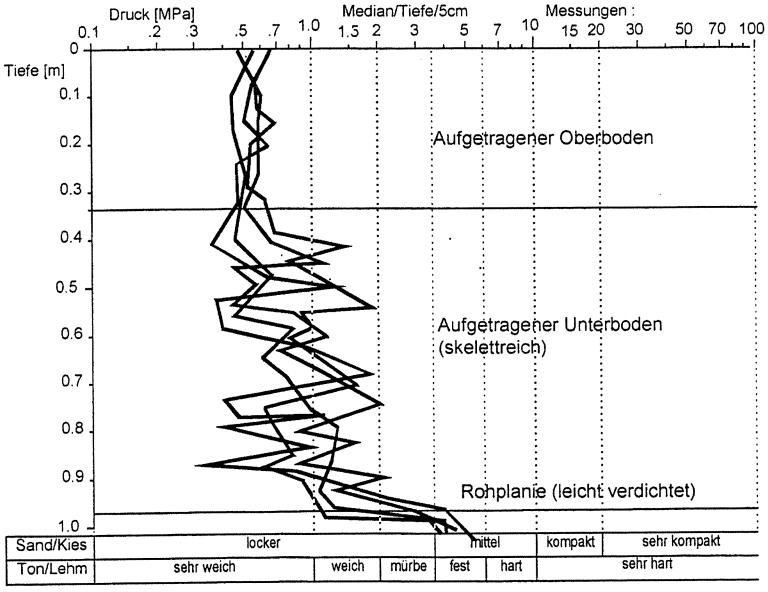


Theoretisch nimmt die Setzungsdichte mit der Auflast der darüberliegenden Bodenschicht nach unten linear zu. (Siehe nebenstehendes Diagramm 2: gewachsener Boden) Am verwendeten Beispiel ist der Einfluss der Bewirtschaftung in Form einer deutlichen Pflugsohle (20 cm) ablesbar. Der Übergang vom gleichmässig zunehmend dichter gelagerten Unterboden zum unverwitterten Ausgangsmaterial (80 cm) ist vor allem an den skelettbedingten, spitzen Ausschlägen festzustellen.

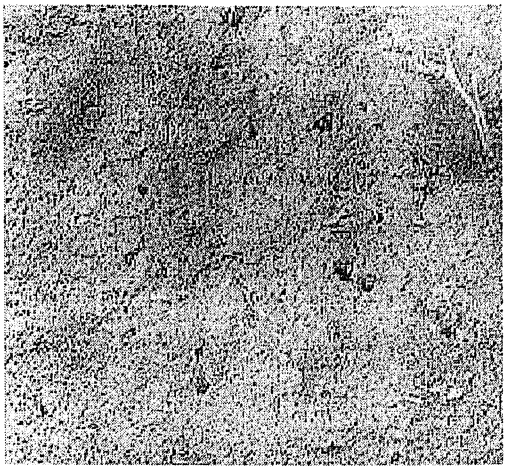
Diagramm 1, rechts:
Im geschütteten Boden ist, neben der Darstellung des Schichtaufbaues, (Oberboden bis 35 cm, Unterboden 35-95 cm) die Zunahme der Setzungsdichte als Tendenz nach einem Jahr im Profil zwar deutlich festzustellen. Die Werte weisen im Unterboden, eine grosse Streubreite auf.

Ergebnis der Untersuchung:
Setzung und Restrukturierung, letztere mit Spatenprobe beurteilt, genügen für eine Freigabe der Nutzung noch nicht.

Diagramm 1: Schüttung Grube Dettenberg

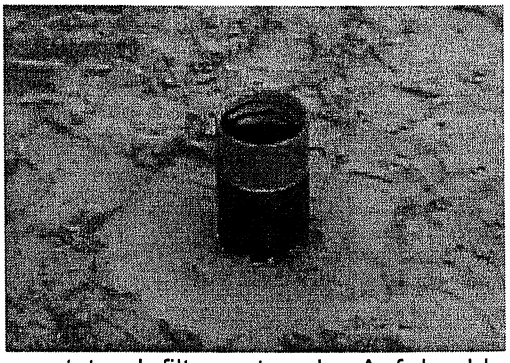


Feststellung der biologischen Aktivität



Die Spatenprobe gibt zwar klare Hinweise für das Vorhandensein, das Ausmass und die Art der biologischen Aktivität in einem Boden, die Diagnose bleibt aber auf den Oberboden und die oberste Unterbodenschicht begrenzt. Tiefer anstehende, biologisch nicht erschliessbare Verdichtungen oder Staunässen bleiben oft unentdeckt. Wenn auf der rekultivierten Fläche die Luzerne und der Rotklee stellenweise verschwinden oder sich nur kümmerlich entwickeln, sind das klare, an der Oberfläche mühelos feststellbare Hinweise für unsichtbare Mängel. Die nebenstehende Abbildung zeigt einen horizontalen Schnitt auf 50 cm Tiefe in der Aufsicht in nat. Grösse. Wurzel- und Wurmgänge liegen in hoher Zahl dicht beieinander, ein Zeichen guter biologischer Aktivität. Das abgebildete Muster wurde sorgfältig von Hand ausgegraben, die letzte Bodenschicht entlang natürlicher Bruchgrenzen mit dem Spatel sorgfältig abgelöst und die ganze Fläche sauber abgewischt. Dadurch werden auch feinere Makroporen sichtbar gemacht. Fehlende Poren und Wurzeln in dieser Tiefe sind ein Zeichen für mangelnde biologische Aktivität.

Messen der Infiltration (Wasserdurchlässigkeit)



Zur Infiltrationsmessung bestehen verschiedene Methoden für Feld und Labor. Für Messungen im Labor müssen ungestörte Proben entnommen werden, was nur bei skelettarmen Böden ohne allzu grossen Aufwand möglich ist. Für die Beurteilung im Feld wird das einfache Infiltrometerrohr (nach KRAMER) empfohlen. Die Messung wird im wassergesättigten Boden durchgeführt. Es muss immer mit drei bis fünf Rohren gleichzeitig gemessen werden, um die Streuung relativieren bzw. Ausreisser eliminieren zu können. Die Abbildung zeigt ein auf der freigelegten Pflugsohle, dh. etwa 30 cm tief eingesetztes Infiltrometerrohr. Auf das blanke Oberteil kann eine Reduktion aufgesetzt werden, was die Beobachtung der Sickergeschwindigkeit auch bei schlechter Durchlässigkeit erlaubt. Beträgt die Sickergeschwindigkeit beispielsweise ≤ 5 mm/h so ist der Boden nicht genügend durchlässig. Die gesättigte Wasserleitfähigkeit wird mit dem sog. k-Wert angegeben. Der Wert $k10^{-1}$ entspricht einer Geschwindigkeit von 1 mm/sec oder 3600 mm/h. Bis $k10^{-2}$ (= 360 mm/h) wird ein Boden noch als durchlässig und trocken bezeichnet. Unter $k10^{-3}$ (= 36 mm/h) muss der Boden bereits als staufeucht, unter 10^{-5} (=0.36 mm/h) als staunass eingeteilt werden. Staufeuchte Böden sind für die ackerbauliche Nutzung ungeeignet und sollten deshalb nur futterbaulich, dh. als Wiesland genutzt werden.

7 Bodenschutzmassnahmen

Boden muss vor schädlichen mechanischen Einwirkungen, gleich welcher Art, geschützt werden, damit er in seiner Fruchtbarkeit uneingeschränkt erhalten bleibt. Mögliche Einwirkungen sind:

- Befahren mit zu schweren Fahrzeugen oder in zu nassem Zustand.
- Aushub und Umlagerung in zu feuchtem, plastisch verformbarem Zustand.
- Zwischenlagerung an zu hoch und oder zu feucht geschütteten Depots.
- Befahren von Unterboden, beispielsweise beim Pflügen.
- Einsatz schwerer Vollerntemaschinen und Anhänger bei feuchtem Boden.
- Ungeeignete Bearbeitungsmethoden und Bearbeitung im nassen Zustand.

Bodenschutz bleibt also nicht allein auf den tiefbaulichen Eingriff beschränkt, er wird mit der stark zunehmenden Mechanisierung vermehrt auch in der land- und forstwirtschaftlichen Nutzung des Bodens beachtet werden müssen. Die nachstehenden Ausführungen sind auf den Tiefbau abgestimmt, gelten bezüglich des Schutzes vor mechanischer Schädigung, (Verdichtung), analog auch für die Nutzung (Befahren/Bearbeiten) des Bodens.

7.1 Verdichtungsempfindlichkeit aufgrund des Bodentyps

Die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens nimmt mit der Bodenfeuchte zu. Da Bodentypen bei uns primär aufgrund ihres Wasserhaushaltes eingeteilt sind, kann die jeweilige Empfindlichkeit gemäß nachstehender Tabelle grob zugeordnet werden. Entsprechend dieser Zuordnung werden die Schutzmaßnahmen vorgesehen. Bei der Bodenart (Textur) sind vor allem die Anteile an Schluff (U) und Ton (T) in der Feinerde und der erhöhte Skelettgehalt relevant.

Bodentyp (gemäß Kartieranleitung FAL Zürich-Reckenholz, 1997)	**Verdichtungs-empfindlichkeit**	**Belastbarkeit / Befahrbarkeit**
• organische Böden • häufig bis zur Oberfläche vernässte Böden • selten bis zur Oberfläche porengesättigte, stauwassergeprägte bzw. ton- oder schluffreiche Böden	extrem empfindlich	• dauernd verdichtungsgefährdet • schon geringe Auflasten können die Bodenstruktur irreversibel schädigen.
• Grund- und hangwassergeprägte, jedoch selten bis zur Oberfläche wassergesättigte Böden • Stau, -hang- und grundwasserbeeiflusste Schluffböden mit > 50% schluff und < 10% Ton	stark empfindlich	• nur beschränkt mechanisch belastbar, ausser während längerer Trockenperioden • eingeschränkte Maschinenwahl
• stau-, hang- oder grundwasserbeeinflusste Böden • Schluffböden mit > 50% Schluff und < 10% Ton mit ausgeglichenem Luft- und Wasserhaushalt	normal empfindlich	• ausserhalb der Vegetationszeit nur eingeschränkt mechanisch belastbar • Perioden mit ausgetrocknetem Boden optimal nutzen • erhöhte Sorgfalt beim Befahren
• Böden mit ausgeglichenem Luft- und Wasserhaushalt und stabilem Gefüge (ohne Schluffböden mit mehr als 50 % Schluff und weniger als 10 % Ton)	schwach empfindlich	• nach entsprechender Abtrocknung im allgemeinen gut belastbar • übliche Sorgfalt
• Böden mit einem Skelettanteil von mehr als 50 % • kies-/steinreiche Sande, weniger als 50 % Schluff, weniger als 10 % Ton	kaum empfindlich	• kaum druckempfindlich • im allgemeinen gut belastbar • übliche Sorgfalt

Tabellarische Darstellung zur Ermittlung der Verdichtungsempfindlichkeit resp. Befahrbarkeit von Böden (Quelle: Amt für Umweltschutz und Energie, Bau- und Umweltschutzdirektion Kanton Basel-Landschaft, Liestal 1998).

7.2 Befahrbarkeit aufgrund der Saugspannung

Beim Befahren wird Boden immer mehr oder weniger verdichtet. Da der Boden aus ca. 50% Hohlräumen besteht, bedeutet jede Verdichtung ein Verlust an Porenvolumen. Besonders die großen, für den Wasser,- Luft- und Stofftransport verantwortlichen Grobporen sind von der Verdichtung betroffen. Die Erfahrung zeigt, dass nasser Boden weniger tragfähig ist. Je tiefere Spuren sich bilden, umso mehr Hohlraum ist zerstört.
Als Bemessungsgrundlage für die Befahrbarkeit eines Bodens gilt also die Saugspannung und nicht der Wassergehalt (in Vol-%), da dieser von der Bodenart, bzw. der spezifischen Porenverteilung und dem Porenvolumen abhängt. Mit der Saugspannung kann der Grad der Entwässerung d r einzelnen Porenklassen (s. Tabelle S.43)

Messung der Saugspannung mit Tensiometer

Der Zusammenhang von Boden - Porenraum- Bodenwasser und der Befahrbarkeit des Bodens aufgrund der Saugspannung (Wasserspannung innerhalb der Bodenmatrix) erklärt sich folgendermaßen: Natürlich gewachsener Boden besteht aus Festanteilen und den dazwischen liegenden Hohlräumen. Im Durchschnitt kann grob von 50 Volumen-% Festanteilen und ebenso vielen Volumen-% Hohlräumen ausgegangen werden. Die Hohlräume sind als stabiles Porensystem strukturiert und stellen so ein kommunizierendes System für den Gas- und Wasserhaushalt des Bodens zur Verfügung. Niederschlagswasser dringt über das Porensystem in den Boden ein. Bei Wassersättigung unterliegt das Bodenwasser fast ausschliesslich der Gravitationskraft und der Boden entwässert sich unter dem Einfluss dieser Kraft. Im wasserungesättigten Porenraum baut sich, bedingt durch die an den Wassermenisken wirkenden Randkräfte (Kapillareffekt) ein Kapillar-Potential (Energie) auf. Dieser, aus dem Energieinhalt des Bodenwassers abgeleitete Druck wird als Kapillardruck (mit negativem Vorzeichen:"Sog" oder geläufiger als Saugspannung S bezeichnet. Die Saugspannung führt zwischen den festen Bodenteilchen zu einer das Gefüge stabilisierenden Wirkung und hat damit einen direkten Einfluss auf die mechanische Belastbarkeit des Bodens.
Messinstrument Tensiometer: Das zur Messung der Saugspannung verwendete Instrument heisst Tensiometer. Dabei wird durch eine poröse Keramikzelle im Boden ("Kerze") der hydraulische Kontakt vom Bodenwasser zu einem Manometer-Teil hergestellt. Gebräuchliche Masseinheiten sind bar = 105N x m^{-2} = 10^5Pa = 10^3 hPa (= 1.032 atm = 1032 cmWS).
Tensiometer-Einbau und Wartung: Die gebräuchlichen Feld-Tensiometer bestehen aus einem Kunststoff-Rohr (meist Durchmesser 7/8) mit einer porösen Keramikzelle (Kontakt zum Bodenwasser) und einem am obern Ende angebrachten Manometer.
Für die Messung der Saugspannung als Mass zur Beurteilung der aktuellen Verdichtungsempfindlichkeit werden die Tensiometer in einer Tiefe von 35 cm eingebaut. Es werden pro Standort mehrere Tensiometer (in der Regel 5 Stück) benötigt.
Beim Einbau wird normalerweise mit einem Bohrer von 22 mm (Durchmesser nur ganz knapp über dem Rohrdurchmesser der Tensiometer) ein Loch bis in die gewünschte Tiefe vorgebohrt, dasTensiometer eingeführt, und im Bereich der Keramikzelle mit einer Schluff-Suspension der Kontakt zur Boden-Matrix sichergestellt. Die Druckübertragung vom Bodenwasser auf das Manometer erfolgt über das Wasser im Schaft. Bei anhaltend hoher Saugspannung kommt es dabei zu Blasenbildung, was eine regelmässige Kontrolle, Entlüften und ev. Nachfüllen erfordert.
Eichung und Kontrolle: Bei Einstellen ins Wasser (auf Kerzenhöhe) muss das Manometer 0 anzeigen. Es existieren Tensiometer mit Eichschraube im Manometer (Nachteil: manipulierbar)
Ablesung und Korrektur: Die Ablesung der Manometer erfolgt am besten immer um die gleiche Tageszeit. Der Median aus den jeweils 5 Werten muss um die Schafthöhe (Saugspannung des hängenden Wassers) pro 10 cm um 1 Cb korrigiert d.h. vermindert werden.

Berechnung der zulässigen Saugspannung

Die zulässige Saugspannung (S_{zul} in Centibar) für das Befahren eines Bodens kann für jede zum Einsatz kommende Maschine individuell berechnet werden, wenn deren Gesamtgewicht (Gg) und der Kontaktflächendruck (FP) bekannt sind:

S_{zul} in Cb = Gg (Tonnen) x FP (bar) x 1.25

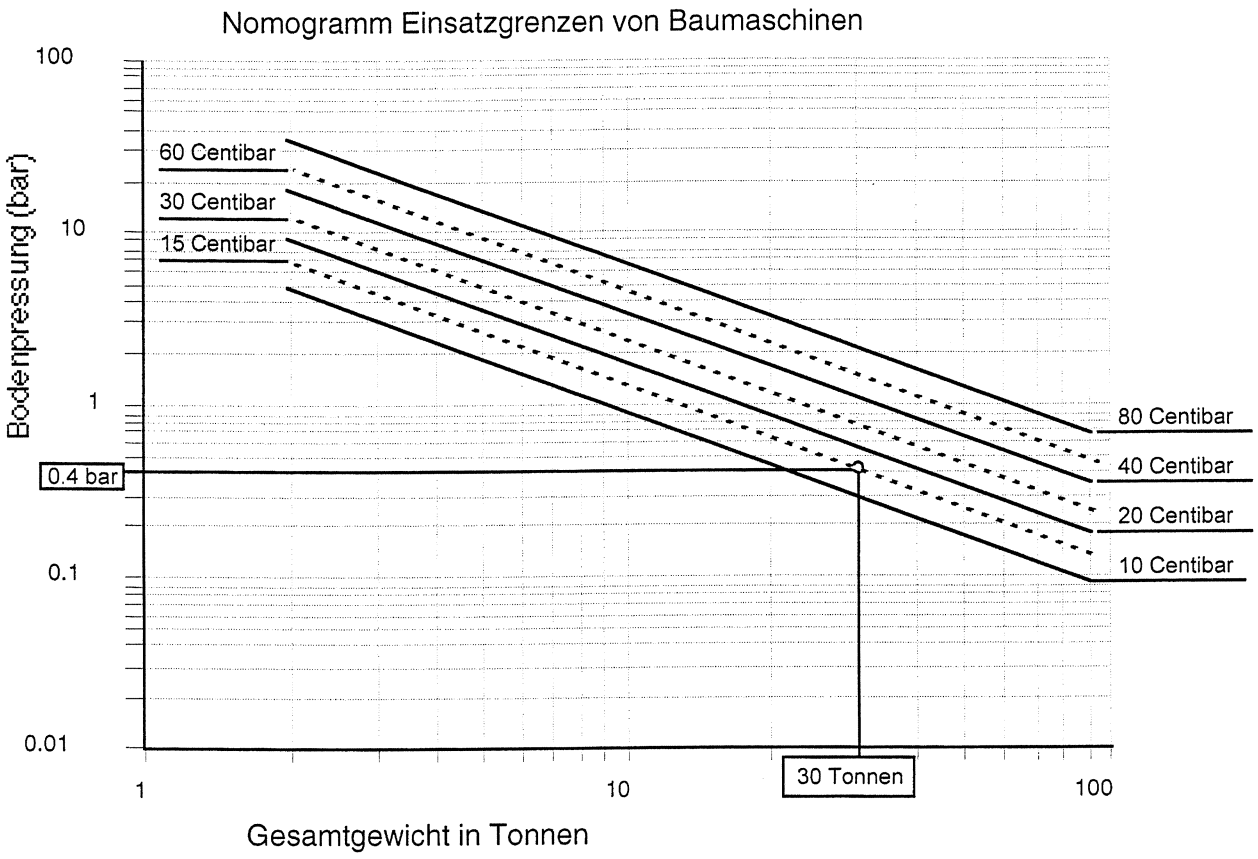
Die zulässige Saugspannung ist weiter abhängig von der Bodenart: Bei Böden mit Tongehalt > 30 % muss die zulässige Saugspannungen um +10 Cb erhöht werden. In weniger verdichtungsempfindlichen Böden, wie reinen Sand- oder skelettreichen Böden (Skelettgehalt > 50 Vol%), ist der Einsatz leichter Baumaschinen ab pF 1.8 (= 6.3 Cb) zulässig.

pF	cm Wasser-säule (WS)	Centibar	bar	Entwässerung nach Porengrösse technische und pflanzenbauliche Orientierungswerte
Kein Baumaschineneinsatz				
1.8	63	6.3	0.063	> 50µm **weite Grobporen entwässert**
2	100	10	0.1	> 30 µm Poren entwässern
Einsatz leichterer Baumaschinen möglich				
2.5	315	31.5	0.315	> 10µm **enge Grobporen entwässert**
2.7	500	50	0.5	> 6 µm Poren entwässern
Auch schwerere Maschinen einsetzbar				
2.8	630	63	0.63	< 5 µm **weite Mittelporen entwässert**
2.9	800	80	0.8	Messgrenze Tensiometer
3.0	1000	100	1.0	Pflanzen beginnen zu welken
3.3	2000	200	2.0	Messgrenze elektrischer Sonden
3.7	5000	500	5.0	Steppen, Wüsten
4.0	10000	1000	10	Überlebensgrenze letzter Wüstenpflanzen
4.2	15000	1500	15	permanenter Welkepunkt, **Mittelporen entwässert**

In dieser Tabelle sind gebräuchlichsten Saugspannungsmasse einigen bodenphysikalischen technischen und pflanzenphysiologischen Eckwerten gegenübergestellt und die Befahrbarkeit für Baumaschinen grob unterteilt.

Praktische Anwendung

Konkret wurde die Tragfähigkeitsbestimmung erstmals beim Gasleitungsbau im großen Rahmen praktisch umgesetzt. Grundlage bilden die Richtlinien zum Schutze des Bodens beim Bau unterirdisch verlegter Rohrleitungen (Bodenschutzrichtlinien) des BEW vom 1.1.1997. Auf der Basis entsprechender Feldversuche der eidg. Forschungsanstalt für Landtechnik in Tänikon (FAT) wurde die Wirkung eines Raupenfahrzeuges bei unterschiedlicher Saugspannung und unterschiedlicher Gesamtlast gemessen. (Für Radfahrzeuge ist die Berechnung der Flächenpressung weniger einfach als bei Raupenfahrwerken, bei welchen die Aufstandsfläche als Produkt von Achsabstand und Plattenbreite klar definiert ist). Das nachfolgende Nomogramm basiert auf den dabei erzielten Eckwerte. Als Ablesebeispiel ist hier die zulässige Saugspannung (Schnittpunkt) für eine Maschine mit 30 Tonnen Gesamtgewicht bei einer Boden- bzw. Flächenpressung von 0.4 bar gesucht.



Beispiel:	Gesamtgewicht	30 Tonnen
	Bodenpressung	0.4 bar
	Einsatzgrenze	15 Centibar

Berechnungsformel für die Aufstandsfläche von Radfahrzeugen

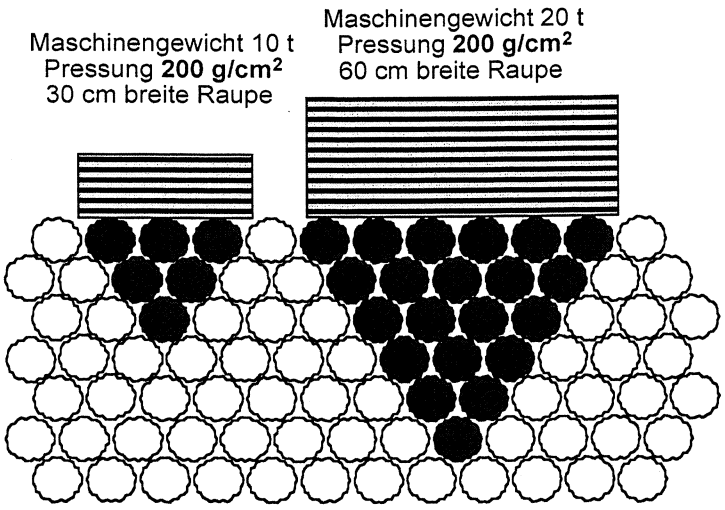
Während die Berechnung der Aufstandsfläche von Raupen anhand der Raupenbreite und des Achsabstandes einfach zu berechnen ist, müssen wir uns bei Radfahrzeugen mit einer Annäherung, beispielsweise nach INNS-KOGLUR, behelfen.

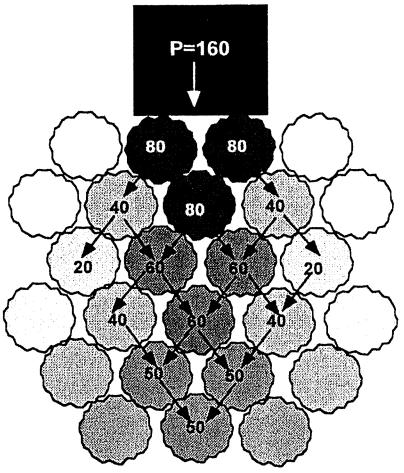
Aufstands- oder Kontaktfläche A = (Breite B x 0.31) x (Durchmesser D x 0.87)

Diese Formel gilt für Normalreifen, und kann deshalb nicht ohne weiteres für ausgesprochene Niederdruck- und Breitreifen (Terra- und Ballonreifen) übernommen werden.

7.3 Einfluss des Gewichtes und der Flächenpressung

Die Verdichtung des Unterbodens, die Zerstörung seines Porensystems und seiner Struktur werden als Schadverdichtung bezeichnet, da sie den Boden als Pflanzenstandort und in seinen natürlichen Funktionen (Wasser- und Luftleitfähigkeit, Wasser und Nährstoffspeichervermögen), empfindlich und dauerhaft beeinträchtigen. Unterbodenverdichtungen sind praktisch kaum wiedergutzumachen, da die biologische Neuerschliessung von verdichtetem Unterboden nicht mehr funktioniert und eine mechanische Wegbereitung, zum Beispiel in Form der Tieflockerung, einen mehrjährigen Nutzungsverzicht zugunsten einer ungestörten Regenerations- und Konsolidierungsphase voraussetzt.





Schema links: Die Auffassung, dass mit der Beibehaltung des Flächendruckes durch entsprechende Verbreiterung der Reifen oder Raupenfahrwerke, die Wirkung in die Tiefe vermieden werden kann, ist falsch. Die Verdichtungswirkung von 200 g/cm^2 der Maschine mit dem doppelten Gewichtes erreicht gemäß abgebildeten Walzenmodell nach Hartge/Horn bei gleichem Flächendruck des breiten Reifens (rechts) die doppelte Tiefe. (Mit echten Moorfahrwerken, d.h. extrabreiten Raupenplatten, werden auch für schwerere Baumaschinen wie Bagger, Dozer, und Dumper Flächenpressungen unter 200g/cm^2 erzielt. Wird die Flächenpressung soweit herabgesetzt, so können Schadverdichtungen ausgeschlossen werden).

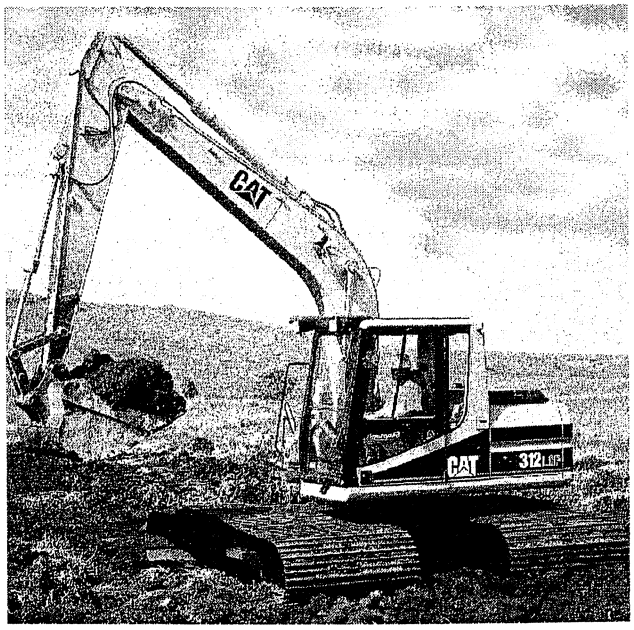
Schema rechts: Die Druckübertragung im Dreieck ist stark schematisiert und zeigt die Wirkung desselben Flächendruckes, bei zunehmendem Gewicht in zunehmende Tiefe. Die vom Druck beeinflusste Zone ist eher rundlich und wird deshalb oft als sog. Druckzwiebel dargestellt. Je trockener (härter) der Boden und je weicher ein Reifen ist, umso weniger tief reicht seine verdichtende Wirkung. Je feuchter ein Boden und je ein Reifen, umso tiefer die Wirkung.
Beide Darstellungen sind stark vereinfachte, zweidimensionale Modelle der Druckübertragung. Das Prinzip beweist jedoch, dass das Gesamtgewicht einer Maschine für die Tiefenwirkung von Bodenverdichtungen verantwortlich ist und deshalb immer möglichst niedrig sein muss.

Grundsatz:
Je höher das Gewicht ist, umso tiefer wirkt es in den Unterboden, und zwar unabhängig von der Flächenpressung. Die Verteilung des Gewichtes (Vergrösserung der Aufstandsfläche) schont vor allem den oberen Bodenbereich.

7.3 Druckverteilung/Pisten

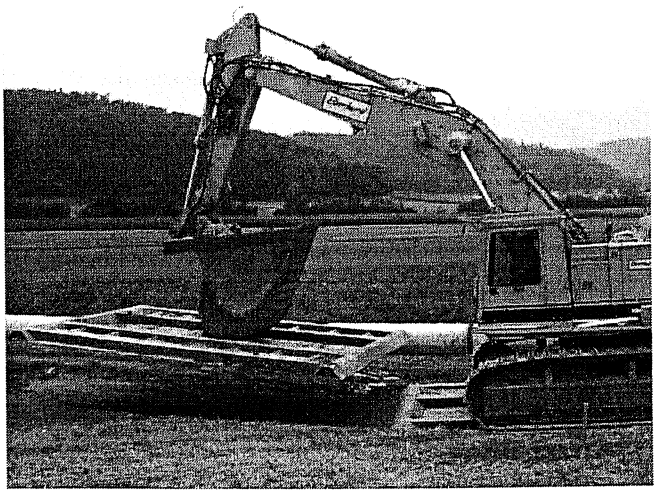
Die nachstehend beschriebenen Einrichtungen (Schutzmaßnahmen) konzentrieren sich vor allem auf den mechanischen Bodenschutz im tiefbaulichen Einsatz.

Moorfahrwerke



Moorfahrwerke bilden den besten und sichersten Schutz empfindlicher Böden vor Schadverdichtungen, da sie die Flächenpressung auch bei schweren Maschinen unter 300g/cm^2 zu senken vermögen. Das abgebildete Beispiel zeigt einen der wenigen im Einsatz stehenden „echten" Moorbagger (Raupenbreite 140 cm). Bei einem Gesamtgewicht von 15 Tonnen weist die Maschine eine Flächenpreßung von nur 160 g/cm^2 (= 0.16 bar) auf.
Leider sind diese Maschinen vor allem infolge der hohen Installationskosten (Raupen müssen infolge Überbreite für den Strassentransport demontiert, oder es muss eine Spezialbewilligung eingeholt und bezahlt werden) mit normalen Baumaschinen nicht konkurrenzfähig. Sie müssen deshalb in der Ausschreibung genau definiert sein.

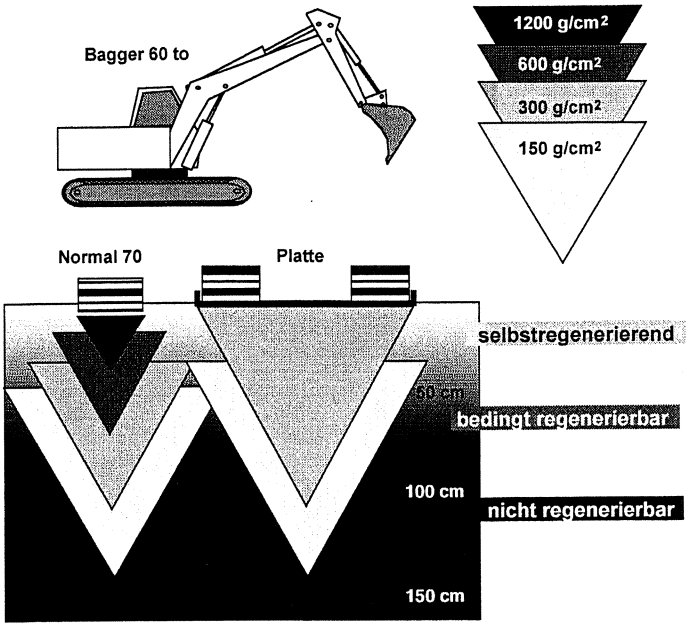
Druckverteilplatten

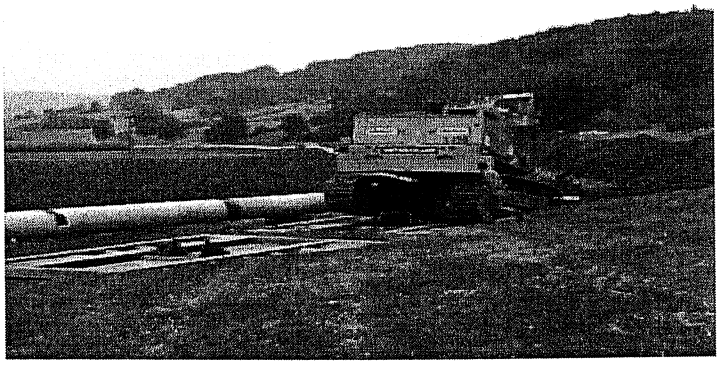


Die Vergrößerung der Aufstandsfläche kann auch mit dem Auslegen von starren Druckverteilplatten (Bild) oder Baggermatratzen (auf Drahtseilen aufgereihte Holzbohlen) erreicht werden. Die nebenstehende Abbildung zeigt einen 70 to- Bagger beim Verlegen einer starren Druckverteilplatte. Dies scheint auf den ersten Blick eine elegante Lösung zu sein, da sich die Flächenpreßung, zumindest theoretisch, um mehr als die Hälfte verringern lässt. Bei näherer Überprüfung zeigt sich aber, dass ein halb so schwerer Bagger mit Spezialfahrwerk praktisch die gleiche Grableistung erbringt, weil das Umsetzen der Platten, vor allem beim Versetzen der Maschine über längere Strecken, als zeitraubende Operation entfällt. (Auf den Verlad dieser Grossbagger wird nach Möglichkeit verzichtet, weil sowohl spezielle Anhänger als auch eine Spezialbewilligung für den Strassentransport nötig sind) Es ist deshalb anzunehmen (und auch beobachtet worden) dass für des Versetzen der Maschine auf das Umsetzen der Platten verzichtet wird.

Die schematische Darstellung rechts soll die Wirkung der Platte bezüglich Verminderung der Flächenpressung bzw. der Druckverteilung aufzeigen:

- Durch die mit der Platte erreichte 4-fache Vergrößerung der Aufstandsfläche (rechts) wird der Flächendruck der Raupe von 1200 g/cm^2 (links) auf 300 g/cm^2 reduziert.
- Anhand der Druckverteilung im Boden (Walzenmodell) lässt sich zeigen, dass sich der übertragene Druck in die Tiefe hin abbaut, dass aber der Druck bei hohem Gewicht in größere, nicht mehr regenerierbare Tiefen wirkt.





Auf nebenstehendem Bild wird deutlich, dass die Druckverteilung nur theoretisch stattfindet. Während der 70-to Bagger mit seinem kurzen Fahrwerk beim Losreissen des Löffels im Graben „kopfsteht", ist es dem leichteren Bagger dank langem Fahrwerk möglich, die volle Grableistung bei besserer Gewichtsverteilung und somit besserer Bodenschonung ohne aufwendige Hilfsmittel zu erbringen. Das abgebildete Beispiel zeigt eine aufwendige und zudem wenig wirksame Art praktischen Bodenschutzes. Es wird diesem Kapitel deshalb vorangestellt, weil ein größeres Unternehmen damit seine Bemühungen zum Bodenschutz suggerieren will. Damit werden aber all jene Unternehmen bestraft, die im harten Preiskampf bei der Ausschreibung mit ihren viel besser geeigneten und speziell ausgerüsteten leichteren Maschinen unterliegen. Es ist nicht zu bestreiten, dass im Pipelinebau zum Teil über 40 to schwere Maschinen (sog. Seitenbäume) für das sichere Verlegen (Absenken) grosskalibriger Rohrstränge nötig sind. Für das Öffnen eines 2.5 - 3 m tiefen Rohrgrabens genügen jedoch Bagger bescheidenen Kalibers. Der Bau der TRG II, der Gasleitung mit dem größten je in der Schweiz gebauten Rohrdurchmesser, hat dies ausreichend bestätigt. Für alle Grabarbeiten und auch das Wiedereindecken wurden vorzugweise Bagger ≤ 20 to Gewicht eingesetzt.

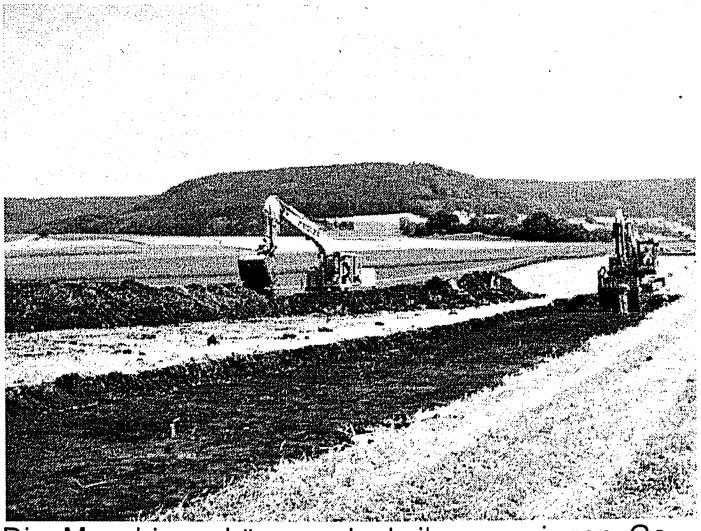
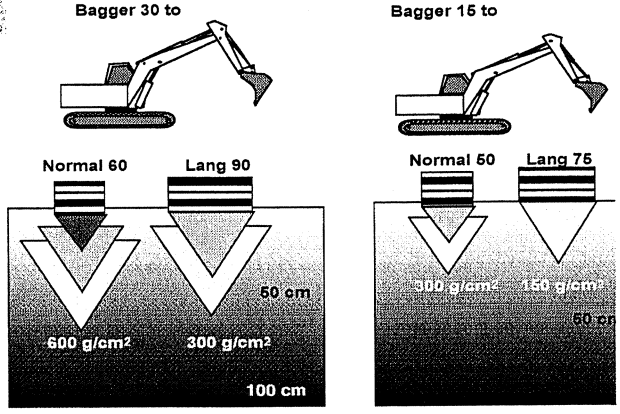


Bild links: Zwei CAT 215 mit Moorfahrwerk beim Abhumusieren des Grabenbereiches. Auf den ersten Blick scheint die abgebildete Arbeit umständlich bzw. wenig effizient angeordnet. Die Praxis zeigt aber, dass auf diese Art die relativ geringe Reichweite der leichten Maschinen nicht ausgereizt ist, d.h. im effizienten Auslegerwinkel gearbeitet und so von beiden Maschinen die maximale Leistung erreicht wird. Zudem wird das Humusdepot im gleichen Arbeitsgang auch außenseitig sauber vorbereitet und zur Begrünung fertig angelegt.

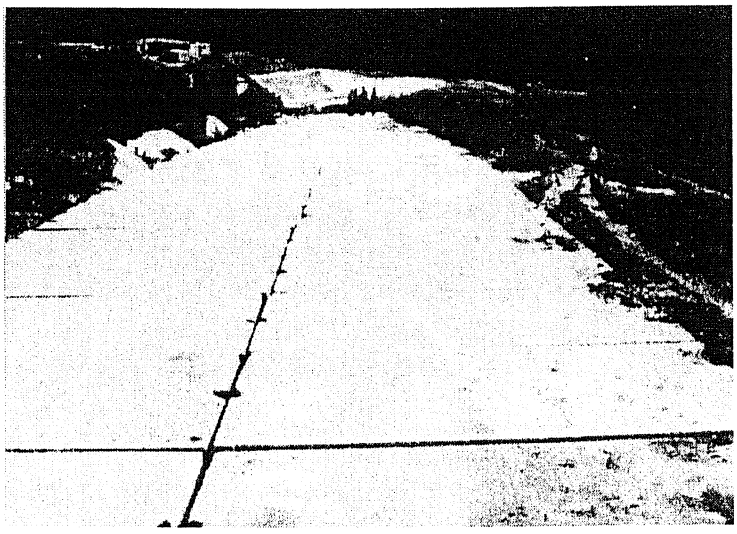
Die Maschinen können dank ihres geringen Gewichtes und der geringen Flächenpreßung bei der minimal zulässigen Saugspannung eingesetzt werden, da Verpreßungen immer innerhalb des selbstregenerierenden belebten Oberbodenbereiches (Maschinen bis ca. 15 t Gewicht) stattfindet oder auf die regenerierbare Tiefe (Maschinen bis ca. 30 t Gewicht) beschränkt werden kann, wenn gleichzeitig die Flächenpreßung mit der Verwendung von angepasstem Fahrwerk unter 400 g/cm^2 gesenkt wird (siehe Schema rechts).



Baggermatratzen aus Holz

Als temporäre Transportpisten sind die sog. Baggermatratzen vor allem im ebenen Gelände gut geeignet. Sie werden vorzugsweise auf den gewachsenen Boden verlegt. Im Beispiel (Bild links) wurde auf Betreiben des Landeigentümers vorgängig „abhumusiert" Damit geht der Schutz- und Verteileffekt des Oberbodens verloren. Baggermatratzen aus einheimischem Fichtenstammholz sind beim Einsatz schwerer Fahrzeuge mit Stegplattenraupen (Seitenbäume) leider ziemlich kurzlebig. Hartholzmatratzen bestehen meist aus tropischen Hölzern und müssen deshalb aus oekologischen Gründen abgelehnt werden. Sie sind zwar widerstandsfähiger gegen Verletzung durch die Raupen, aber schon im leicht feuchten Zustand sehr glitschig und entsprechend gefährlich. Sie lassen sich deshalb vor allem bei Seitenneigung nicht mehr einsetzen.

Mobile Betonpisten



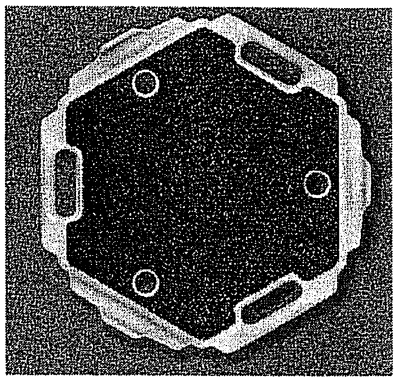
Im Gegensatz zu den flexiblen und viel leichteren Holzmatratzen muss für starre Betonplatten unebenes Terrain vorplaniert werden, damit die gewünschte Befahrbarkeit einerseits und die gleichmäßige Druckverteilung anderseits gewährleistet sind. Damit ist ein grundsätzlich anzustrebendes Ziel, Boden unter temporären Pisten in seinem Aufbau ungestört zu belassen, mit der Verwendung von Plattenpisten in Frage gestellt. Eine einzelne Betonplatte erträgt eine Auflast von 30 to und überträgt dabei einen Bodendruck von 0.5 bar. Die Platten sind an allen vier Seiten mit Biegeeisen versehen und können aneinandergehängt werden. Vorfabrizierte armierte Betonpisten wurden 1993 im Standardmass 200x300x19cm vom Prefa-Werk Bratislava angeboten. (Bau der Transitgasleitung II). Die Platten werden mit verschiedener Oberfläche (gewischt, gerillt oder gewaschen) in Rauhigkeit auf Wunsch des Kunden hergestellt. Das Gewicht einer Platte beträgt 3170 kg bei einem Volumen von 1.269 m^3 pro Platte. Der Preis betrug 1993 Fr 127.-/m^2 franko Baustelle, bei einer Liefermenge von total 23'000 m2

Betonpisten kamen bei uns bisher nie im größeren Rahmen zum Einsatz. Auch im erwähnten Projekt wurden die Spezialbaustellen mit konventionellen Kiespisten, zT. mit bituminösem Belag, erschlossen.

Pisten aus steckbaren Sechseckplatten

Sechseckplatten aus Kunststoff finden vor allem als temporäre Parkflächen und Fußgängerzonen auf offenen Messegeländen und anderen Freiluftveranstaltungen Anwendung. Sie sind in dieser leichten Ausführung für Überfahrten mit leichteren Fahrzeugen und zur Schonung des Grasbestandes allgemein geeignet.

Die Platten müssen vor allem bei längerem Gebrauch auf ein Vlies verlegt werden. Im tiefbaulichen Einsatz bei nassem Wetter ist diese Pistenart gegenüber der querstarren Baggermatratze im Nachteil, da sich vor allem beim Befahren mit schweren Lastwagen bereits nach kurzer Zeit Spurrinnen bilden.



Für den tiefbaulichen Einsatz und eine häufige Wiederverwendbarkeit kommen eher die robusten Druckgussplatten zum Einsatz. Sie haben gegenüber den Betonplatten den Vorteil des geringeren Gewichtes und Transportvolumens. Sie können in mäßig coupiertem Gelände, ähnlich den Holzmatratzen, ohne vorheriges Planieren verlegt werden. Für den großflächigen Einsatz werden zusammengesteckte Platten wie Faltteppiche mit Speziallastwagen verlegt. Ihr praktischer Einsatz im großen Rahmen blieb bisher auf den militärischen Bereich (Bundeswehr D) beschränkt, denn die Sechseckplatten sind zur Zeit noch ziemlich teuer.

Geschüttete Pisten ohne Oberbodenabtrag (Kiespisten)

Diese Pistenart ist bekannt, erprobt und verbreitet. Auf die Anforderungen an Material, Schüttmächtigkeit und Verdichtung wird deshalb nicht eingegangen. Für viele Praktiker wirkt die Forderung des Bodenschutzes befremdend, beim Bau temporärer Pisten auf das vorgängige Abtragen der Vegetationsschicht (sog. Abhumusieren) und das Einlegen von Geotextilien (als Trennschicht) zu verzichten. Als Trennschicht kann ebensogut der Grasbestand dienen.
Sofern die geschüttete Piste genügend dimensioniert und vorverdichtet wird kann die befürchtete Durchmischung des Oberbodens mit Steinen vermieden werden. Wirksam und hilfreich ist das vorgängige Begrünen der beanspruchten Flächen. Je länger ein Grasbestand sich entwikkeln kann, umso dichter und stabiler ist auch das Wurzelwerk, und umso größer ist seine mechanische Schutzwirkung.
Je trockener der Boden beim Schütten ist, umso besser. Das Gras hilft mit, den Boden rascher abtrocknen zu lassen (der Grasbestand verdunstet pro Tag im Sommer bis 5 Liter Wasser/m^2
Die verdichtete Piste lässt in der Regel kein Wasser eindringen, so dass der abgedeckte Bereich trocken und tragfähig bleibt, sofern der Boden nicht durch kapillaren Aufstieg oberflächennahen Grund- bzw. Stau- oder Hangwassers vernässt (Gleye, Pseudogleye). Je mehr die Piste mit dem Untergrund durchfedert (Deflektion) umso schneller ist eine Vernässung möglich. Die nötige Stabilisierung kann oft nur mit aufwendiger Absenkung des Wasserspiegels (z.B. mittels Wellpoint-Verfahren) erreicht werden.

Pisten aus Aushubmaterial

Für den Aufbau von Pisten werden bezüglich seiner Zusammensetzung folgende Anforderungen an das vorhandene Aushubmaterial gestellt:

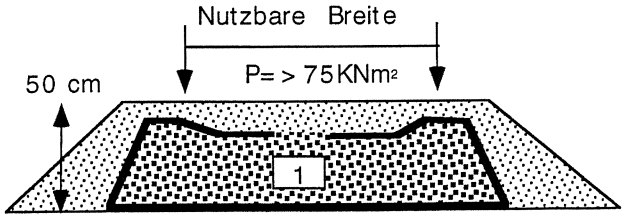
Kies und Steinanteil	> 50 Vol.-%
Tongehalt total	< 5 Vol.-%
Schluffgehalt total	< 25 Vol.-%

Bei höherem Schluff- oder Tongehalt wird die Piste im nassen Zustand unstabil, ebenso bei tieferem Skelettgehalt. Leider fehlt in der Praxis solcher Aushub am ehesten gerade dort, wo für empfindliche Böden schützende Pisten am dringendsten benötigt werden.

Stabilisierte Pisten

Wenn Pisten aus stabilisiertem Aushub erwogen werden sind diese von Grund auf schichtweise zu stabilisieren. Diese Methode ist deshalb problematisch, weil mit einem korrekten Aufbau einer effizienten Stabilisierung auch schwerer Maschineneinsatz verbunden ist. Sie wird eher die Ausnahme bilden.
Im Bild links: (Hintergrund) Kalkstreuwagen auf Raupenfahrwerk, (Mitte) Scheibenegge zum Einmischen (Vordergrund) Walze zum Verdichten. In den meisten Fällen muss das verdichtete Mischgut mindestens teilweise, wieder abgeführt werden.

Armierte Pisten



Wenn wenig geeigneter Aushub vorhanden und Kies zu teuer beizubringen ist, kann die armierte Piste eine Alternative sein.
Vorgabe: (Praktisches Beispiel beim Bau der Transitgasleitung II). Der empfindliche, tonige Boden muss vor Schadverdichtungen durch die Seitenbäume beim Absenken des verschweißten Rohrstranges genügend geschützt werden. Die zulässige Saugspannung von 50 Centibar wird nie erreicht, da es sich um staufeuchten Boden in schattiger Muldenlage handelt. Um Transporte zu vermeiden, soll eine armierte temporäre Piste aus vorhandenem, tonigem Aushub mit einer scheinbaren Kohäsion von 20kN/m^2 geschüttet werden. Für die nutzbare Pistenbreite von 3 Metern wird eine ≥6m breite Geotextilbahn benötigt, welche um den geschütteten und leicht vorverdichteten Kern (1. dunkel) eingeschlagen wird. Als Armierung wird ein ein zugfestes Polypropylen-Gewebe eingesetzt. Darüber erfolgt die Schüttung des endgültigen Profils (hellgrau)
Ergebnis: bereits mit einer Schüttmächtigkeit von 50 cm kann eine genügende Druckverteilung von 75% erreicht werden. Die Flächenpressung des Fahrzeuges von 0.75 - 0.8 bar wird auf ≤ 0.2 bar gesenkt, dh. auch bei einer punktuellen Überschreitung des Druckes um 50% bleibt die Belastung des Bodens unter der Piste ≤ 0.3 bar, womit Schadverdichtungen vermieden werden.
Nachteile: Die Beschaffungskosten für Geotextil und dessen korrekten Einbau sind beträchtlich. Die saubere Aussortierung des Geotextils beim Rückbau der Piste sowie die korrekte Entsorgung sind ebenfalls aufwendig und müssen kontrolliert werden.

Zusammenfassung

Aus der Sicht des Bodenschutzes ist der angepasste Maschineneinsatz der Verwendung mobiler Pisten vorzuziehen. Wenn mobile Pisten eingesetzt werden müssen ist projektseitig bei der Offerteingabe die Machbarkeit der Vorschläge zu prüfen. Kosten und praktischer Nutzen der einzelnen Maßnahmen sind nur bedingt vergleichbar. Bereits die Bedingungen des jeweiligen

Einsatzstandortes (Lage, Transportmöglichkeit, lokaler Markt etc.) können die Kosten eines einzelnen Produkts stark beeinflussen . Dennoch sei ein Vergleich versucht:

Tabellarische Gegenüberstellung (temporäre Pisten):

Pistenart	Holz leicht	Holz mittel	Holz schwer	Kies ≥60	Beton 20	6-Eck leicht	6-Eck schwer
Preis (Fr./ m²)	95.-	115.-	130.-	30.-	135.-	80.-	500.-
Gewicht (kg/m²)	100	170	230	1400	500	13	40
Volumen (pro m²)	0.15	0.25	0.35	0.8	0.2	0.05	0.05
Reziklierbarkeit	+++	+++	+++	+	++(+)	+++	++(+)
Verwendbarkeit	++	++	++	+	++	++	++
Nachhaltigkeit	+++	+++	+++	+(+)	++	++	+(+)
Belastbarkeit	+	++	+++	+++	++(+)	+	+++

Die Werte in obenstehende Tabelle sind relativ. Zu viele allgemeine Faktoren wie Material- und Transportpreise, Auftragsgrösse, sowie spezifische Gegebenheiten wie: Austrocknungszustand (Holz) und Verdichtungsgrad (Kies). Bei Produkten wie 6-Eck-Platten und Betonplatten bestehen wenig praktische Erfahrungen bei tiefbaulichem Einsatz, auch bezüglich der Wiederverwendbarkeit nach hartem Einsatz. Die Preise, soweit sie nicht auf Offerten basieren, wurden bei den Herstellern eingeholt (Richtpreise 1998). Bei Holzmatratzen ist die Verwendbarkeit +++ (= gut) bei Einsatz von Radfahrzeugen, ++ (=eher mäßig) bei glatten Raupen und + (= eher schlecht) bei Stegraupen wie sie z.B. auf Seitenbäumen und Dozern montiert sind. Das (+) bedeutet: unter guten Voraussetzungen erreichbar.

8. Richtlinien und Methoden

In den nachstehenden Kapiteln sind die Inhalte der wichtigsten einschlägigen Arbeitspapiere, welche den mechanischen Bodenschutz betreffen, zusammengefasst. Wissenschaft und Forschung befassen sich seit Jahren intensiv mit dem Thema, Feldmethoden werden weiterentwikkelt und verfeinert. Einige der heute empfohlenen Methoden dürften in den nächsten Jahren vereinfacht oder ersatzlos gestrichen werden, weil sie für den praktischen Einsatz zu aufwendig sind.

8.1 Klassieren der Böden nach Empfindlichkeit

Böden weisen aufgrund ihrer inneren Qualitäten unterschiedliche Empfindlichkeit, vor allem gegenüber mechanischen Einflüssen, auf. Unabhängig davon gilt, dass Böden im nassen Zustand generell empfindlicher gegenüber allen mechanischen Einflüssen sind (siehe auch Kap. 7.1). Wenn Böden aufgrund ihrer Textur als besonders empfindlich oder wenig empfindlich beurteilt werden, so ist in erster Linie die Verdichtungsempfindlichkeit (Befahren) gemeint. Die Einstufung kann aber auch für die Beurteilung der Empfindlichkeit bei anderen mechanischen Einwirkungen, beispielsweise für die zulässige Schütthöhe von Zwischenlagern (Ober- un beigezogen werden.

8.11 Empfindliche und extrem empfindliche Böden (sog. Kategorien N und E)

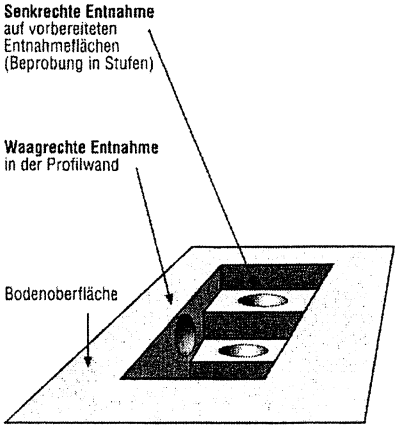
Die grobe Unterteilung in die sog. Empfindlichkeitsklassen N und E aufgrund des Tongehaltes wird im Feld mit dem Handbohrer im Rahmen der Bodenkartierung vorgenommen. Gute Übung im Umgang mit der Fühlprobe werden beim Kartierer vorausgesetzt. Diese Unterteilung wurde bis zum Inkrafttreten der revidierten Bodenschutzichtlinien BEW (1.1.97) als genügend angesehen. Der weitaus grösste Teil des Kulturlandes in der Schweiz fällt in diese beiden Kategorien.

Abgrenzung aufgrund der Lagerungsdichte

Die Bestimmung der Lagerungsdichte (auch scheinbare Dichte genannt) kann entweder mit dem Ballon-Densitometer im Feld) oder anhand von ungestörten Zylinderproben im Labor (gute Genauigkeit bei hohem Aufwand) erfolgen.

Zylinderprobe (ungestörte Probe)

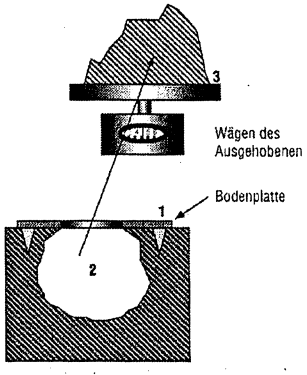
Mit einem Stechzylinder bekannten Inhalts (z.B. 100/500/1000 ml), der unter Verwendung einer Aufsatzhülse mit einem Hammer senkrecht in den gewachsenen Boden eingetrieben wird, kann ein bestimmtes Volumen ungestörten Bodens entnommen werden.
Nach dem Ausgraben des Zylinders wird beidseitig das vorstehende Erdreich mit einem Messer glatt abgetrennt und der Zylinderinhalt gewogen. Wenn nur Dichte und Wassergehalt bestimmt werden sollen, kann die Probe z.B. auch waagrecht in einer Profilwand entnommen werden. (vgl. Bild rechts) Für die Messung der Wasserleitfähigkeit ist die waagrechte Entnahme nicht zulässig.

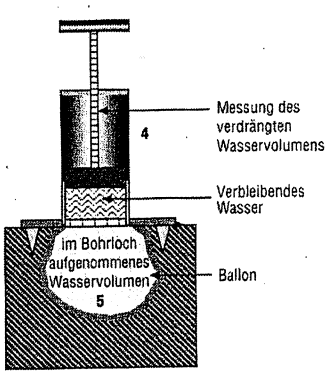


Weiterbearbeitung im Labor
Die ungestörte Probe kann im Labor zu weiteren Messungen (Porenvolumen, Poren' etc.) verwendet werden. In diesem Fall muss die Probe, in der Regel sind es Zylinder Inhalts, bis zur Weiterbearbeitung in der Metallhülse belassen und dicht verschlossen werden, damit sie nicht austrocknet.

Nachteile
Diese Methode ist nur in steinarmen bis steinfreien Böden anwendbar. Um aussagekräftige Resultate zu erreichen, müssen viele Proben pro Horizont untersucht werden (Heterogenität des Bodens). Deshalb ist diese Art der Untersuchung ziemlich zeit- und materialaufwendig.

Membran-Densitometer (Ballon-Methode)





Das frische, d.h. feldfeuchte Raumgewicht eines Bodens kann mit der sogenannten Ballon-Methode im Feld bestimmt werden. Der Vorteil dieser Methode besteht in der sofortigen Verfügbarkeit relativ genauer Resultate. Die Heterogenität des Bodens verlangt aber auch hier mehrere Messungen, damit sichere Resultate erreicht werden.

Linkes Bild
Arbeitschritte Wägung:
1 Bodenplatte fixieren
2. Ausheben und Wägen des Bodenmaterials

rechtes Bild
Arbeitsschritte Messung:
1. Apparatur aufsetzen und Wasser in Ballon pressen
2. anhand der abgelesenen Restwassermenge im Apparat das Raumvolumen des ausgehobenen Lochs bestimmen

8.12 Unempfindliche und wenig empfindliche Böden mit hohem Skelettanteil (sog.Kategorien U, Wss, Ws)

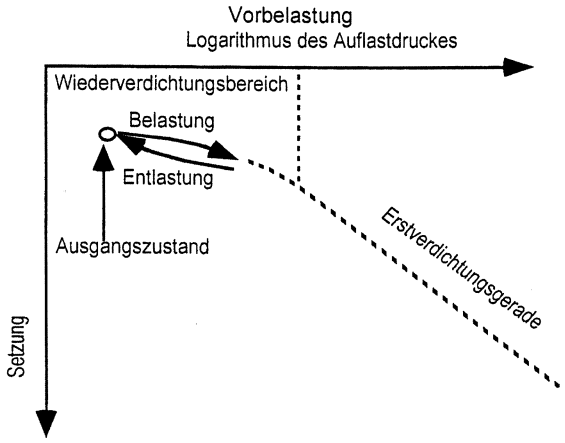
Die Bestimmung des Skelettanteils ist relativ aufwendig: Bereits ein mässiger Anteil von mittelgrossen Steinen verunmöglicht die Probenahme mit dem Bohrer. Die Betrachtung des Bodens in der Tiefe ist aber unerlässlich, da der Skelettanteil innerhalb der verschiedenen Bodenschichten stark variieren kann.
Während ein Skelettanteil von > 50 % (sog. Kategorie U) einigermassen zuverlässig erkennbar ist, wird die Unterscheidung der sog. Kategorien Wss und Ws deutlich schwieriger (Beschreibung der Einteilung gemäss Schema Seite 58). Hinzu kommt, dass in skelettreichen Böden mit hohem Grobsandanteil das Abschätzen des Ton- und Schluffanteils mittels Fühlprobe sehr schwierig ist. Die zuverlässige volumetrische Bestimmung des Skelettanteils kann nur durch Aussieben erfolgen.

8.13 Wenig empfindliche Böden aufgrund der Vorverdichtung (sog. Kategorie Wv)

Eine Vorverdichtung kann vorliegen wenn der Boden geogen, d.h. insbesondere durch die Au f-last eines Gletschers während der letzten Eiszeiten so stark verdichtet und nicht mehr gelockert wurde und der Unterboden auch heute noch so dicht ist, dass er durch das Befahren rnit Baumaschinen - ausser im sehr feuchten bis nassen Zustand - nicht weiter verdichtet werden kann. Der Nachweis der Vorverdichtung (siehe Schema auf Seite 58) ist extrem aufwendig.

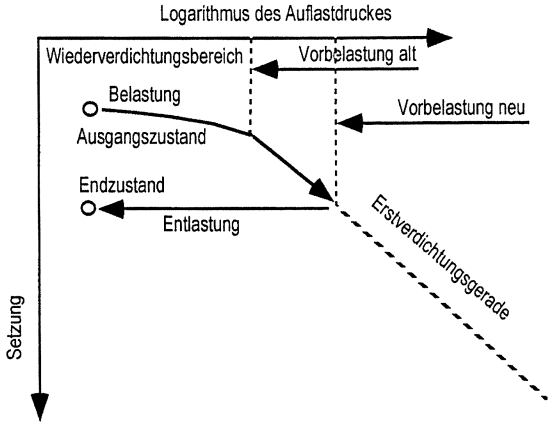
Vorbelastung = Ermittlung der Vorverdichtung m ittels Drucksetzung

Die Vorbelastung ist ein Mass für die Verdichtungsempfindlichkeit eines Bodens. Vereinfacht ausgedrückt gibt sie an, wie stark der Boden an der betreffenden Stelle bereits zuvor belastet wurde und bis zu welcher erneuten Belastung folglich keine wesentliche weitere Verdichtung zu erwarten ist.



Bis zur Vorbelastung führt eine erneute Belastung nur zu einer elastischen, d.h. reversiblen Verdichtung. Nach der Entlastung kehrt der Boden in diesem Fall also wieder in den Ausgangszustand zurück (elastische Verdichtung)
Die Vorbelastung wird nicht überschritten. Der Boden wird nur vorübergehend verdichtet, d.h. solange die Belastung anhält.

Überschreitet die Belastung die Vorbelastung, kommt es zusätzlich zur plastischen Verdichtung, d.h. einer Verdichtung, die auch nach der Entlastung erhalten bleibt (im Schema rechts: Vorbelastung neu). Der Maximalwert der neuen Belastung wird zur neuen Vorbelastung.

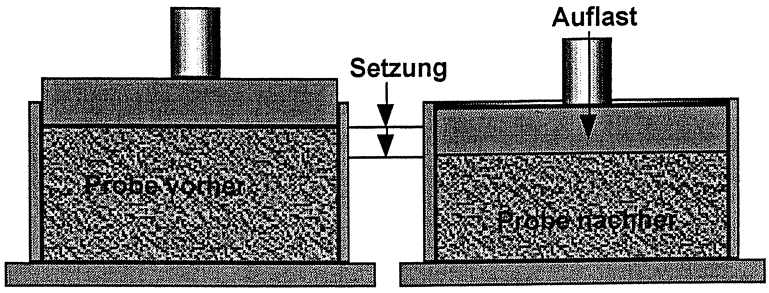


Zum Schema rechts:
Nicht reversible (plastische) Verdichtung:
Die bestehende Vorbelastung wird überschritten. Der Boden wird dauerhaft verdichtet. Je nach Ausmass kann die Bodenfruchtbarkeit beeinträchtigt sein.

Genau genommen ist die Vorbelastung nicht ein einziger Wert, sondern eine Funktion des Bodenzustands. Wesentlicher Einflussfaktor ist dabei vor allem die Bodenfeuchtigkeit. Bei nassem Boden ist die Vorbelastung grundsätzlich sehr viel niedriger als bei trockenem Boden. Das heisst, dass sich die Vorbelastung auch bei gleichbleibender Auflast ändert, wenn der Boden feuchter oder trockener wird.

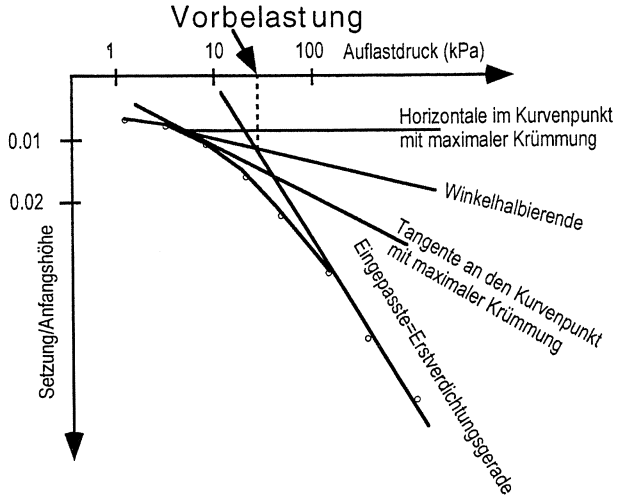
Oedometerversuch

Die Drucksetzungskurve wird mit dem Ödometerversuch bestimmt. Dabei wird auf eine Bodenprobe, die in einen starren Mantel (Ring) eingespannt ist, stirnseitig ein schrittweise erhöhter, definierter Auflastdruck aufgebracht und die jeweilige Setzung der Probe gemessen.



Die Bodenprobe muss in ihrer Lagerung ungestört sein. Es sollten möglichst grosse Proben verwendet werden. Geeignet sind insbesondere Proben, die mit sogenannten Burgerzylindern, das sind Stechzylinder von einem Liter Inhalt aus Metall, ausgestochen werden. Darin können die Proben dann auch direkt für die Messung der Drucksetzungskurve, ohne Störungen der Probe durch das Ausstossen in einen speziellen Probenring, verwendet werden.
Da die Vorbelastung stark von der Bodenfeuchtigkeit abhängt, ist es wichtig, dass bei der Bestimmung der Vorbelastung die Feuchtigkeit kontrolliert wird. Für die Anwendung im Entscheidungsablauf (nach Schema Seite 58) ist es notwendig, dass eine Saugspannung von 6 Cb (sog. "Feldkapazität" des Bodens) eingehalten wird.

Trägt man die Setzung als Funktion des Logarithmus des Auflastdruckes auf, so erhält man die Drucksetzungskurve in einer Form, in welcher der Erstbelastungsbereich erfahrungsgemäss eine Gerade bildet und der Wiederbelastungsbereich als von dieser Geraden abbiegende Kurve erkennbar ist. Da der Übergang nicht scharf, sondern gleitend ist, ist es nicht einfach, die effektive Vorbelastung aus der Kurve herauszulesen. Im Sinne einer Näherung wird die "Vorbelastung" in der Praxis mit dem Verfahren von Casagrande bestimmt, welches im folgenden kurz beschrieben ist (nebenstehendes Schema):



- Werte des aufgebrachten Auflastdruckes (logarithmische Skala) in Funktion der Werte für die relative Setzung der Proben auftragen.
- Kurve im Wiederverdichtungsbereich und Gerade im Erstverdichtungsbereich an die Messwerte anpassen. Lässt sich keine Gerade anpassen, so wurde mit der Auflast die Vorbelastung vermutlich nicht erreicht oder nicht wesentlich überschritten.
- Kurvenpunkt K bezeichnen, in dem die Kurve die grösste Krümmung aufweist (von Auge).
- Tangente der Kurve durch den Kurvenpunkt K legen.
- Horizontale durch K (parallel zur Auflast-Achse) einzeichnen.
- Winkelhalbierende zwischen der Tangente und der Horizontalen durch den Kurvenpunkt K konstruieren und mit eingepassten "Erstverdichtungsgeraden" zum Schnitt bringen. Die "Vorbelastung" entspricht dem Wert des Achsenabschnittes dieses Schnittpunktes auf der Auflastachse.

Damit die gemessene Vorbelastung als Kriterium zur Bestimmung der Verdichtungsempfindlichkeit im Entscheidungsablauf (nach dem Schema Seite 58) verwendet werden kann, sind die Proben aus einer Tiefe von 32.5 cm (Mitte der Probenhöhe) zu nehmen.

Es wird empfohlen, für die Messung der Drucksetzungskurve mit den folgenden Druckstufen zu arbeiten: 4 kPa, 12.5 kPa, 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa und 800 kPa. Für eine verlässliche Auswertung müssen mindestens zwei Druckstufen unter und zwei Druckstufen über der Vorbelastung der Probe liegen. Kann im angegebenen Druckbereich kein Übergang von einer Kurve in eine Gerade gefunden werden, so kann dies bedeuten, dass die Vorbelastung bereits bei der untersten Druckstufe überschritten wurde (bei einem lockeren Boden) oder dass die Vorbelastung noch gar nicht oder erst bei der letzten Druckstufe erreicht wurde (bei einem dichten Boden).
Die Vorbelastung kann selbst in einem relativ homogen erscheinenden Boden kleinräumig stark variieren. Es wird deshalb empfohlen, jeweils den Medianwert von mindestens drei Proben zu bestimmen.

Entscheidungsablauf zur Bestimmung der Verdichtungsempfindlichkeit

Diese Arbeitsgrundlage bildet Bestandteil der revidierten "Richtlinien zum Schutze des Bodens beim Bau unterirdisch verlegter Rohrleitungen (Bodenschutzrichtlinien)" des Bundesamtes für Energiewirtschaft.
Das Diagramm bildet die Grundlage für die Einteilung der kartierten Böden des Trassees in bezug auf die Verdichtungsempfindlichkeit des Unterbodens. Diese Einteilung bestimmt, in welcher Weise das Nomogramm (Kap. 7.1) zur Ermittlung des zulässigen Baumaschineneinsatzes in Abhängigkeit von der aktuellen Porensaugspannung anzuwenden ist, abhängig davon:

- welches die minimal erforderliche Porensaugspannung ist,
- wie der Saugspannungs-Eingangswert des Nomogramms aus der gemessenen Porensaugspannung zu bestimmen ist.
- in welchen Fällen auf die Anwendung des Nomogramms gänzlich verzichtet werden kann.

Des weiteren gibt die nachfolgende Einteilung Hinweise auf allfällige weitere Massnahmen und Einschränkungen. Es werden folgende **Hauptkategorien** unterschieden:

- N **n**ormal empfindlich
- W **w**enig empfindlich
- E **e**xtrem empfindlich
- U **u**nempfindlich

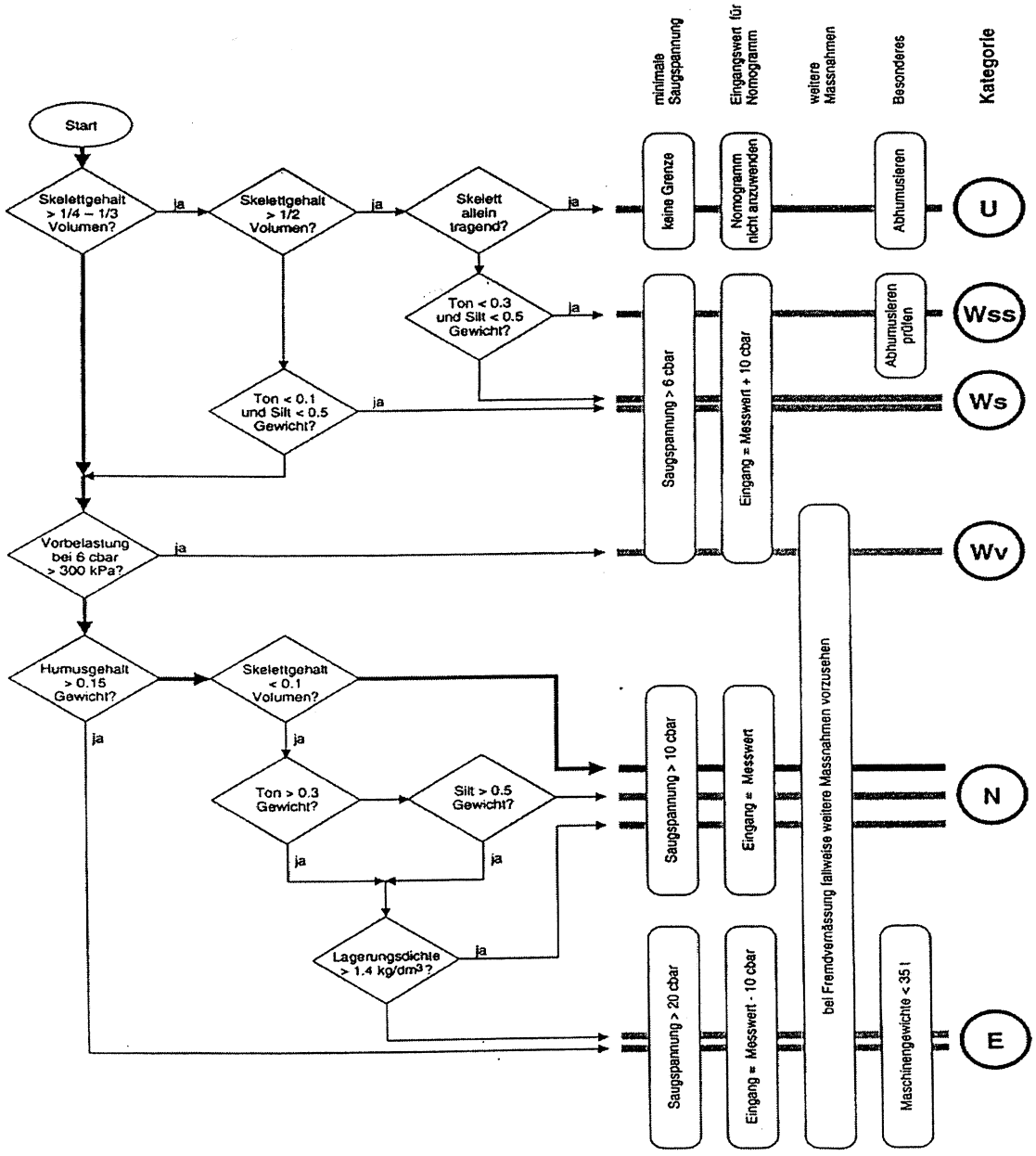
Die **Kategorie W** wird weiter unterteilt in:

- Wv **w**enig empfindlich infolge hoher **V**orbelastung
- Ws **w**enig empfindlich infolge hohen Gehaltes an **S**kelett (Steinen)
- Wss (sehr) **w**enig empfindlich infolge **s**ehr hohen Gehaltes an **S**kelett (Steinen)

Diese Einteilung geht davon aus, dass geringe Verdichtungsempfindlichkeit sowohl durch die Art der Korngrössenzusammensetzung als auch durch eine bereits bestehende Verdichtung (Vorverdichtung, gemessen als "Vorbelastung") des Bodens bedingt sein kann.
Der erstere Fall liegt vor, wenn Böden einen so hohen Anteil an Steinen und grobkörniger Feinerde aufweisen, dass sie gar nicht oder nur durch extrem hohe Belastungen durch Befahren so stark zusammengedrückt werden können, dass der Grobporenraum keine genügende Entwässerungsfähigkeit mehr gewährleistet und damit die Bodendurchlüftung beeinträchtigt wird.
Im Extremfall bildet das Skelett ein Gerüst, das die auftretenden Belastungen allein auffangen und tragen kann. Dies hängt nicht allein vom Skelettgehalt (in der Regel ca. 2/3 bis 3/4 Volumenanteil und mehr), sondern auch von der Qualität des Skeletts (Stabilität, Form der Steine) und seiner Struktur (Verzahnung, gegenseitige Abstützung der Steine) ab.
Die Einteilung erfolgt aufgrund der Bestandesaufnahme der entsprechenden Parameter im Rahmen der Bodenkartierung für das Projekt. Es handelt sich bei Parameter, die sich auf die Körnung beziehen (Skelettgehalt, Ton- und Schluffgehalt), wie auch beim Humusgehalt, primär um Schätzwerte aus der Profilansprache (nach Kartieranleitung FAL/BGS). Die gutachtliche An-

sprache dieser Parameter ist durch bodenkundlich geschulte Fachpersonen mit entsprechender Felderfahrung vorzunehmen. Vorbelastung und Lagerungsdichte sind mit Laboruntersuchungen an Bodenproben zu bestimmen. Die Vorbelastung ist dabei aus der Drucksetzungskurve zu ermitteln.

Als Grundsatz für untenstehendes Schema gilt, dass ein Kriterium explizit erfüllt sein muss, damit bei einer Entscheidung die Antwort "ja" gegeben werden kann. Ist das Kriterium nicht erfüllt, d.h. lautet die Antwort explizit "nein" oder liegen ungenügende Informationen vor, so gilt die andere Alternative. Beim Fehlen entsprechender Datengrundlagen führt der Entscheidungsweg nach diesem Grundsatz auf dem stark gezeichneten Pfad zur Kategorie N (Grundannahme).



LEGENDE: Kategorien der Verdichtungsempfindlichkeit

U	**U**nempfindlich
Wss	(sehr) **w**enig empfindlich infolge **s**ehr hohem Gehalt an **S**kelett (Steinen)
Ws	**w**enig empfindlich infolge hohem Gehalt an **S**kelett (Steinen)
Wv	**w**enig empfindlich infolge hoher **V**orbelastung
N	**n**ormal empfindlich
E	**E**xtrem empfindlich

8.2 Probenahme, Aufbereitung, Untersuchungen

Grundsätzlich wird zwischen gestörter und ungestörter Probe unterschieden. Die Entnahme der Probe, die Verpackung und Weiterbearbeitung vor der Aufbereitung im Labor sind Gegenstand umfangreicher Wegleitungen, Handbücher und Methodenbeschreibungen mit dem Ziel der Wiederholbarkeit für einen späteren Vergleich, wie dies zum Beispiel beim Nationalen (NABO) und Kantonalen Bodenbeobachtungsnetz (KABO) der Fall ist. Diesen Anforderung muss nicht nur die Aufbereitung und Analytik, sondern auch die Probenahme und Verpackung, genügen.
Akkreditierte Labors arbeiten nach Standardmethoden und nehmen regelmässig an Ringversuchen teil. Trotz immer präziser arbeitenden Geräten liegt der Fehleranteil der Analytik zur Zeit noch wesentlich über demjenigen der Beprobung.
Die tabellarische Zusammenstellung nach Einsatzgebiet und Beprobungsmethode erleichtert die Übersicht, ersetzt aber weder spezifische Wegleitungen noch Handbücher. Sie gibt vor allem Aufschluss darüber, welche Probenahme für eine bestimmte Fragestellung, bzw. Untersuchungsparameter, eingesetzt wird:

Beprobungsart / Parameter	ungestörte Probe	gestörte Probe	Besonderheiten:
Schwermetalle nach VBBo		Flächenmischprobe mit definierter Entnahmetiefe, in der Regel 0-20 cm	Entnahmegerät aus Einfachstahl (unlegiert) definierte Anzahl Einstiche Probe ungeteilt verpacken
Organische Schadstoffe: PAK, PCB etc. nach VBBo		Flächenmischprobe mit definierter Entnahmetiefe, in der Regel 0-20 cm	definierte Anzahl Einstiche Probe ungeteilt verpacken und sofort kühlen Vorgereinigte Glas- oder Aluminiumbehälter verwenden
pedologische Parameter: • Bodenart (Körnung) • Humusgehalt • pH, Kalkgehalt, KAK etc • Nährstoffspiegel/Vorrat		Parzellenweise, bei grossen Bodenunterschieden aufgeteilt beproben. Beprobungstiefe entspricht etwa der Bearbeitungstiefe	Praktischer Probensammler mit Auffangbehälter wird von Beratungsstellen ausgeliehen.
bioogische Untersuchugen: • Katalase-Index • Biomasse-ATP • Reaktivität / pot. Aktivität • CO2- Freisetzung		Wie oben oder nach spezieller Fragestellung	Biologische Untersuchungen können verfahrensbedingt mehr Zeit beanspruchen
physikalische Parameter : • Porenvolumen und Porenverteilung • Scheinbare und reelle Dichte • Durchlässigkeit (k-sat) • Sorption/Desorption • Vorbelastung	Entnahme sog. Zylinderproben mit Stechzylinder definierten Inhaltes. Beprobung im ganzen Profilbereich, Entnahme meist senkrecht, horizontale Entnahme aus der Profilwand ist möglich. Für diese Untersuchungen Ist nur die senkrechte Probendem zulässig		Die ungestörte Probenahme ist sehr schwierig bis unmöglich in skeletthaltigen und ausgetrockneten Böden. Nicht alle Labors verwenden die gleichen Zylindermasse. Vorher absprechen! Exaktes Arbeiten ist sehr wichtig (Erfahrung). Zweifelhafte Proben verwerfen und wiederholen. Proben feldfrisch dicht verschliessen.

8.3 Weiterverwendung des Bodenaushubes

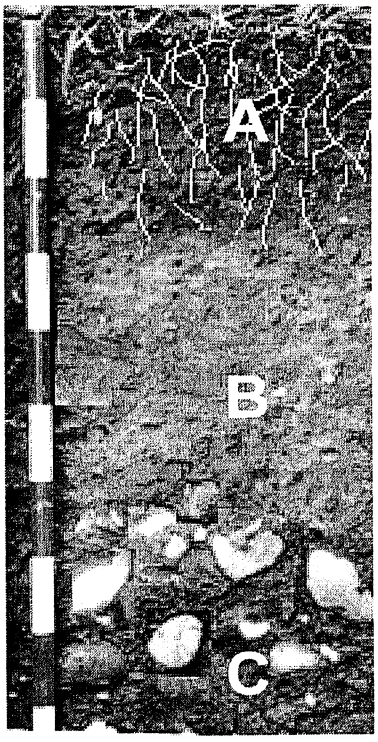
Ungeachtet, ob es sich um Bodenaushub (nach VBBo 1998) oder Bodenaushub (nach TVA) handelt, ist seine Weiterverwendung allenfalls durch die stoffliche Belastung limitiert. Die Eignung aufgrund der Kornzusammensetzung (Bodenart oder Textur) ist dabei nicht berücksichtigt und muss aufgrund der jeweiligen Zielsetzung individuell abgeklärt werden.

Bodenaushub = Beurteilung nach VBBo

Die Weiterverwendung von Bodenmaterial, bzw. seine Verwendbarkeit zum Wiederaufbau eines neuen Bodens hängt vor allem von der chemischen Belastung mit Schadstoffen ab, welche durch entsprechende Analysen ermittelt wurde. Die VBBo (Verordnung über Belastungen des Bodens) befasst sich mit dem Bodenaushub, das heisst mit dem:

Oberboden (**A-Horizont**) = Belebte, humusreiche, meist dunkel gefärbte und intensiv durchwurzelte oberste Bodenschicht

Unterboden (**B-Horizont**) = Übergangsschicht aus verwittertem Ausgangsmaterial mit der jeweils typischen Gefügeform.



Mineralischer Aushub nach TVA

Das nicht mehr oder nur noch spärlich durchwurzelte, unverwitterte, meist deutlich dichter gelagerte Ausgangsmaterial, (gemäss der schematischen Darstellung = **C Horizont**) gilt nicht mehr als Bodenaushub, sondern wird gemäss Richtlinie zur TVA (Technische Verordnung über Abfälle, Entwurf zur Vermnehmlassung 12.97) als mineralischer Aushub. Dieser wird, je nach seiner Art, auch in Abraum- oder Ausbruchmaterial (bei Fels) unterteilt.

Mineralischer Aushub umfasst demzufolge:
- Lockersedimente wie Kies, Sand, Lehm, Ton.
- Gebrochenen Fels.
- Material das von früheren Bautätigkeiten oder von Abfällen stammt.

Die Weiterverwendung für Terrainneugestaltungen, z.B. nach Kiesabbau als Grundlage (Rohplanie) für den Bodenaufbau, hängt vom allfälligen Verschmutzungszustand ab.
Gemäss TVA wird unterteilt in:
- Richtwerte U für unverschmutzten Aushub.
- Richtwerte T für tolerierbaren Aushub.

Tabellarische Aufstellung Richt- Prüf- und Orientierungswerte

Bodenaushub (siehe untenstehende Tabelle)

Wenn Ober- und Unterboden ausserhalb der angestammten Fläche wiederangelegt werden, sind bezüglich des Schadstoffgehaltes Grenzen für die Wiederverwendbarkeit gesetzt.
Bodenaushub der Kategorie I kann uneingeschränkt wiederverwendet werden für:

- Flächen für Nahrungs- und Futterproduktion
- Gartenflächen
- Waldflächen
- Kinderspielplätze
- Grundwasserschutzzonen und -areale

Bodenaushub der Kategorie II ist für die Wiederverwendung auf Flächen mit wenig nutzungsbedingtem Risiko direkter Gesundheitsgefährdung zulässig. Darunter fallen Standorte wie:

- Öffentliche Grünflächen und Parkanlagen
- Rasenflächen und Ziergärten
- Grünflächen in Industrie- und Gewerbezonen
- Böschungen entlang von Verkehrsanlagen
- Freizeit- und Sportanlagen

Parameter	VBBo Kategorie I		VBBo Kategorie II		Änderungen (seit 7.1998)	
anorganische Schadstoffe	total	löslich	total	löslich	total	löslich
Blei	50	1	300	1.5		
Cadmium	0.8	0.03	2	0.05	0.8	0.02
Kobalt	25					
Chrom	75	0.04	200	0.06	50	0.04
Fluor	400	25			700	20
Kupfer	50	0.7	100	1.4	40	
Molybdän	5					
Nickel	50	0.2	100	0.4	150	
Quecksilber	0.8		1.2			
Thallium	1					
Zink	200	0.5	350	1		
organische Schadstoffe					*normale Hintergrundgehalte*	
PCDD/F					< 2ng I-TEQ/ kg Boden	
PAK	1		5		< 0.5 mg/kg Boden	
PCB	0.05		0.25		< 0.005 mg/kg Boden	
Arom. Verbindg.	0.7		7			
Mineralöle	50		300			

Alle Werte sind, wenn in der Tabelle nicht anders vermerkt in Gramm pro Tonne zu verstehen.
Die Totalgehalte beziehen sich auf die HNO_3 -Extraktion (gemäss VBBo)
Die löslichen Gehalte werden im $NaNO_3$-Extrakt (nach VBBo) gemessen.
Die Orientierungswerte für organische Schadstoffe sind bodenspezifisch und werden in Abhängigkeit des Humusgehaltes wie folgt angepasst:
Humusgehalt < 2 % Orientierungswert x 0.2
Humusgehalt 2-30 % Orientierungswert x (Humus/10)
Humusgehalt >30 % Orientierungswert x 3

Mineralisches Aushub-, Abraum- und Ausbruchmaterial

(siehe untenstehende Tabelle)

Aushubmaterial wird in drei Klassen eingeteilt, welche dessen Weiterverwendung, bzw. die fachgerechte Lagerung oder Entsorgung bestimmen.

Unverschmutzter Aushub

Aushub gilt als unverschmutzt, wenn er:

- stofflich durch menschliche Tätigkeit nicht verändert ist,
- weder Holz noch Grünzeug enthält,
- nicht mit Siedlungs- und Bauabfällen (Asphalt, Ziegel, Beton) belastet ist,
- die Anforderungen an unverschmutzten Aushub aufgrund der Richtwerte erfüllt,
- keine Stoffe enthält, die das Grundwasser nachteilig verändern können.

Tolerierbarer Aushub

Aushub gilt als tolerierbar, wenn:

- er stofflich durch menschliche Tätigkeit so belastet ist, dass eine eingeschränkte Verwendung ohne Vorbehandlung möglich ist,
- die nach Absprache mit den kantonalen Fachstellen untersuchten Parameter die Richtwerte T erfüllen (vgl. untenstehende Tabelle)
- das Material zu ≥ 95 Gewichts-% aus Lockergestein oder gebrochenem Fels besteht,
- Fremdstoffe wie Papier, Holz und Kunststoffe (soweit technisch und betrieblich möglich) vorgängig entfernt worden sind.

Verschmutzter Aushub

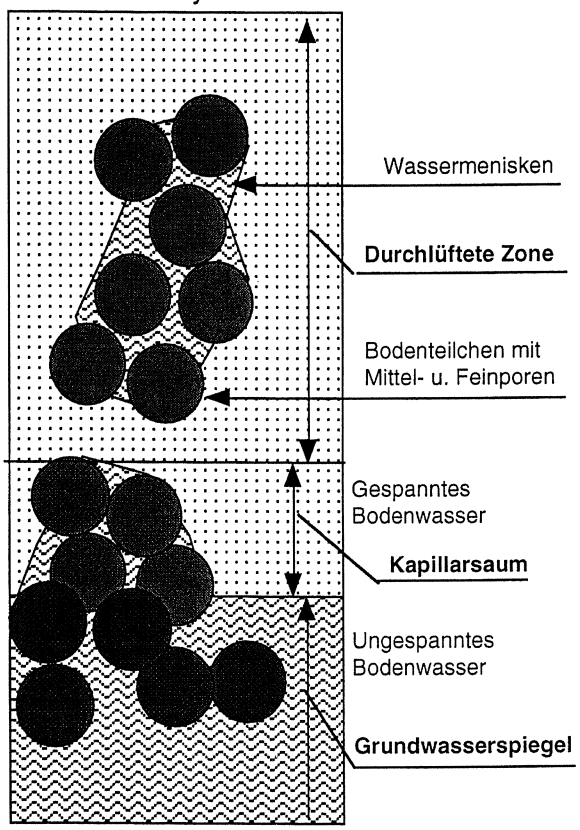
Aushub gilt als verschmutzt, wenn:

- er derart mit umweltgefährdenden Stoffen belastet ist. dass eine Verwertung ohne Behandlung nicht möglich ist,
- die nach Absprache mit den kantonalen Fachstellen untersuchten Parameter die Richtwerte T überschreiten (vgl. untenstehende Tabelle)
- er zu weniger als 95 Gewichts-% aus Lockergestein oder gebrochenem Fels besteht.

anorganisch: Gesamtgehalte	Richtwert U (mg/kg = g/t)	Richtwert T (mg/kg = g/t)
Arsen	15	40
Cadmium	0.5	5
Chrom $_{gesamt}$	50	200
Chrom (Cr^{VI})	0.005	0.005
Kupfer	40	250
Quecksilber	0.5	1
Nickel	50	250
Blei	50	250
Zink	150	500
Organische Schadstoffe und -Verbindungen		
CKW als Summe	0.2	0.2
PAK als Summe	1	15
Benz(a)pyren	0.1	2
PCB als Summe	0.1	0.1
BETX als Summe	1	5
Benzol	0.1	0.5
KW nach Alox	50	250
KW (C6-C10)	1	5

8.4 Saugspannungsmessung und Interpretation

Die Hohlräume eines gewachsenen Bodens, es kann im Durchschnitt von 50 Volumen-% ausgegangen werden, bilden ein stabiles, dem Gas- und Wasserhaushalt dienendes, kommunizierendes Porensystem.



Das Niederschlagswasser dringt über dieses Porensystems in den Boden. Ist dieser wassergesättigt, so entwässert der Boden praktisch ausschliesslich aufgrund der Gravitationskraft. Ein Teil des Wassers wird durch die Pflanzen benötigt und verdunstet, im Sommer bis zu 5Liter/m^2/Tag. Dabei baut sich, im zunehmend ungesättigten Porenraum, aufgrund der an den Wassermenisken wirkenden Randkräfte (Kapillareffekt) ein Kapillar-Potential (Energie) auf. (Dimension $M \times L^2 \times T^{-2}$ z.B. Joule)

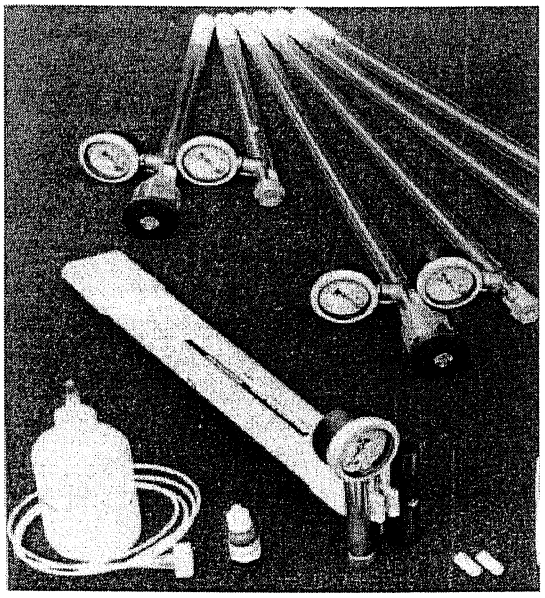
Die nebenstehende Darstellung schematisiert das Bodenwasser (nach Zunker). Sie zeigt die durchlüftete Zone des Bodens, den vernässten Kapillarsaum mit dem gespannten Bodenwasser und den Bereich des ungespannten Bodenwassers unterhalb des Grundwasserspiegels.

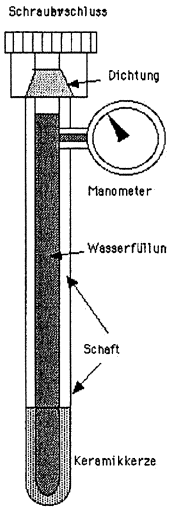
_Bild rechts: Mikroskop-Dünnschliff von Boden, wobei die grossen weissen Partien den luftgefüllten Grobporen im obigen Schema entsprechen.

Auf das Volumen bezogen, erhält das Kapillarpotential die Dimension eines Drucks, z.B. Pa oder $N \times m^{-2}$. Wird dieses Potential auf das Gewicht bezogen, kann die neue Grösse als Druckhöhe in Form einer Wassersäule dargestellt werden (cm Wassersäule). Dieser aus dem Energiegehalt des Bodenwassers abgeleitete Druck wird als Kapillardruck, mit negativem Vorzeichen als Saugspannung (S) bezeichnet. Diese Saugspannung führt zwischen den festen Bodenteilchen zu einer stabilisierenden Wirkung auf deren Verband (Gefüge) und hat damit einen direkten Einfluss auf die Belastbarkeit des Bodens. Weil Porenanteil (Vol% Hohlraum), Porengrösse und Verteilung je nach Boden stark variieren können, erlaubt die Messung des Wassergehaltes (z.B. Mit TDR-Sonde) die Beurteilung der Belastbarkeit eines Bodens nur bedingt.

Tensiometer

Zur Messung der Saugspannung wird das sogenannte Tensiometer verwendet (vgl. untenstehende Abbildung). Es besteht aus einer porösen Keramikkerze, welche an der Spitze eines dichten Schaftes angebracht, den hydraulischen Kontakt zum über dem Boden liegenden Manometerteil herstellt. Beim Einsetzen ist auf optimalen Bodenkontakt, vor allem im Bereich der Kerze zu achten. In skeletthaltigen Böden kann die Kerze beschädigt werden. Zudem sind Tensiometer frostempfindlich.
Am korrekt eingesetzten Tensiometer kann die aktuelle Saugspannung, unter welcher die im Boden eingebaute Saugkerze steht, abgelesen werden. Der Unterdruck wird in bar = 10^5 N x m^{-2} = 10^5 Pa = 10^3 hPa (= 1.032 atm = 1032 cm Wassersäule), auf dem Unterdruckmanometer gebräuchlicherweise in Centibar ausgedrückt, angegeben. Weil 1 Centibar (=1/100 bar) 10 cm WS (Wassersäule) entspricht, muss der abgelesene Wert um 1 Cb pro 10 cm Schaftlänge korrigiert, d.h. der Einfluss des im Schaft hängenden Wassers von dem im Boden gemessenen Unterdruck abgezogen werden.





Die Abbildung links zeigt verschiedene Modelle und Baulängen von Tensiometern, rechts daneben ein Schnittschema.

Natürlich gewachsener Boden ist grundsätzlich inhomogen, innerhalb desselben Bodentyps aber doch zumindest ähnlich. Gleichwohl darf bei der Feststellung einer Saugspannung nicht von einer einzelnen Messung ausgegangen werden. Die Erfahrung zeigt, dass mindestens 3, besser jedoch 5 Tensiometer innerhalb eines Abschnittes von ca. 2 m^2 eingesetzt werden müssen. Der Medianwert aus allen Ablesungen kann als repräsentativer Wert für diesen Standort angenommen werden.

Aufgrund des Medians kann eine zuverlässige Aussage über die Belastbarkeit des untersuchten Bodens gemacht werden, wobei seine spezifische Empfindlichkeit, etwa aufgrund des hohen Tongehaltes, zusätzlich zu berücksichtigen ist. (siehe auch Kap. 7.1 und 8.1)

8.5 Maschinenlisten

Die Maschinenliste hat zum Ziel, dass innerhalb eines Projektes die Auswahl der Maschinen aus dem Gesichtspunkt ihrer Bodenverträglichkeit erfolgt. Es ist zu wünschen, dass aufgrund des nunmehr gesetzlich verankerten physikalischen Bodenschutzes daraus auch eine sog. Labelisierung von Baumaschinen und Landwirtschaftsmaschinen entstehen könnte, wie sie im süddeutschen Forstwesen bereits mit Erfolg eingeführt ist. Dort haben Unternehmer, deren Maschinen kein Gütezeichen (Label) für eine bodenschonende Ausrüstung bei begrenztem Maximalgewicht aufweisen, keine Chance mehr, staatliche Aufträge im Forst zu erhalten. Bodenschäden lassen sich zwar aufgrund von Maschinenlisten nicht verhindern, unter suboptimalen bis misslichen Bedingungen lassen sich diese Schäden aber leichter begrenzen, wenn die zum Einsatz kommenden Maschinen beispielsweise

- eine bereits streng bereinigte Auswahl darstellen und
- nach Einsatzgrenzen mit farbigen Klebern markiert sind

Maschine	**Typ**	**Gewicht** (to)	**Flächenpressung** (bar)	**Cb** zul.	**Farbmarke**
Bagger	N	15'000	0.8	15	weiss
Bagger	Moor	24'000	0.5	15	weiss
Traktor	100 kW	8'000	1.5	15	weiss
Bagger	N	23'500	0.85	25	grün
Druckfass	Tandem	12'000	1.5	22.5	grün
Schürfraupe	SR 85	30'000	0.65	24.5	grün
Bagger		35'000	0.8	35	rot
Schürfraupe	SR 2000	40'000	0.85	42.5	rot
Seitenbaum	LB	30'000	1.25	47	rot
Rübenvollernter		30'000	1.5	56	schwarz
Seitenbaum	SN	42'000	1.5	78	schwarz
LKW		20'000	2.5	62.5	schwarz

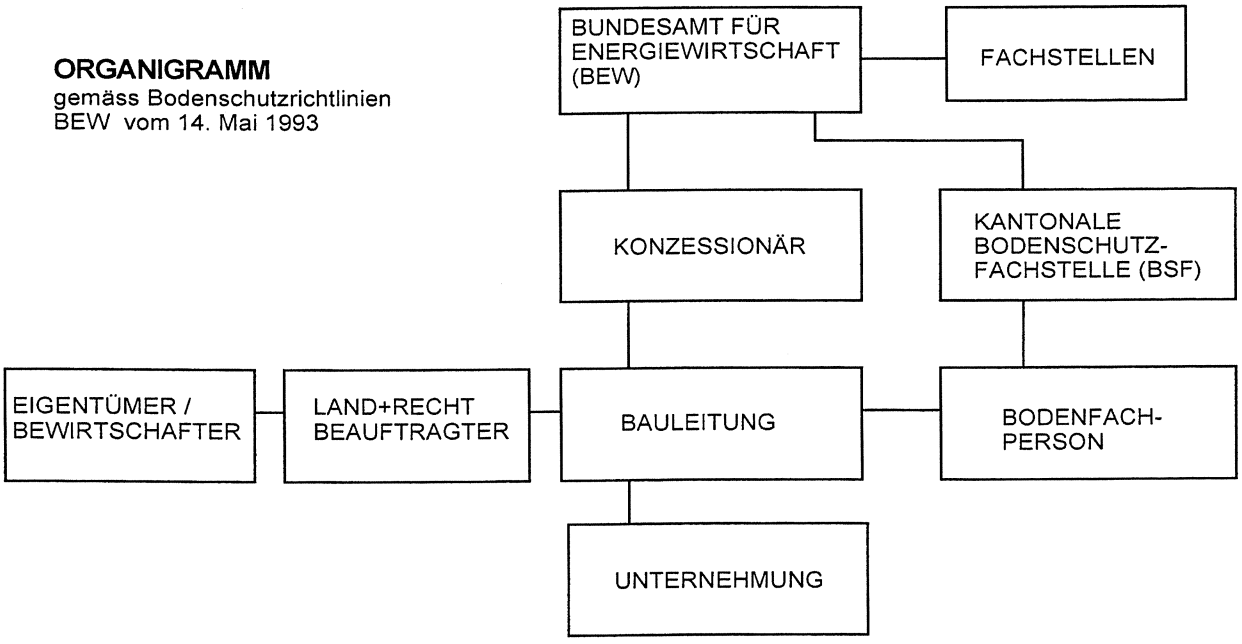
Bei diesem Beispiel einer einfachen sind einige Landmaschinen zum Vergleich miteinbezogen. Eine Labelisierung macht nur im Bereich weiss und grün Sinn. Maschinen, die erst ab 30 Cb ohne Bodengefährdung eingesetzt werden können, haben in unseren klimatischen Verhältnissen meist nur kurze Einsatzzeiten.
Im weiteren sind folgende Punkte zu beachten:

- Bei empfindlichen Böden (Tongehalt > 30 %) muss der zulässige Saugspannungswert (Cb zul.) um 10 erhöht werden
- bei wenig empfindlichen Böden (z.B. Mit einem Skelettanteil >50%) können 10 Cb abgezogen werden.
- Grundsätzlich soll auch wenig empfindlicher Boden nie unter 6 Cb befahren oder bearbeitet und nicht unter 10 Cb ausgehoben oder umgelagert werden.
- Maschinen der Kategorie rot sind in den meisten Fällen einsatzkritisch und durch solche der Kategorie grün ersetzbar.
- Maschinen der Kategorie schwarz sind stark bodengefährdend und sollten im Bodenbereich grundsätzlich nicht eingesetzt werden.

Schäden lassen sich oft auch bedienungsseitig effizient begrenzen. Die Instruktion und Prüfung der Maschinisten bezüglich Bodenschutz wären eine Voraussetzung dafür. Allerdings darf nicht vergessen werden, dass diesbezüglich auch in Forst- und Landwirtschaft bei dem Trend zu immer schwereren und leistungsfähigeren Maschinen für Lohnunternehmer und den überbetrieblichen Einsatz Handlungsbedarf besteht.

9 Bodenkundliche Baubegleitung:

Bodenschutz beim Bau ist heute gesetzlich gefordert (USG 1997). Erfahrungen mit der bodenkundlichen Baubegleitung (BkB) wurde vor allem im Rahmen des Gasleitungsbaues eingeführt. Eine Pionierrolle kommt dabei dem Bau der zweiten Transitgasleitung im Abschnitt Wallbach AG - Däniken SO (1993/94) zu. Vor Auf Druck der vom Bau der ersten Transitgasleitung (1976) betroffenen Landwirte, welche sich kantonsübergreifend (AG, BL, SO) als BOGAS (Bodenschutz beim Gasleitungsbau) organisierten und wirksame Massnahmen für den Schutz des Bodens forderten, hat die Transitgas AG den Bodenschutz bereits im Stadium des Konzessionsgesuches und der damit verbundenen Umweltverträglichkeitsprüfung in das Projekt integriert. Die organisatorische Einbindung des Bodenschutzes war direkt und entsprach dem Organigramm der 1993 geschaffenen Richtlinien zum Schutze des Bodens beim Bau unterirdisch verlegter Rohrleitungen (Bodenschutzrichtlinien) Gemäss diesen Richtlinien ist die Weisungsbefugnis der Bodenfachperson und der „Rechtsweg" klar definiert (Organigramm und Originaltext 1993):



6.6 Entscheid über den zulässigen Einsatz der einzelnen Baumaschinen pro Abschnitt

Ist der Einsatz einzelner Baumaschinen nach den Kriterien gemäss Ziff. 6 der Bodenschutzrichtlinie nicht möglich, beantragt die Bodenfachperson die Einstellung der entsprechenden Bautätigkeit oder es ist mit zusätzlichen Massnahmen die ungenügende Tragfähigkeit des Bodens zu kompensieren. Falls die Bauleitung diesem Antrag nicht einverstanden ist, entscheiden der Konzessionär und die kantomale Bodenschutzfachstelle gemeinsam. Die kantonale Bodenschutzfachstelle kann beim Konzessionär nach den Kriterien der Bodenschutzrichtlinien die Einstellung einzelner Bautäugkeiten ebenfalls verlangen.

Kommt keine Einigung zustande, entscheidet das BEW nach Anhören der Parteien (Konzessionär, Bodenschutzfachstelle, etc.) abschliessend.

Bis zum Eintreffen eines Entscheides (innerhalb max. eines Arbeitstages) gilt der Antrag der Bodenfachperson an die Bauleitung, resp. der Bodenschutzfachstelle an den Konzessionar.

Die zitierten Richtlinien wurden geändert und liegen in einer neuen Fassung vor (1.1.1997)

9.1 Anforderungsprofil

Die bodenkundliche Baubegleitung (in der Folge geschlechtsneutral und als BkB abgekürzt) muss, nebst soliden pedologischen Grundkenntnissen, einer breiten Palette von Anforderungen gerecht werden. Ein grosser Teil der nötigen Kenntnisse und Qualitäten können nur im langjährigen Praxiseinsatz erworben und aufgebaut werden. Nachstehend einige Begriffe in ungezwungener Reihenfolge, die versuchen, das Anforderungsprofil der BkB in seiner ganzen Vielfalt darzustellen:

Fronttauglichkeit
Wie jeder Spezialist im Fronteinsatz, muss die BkB oft in kurzer Zeit entscheiden und somit dem Bauleiter die notwendige Unterstützung bieten können. Ähnlich dem Geologen oder dem Vermesser, befindet sich die BkB in einer aktiven Rolle am Ort des Geschehens.

Überzeugung und Integrität
Die BkB muss von ihrer Aufgabe, den Boden bestmöglich zu schützen, überzeugt sein. Sie sollte die Bauleute aller Funktionsstufen auf ansprechende und fachlich überzeugende Art für die Sache des Bodenschutzes gewinnen können. Sie muss der Vertrauensstellung als Treuhänderin gerecht werden und die Interessen des „amtlichen" Bodenschutzes glaubhaft vertreten können.

Initiative und Selbständigkeit:
Die BkB muss sich die nötigen Informationen laufend selber beschaffen. Bodenschutz lässt sich nicht mit dem Abwarten von Beschlussprotokollen vollziehen. Das Hol-Prinzip findet heute auch im Management von Grossbaustellen allgemein Verbreitung.

Verhandlungsgeschick und Offenheit
Die BkB muss viele Interessen berücksichtigen. Sie muss die Sprache des Bauherrn, des Unternehmers, aber auch die des Landwirts verstehen. Sie muss berechtigte Forderungen erkennen und abwägen können. Der Vollzug der Bewilligungsauflagen muss für alle Beteiligten einsichtig sein.

Zusammenhänge erkennen
Kenntnisse in Land- und Forstwirtschaft sind ebenso nützlich wie beispielsweise das Erkennen von Zeigerpflanzen. Bestandesunterschiede oder spezielle Artenzusammensetzung liefern wichtige Hinweise über Zustand und Beschaffenheit eines Bodens. Aus Geologie und Wasserhaushalt eines Standortes lassen sich wichtige Schlüsse bezüglich der Empfindlichkeit des Bodens ableiten.

Bautechnische Kenntnisse
Die BkB muss die einschlägigen Bauverfahren und die dazu verwendeten Maschinen und Einrichtungen kennen. Sie muss die Organisation einer Baustelle ebenso erfassen wie den Einsatz ungeeigneter Maschinen oder die Wirksamkeit und Nachhaltigkeit von Schutzmassnahmen. Ein kurzes Gespräch mit dem Maschinisten kann hilfreich sein bei der Optimierung eines Arbeitsablaufes.

Zähigkeit und Durchhaltewillen
Die BkB muss mit Anfeindungen umgehen können. Schwierige Umstände wie wetterbedingte Arbeitsunterbrüche, Kosten und Zeitdruck führen oft zu Spannungen. In solchen Phasen fühlt sich die BkB unverstanden. Eine robuste Natur und eine gute Portion Humor und Zuversichtlichkeit sollten der BkB eigen sein.

9.2 Pflichtenheft

Das Pflichtenheft der BkB bildet heute Bestandteil der Bewilligungsauflagen bei jedem grösseren Projekt. Wird die BkB von Anfang an, d.h. bereits in der Planungsphase und den Arbeiten zum UVB (Umweltverträglichkeitsbericht) eingesetzt, kann ein Pflichtenheft wie folgt aussehen:

Projektphase:

- **Erfassen des Ausgangszustandes**: Darin enthalten sind die Bodenkartierung, Feststellen von Nutzung und Nutzungseignung, Belastungssituation nach VBBo und allfälliger Altlasten.
- **Massnahmen zum Schutze des Bodens**: Dazu gehören die Einteilung der Böden im Projektperimeter nach ihrer Empfindlichkeit, Massnahmenvorschläge zum Schutze empfindlicher Böden sowie Projektanpassungen oder Änderungen.
- **Mitarbeit bei der Arbeitsvergabe**: In dieser Phase lässt sich effizient Bodenschutz betreiben, indem die dazu geeigneten Vorgaben (Maschinenlisten, Verfahren, Zeitpläne, Schlechtwetterregelung und Baueinstellung) bereits im Offertstadium bekanntgegeben werden.
- **Materialmanagement**: Mitarbeit bei der Planung der Materialflüsse, (insbesondere des Bodenaushubes), der Zwischenlager und allfällig notwendiger Triage nach VBBo/TVA
- **Vorbereitende Massnahmen** wie Orientierung der betroffenen Eigentümer und Bewirtschafter bezüglich der geplanten Bodenschutzmassnahmen (als konkretes Beispiel etwa die vorgängige Begrünung der betroffenen Flächen im Baubereich oder der generelle Verzicht auf das Abhumusieren ausserhalb der Aushubbereiche).

Bauphase:

- **Orientierung der Bauleute** bezüglich des Bodenschutzes und der daraus resultierenden Massnahmen auf der Baustelle.
- **Erstellen und Betrieb von Messstationen** (Tensiometer) zur laufenden Feststellung der Saugspannung (Verdichtungsempfindlichkeit) und der Niederschläge.
- **Beratung der Bauleitung** in allen Fragen des Bodenschutzes, Bauvorgaben formulieren und allfällige Schutzmassnahmen anordnen.
- **Teilnahme an allen wichtigen Bausitzungen**, selbständige Beobachtung des Zeitplanes und vorausschauende Kontrolle in bodenrelevanten Phasen des Bauablaufes (Aushub von Bodenmaterial, Anlegen von Zwischenlagern etc.).
- **Information der kantonalen Bodenschutzfachstellen** über die Einhaltung der Massnahmen während des Baues.

Wiederherstellungsphase:

- **Begleitung der Rekultivierungsarbeiten** unter Beachtung der zulässigen Saugspannungen
- **Abnahme der wiederaufgebauten Böden** (Werkabnahme), zusammen mit Vertretern der Unternehmung, der Bauherrschaft und der Landeigentümer (mit Abnahmeprotokoll).
- **Mithilfe bei Sanierungsmassnahmen:** Allfällig notwendige Tieflockerung, Entwässerung etc.
- **Einführung der Bewirtschafter** in die korrekte Folgebewirtschaftung zur Restrukturierung der wiederaufgebauten Böden.
- **Mitwirkung bei der Schlussabnahme** der Flächen und Freigabe zur normalen Nutzung. Ev. Vergleich des erreichten mit dem Ausgangszustand (identische Parameter und methodengleiche Analysen beachten).

9.3 Orientierung der Bauleute

Die sachgerechte Orientierung aller am Baugeschehen direkt Beteiligten über den Bodenschutz ist in der Einführungsphase der neuen gesetzlichen Grundlagen wichtig (Revidiertes USG und VBBo). Probleme bei solchen Orientierungen bilden nebst der Organisation zusammengefasster Orientierungsveranstaltungen vor allem die verschiedenen Sprachen. Eine individuelle Orientierung ist aber auch aus Gründen verschiedener persönlicher Voraussetzungen der Beteiligten zu prüfen.

Maschinisten, Bauarbeiter

Erfahrungsgemäss ist das Verständnis der Maschinisten für den Boden vorhanden. Oft haben diese Leute einen persönlichen Bezug zur Landwirtschaft und zum Boden, viele pflegen in ihrer Freizeit mit Hingabe einen Schrebergarten. Meist müssen sie gegen ihre persönliche Überzeugung dem dauernden Termindruck nachgeben und haben aus Angst um ihren Arbeitsplatz wenig Lust, persönlich Bodenschutz auf der Baustelle zu betreiben. Die Arbeiten werden oft nur dann unterbrochen, wenn die Einsatzgrenzen erreicht sind, das heisst wenn der Boden so nass ist dass das Risiko eines Grundbruches besteht oder die Leistungsfähigkeit der Maschine infolge fehlender Traktion oder festklebenden Bodens zusammenbricht.

Poliere, Vorarbeiter, Abschnittsleiter

Als Absolventen einer Bauschule und diverser Weiterbildungsgänge besteht bei diesen Leuten am ehesten die Möglichkeit, dass sie von Bodenschutz anlässlich ihres Bildungsganges etwas mitbekommen haben. Viele Bauschulen haben den Bodenschutz bereits vor seiner gesetzlichen Verankerung in ihrem Ausbildungsprogramm eingebaut. Sind derart ausgebildete Leute im unteren Kader einer Baustelle im Einsatz, so erleichtert dies die Arbeit der BkB beträchtlich. Die internationale Ausschreibung grösserer Projekte und ständiger Preisdruck bringen zunehmend ausländische Konkurrenz auf den Plan. Hier fehlt oft das Verständnis und auch der Wille für den praktischen Bodenschutz.

Bauleiter, Projektleiter

Aufgrund des höheren Ausbildungsstandes der Bauingenieure (HTL/ETH) ist zumindest der theoretische Bodenschutz hier leichter zu vermitteln. Inwieweit sich daraus ein Pflichtgefühl entwickelt, ist u.a. stark von der Überzeugungskraft der BkB abhängig. Wenn letztere die Möglichkeit hat, von Beginn des Projekts an mitzuwirken, so kann sie ihr Fachwissen praxisnah und verständlich einfliessen lassen. Es ist für den planenden und leitenden Ingenieur wichtig, sich im Zweifelsfall auf Normen, Richtzahlen und Grenzwerte abstützen zu können. Macht die BkB aus ihrer Wissenschaft ein Geheimnis, so wird sie auf der Baustelle rasch in Frage gestellt. Bemüht sie sich redlich, die Begriffswelt der Bodenkunde mit jener des Grundbaues und der Geotechnik zusammenzubringen, so hat sie gute Chancen, als beratender Partner akzeptiert zu werden.

Hilfsmittel

- Die neuen Normen Erdbau, Boden SN 640 581 a (Grundlagennorm) SN 640 582 (Messnorm) und SN 640 583 (Praxisnorm) sind u.a. auf der Basis des vorliegenden Forschungsberichtes in Arbeit. (Publikation 1999)
- Ein Handbuch „Bodenschutz beim Bauen" ist beim BUWAL im Mai 1996 erschienen und wird von der EDMZ vertrieben. Es enthält eine kurze Einführung in die Bodenkunde und ihre Begriffe, vor allem für Kaderleute gedacht, aber auch für den interessierten Laien lesbar.
- Ein Video zum Bodenschutz beim Bauen ist ab Sommer 1999 beim BUWAL in deutscher und französischer Version erhältlich. (ca. 20 Minuten Spieldauer) Begleittexte in verschiedenen Fremdsprachen sind vorgesehen.

9.4 Vollzug des Bodenschutzes auf der Baustelle

Dieser ist nur generell zu umschreiben, weil er je nach Projekt unterschiedlich ist. Die bodenkundliche Begleitung der Rekultivierung einer Kiesgrube stellt bezüglich Präsenzzeit, Flexibilität und Personaleinsatz andere Anforderungen an die BkB als beispielsweise die Arbeit im Gasleitungsbau. Dennoch ist die Arbeit in gewissen Punkten ähnlich.
Der Vollzug des Bodenschutzes auf der Baustelle verlangt immer das Prinzip der Voraussicht: Je grösser eine Baustelle, umso eher müssen arbeitsrelevante Vorgaben wie Anordnung von Schutzmassnahmen, eingeschränkte Tätigkeiten oder limitierte Maschineneinsätze, Baueinstellungen etc. rechtzeitig bekanntgegeben werden. Auch wenn die Arbeit auf der Baustelle beispielsweise um 7 Uhr morgens beginnt, sind für gewisse Dispositionen Meldungen um diese Zeit zu spät. Maschinen- und Materialtransporte sind bereits organisiert und zum Teil unterwegs, die Bauleitung ist mit Umdisponieren hart gefordert.

Beobachtung der Bodenfeuchte (Saugspannung)
Die Beobachtung der Befahrbarkeit des Bodens bildet ein zentrales Element beim Vollzug des Bodenschutzes. Auf grösseren Baustellen müssen oft mehrere Messtationen mit Tensiometern und Regenmessern gewartet und deren Ergebnisse ausgewertet werden, damit auf dem ausgedehnten Projektgebiet ein optimaler Bodenschutz geplant und durchgezogen werden kann. Beim spontanen Entscheid im Einzelfall genügt oft die Spatenprobe (Fühlprobe) um festzustellen, dass ein Boden aufgrund der aktuellen Feuchte einen Maschineneinsatz nicht erträgt. Die Messung mit technischen Hilfsmitteln (Quick-Draw, TDR-Sonde u.ä.) erfordert nebst dem hohen materiellen Aufwand auch praktische Routine und ist deshalb bedingt zu empfehlen.

Einholen der Information zum Bauablauf
Die BkB muss sich h selber um den Bauablauf und das zeitliche Eintreffen bodenrelevanter Informationen kümmern. Die Bauleitung orientiert in der Regel an den Bausitzungen über den Baufortschritt und die für den nächsten Zeitraum geplanten Arbeiten. Dazwischen gilt das Hol-Prinzip, d.h. der Baubegleiter holt sich die nötigen Informationen selber.

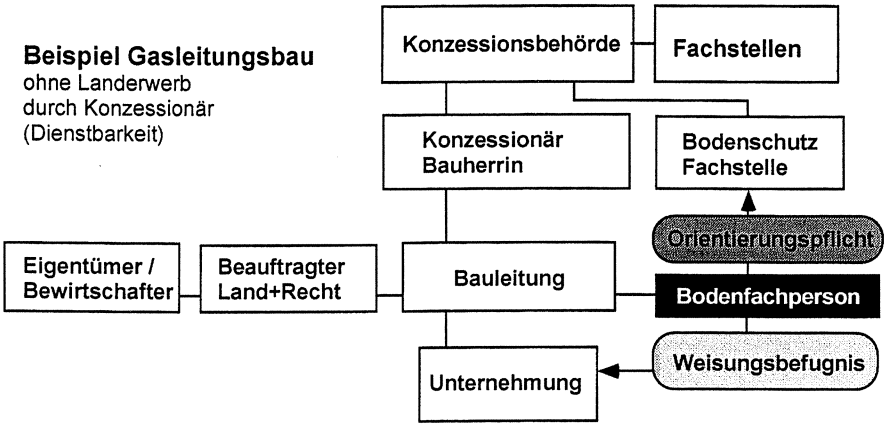
Kontrolle der Vorgaben
Die BkB erlässt nicht nur Weisungen über zu treffende Massnahmen, sondern kontrolliert auch deren Durchführung. Über die Durchführbarkeit (Nachhaltigkeit und Verträglichkeit) von angeordneten Massnahmen macht er sich Gedanken, bevor sie in die Welt gesetzt werden. Diskussionen sind zwar grundsätzlich wertvoll und zu begrüssen, werden aber im konkreten Fall als Unsicherheit gewertet und stellen die daraus resultierenden Anordnungen in Frage.

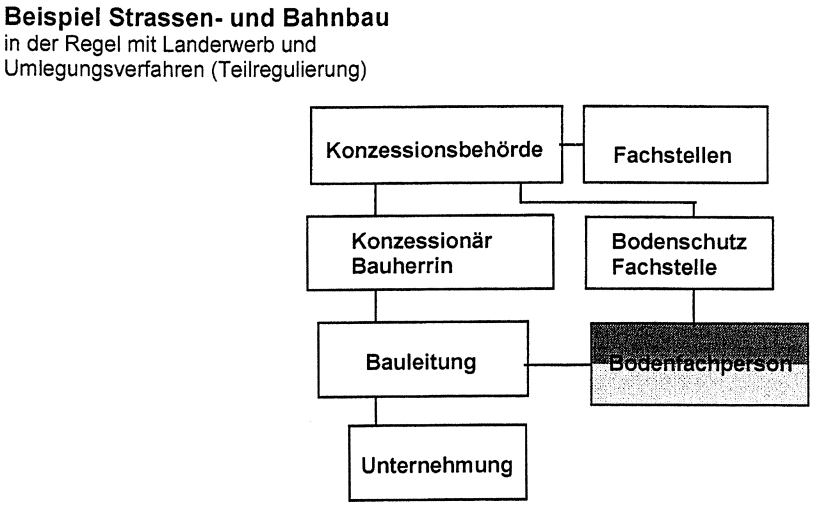
Buchführung und Berichterstattung
Es empfiehlt sich, über die wichtigsten Abläufe und Ereignisse Buch zu führen und darin auch festzuhalten, in welchen Zeiträumen und Bauabschnitten die Vorgaben des Bodenschutzes nicht eingehalten wurden. Dies ist insbesondere für die eventuell eintretenden Schadenersatz- oder Sanierungsfragen bei der Werkabnahme wichtig und soll im Schlussbericht auch planmässig erfasst sein.

Orientierung der Behörde
Die zuständige kantonale Bodenschutzfachstelle erwartet von der BkB in der Regel eine regelmässige und unaufgeforderte Information. So sind vor allem geplante Änderungen von Schutzmassnahmen und angeordnete Baustopps zu melden. Die Behörde ist auch rechtzeitig ins Bild zu setzen, wenn die Arbeit „aus den Fugen" gerät und der Bodenschutz auf der Baustelle nicht mehr sichergestellt ist.

9.5 Organisatorische Einbindung und Befugnisse

Die zweckmässige Einbindung der BkB ergibt sich aus ihrem Pflichtenheft. Keinesfalls darf die BkB durch eine übergeordnete Stufe (Umweltaufsicht) als Managementsaufgabe verstanden, ausgeführt oder bevormundet werden. Ihre Aufgabe liegt eindeutig an der Baufront mit direkter Verbindung zur Bauleitung, ähnlich dem begleitenden Geologen oder Vermesser. In nachstehenden Organigrammen sind Beispiele für die mögliche Einbindung sind zu entnehmen.





Befugnisse

Die BkB ist für die Durchsetzung des Bodenschutzes auf der Baustelle zuständig. Sie muss entsprechende Kontrollen jederzeit und unangemeldet vornehmen können. Normalerweise werden Entscheidungen der BkB durch die zuständige Bauleitung umgesetzt (unteres Beispiel). Kommt es diesbezüglich zu Auseinandersetzungen, so muss der Entscheidungspfad durch die zuständige Bewilligungsbehörde (ähnlich Gasleitungsbau) festgelegt werden. Wenn der BkB erweiterte Befugnisse, wie die alleinige Anordnung von Baustopps zugestanden werden, muss dies sowohl im Organigramm (oberes Beispiel) enthalten wie auch den am Bau beteiligten Firmen bekannt sein.

Titel	Verfasser/Herausgeber	Jahr
Gesetze und Verordnungen		
• Bundesgesetz über den Umweltschutz (USG 1983)	EDMZ Stand 21. Oktober	1987
• Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo)	EDMZ 1. Juli	1998
Weitere verwendete Literatur:		
• Schweizerische Referenzmethoden	FAL/RAC/FAW	1998
• Le sol vivant	J.M, Gobat et.al. EPFL	1998
• Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden	Schriftenreihe der FAL 24	1998
• Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit als Folge des Baus der Transit-Gasleitungen 1973/94	Lukas Stricker ETHZ	1997
• Messung von Bodenverdichtungen im Feld	Teilprojekt Methodik FABO	1998
• Bodenschutz in der Praxis (Internes Arbeitspapier)	TERRE AG	1998
• Bodenverträglichkeit von Landmaschinen	Kriterienkatolog BL, BE, SO	1997
• Messbarkeit von Bodenverdichtungen im Feld	Fachbericht der FABO ZH	1997
• Folgebewirtschaftung rekultivierter Flächen	Merkblatt A.G.A. Kt. Bern	1997
• Richtlinien zum Schutze des Bodens bei unterirdisch verlegten Rohrleitungen,	Bundesamt für Energie	1997
• Bestimmung der Verdichtungsempfindlichkeit	Berli/Hoerner ETHZ	1997
• Bodenkundliche Methoden zur Beurteilung der Verdichtungsgefährdung des Unterbodens	Berli/hoerner ETHZ	1997
• Cartographie des sols	J.P. Legros, EPFL	1996
• Bodenschutz beim Bauen	Handbuch BUWAL	1996
• Die Gefährdung der Böden der Schweiz	Synthese Th. B. Mosimann	1996
• Sols artificiels /faisabilité et utilisation (BFS/VSS)	Strehler et al.biol.conseils	1995
• Bodenkundliche Aufnahme bei Deponien	Merkblatt (BFS/FSK BE)	1995
• Bodenbeurteilung im Feld	UFA - Revue 2,	1995
• Verifica riguardante la modalita di ripartizione del carico d'un cingolato su di un terreno agricolo	Gutachten E.Farinatti	1994
• Angepasste Kartierung für den Gasleitungsbau (Internes Arbeitpapier)	TERRE AG	1993
• Mitteilungen zum qualitativen Bodenschutz und zur VSBo, Nr. 4	FAC/BUWAL	1993
• Bodenkunde (2 Auflage)	Landw. Lehrmittelzentrale	1993
• Etude sur le comportement de terres végétales entreposées en tas (BFS/VSS)	Meylan et al DIAR GE	1992
• Handbuch des Bodenschutzes	H.P. Blume 2..Auflage	1992
• Klassifikation der Böden der Schweiz,	FAL Reckenholz, BGS/SSP	1992
• Die physikalische Untersuchung von Böden	Hartge, K.H. & Horn, R.	1992
• Physique du sol	Musy, A. Soutter, M. EPFL,	1991
• Bodenökologie	U. Gisi et.al.	1990
• Geotechnik für den Tiefbau	Otto, H. Eigenverlag,	1990
• Les sols cultivés	R. Morel	1990
• Lehrbuch der Bodenkunde	Scheffer/Schachtschabel	1989
• Verordnung über Schadstoffe im Boden (VSBo)	EDMZ 9.Juni	1986
• Agrarpedologie	E. Frei, Uni Bern	1983
• Bodenkunde in Stichworten	D. Schroeder 4. Auflage	1983