



Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz
Société Suisse de Pédologie
Società Svizzera di Pedologia

BULLETIN

28

Jahrestagung vom 17. und 18. März 2005 in Zürich

ERRUNGENSCHAFTEN IM PHYSIKALISCHEN BODENSCHUTZ

Referate, Texte zu den Postern

sc | nat 

Member of
the Swiss Academy of Sciences

BODENKUNDLICHE GESELLSCHAFT DER SCHWEIZ

SOCIÉTÉ SUISSE DE PÉDOLOGIE

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

Telefon 044 635 51 14 od. 044 635 51 21 (Sekretariat) **Fax** 044 635 68 48

E-Mail megli@geo.unizh.ch

Internet <http://www.soil.ch>

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

Vorstand / Comité 2004

Präsidentin / Présidente:	S. Tobias, Birmensdorf	044 739 23 49	silvia.tobias@wsl.ch
Vizepräsidentin / Vice-présidente:	E. Havlicek, Neuchâtel	032 718 39 44	elena.havlicek@unine.ch
Beisitzer / Assesseur:	M. Achermann, Luzern	041 228 64 58	matthias.achermann@lu.ch
	R. Krebs, Wädenswil	044 789 97 90	r.krebs@hsw.ch
Sekretär / Secrétaire:	M. Egli, Zürich	044 635 51 14	megli@geo.unizh.ch
Rechnungsführer / Comptable:	A. Kayser, Zürich	044 447 20 25	akayser@envico.ch
Redaktor / Rédacteur	M. Müller, Zollikofen	031 910 21 24	moritz.mueller@shl.bfh.ch

Geschäftsstelle / bureau exécutif

BGS Geschäftsstelle, Nicole Näf
c/o Umwelt und Energie Kt. Luzern, Libellenrain 15, Postfach 3439, 6002 Luzern
Telefon 041 228 60 60 E-Mail bgs.gs@soil.ch

Dokumentationsstelle / Service des documents

Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale LmZ, Länggasse 79, 3052 Zollikofen
Telefon 031 910 50 60 Fax 031 910 50 70
E-Mail lmz@edition-lmz.ch Internet <http://www.edition-lmz.ch>

Vorsitzende der Arbeitsgruppen / Président(e)s des groupes de travail

Klassifikation und Nomenklatur:	J. Presler, Zürich	043 311 10 40	j.presler@babu.ch
Bodenschutz und Werthaltung:	M. Kaufmann, Zürich	044 362 47 43	manfred.kaufmann@agrl.ethz.ch
Bodenkartierung:	M. Knecht, Zürich	044 383 70 71	ambio@bluewin.ch
Reflexion/Strategie	P. Germann, Bern	031 631 38 54	germann@giub.unibe.ch

Redaktion / Rédaction

M. Müller
Schweizerische Hochschule für Landwirtschaft, 3052 Zollikofen
Telefon 031 910 21 24/11 Fax 031 910 22 99/96 E-Mail moritz.mueller@shl.bfh.ch

Redaktionskomitee / Comité de rédaction

M. Egli, Zürich	megli@geo.unizh.ch
C. Keller, Aix-en-Provence	keller@cerege.fr
J.-A. Neyroud, Nyon	jean-auguste.neyroud@rac.admin.ch
H. Sticher, Zug	hans.sticher@bluewin.ch
S. Zimmermann, Birmensdorf	stefan.zimmermann@wsl.ch

**BODENKUNDLICHE GESELLSCHAFT DER SCHWEIZ
SOCIETE SUISSE DE PEDOLOGIE**

Bulletin 28

2005

**Jahrestagung vom
17. und 18. März 2005
in Zürich**

**ERRUNGENSCHAFTEN IM PHYSIKALISCHEN
BODENSCHUTZ**

Referate, Texte zu den Postern

Schriftleitung: Moritz Müller, Zollikofen

ISSN 1420-6773

ISBN 3-03888-097-3

Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale
Zollikofen 2006

Druck und Verlag: LmZ, Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale, 3052 Zollikofen

ISSN 1420-6773

ISBN 3-03888-097-3

Copyright: 2006 Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz

Referate und Posterbeiträge der Jahrestagung vom 17. und 18. März 2005 "Errungenschaften im physikalischen Bodenschutz"

J.-P. CLEMENT		
Perspectives de la protection des sols contre les atteintes physiques portées aux sols - le point de vue de la section sol de l'OFEV		5
F. BORER		
Chancen und Risiken beim praktischen Vollzug des physikalischen Bodenschutzes in der Forstwirtschaft		7
P. LÜSCHER, O. THEES, F. FRUTIG & S. SCIACCA		
Physikalischer Bodenschutz im Wald als Teil der Arbeitsqualität		11
E. HEPPERLE & T. STOLL		
Physikalischer Bodenschutz und Raumnutzung		15
A. ALAOUI		
A method to evaluate the compaction effect on soil structure		21
S. ISLER		
Methoden zur Beurteilung von Strukturschäden in Böden		27
B. SCHÄFFER, M. STAUBER, R. MÜLLER & R. SCHULIN		
Effects of trafficking by heavy agricultural machinery on mechanical and structural properties of restored soil		31
T. KELLER, P. WEISSKOPF & J. ARVIDSSON		
Können Bodenverdichtungen durch das Beschränken der mechanischen Belastung auf Werte kleiner als die Vorbelastung vermieden werden?		35
O. NESTROY		
Untersuchungen der winterlichen Erosion auf Versuchsflächen in Kirchberg am Walde (Oststeiermark) sowie die Umsetzung der gewonnenen Ergebnisse in die Praxis		41
A. SCHÖNBORN & R. SCHULIN		
Do-It-Your-Soil – a Virtual Course in Applied Soil Science		47
F. CELARDIN		
L'évaluation des seuils critiques de risque de perte de phosphore estimé à partir des analyses agronomiques des sols de Genève		52

PERSPECTIVES DE LA PROTECTION DES SOLS CONTRE LES ATTEINTES PHYSIQUES PORTEES AUX SOLS - LE POINT DE VUE DE LA SECTION SOL DE L'OFEV.

Jean-Pierre Clément,

Office fédéral de l'environnement (OFEV), Section Sol, CH -3003 Berne

Ma contribution au thème de votre réunion annuelle est placée sous les mots-clés : consolider et globaliser.

J'aborderai en premier lieu la formation et la recherche et ensuite la mise en œuvre.

En Suisse, les chercheurs et les formateurs de la science du sol n'ont pas hésité au cours des années 70' et 80' à se frotter aux réalités du terrain et de la politique. Mentionnons par exemple le PNR - 22 SOL de 1983 à 91 qui a lancé la carrière de plusieurs membres de la SSP/BGS.

La réalisation des grands programmes d'infrastructures (autoroute, rail et conduites de gaz) et des gravières et carrières qui vont de pair avec ces projets ont élargi et renforcé cet élan de la recherche appliquée. Au moment où la cartographie agricole périlait, le rapport d'étude d'impact et la surveillance de chantier ont ouvert de nouvelles perspectives d'application à la recherche et des débouchés à la formation.

En résumé la fin du 2ème millénaire a été favorable au développement des connaissances sur les atteintes physiques portées aux sols.

En tant qu'observateur extérieur à la recherche et à la formation, vous me permettrez de m'inquiéter des effets actuels et futurs :

- des restrictions budgétaires,
- des priorités définies en fonction d'objectifs à court terme et
- de la restructuration « justifiée » le « processus de Bologne ».

Dans ce contexte, le mot consolider pourrait devenir un leitmotiv de la recherche sur le sol.

Les perspectives de la globalisation sont plus réjouissantes. Je pense ici aux effets des bilatérales II entre l'UE des 25 et la Suisse. En matière de recherche sur le sol notre pleine participation aux travaux de l'Agence Européenne de l'environnement impliquera dès 2006 notre contribution aux programmes d'observation des sols, mais surtout notre participation aux efforts de normalisation méthodologique et de recherches. Cette globalisation européenne pourrait être à l'origine d'une relance en Suisse de la recherche sol, y compris dans la physique des sols.

Passons à la mise en œuvre.

Si l'on considère les circonstances de l'apparition de la protection des sols dans la LPE 1983 (mention décidée par le Parlement en cours de délibération finale) et le contenu de l'OSol 1986 en matière d'atteintes physiques, nous ne pourrions jamais assez remercier les gazières européens et leurs programmes de renouvellement des conduites d'approvisionnement et de transit en Suisse. Ils sont arrivés juste au moment où les Services cantonaux chargés de l'application de l'OSol étaient pleinement en mesure de réagir et de jouer un rôle de partenaire utile. Ils ont permis de sortir du face à face stérile entre l'environnement et l'agriculture et de démontrer, avec l'aide de la recherche, que la protection des sols sur les chantiers n'était pas si coûteuse que ça et permettait effectivement de réduire les atteintes. La révision de l'OSol 98 en a été facilitée et les principes de la prévention des atteintes physiques ont pu être développés dans des normes de la VSS où les directives de l'ASGB, p. ex. Je dois tout de suite apporter un bémol à ce tableau idyllique. En matière d'atteintes physiques la prévention est la seule voie qui s'ouvre à nous, c'est une lutte qui recommence perpétuellement et qui implique la création d'alliances entre les acteurs intéressés.

En outre en matière de globalisation je rappelle que les bilatérales I et II n'apporteront rien à la mise en œuvre de la protection des sols contre les atteintes physiques. Nous continuons notre croisière solitaire et l'effet d'une directive sol européenne qui irait plus loin que l'observation de l'état des sols et des apports de substances polluantes ne se ferait sentir que dans le cas d'une adhésion. C'est donc à nous tous de trouver, en Suisse, les arguments et les appuis politiques pour maintenir et développer les instruments de la protection des sols contre les atteintes physiques.

Pour terminer je ne résiste pas au plaisir de citer une phrase extraite des vœux 2005 de notre collègue de la SSP Mijo Jozic : „Die Pionierarbeit ist weitgehend abgeschlossen. Jetzt geht es darum, das Erreichte zu konsolidieren, zu verfeinern und die Zukunft mit einer neuen Generation aufzubauen.“

Chancen und Risiken beim praktischen Vollzug des physikalischen Bodenschutzes in der Forstwirtschaft

Franz Borer

Amt für Umwelt des Kantons Solothurn, Fachstelle Bodenschutz, Werkhofstrasse 5, 4509 Solothurn

Zusammenfassung

Die bundesgesetzlichen Vorgaben zum Bodenschutz in USG (Umweltschutzgesetz) und VBBo (Verordnung über Belastungen des Bodens) verpflichten die Bewirtschafter des Waldes zu bodenschonender Nutzung zwecks Erhaltung der Fruchtbarkeit der Waldböden.

Die grossen Schadenereignisse der vergangenen Jahre führten vermehrt zu stark bodenbelastenden Einsätzen von Holzerntemaschinen, die auch zu grossen Schäden am Waldboden führten.

Es wird auf einige offensichtliche, zum Teil aber auch versteckte Stolpersteine des Bodenschutzvollzugs im Walde hingewiesen, nicht zuletzt auch, um die Vollzugsinstanzen des Bodenschutzes auf ihre Verantwortung aufmerksam zu machen, die Forstpraxis auf ihre Verpflichtungen gegenüber dem Produktionsstandort hinzuweisen und den Vertretern der Forschungsinstanzen die Ansprüche der Praxis klarer vor Augen zu führen.

Abstract: Execution of soil protection on forest soils: prospects and risks.

According to regulations of Swiss environmental law, the management of forests has to be done in a sustainable manner for the purpose of saving soil fertility.

In the last years big calamities in Swiss forests initiated the use of heavy equipment for harvesting and lumbering trees, involving damages especially as irreversible soil compaction.

It is shown, that execution of soil protection in forestry needs a good cooperation between soil protection administration, forest practitioners and forest research institutions. In addition fundamentals of practice in soil protection, based on soil properties, have to be evaluated.

Prospects and risks are discussed.

Keywords: soil protection, forest soils, damages, soil compaction, execution.

1. Einführung

Waldböden entwickelten sich nach der letzten grossen Eiszeit, d.h. ab dem Präboreal (ca. 8'300 - 6'800 v. Chr.), gemeinsam mit dem darauf stokkenden Wald, während verschiedener Kalt- und Warmphasen zu den heute vorliegenden Bodentypen und -untertypen.

"Unser" Wald ...

... entwickelte sich nach der letzten Eiszeit ab dem Präboreal (ca. 8'300 - 6800 v.Chr.) - zusammen mit den Böden - über verschiedene Kalt- und Warmphasen zum heutigen Wald

... wurde ab ca. 1000 n.Chr. einerseits verstärkt gerodet zur Gewinnung nutzbarer Acker- und Wieslandes; andererseits wurde auch der Wald selbst intensiver genutzt

... wurde nach grober Übernutzung und anschliessenden Überschwemmungen im Jahre 1876 einem beispielhaften Schutz unterstellt (Forstgesetz mit Rodungsverbot)

Diese waren bis vor wenigen Jahrzehnten keinen direkten schädlichen Einflüssen durch anthropogene Luft-Schadstoffe oder übermässige physikalische Beanspruchungen ausgesetzt.

Dementsprechend konnten in den Schweizer Wäldern bis vor kurzem Böden mit weitgehend natürlicher Ausprägung und - trotz beinahe flächendeckender Bewirtschaftung - ohne Anzeichen von gravierenden Beeinträchtigungen der Bodenfruchtbarkeit angetroffen werden. Relativ leichte Maschinen und die naturnahe Bewirtschaftung (Femel- und Plenterwaldwirtschaft) waren Garant hierfür.

Die grossen Schadenereignisse (Sturm Viviane im Februar 1990, dann aber vor allem der Sturm Lothar am 26. Dezember 1999) führten zu einem abrupten und unvorbereiteten Wechsel in der Holzerntetechnik. Die grosse Menge durch den Sturm geworfenen Holzes während Lothar (beinahe 14 Mio m³ Holz, d.h. das 2.5-fache einer normalen Jahresnutzung) bedingten ein rationelleres, damit aber zum Teil auch ein für den Boden katastrophales Vorgehen bei der Holzernte.

Abb. 1: Die Entwicklung „unseres“ Waldes



Ant für Umwelt Forstplanung und -management Forstliche Holztechnik

Abb. 2: Spuren von Holzerntemaschinen (Sturmschäden Lothar, 1999)

Schweres Gerät (Holzernte- und Rückemaschinen) wurde bei oft ungünstigen Bodenverhältnissen (Nichtbeachten der hohen Bodenfeuchte) und unkoordiniertem Befahren grosser Flächen eingesetzt und führte so zu massiven Bodenschäden verschiedenster Art (tiefe Spurrinnen, damit Zerstörung des natürlichen Bodenaufbaus und flächenhafte Verdichtungsschäden).

Bodenschäden im Wald

Wichtigste **Schadwirkungen** sind:

- . die Verringerung des **Porenvolumens** und
- . die Störung der **Porenkontinuität**

Wichtigste **Veränderungen** im „System Boden“ sind:

- . Beeinträchtigung des **Bodenwasserhaushalts**
- . Beeinträchtigung des **Bodenlufthaushalts**
- . Beeinträchtigungen der **unterirdischen Pflanzenorgane**

Ant für Umwelt Forstplanung und -management Forstliche Holztechnik

Abb. 3: Bodenschäden im Wald

2. Gesetzliche Vorgaben

Dem qualitativen Schutz des Bodens, unter dem Begriff der „Bodenfruchtbarkeit“ zusammengefasst, wird in der Umweltschutzgesetzgebung [3] grosse Bedeutung zugemessen und zwar für alle Böden in Wald, Feld und Siedlungsgebiet, sowohl gegen chemische, biologische als auch physikalische Beeinträchtigungen.

Für den Wald ist zudem das Nachhaltigkeitsprinzip speziell zu beachten. Der Baum ist Produkt und Produktionsmittel in einem und bedarf des speziellen Schutzes vor Beeinträchtigungen. Dieser Schutz muss den Standort sowie den Baumkörper während seines ganzen, meist 100 Jahre übersteigenden Lebens umfassen.

VBBo

Art. 2 Begriffe

¹ Boden gilt als fruchtbar, wenn:

- a. er eine für seinen Standort typische artenreiche, biologisch aktive Lebensgemeinschaft und typische Bodenstruktur sowie eine ungestörte Abbaufähigkeit aufweist;
- b. natürliche und vom Menschen beeinflusste Pflanzen und Pflanzengesellschaften ungestört wachsen und sich entwickeln können und ihre charakteristischen Eigenschaften nicht beeinträchtigt werden;
- c. die pflanzlichen Erzeugnisse eine gute Qualität aufweisen und die Gesundheit von Menschen und Tieren nicht gefährden;
- d. Menschen und Tiere, die ihn direkt aufnehmen, nicht gefährdet werden;

Ant für Umwelt Forstplanung und -management Forstliche Holztechnik

Abb. 4: Definition der Bodenfruchtbarkeit in der VBBo [5]

Bodenschäden in Form von Verdichtungen führen in Waldbeständen oft auch zu Wurzelschäden, die meist während des ganzen Baumlebens bestehen bleiben und zu Eingangspforten für Pilzerkrankungen werden können.

3. Strategie

Dem Schutz der durch die Natur gegebenen Standorteigenschaften, speziell jenen des Bodens, wurde im Rahmen des Waldprogramms Schweiz (WAP-CH, 2004-2015) [6] auch gebührende Beachtung geschenkt und es wird als strategische Stossrichtung zu dessen Umsetzung die „Förderung der den Boden schonenden Bewirtschaftung, insbesondere bei der Holzernte“ postuliert.

Wie weit diese strategische Ausrichtung und positive Gewichtung tatsächlich auch in der laufenden Gesetzesrevison des Eidgenössischen Waldgesetzes Berücksichtigung finden wird, ist angesichts der politischen Grosswetterlage unsicher und es ist nicht auszuschliessen, dass sich Fehler, die bereits vor 150 Jahren im Umgang mit dem Wald in Schutzgebieten gemacht wurden, wiederholen werden.

4. Bodenverdichtung vermeiden

Die Umsetzung der strategischen Vorgabe wird in Art.6 Abs. 1 der VBBo (Verordnung über Belastungen des Bodens) klar und unmissverständlich dargelegt und bedarf keiner weiteren Erläuterungen: „...Wer Anlagen erstellt oder den Boden bewirtschaftet, muss unter Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften und der Feuchtigkeit des Bodens Fahrzeuge, Maschinen und Geräte so auswählen und einsetzen, dass Verdichtungen des Bodens vermieden werden, welche die Bodenfruchtbarkeit langfristig gefährden...“

Diese Prämisse gilt, wie früher schon ausgeführt, nicht nur für Landwirtschafts-, sondern in gleichem Masse auch für Waldböden.

5. Bodenparameter

Nebst vielen quasi-konstanten Bodenparametern (u.a. Textur und Skelettgehalt) sind der Bodenwassergehalt und die davon direkt abhängige Saugspannung die massgeblichen variablen Parameter, die darüber entscheiden, wie weit sich ein Boden bei physikalischer Auflast elastisch (reversible Beeinträchtigung) oder plastisch (irreversible Beeinträchtigung) verhält. Plastisches Verhalten führt zu einer Verdichtung, die es jedoch unbedingt zu vermeiden gilt.[1]

Beurteilung der Verdichtungsempfindlichkeit

Wichtigste Bodenparameter zur Beurteilung einer möglichen Bodenverdichtung sind:

a) als Konstanten

- . Textur (Bodenart)
- . Skelettanteil

b) als Variable

- . Saugspannung resp. Bodenwassergehalt

Amt für Umwelt Kanton Schwyz Amt für Wald

Abb. 5: Beurteilung der Verdichtungsempfindlichkeit

Die Saugspannung ist insofern eine optimale Messgrösse, als sie direkt die variablen, kohäsiven Kräfte im Porenraum des Bodens beschreibt und zudem mit Tensiometern sehr schnell und auf einfache Art gemessen werden kann.

Die Bodenschutzfachstellen der Kantone arbeiten im praktischen Bodenschutz seit rund 15 Jahren erfolgreich mit entsprechenden Methoden auf dieser Basis. Grössere Bauvorhaben (Rohrleitungen, Nationalstrassen, Bahninfrastruktur, flächenrelevante Hochbauvorhaben) werden standardmässig auf diese Weise bodenschützerisch begleitet.

6. Umsetzung

Beste Datengrundlage für Massnahmen zugunsten einer bodenschonenden Bewirtschaftung des Waldes bietet eine grossmassstäbliche Bodenkarte (1:2'500 bis 1:5'000), worin alle Informationen zu Bodenart, Skelettgehalt, Wasserhaushalt, organische Substanz etc. vorhanden sind. Bodenkarten in diesen Massstäben sind aber noch nicht in ausreichendem Masse vorhanden,

um generell auf solche zurückgreifen zu können [2].

Beim Fehlen von Bodenkarten wird daher oft auf Vegetations- und Standortskarten zurückgegriffen, indem die Informationen des zweidimensional ausgerichteten Ökogramms (Säuregrad und Feuchtegrad) ausgewertet werden. Standorte an den Rändern des Ökogramms (Extremstandorte) werden durch dieses meist ausreichend beschrieben. In den mittleren Bereichen jedoch, repräsentativ für die meisten Böden in Schweizer Wirtschaftswäldern, ist dies nicht der Fall. Dort sind Vegetations- oder Standortskarten jeweils mit bodenkundlichen, in ausreichendem Masse vor Ort erhobenen Daten zu ergänzen, um als Basis zur Beurteilung der Befahrbarkeit der Böden dienen zu können.

7. Risiken

Im Folgenden soll auf die Gegebenheiten hingewiesen werden, die den angestrebten physikalischen Bodenschutz im Wald beeinträchtigen:

- a) Die die Waldböden am meisten schädigenden Aktivitäten (Holzernte) finden vornehmlich im Winterhalbjahr bei normalerweise hohen Bodenwassergehalten statt. Damit wird der Boden bei ungünstigsten Bedingungen mit den höchsten Lasten befahren. Dieser Rahmenbedingung kann oft nicht ausgewichen werden.
- b) Die Planungsgrundlagen für eine bodenschonende Holzernte sind noch schwach entwickelt (häufig fehlen grossmassstäbliche Bodenkarten) und können durch Vegetationskarten resp. Standortskarten alleine nicht kompensiert werden; es braucht ergänzende bodenphysikalische Messungen.
- c) Der ins Feld geführte, unzweifelhaft vorhandene ökonomische Druck in der Forstwirtschaft vernachlässigt die Prinzipien der Nachhaltigkeit, die in der Forstwirtschaft nach einem Denken in Jahrhunderten verlangen. Die seit einigen wenigen Jahrzehnten im Wald durch den Einsatz schwerer Maschinen auf den Boden wirkenden Kräfte sind seit dem Rückzug der Gletscher die grössten, bisher nicht gekannten physikalischen Einwirkungen. Diese werden die Waldböden und damit die Wuchsbedingungen für den Wald in einem noch nicht abschätzbaren Ausmasse negativ beeinflussen.
- d) Die Vollzugsinstanzen für den Bodenschutz sind für die Anforderungen, die der Bodenschutz im Wald stellt, noch nicht oder zumindest noch unzureichend gerüstet. Aber auch die Forstinstanzen kennen die Vorgaben des Bodenschutzes, abgeleitet aus der Umweltschutzgesetzgebung, in aller Regel nicht.

8. Chancen

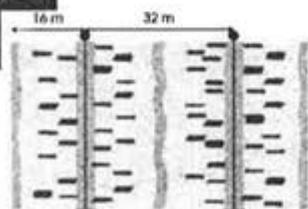
Es bestehen aber auch Chancen für den physikalischen Bodenschutz im Wald, die für den Vollzug durch die Bodenschutzfachstellen zum Teil sogar bessere Möglichkeiten eröffnen, als dies in der Regel in der Landwirtschaft der Fall ist:

- a) Die Vollzugsinstanzen des Bundes (BUWAL, Forstdirektion resp. Sektion Boden), aber auch die WSL als Forschungsinstitution, haben den Ernst der Lage erkannt und sind bestrebt, Massnahmen zum Schutz des Waldbodens zu erarbeiten und in den Vollzug zu integrieren. Es sind Projekte geplant [4], die diese Problematik in einer umfassenden und auf die praktische Umsetzbarkeit ausgerichteten Art zu lösen versuchen.
- b) Die Unzulänglichkeit der reinen Vegetationskarten zum Zweck des physikalischen Bodenschutzes ist erkannt und es laufen Bestrebungen, diesen Mangel, im Sinne einer praktikablen Notlösung, durch bodenkundliche Ergänzungen zu mildern.
- c) Die Schweiz hat durch ihre Waldbesitzesstruktur (70% der Wälder sind im Besitz von öffentlich-rechtlichen Institutionen) und die bestehende Forstorganisation die Möglichkeit, relativ schnell und relativ breit einen grossen Teil der Bewirtschafter über neue Erkenntnisse ins Bild zu setzen und auch in Form von Weiterbildungsangeboten auf sie einzuwirken, dies im Gegensatz zur Landwirtschaft.
- d) Neue Innovationen in der Forsttechnik gehen in Richtung von bodenschonenderen Erntesystemen und –maschinen mit kleineren spezifischen Auflasten (Raupenfahrwerke) und klar definierten, systematischen Erschliessungssystemen zum Schutze des übrigen Waldbestandes.



Harvester auf 4 Raupenfahrwerken

strikte Feinerschliessung mit Rückegassen



Amz 10/05swit

Forstlich + Boden-Inf.

*****saletshorn

Abb. 6: Bodenschonende Holzerntemaschine, kombiniert mit bodenschonender Rückegassen-Erschliessung

9. Bilanz

Es muss zur Kenntnis genommen werden, dass, zumindest im Winterhalbjahr, aufgrund der hohen Wassergehalte und damit tiefen Saugspannungen eine bodenschonende Holzernte mit den heute angebotenen Maschinen in aller Regel noch nicht gewährleistet werden kann.

Neue Innovationen sind sowohl maschinenseitig, von der Erschliessungstechnik als auch von der anwendungsorientierten Forschung im Bodenschutz erforderlich.

Die Fachstellen Bodenschutz der Kantone müssen vermehrt ihre Verantwortung bezüglich des Bodenschutzes im Wald übernehmen, immerhin handelt es sich dabei um die Hälfte der gesamten nutzbaren Bodenfläche der Schweiz.

Literatur

[1] BGS-Dokument 13: Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen; Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz, 2005.

[2] BI-CH Bodeninformation Schweiz (Teilprojekt 5), LÜSCHER, C.: "Leitfaden Bodenkartierung: Bodendaten – ein Werkzeug für Planung, Nutzung und Schutz des Lebensraumes Boden", BGS, 2004, 79 S.

[3] Bundesgesetz über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz, USG), 7. Oktober 1983, AS 1984 1122, SR 814.01.

[4] LÜSCHER, P., 2005: Physikalischer Bodenschutz im Wald als Teil der Arbeitsqualität. BGS-Bulletin, S.

[5] Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo), 1. Juli 1998, AS 1998 1854, SR 814.12.

[6] Waldprogramm Schweiz (WAP-CH). Handlungsprogramm 2004-2015. BUWAL, Schriftenreihe Umwelt, 2004. 119 S.

Physikalischer Bodenschutz im Wald als Teil der Arbeitsqualität

Peter Lüscher, Oliver Thees, Fritz Frutig, Stéphane Sciacca

Eidg. Forschungsanstalt WSL, Zürcherstr. 111, CH-8903 Birmensdorf

Zusammenfassung

Der Beitrag zeigt Möglichkeiten auf, wie Leitlinien des physikalischen Bodenschutzes im Rahmen bodenschonender Waldarbeit besser gehandhabt und umgesetzt werden können. Dabei werden bestehende Grundlagen gezielt weiterentwickelt und mittels stufengerechter Schulungskonzepte für die Aus- und Weiterbildung umgesetzt.

Wechselwirkungen zwischen standörtlichen, maschinenbedingten und verfahrenstechnischen Faktoren sind gesamtheitlich schwierig zu fassen und daher nur schwer abschätzbar. Entsprechend aufwändig und anspruchsvoll sind Vorhersagen der Bodenempfindlichkeit sowie die Herleitung und Begründung von Grenzwerten für einen ökosystemverträglichen Maschineneinsatz.

Mit konkreten Fallbeispielen in der Schweiz sind vorhandene Befahrungsschäden in Abhängigkeit vom Standort und von unterschiedlichen Mechanisierungsgraden der Arbeiten zu analysieren. Dabei sind die Möglichkeiten zur Schätzung der Befahrungsempfindlichkeit bei unterschiedlicher Datengrundlage zu beurteilen. Mittels eines Informationssystems das sowohl Boden- wie Maschinendaten berücksichtigt, sind Entscheidungshilfen für den bodenschonenden Technikeinsatz zu erarbeiten.

Ausgehend von diesen Untersuchungen sind Handlungsstrategien zur zeitlichen und örtlichen Priorisierung von Holzerntemassnahmen abzuleiten und stufengerecht in Ausbildungskonzepte und Lehrmaterial für die Planungs- und die Ausführungsebene umzusetzen.

Abstract

This contribution shows us how to better apply and use the main lines of the soils physical protection within the framework of a soil protecting forest work. Different bases will be further developed and applied by means of adapted education concepts for training.

Reciprocal effects between locally, machine-conditioned and process engineering factors are difficult to seize and therefore valuable only with difficulty. The prediction of soil sensitivities and the elaboration and demonstration of limit values for an ecosystem compatible employment of machines is fastidious.

With concrete examples in Switzerland it is possible to analyse existing driving compaction damages depending on location and different mechanization degree of the work. The possibilities to estimate the soil sensitivity for driving compaction according to the data base is also to judge. Decision making aids for the employment of soils protecting techniques by means of a data-processing program which take in account both soil and machine data is further to develop.

On the basis of these investigations, strategies for the temporal and local prioritization of wood harvest measures have to be developed and adapted education concepts and teaching material for the planning and the execution levels will be converted.

Keywords: soil protection, forest soils, decision support, technology management

1. Einführung

Gesunde Böden sind für die Erhaltung einer gesamtheitlichen Nachhaltigkeit im Wald eine grundlegende Voraussetzung. Sie stellen ein System mit grosser Selbsterhaltungskraft dar und gewährleisten umfassend die Erfüllung aller Bodenfunktionen. Es ist daher wichtig, dass bei der Waldbewirtschaftung die gesetzlich verankerten Vorgaben des physikalischen Bodenschutzes (Umweltschutzgesetz, USG 1983 und Verordnung über Belastungen des Bodens, VBBo 1998) eingehalten werden. Im Waldprogramm Schweiz (WAP-CH, 2004) wurden Grundsätze für eine künftige Waldpolitik festgelegt. Unter den fünf prioritären Zielen wird die

Erhaltung der Boden- und Trinkwasserqualität erwähnt.

Die Bodenschutzanliegen werden im schweizerischen Umweltschutzgesetz über die langfristige Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit definiert. Auf den Wald bezogen heisst dies, dass die Selbsterhaltung der standortstypischen Lebensgemeinschaft Wald mit Naturverjüngung nachhaltig gewährleistet sein muss. Das Wurzelwachstum der standortgerechten Baumarten darf nur durch natürliche Limiten beeinträchtigt werden und die biologische Bodenaktivität ermöglicht den ungehemmten Abbau der Vegeta-

tionsrückstände unter den gegebenen standörtlichen Verhältnissen.

2. Was für Gefahren bestehen im Ober- und im Unterboden?

Das Befahren von natürlich gelagerten Waldböden mit Forstmaschinen verursacht auf einem Grossteil der im Schweizer Wald vorkommenden Böden im Bereich der Fahrspuren tief greifende und lang anhaltende Bodenveränderungen, die wichtige Bodenfunktionen beeinträchtigen. Eingeschränkte Porenvolumina und Porenvernetzung verringern die Transportleistung des Bodens für Wasser und Luft. Die Versorgung der Wurzeln mit Wasser und Luft ist eine unabdingbare Voraussetzung für die Bodenfruchtbarkeit.

Durch den technischen Fortschritt gelangen bei der mechanisierten Waldarbeit immer grössere und schwerere Maschinen zum Einsatz. Die erste Überfahrt verursacht nicht nur im Oberboden sichtbare Verdichtungen und Verformungen (Abb. 1), sondern die hohen Maschinengewichte und dynamischen Belastungsspitzen wirken sich auch bis in grössere Bodentiefen aus (Abb. 5). Damit werden nicht nur im Keimbeet die Voraussetzungen für die Naturverjüngung drastisch vermindert, sondern das ungestörte Wurzelwachstum im gesamten Wurzelraum wird beeinträchtigt.



Abb. 1: Die kleinflächig wechselnden Bodenverhältnisse führen zu verschieden ausgeprägten Fahrspuren. (Photo: Bodenökologie WSL)

3. Was muss erreicht werden?

Zwischen den Bestrebungen nach effizienter Holznutzung und der Umsetzung von gesetzlich verankerten Vorgaben bezüglich Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit ist ein zweckmässiges Vorgehen zu finden. Es sind einheitliche Entscheidungshilfen für die schonende Befahrung von Waldböden und für die Feinerschliessung von Waldbeständen zu erarbeiten. Die Befahrungsrichtlinien und Regeln für den Technikeinsatz

sind standortsspezifisch aufzubauen. Zusätzlich sind der Einsatz von modernen Hilfsmitteln sowie Kosten-Nutzenüberlegungen und die Möglichkeiten anreizgebender Organisationsformen zu prüfen. Es sind Vorsorgestrategien auf der Planungs- und Ausführungsebene zu entwickeln. Zudem werden mittelfristig Empfehlungen zur Förderung von Regenerationsmassnahmen erarbeitet.

4. Wo liegen die Schwierigkeiten?

Die Wechselwirkungen zwischen standörtlichen, maschinenbedingten und verfahrenstechnischen Faktoren sind gesamtheitlich schwierig fassbar und daher nur schwer abzuschätzen. Prognosen von Bodenschäden sowie die Herleitung und Begründung von Grenzwerten - z.B. von Bodenwasserzuständen die eine Befahrung noch erlauben - sind für einen ökosystemverträglichen Maschineneinsatz schwierig und anspruchsvoll. Ökologische Erkenntnisse, ökonomische Zwänge, technische Weiterentwicklungen und gesellschaftliche Ansprüche an den Wald bzw. die Waldwirtschaft erfordern grundsätzliche Überlegungen hinsichtlich künftiger Konzepte im Umgang mit dem physikalischen Bodenschutz im Wald.

5. Welche Massnahmen lassen sich umsetzen?

Die Räumungsarbeiten in Flächenschäden nach Lothar haben mancherorts „flächig“ Fahrspuren hinterlassen. Künftig ist nach dem Grundsatz zu handeln, dass auch nach Kalamitäten das Befahren ausschliesslich auf Feinerschliessungslinien zu beschränken ist (Abb. 2 und 3).



Abb. 2: Fahrspuren nach flächigem Befahren auf der Lothar Reservatsfläche Brüttelen, differenziert nach Störungsgraden. Beeinträchtigte Fläche: rund 66 %.

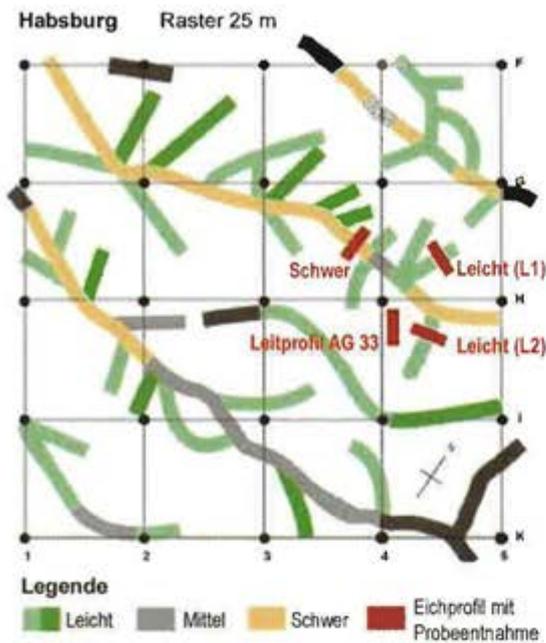


Abb. 3: Fahrspuren längs Rückegassen auf der Lothar Reservatsfläche Habsburg, differenziert nach Störungsgraden. Beeinträchtigte Fläche: rund 25 %.

Es sind Spurtypen zu definieren, die im Einklang mit Richt- und Prüfwerten (VBBö, 1998) stehen und dadurch das Ausmass der Beeinträchtigung bzw. Schädigung zum Ausdruck bringen (Abb. 4).

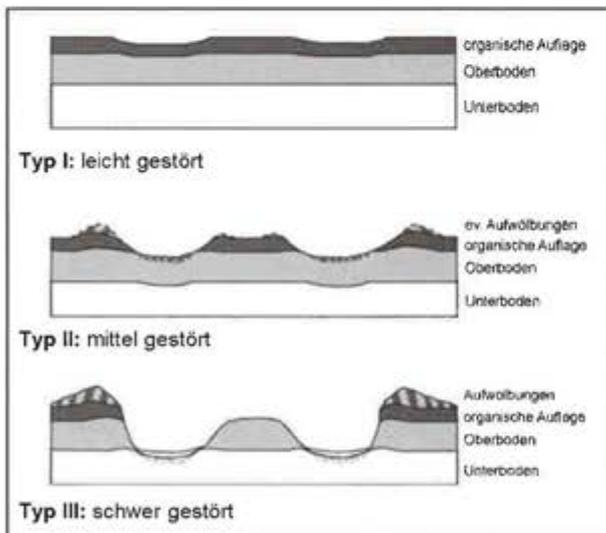


Abb. 4: Visuelle Typisierung der Fahrspuren nach Störungsgraden (Überblick).

Diese Werte betreffen die effektive Lagerungsdichte des Bodens, das Grobporenvolumen, die gesättigte Wasserleitfähigkeit sowie den Eindringwiderstand (BGS, 2004). Es zeigt sich, dass die erkennbaren „Spuren“ an der Bodenoberfläche stets im Unterboden - z.T. mit den Augen kaum erkennbar - mit Daten eindeutig nachzuweisende Schädigungen hinterlassen. Abbildung 5 zeigt den Eindringwiderstand in einer Mull-Braunerde auf Moräne in einem Wald-

meister-Buchenwald. Der unbefahrenen Referenzmessung bis in eine Tiefe von 100 cm werden die Resultate einer einmaligen Befahrung mit einem Vollernter unter guten Voraussetzungen, d.h. bei geringem Wassersättigungsgrad und der Eindringwiderstand in einer Spur nach mehrmaliger Befahrung bei unterschiedlichen Wassersättigungszuständen gegenüber gestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass die Eindringwiderstände erst in einer Tiefe ab 55 cm bzw. ab 75 cm sich wieder jenen der Referenzkurve angleichen.

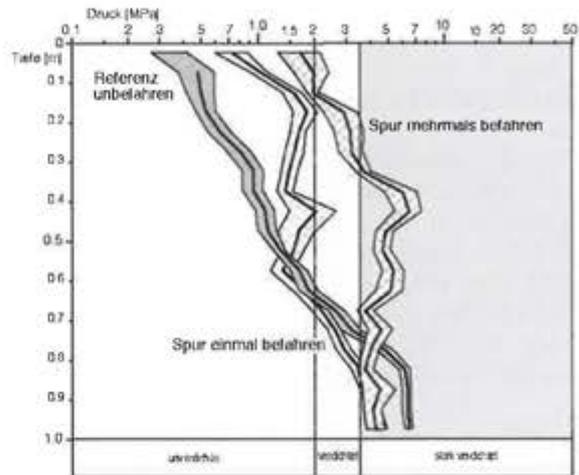


Abb. 5: Eindringwiderstand in Abhängigkeit von der Bodentiefe, erhoben mit einer PANDA-Sonde an einem unbefahrenen Referenzort, in einer einmal befahrenen und in einer mehrmals befahrenen Spur.

Wenn einige Grundsätze beachtet und bei erhöhtem standortspezifischem Risiko rechtzeitig Vorkehrungen getroffen werden, ist eine Minimierung der Bodenschäden möglich. Vorsorge verlangt nebst Kenntnis von Bodeneigenschaften und Empfindlichkeiten auch ein Prozessverständnis, um die Zusammenhänge zwischen Beeinträchtigung und optimalem Technikeinsatz zu begreifen und in die Praxis umzusetzen. Bodenschutz beginnt mit der geeigneten Maschinenwahl (Gewicht, Anzahl Räder) und der entsprechenden Ausrüstung (Bereifung, Boogie-Bänder usw.). Der bodenschonende Maschineneinsatz erfordert ein sorgfältig geplantes Feinerschliessungssystem.

Je nach den Witterungsverhältnissen ist die Bodenfeuchte vor Ort als eine Grundlage für den Entscheid über einen möglichen Maschineneinsatz zu erheben. Je feuchter ein Boden ist, umso empfindlicher ist er bezüglich Belastung. Nach Möglichkeit sind deshalb Einsätze auf alternativen, weniger empfindlichen Böden vorzusehen.

Moderne Standortskarten in den einzelnen Kantonen (mit Bodendaten von Leitprofilen) stellen vor allem bei Planungsarbeiten eine wichtige Grundlage dar. In den für das Waldgebiet nur

teilweise vorhandenen Bodenkartierungen sind die Parameter wie Körnung, Skelettanteil, Vernäsungsgrad, Humusgehalt sowie Bodentyp und Humusform bereits flächig kartiert und tabellarisch in der Legende pro Kartierungseinheit aufgeführt. Mit dem Informationssystem ProFor+ (TU München, 2004) steht ein leistungsfähiges Instrument zur Verfügung, das Beurteilungen an der Schnittstelle Boden / Maschine auf dieser Datenbasis zulässt. Für jede Kartierungseinheit resultiert ein Grenzwassergehalt des Bodens bei dem dieser noch befahren werden kann. Damit ist eine standortsbezogene Risiko- und Empfindlichkeitsbeurteilung möglich. Die verschiedenen Hilfsmittel werden auf ihre Tauglichkeit bezüglich unserer Fragestellung in ausgewählten Testgebieten geprüft.

Für die spezifischen standörtlichen Voraussetzungen und die z.T. kleinparzellierten Besitzstrukturen in der Schweiz sind eigenständige Konzepte nötig, die sich jedoch eng an Bestehendes anlehnen. Eigenheiten sind u. a. das z.T. kleinflächige, heterogene Standortmosaik, sowie der Wandel in der Waldbewirtschaftung und der Forstorganisation.

6. Regeneration

Durch das Befahren verursachte Bodenschäden benötigen meist eine sehr lange Regenerationszeit. Teilweise sind sie auch nahezu irreversibel.

Bei stark beeinträchtigten Böden können geeignete Sanierungsmaßnahmen die Revitalisierung kleinflächig fördern bzw. beschleunigen. Sie sollen die natürlichen Regenerationsprozesse unterstützen. Verschiedene Verfahren werden geprüft, um die Durchwurzelung und damit das Porensystem sowie die biologische Aktivität der Böden zu erhöhen.

7. Überblick über die ganze Schweiz

Im Rahmen des schweizerischen Landesforstinventars werden zurzeit auf dem LFI-Stichprobenraster Veränderungen von Waldböden durch mechanische Belastungen festgehalten. Von einer Piloterhebung aus dem Kanton Freiburg liegen erste Auswertungen vor. Diese zeigen, dass Beeinträchtigungen je nach Region auf knapp 10 % der Stichproben vorkommen. Im Einzelfall sind aber grössere Beeinträchtigungen festgestellt worden.

8. Ausblick

Das BUWAL-Projekt „Physikalischer Bodenschutz im Wald“ wird an der WSL von den

Abteilungen Bodenökologie und Management Waldnutzung in enger Zusammenarbeit mit den Forstorganen und den Bodenschutzfachstellen sowie mit Unterstützung des Lehrstuhls für forstliche Arbeitswissenschaften und angewandter Informatik der TU München bearbeitet. Es wird davon ausgegangen, dass langfristig wirkende Massnahmen primär über eine gezielte Schulung in der Aus- und Weiterbildung zu erreichen sind. Eine Begleitgruppe bestehend aus Vertretern der Forstdienste, den Bodenschutzfachstellen, dem Forstunternehmerverband, den Bildungszentren Wald sowie dem Zertifizierungsteam soll mithelfen, dass die Bodenschutzanliegen auf allen Stufen akzeptiert und rasch in die Praxis umgesetzt werden.

9. Literatur

BGS Dokument 9, 1999: Physikalischer Bodenschutz. Juris Druck und Verlag, Dietikon.

BGS, 2004: Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen. Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz. Dokument 13, Landw. Lehrmittelzentrale, Zollikofen.

BUWAL, 2004: Umwelt 2/2004, Bodenschutz Bodenschutz. www.umwelt-schweiz.ch

TU München, 2004: Informationssystem ProFor+, Version 1.0.1. Lehrstuhl für Forstl. Arbeitswissenschaften und Angewandte Informatik, TU München.

USG, 1983: Bundesgesetz über den Umweltschutz vom 7. Okt. 1983, AS 1984 1122, SR 814.01. EDMZ, Bern.

VBBö, 1998: Verordnung über Belastungen des Bodens vom 1. Juli 1998, SR 814.12. AS 1998 1854. EDMZ, Bern.

Waldprogramm Schweiz (WAP-CH) Schlussbericht, 2004: Schwerpunkt Waldschutz. Schriftenreihe Umwelt Nr. 363, BUWAL, 119 S.

Physikalischer Bodenschutz und Raumnutzung

Erwin Hepperle und Thomas Stoll

ETH Zürich, Institut für Terrestrische Ökologie, CH-8092 Zürich

Zusammenfassung

Bodennutzungen wirken sich auf die Qualität von Böden aus und sind zugleich Regelungsgegenstand der Raumplanung. Als gemeinsamer Bezugspunkt der beiden Fachbereiche bietet sich die Funktion und Leistungsfähigkeit der Böden in den Naturkreisläufen an. In Verbindung damit steht auch die spezifische Empfindlichkeit der betroffenen Böden gegenüber menschlichen Einwirkungen.

Die entsprechenden Potenziale und Empfindlichkeiten der Böden lassen sich in einer auch für bodenkundliche Laien lesbaren Form kartografisch darstellen. Am Beispiel eines Meliorationsprojekts wird aufgezeigt, wie Bodendaten zu entsprechenden Entscheidungsgrundlagen für den Planungsprozess aufgearbeitet werden können.

Abstract: Physical soil protection and land management

Soil use affects soil quality. Soil use is also the subject of spatial planning. A common focus of both areas could be the functioning and productivity of soils in natural cycles. Soils are particularly sensitive to certain anthropogenic activities. (such as soil compaction by agricultural engines). The ecological potential and the vulnerability of soils can be depicted cartographically in a manner that is also understandable to a non-specialist in soil science. Using an example of a land-improvement project, we show how soil data can be used as a basis for decision-making during the planning process.

Key words: soil protection, spatial planning, soil maps, environmental performance, sustainability

1. Notwendigkeit einer räumlichen Sichtweise

Die Integration des Bodenschutzes in die gesamt-räumliche Planung wird immer dringlicher gefordert. Die Notwendigkeit einer räumlichen Optik zeigt sich dabei aus verschiedenen Betrachtungswinkeln.

- Vom naturwissenschaftlichen Standpunkt aus kann man die Heterogenität der Böden als eine heterogene Ressourcenverteilung interpretieren.

Ein und dieselbe Bodennutzung hat nicht überall gleich gravierende Folgen. Weil aber nicht nur die Eigenschaften der Böden heterogen verteilt sind, sondern auch die Nutzungen, eröffnet sich die Chance einer räumlich optimierten Lokalisierung von Nutzungen, die auf die bodenkundlichen Gegebenheiten achtet.

- Die Raumplanung soll mit ihren Mitteln die Anstrengungen zum Schutz der Lebensgrundlagen unterstützen (Art. 1 Abs. 2 Buchstabe a des Bundesgesetzes über die Raumplanung). Sie hat für eine haushälterische Bodennutzung zu sorgen und die raum-wirksamen Tätigkeiten untereinander zu koordinieren.

Für die Raumplanung ist das Ausmass der Einwirkungen wichtig. Das räumliche Ausmass physikalischer Bodenbelastungen ist zweifellos bedeutend genug, dass sich die Raumplanung damit beschäftigen sollte. Allein im Kanton Zürich werden jährlich 1,5 Millionen m³ Boden verschoben,

davon sind 27% Oberboden und im Kanton Basel-Land wurde beinahe die Hälfte aller Böden als empfindlich (30%), stark empfindlich (3%) oder extrem empfindlich (10%) gegenüber Verdichtungen eingestuft (PRESLER und MEULI 1998).

- Es gibt aber auch eine rechtliche Notwendigkeit. Sie wurzelt im Koordinationsgebot und im Nachhaltigkeitsprinzip.

Es handelt sich dabei um Verfassungsgrundsätze. Solche können nicht leichtfertig ignoriert werden. Was die Nachhaltigkeit betrifft, so fordert Artikel 73 der Bundesverfassung Bund und Kantone auf, ein auf Dauer ausgewogenes Verhältnis zwischen der Natur und ihrer Erneuerungsfähigkeit einerseits und ihrer Beanspruchung durch den Menschen andererseits anzustreben. Die Verfassung sagt nicht, was unter ausgewogen zu verstehen ist. Sie verlangt aber ein verbindliches strategisches Programm (GRIFFEL 2001 S. 27) und konkrete Schritte, die letztlich mit Blick auf die natürlichen Regenerationsvorgänge auf ein dauerhaftes Fließgleichgewicht hinzielen. Solche Schritte können auch im Rahmen von Planungen eingefordert werden.

2. Die Rolle von Bodenpotenzialen

Will man bodenkundliche Erkenntnisse für die Planung nutzbar machen, so muss nach Anknüpfungspunkten gesucht werden, die für beide Fachbereiche wichtig sind. Wir schlagen dafür die Rolle der Böden für die Naturkreisläufe vor. Das

betrifft zum einen den Lebensraum Boden im Sinne der Fruchtbarkeitsdefinition nach Art. 2 VBBö. Zum anderen wird damit aber auch die Regelungsfunktion der Böden im Stoffhaushalt angesprochen (Abbildung 1).

Aus bodenkundlicher Sicht liefern uns Veränderungen von bodenkundlichen Kenngrößen Informationen über die zu erwartende Veränderung der Regulations- und Lebensraumpotenziale. Für die Bedürfnisse von Entscheidungsträgern müssen diese Beziehungen allerdings bedürfnisgerecht aufgearbeitet und dargestellt werden. Dazu kann heute auf eine wachsende Anzahl von Ableitungsmethoden zurückgegriffen werden (Vgl. beispielsweise AD-HOC-AG BODEN 2003, HENNINGS 2000). Die Beschreibung beruht vorwiegend auf empirischen Zusammenhängen; die im Boden ablaufenden Prozesse werden zum Teil stark vereinfachend abgebildet. Als Endgrößen können meist nur relative Einstufungen gewonnen werden. Häufig werden die Bodenpotenziale in 5 Bewertungsstufen kategorisiert.

Kann in einem konkreten Raum auf ein ausreichendes Datenset zurückgegriffen werden, so lassen sich mit Hilfe solcher Ableitungsmethoden Karten erstellen, welche die räumliche Verteilung von einzelnen Bodenpotenzialen wiedergeben. Solche Karten können im Sinne der Nachhaltigkeit als ein Mittel angesehen werden, mit dem die natürliche Ressource Boden beschrieben wird.

So können z.B. Veränderungen der Leistungsfähigkeit von Böden sichtbar gemacht werden. Für den Einfluss von Nutzungen ist aber nicht allein massgeblich, welche Potenziale die betreffenden Böden aufweisen, ebenso grundlegend ist ihre Empfindlichkeit gegenüber Einwirkungen. Beim physikalischen Bodenschutz kommt insbesondere der Erosions- und der Verdichtungsempfindlichkeit eine bedeutende Rolle zu. Auch sie lassen sich kartografisch erfassen.

3. Massgebliche Nutzungseinflüsse

Die Raumplanung ihrerseits setzt bei den raumwirksamen Tätigkeiten an. Diese sind regelmässig mit Bodennutzungen verbunden. In regionalen räumlichen Zusammenhängen sehen wir uns einer Vielfalt von Nutzungen gegenüber. Kann der Einfluss von Nutzungen und Nutzungsänderungen auf die Bodenparameter festgestellt bzw. prognostiziert werden, dann lässt sich dies für die Planung nutzbar machen: Die räumliche Nutzungsverteilung kann im Sinne von Art. 73 BV an Nachhaltigkeitskriterien gemessen werden. Man wird sich dabei auf jene Beziehungen konzentrieren, die eine Auf- oder eine Abstufung des Potenzials (z.B. von hoch auf mittel) bewirken. Das reduziert die Anzahl Relationen, die wir berücksichtigen müssen.

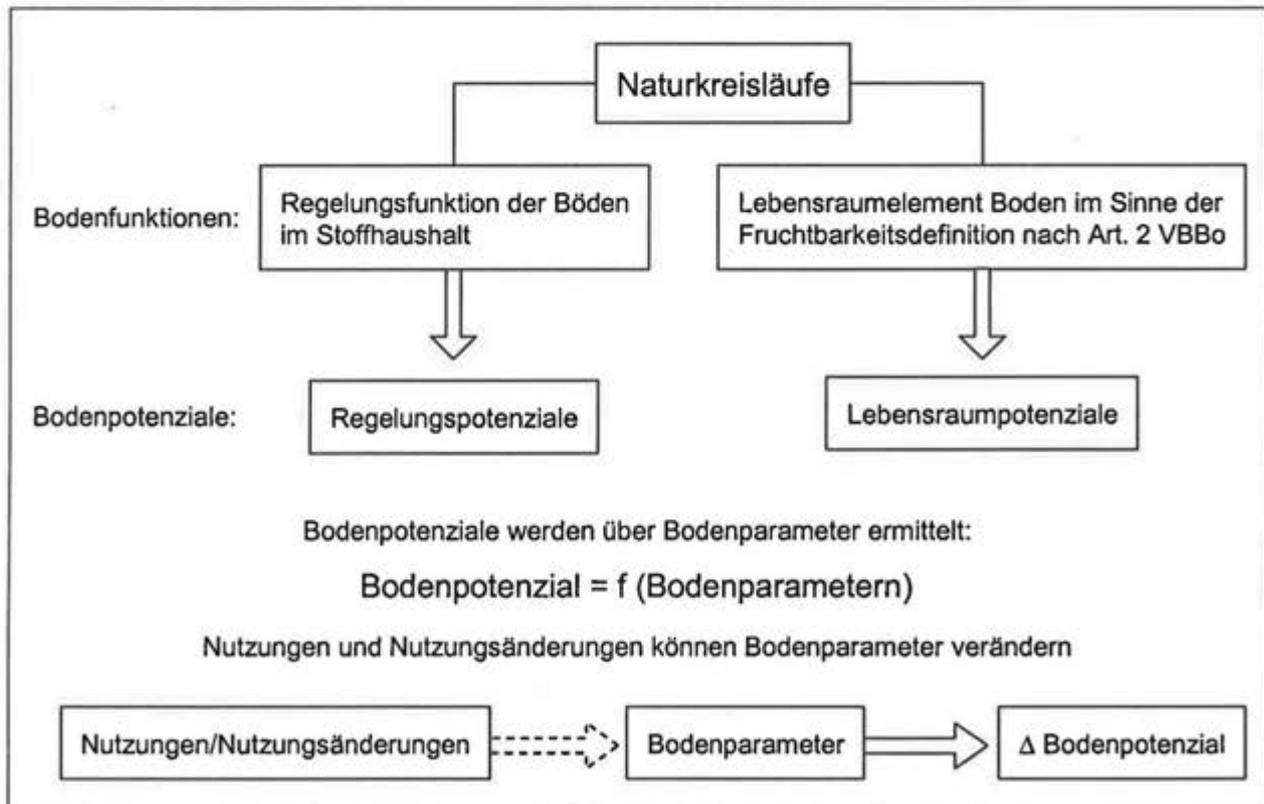


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Bodenfunktionen und Bodenpotenzialen und deren Beeinflussung durch Bodennutzung. Die Leistungsfähigkeit von Böden wird durch deren Potenziale ausgedrückt und kann in Bodeneignungskarten dargestellt werden. Die Empfindlichkeit der Böden ist abhängig von den Bodenparametern (Bodeneigenschaften), der Art und der Intensität der Nutzung.

Im Beispiel Bodendeposition (Abbildung 2) sind Bodenaufbau und Bodenstruktur zentral. Die für die Ansprüche des physikalischen Bodenschutzes erhobenen Daten lassen sich zur Beschreibung der Zusammenhänge nutzen, wenn auch leider noch nicht alle. Z.B. existiert zurzeit keine

Ableitungsmethode, mit der man von der Änderung des Grobporenvolumens auf die Änderung des Bodenpotenzials Wasser schliessen könnte. Mit Blick auf die Datenlage wäre es natürlich erwünscht, möglichst leicht zu erhebende Parameter zu verwenden.

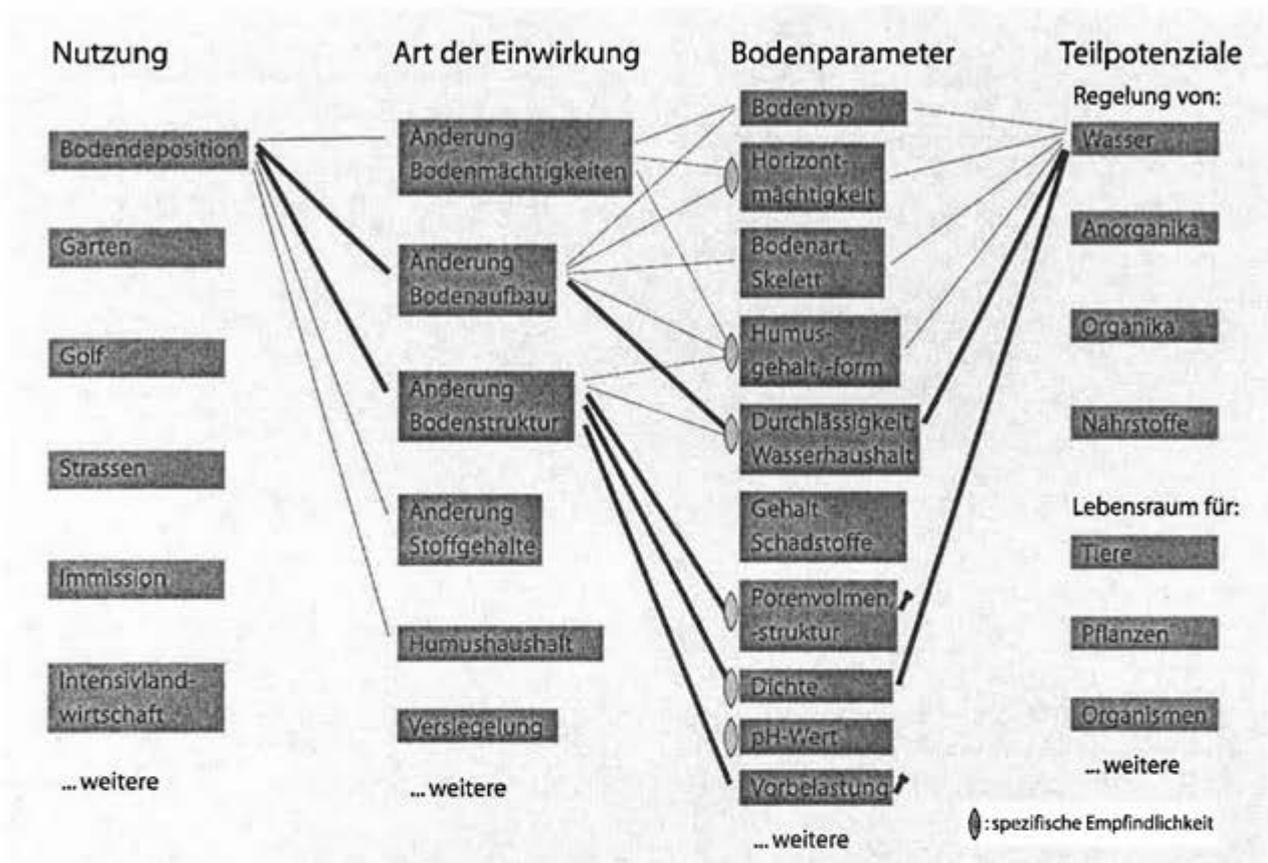


Abbildung 2: Zusammenhang von Nutzungen, Bodenparametern und Bodenpotenzialen, illustriert für die Auswirkungen einer Bodendeposition auf das Regulationspotenzial Wasser. Hervorgehoben sind die wichtigsten Wirkungspfade.

4. Koordination

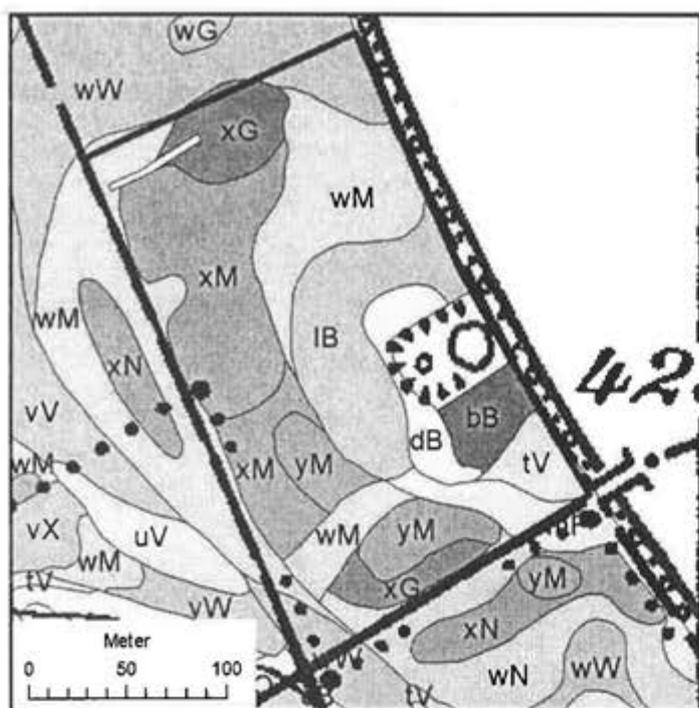
4.1. Beispiel „Moderne Melioration Boswil“

In Boswil ist eine so genannte Moderne Melioration im Gang, d.h. die Melioration verfolgt nicht nur landwirtschaftliche Ziele, sondern auch solche der Raumplanung und insbesondere des Natur- und Landschaftsschutzes.

Bei solchen Vorhaben sollten die Effekte von Bodenveränderungen schon auf Stufe Planung einbezogen werden. Damit können die Akteure frühzeitig in den Bodenschutz eingebunden werden. Die Struktur der Verwaltung und die Aufteilung von Zuständigkeiten können dabei allerdings ein erhebliches Hindernis darstellen. Die verschiedenen Entscheidungen müssen koordiniert werden.

4.2. Bodenschutz und Naturschutz

Das Meliorationsvorhaben hat im Gebiet „Zittlermoos“ zu einem Konflikt zwischen Naturschutz- und Bodenschutzanliegen geführt. Das Gebiet ist von stark durchnässten Moorböden geprägt. Um den Feuchtstandort zu renaturieren wurde ein Detailprojekt ausgearbeitet. Zu diesem Zweck sollte auf einer Fläche von ca. 1 ha Oberboden bis in eine Tiefe von 30-40 cm abgeschürft werden. Das ausgehobene Bodenmaterial sollte nach dem ursprünglichen Projekt innerhalb eines zweiten Perimeters wieder abgelagert werden. Hauptsächlicher Beweggrund für die Wahl des Ablagerungsstandorts war eine Geländeneivellierung, welche die landwirtschaftliche Nutzbarkeit des betreffenden Bodens verbessern sollte.



Bodentypen:

- | | |
|--------------|------------------------|
| B Braunerde; | N Halbmoor; |
| F Fluvisol; | V Braunerde-Gley; |
| G Fahlgley; | W Buntgley; |
| M Moor; | Y Braunerde-Pseudogley |

Wasserhaushalt / Gründigkeit:

Normal durchlässige Böden:

- a, b, sehr tiefgründig bis tiefgründig;
- d, e, ziemlich flachgründig bis flachgründig

Mässig grund- / hangnasse Böden:

- k, l, tiefgründig bis mässig tiefgründig;
- m, n, ziemlich flachgründig bis flachgründig

Selten bis zur Oberfläche porengesättigte Böden:

- s, t, u, tiefgründig bis mässig tiefgründig, ziemlich flachgründig

Häufig bis zur Oberfläche porengesättigte Böden:

- v, w, mässig tiefgründig, ziemlich flachgründig bis flachgründig

Meist bis zur Oberfläche porengesättigte Böden:

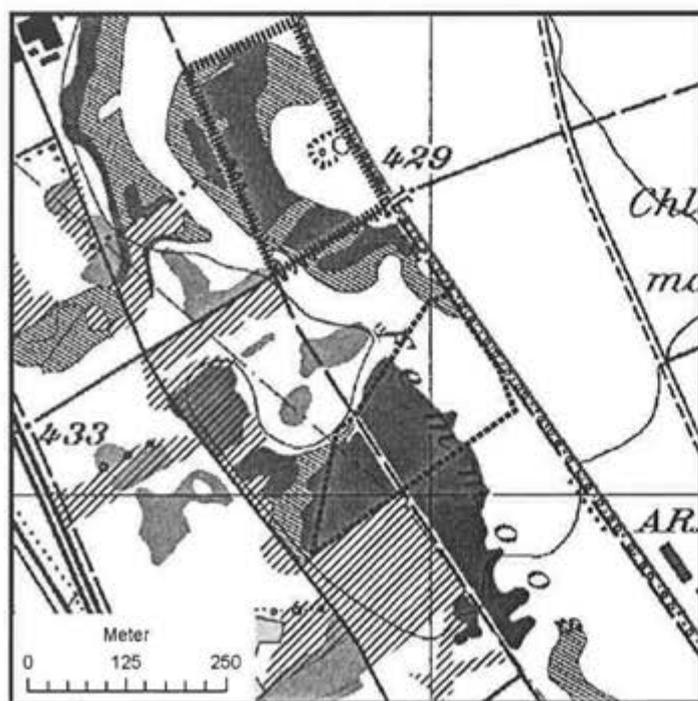
- x, y, ziemlich flachgründig, flachgründig bis sehr flachgründig

Abbildung 3: Bodenkarte im Gebiet Zittlermoos (Kartierung: ENVICO AG Zürich, Leitung: M. ZÜRREER).

Das Landwirtschaftsamt hat zu Bonitierungszwecken eine Bodenkarte ausarbeiten lassen. Der für unser Beispiel relevante Ausschnitt ist in Abbildung 3 dargestellt.

Im Sinne der angestrebten Darstellung der räumlichen Verteilung von relevanten Potenzialen und Empfindlichkeiten können unter anderem das Biotopentwicklungspotenzial und die Verdich-

tungsempfindlichkeit aus den Angaben der Bodenkarte abgeleitet werden. Wir haben für unser Beispiel Ableitungen verwendet, wie sie auch schon in Basel-Land zur Anwendung kamen. Das Biotopentwicklungspotenzial wurde nach einer modifizierten Version der Methode MOSIMANN 1999 bewertet (Abbildung 4).



- potenzielle Feuchtstandorte
- potenzielle Trockenstandorte
- ▨ übrige Moore und Halbmoore
- ▤ vorgesehener Abtrag
- ▤ vorgesehene Ablagerung
- ▨ bestehende Auffüllungen

Abbildung 4: Karte des Biotopentwicklungspotenzials.

Die Karte macht deutlich, dass sich die abzutragenden Böden nicht alle für das Vorhaben eignen. Dagegen würde sich ausgerechnet der vorgesehene Auffüllstandort zu über 50% als Feuchtstandort anbieten. Insgesamt erscheint die Lokalisierung des Vorhabens aus bodenkundlicher Sicht als schlecht gewählt. Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass die Ableitungsmethode aufgrund neuerer Erkenntnisse einer Validierung bedarf. Wie HOCHFELD (2004) nachgewiesen hat, müssen die den Bewertungen von Lebensraumfunktionen zugrunde liegenden Hypothesen überprüft werden. Immerhin wird in unserem Beispiel der Befund auch von der Karte

der Verdichtungsempfindlichkeiten bestätigt (Abbildung 5, Ableitung nach PRESLER und MEULI 1998).

Auf den Auffüllstandort musste in der Folge verzichtet werden und das ganze Projekt wurde umfangsmässig erheblich reduziert. Das Erstellen von entsprechenden Bodeneignungskarten zu einem ausreichend frühen Zeitpunkt hätte auch für bodenkundliche Laien die Unstimmigkeiten leicht erkennbar gemacht. Die benötigten Informationen lassen sich über eine GIS-Plattform leicht austauschen, wenn die nötigen Bodendaten zur Verfügung stehen.

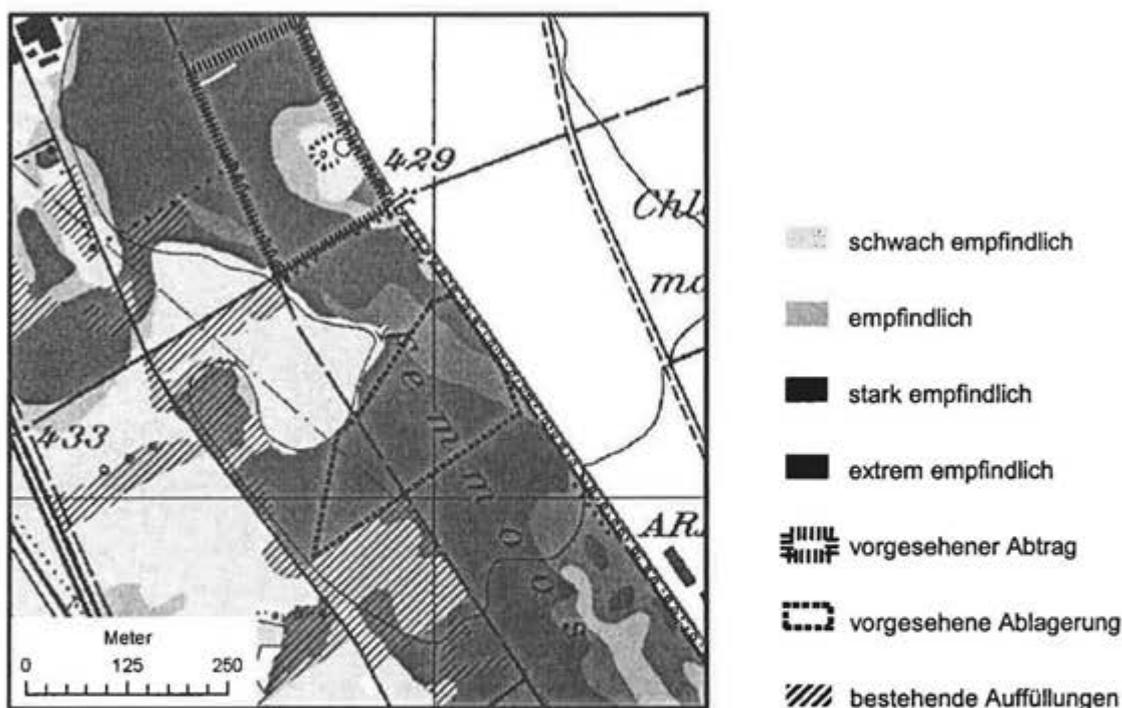


Abbildung 5: Karte der Verdichtungsempfindlichkeit.

4.3. Verfeinerte Bewertung der Eignung zur Fruchtfolge

Auch für den landwirtschaftlichen Teil des Meliorationsprojekts und insbesondere die Neuzuteilung von Grundstücken kann die Ableitung von Bodenpotenzialen und Empfindlichkeiten einen Zugewinn an Information bedeuten. Wenn man z.B. für die Melioration Boswil die Bewertung der Fruchtfolgeflächen-Eignung kartografisch darstellt und mit den Karten zur Erosionsempfindlichkeit und zur Verdichtungsempfindlichkeit überlagert, so zeigt sich, dass seitens der Erosionsgefährdung gegen die Ausscheidung kaum etwas einzuwenden ist. Es zeigt sich aber auch, dass einige der potenziellen Fruchtfolgeflächen eine starke bis extrem starke Verdichtungsempfindlichkeit aufweisen. Der Anteil an Böden mit erhöhter Empfindlichkeit ist sogar relativ gewichtig. Gemäss der Methodenbeschreibung ist auf die-

sen Flächen eine grössere Sorgfalt beim Befahren und bei den Feldarbeiten notwendig. Die Böden sind während längerer Nassperioden sowie ausserhalb der Vegetationszeit nur eingeschränkt belastbar. Das kann bei der Neuzuteilung von Grundstücken von Bedeutung sein.

5. Fazit

Durch den frühzeitigen Einbezug bodenkundlicher Grundlagen lassen sich Meliorationsplanungen sachlich besser abstützen. Über die Ableitung von Bodenpotenzialen, aber auch Empfindlichkeiten, lassen sich nicht nur Risiken besser beurteilen. Es ist vielmehr so, dass sich Interessenten und Amtsstellen, die nicht über bodenkundliche Spezialkenntnisse verfügen, so überhaupt erst ein Bild über die grundsätzliche Eignung von Böden machen können.

Das hier vorgestellte Vorgehen lässt sich je nach Datenlage durchaus verallgemeinern. Auch da, wo die Datenlage schlechter ist als im Beispiel, können raumbezogene Entscheidungsgrundlagen abgeleitet werden, aus denen die beteiligten Ämter Nutzen ziehen können.

Will man seitens des Bodenschutzes auf räumliche Planungen Einfluss nehmen, so scheint dies ein gangbarer Weg zu sein. Wichtig ist, dass die Rohdaten für den Planungsprozess aufgearbeitet werden. Wichtig ist aber auch, dass sich die Fachstellen Vorstellungen über die mögliche Konsequenz von räumlichen Entwicklungen machen. Nicht zuletzt verringert sich dadurch der spätere Aufwand im Vollzug.

Verdankung

Die vorliegende Untersuchung ist im Rahmen einer Studie entstanden, die durch das BAFU (vormals BUWAL) mitfinanziert wurde. Der vollständige Schlussbericht liegt in einer Draft Version vor, die für eine Umfrage den deutschschweizerischen Bodenschutzfachstellen zugeschickt wurde (HEPPERLE & STOLL 2005). Das Projekt ist auch Teil des WSL-Programms „Landschaft im Ballungsraum“ (www.wsl.ch/programme/periurban).

Literatur

AD-HOC-AG BODEN des Bund/Länder-Ausschusses Bodenforschung (2003): Methoden-katalog zur Bewertung natürlicher Bodenfunktionen, der Archivfunktion des Bodens, der Gefahr der Entstehung schädlicher Bodenveränderungen sowie der Nutzungsfunktion „Rohstofflagerstätte“ nach BBodSchG - Stand Juli 2003, Arbeitshefte Boden, Heft 2, Geozentrum Hannover, 73 S.

GRIFFEL A. (2001): Die Grundprinzipien des schweizerischen Umweltrechts. Verlag Schulthess, Zürich, 412 S.

HENNINGS V., Koordination (2000): Methodendokumentation Bodenkunde; Auswertungsmethoden zur Beurteilung der Empfindlichkeit und Belastbarkeit von Böden. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Staatliche Geologische Dienste der Bundesrepublik Deutschland, 2. Auflage, Geologisches Jahrbuch, Sonderhefte, Reihe G Heft 1, 232 S.

HEPPERLE E. und STOLL T. (2005): Ressourcenplan Boden. Ein Konzept zum planerisch-nachhaltigen Umgang mit Bodenqualität. ETH Zürich, Institut für terrestrische Ökologie, Final Draft Version, Zürich, 267 S.

HOCHFELD B. (2004): Bodenfunktionsbewertung. Entwicklung eines Verfahrens zur planerischen Bewertung von Bodenfunktionen in Ham-

burg unter besonderer Berücksichtigung eines praxisnahen Vergleichs bestehender Methoden. Diss. Universität Hamburg, Verein zur Förderung der Bodenkunde, Hamburger bodenkundliche Arbeiten, Hamburg 258 S.

MOSIMANN T. (1999): Integration des Bodenschutzes in die Raumplanung. Kanton Basel-Landschaft, Amt für Umweltschutz und Energie, Liestal 1999, 65 S.

PRESLER J. und R. MEULI (1998): Empfindlichkeit der Baselbieter Böden gegenüber mechanischer Belastungen. Kanton Basel-Landschaft, Amt für Umweltschutz und Energie, Liestal, 31 S.

A method to evaluate the compaction effect on soil structure

Abdallah Alaoui

Soil Science Section, Institute of Geography, University of Bern, CH-3012 Bern

Abstract:

In this paper, a simple method allowing the evaluation of the effect of the compaction on soil structure is presented. It is based on soil moisture measurements via TDR method (Time Domain Reflectometry). The investigation of the hydrodynamic variation of soil moisture indicated two types of compaction: 1) Compaction by load traffic implying change in structure. Consequently, no flow occurred downward. 2) Compaction by intensive stock trample in which micropores are reduced. Macropores on the contrary are well developed, and resistant to the vertical compression in compacted soil and therefore dominated infiltration. Moreover, in reconstructed soils, micropores provide the totality of flow, as demonstrated by the modeling results.

Keywords: compacted soil, reconstructed soil, hydrodynamic response, dual-porosity modeling

Résumé: Une méthode simple pour l'évaluation de l'effet de la compaction sur la structure du sol

Dans cet article, une méthode simple permettant l'évaluation de l'effet de la compaction sur la structure du sol est présentée. Elle est basée sur les mesures de teneurs en eau par la méthode TDR (Time Domain Reflectometry). Les résultats obtenus montrent deux types de compaction: 1) compaction par le passage de la machinerie impliquant un changement dans la structure caractérisé par l'absence d'écoulement vers le bas. 2) compaction par le passage intense du bétail caractérisé par une microporosité réduite et une macroporosité développée, résistant à la compression verticale et dominant l'écoulement. Par ailleurs, dans les sols reconstruits, la microporosité procure la totalité de l'écoulement comme démontré par la modélisation.

Mots-clés: sol compacté, sol reconstruit, réponse hydrodynamique, modélisation en milieu à double porosité

1. Introduction

The traffic of the heavy machines does not always imply a significant modification in the total porosity. In fact, notable decrease of the macroporosity (mean diameter > 100 μm) can be compensated by an increase of the microporosity as observed by KOOISTRA (1994) in sandy-loam soils. ALAKUKKU (1996) found that, in the 0.20 – 0.50 m layer of an organic soil, macroporosity was reduced and microporosity (under 30 μm) increased by the heavy loading. She found that total porosity did not reveal the effects of compaction on the organic soil. In fact, specific conditions leading to the change of microporosity/macroporosity in subsoil have to be determined for each soil type. BRUAND and COUSIN (1995) observed an increase in the textural porosity after compacting cores of calibrated loamy-clay aggregates in wet conditions in the laboratory. They showed that this increase resulted from the formation of relict structural porosity. These special pores were found in the field by BRUAND et al. (1997). RICHARD et al. (2001) demonstrated that after compaction these pores are accessible only through the micropores of the matrix. This observation shows a change in the relationship

between textural porosity and structural porosity generating a change in the hydrodynamic aspects between textural pores and the remaining structural pores.

Thus, bulk density has a limited value for comparison of the state of compaction between soil types. To overcome this problem, actual-bulk density is expressed as a percentage of some reference-compaction state of a given soil and called degree of compactness or relative compactness (HAKANSSON, 1990; HAKANSSON and LIPIEC, 2000).

To characterize soil properties from a soil hydrodynamic processes point of view, the existing methods are unsatisfactory since they lead to describe the state of compactness and not its effect on soil structure. This drawback can be overcome by investigating the continuity of the structure in terms of a hydrodynamic function rather than the structure morphology.

The principal aims of this study are: a) to investigate the effect of soil compaction on soil structure using hydrodynamic variations of water content in response to brief irrigations applied on soil surface, and b) to validate the proposed method by comparing its results with those obtained from established procedures.

2. Material and methods

Two projects show the investigation of the hydrodynamic variation of soil moisture to evaluate the compaction effect on soil structure.

2.1. Experimental sites

Project 1: The site is located near Frauenfeld in Switzerland. The soil, situated in a wide valley bottom, is a skeleton-free eutric Cambisol. The soil consists of a sandy loam between 0 and 0.37 m and of loamy sand between 0.37 and 0.57 m. The bulk density is 1.4 g/cm^3 . Two measurement points (F1 and F2) are chosen in this area. F1 is situated in the soil without passage serving as a control, and F2 in the soil with four passages (sugar beet harvester). Both plots were successively irrigated twice with a sprinkler with intensities of 24 mm h^{-1} during 1 h.

Project 2: Three experimental plots (A, B and C) were selected in an area near Bern in Switzerland (Rüdtligen, Kirchberg). The soil of the first one (A with two measurement points 1 and 2) is located in a pasture and is compacted due to intensive passing of the cattle (pugging). Soil of plots (B with measurement point 5) and (C with measurement point 9) are recently reconstructed. The soil of the pasture is a brown luvisol. Its texture is loam between 0 and 0.60 m, and clay loam below this depth. pH is 7 throughout while organic matter varies from 3 % at soil surface and 2 % below 0.60 m. The vegetation consists of herbs and grasses. A network of macropores comprising particularly earthworm channels is visible to the depth of 0.80 – 0.90 m.

2.2. MACRO model

JARVIS (1994) developed a physically-based model (MACRO) of water and solute transport in macroporous soil. The model divides the total soil porosity into macropores and micropores. Water flow in micropores is calculated with the Richards equation, while macropore flow is simulated as a power law function of the saturation level in macropores. An effective diffusion pathlength d , controls mass exchange between the domains. Net rainfall is partitioned into an amount taken up by micropores and an excess amount of water flowing into macropores under non-equilibrium conditions bypassing the matrix flow. The use of MACRO model helped to determine the type of the dominant flow (macropore or micropore flow) during irrigations and to define the boundary between the two domains (ALAOUI et al., 2003). This partitioning will help then to evaluate the degree of soil compaction in each domain.

2.3. Brilliant blue

To stain the preferential flow path, 10 g of Brilliant Blue powder was diluted in 1 L water and uniformly sprinkled with a hand-held spray onto the 1 m^2 of the soil surface of point 1 and 2 of plot A. It was subsequently flushed with 30 L of water at a constant rate of 30 mm h^{-1} using a rainfall simulator. Initial-soil moisture and irrigation characteristics (intensities and durations) were similar for all experiments. Three hours later, a soil pit was excavated and vertical profiles prepared each 0.10 m. The profiles containing a rubber string grid were photographed with a digital camera (hp photosmart 945, with a resolution of 5 Mega pixels) at each profile within a square of 1 m^2 and a height of 0.70 m. The resultant-digital images have a resolution of 2000×2000 pixels. The length, diameter and number of stained macropores were first visually quantified *in situ* during the excavation. According to the observations, we could state that the earthworm channels have a cylindrical form. This yields to a three-dimensional analysis of the macropore volume. The final volume of stained macropores was subsequently determined from the *in situ* observations and were adjusted if necessary with the profile images.

2.4. Oedometer compression test

A standard oedometer was used to perform the mechanical tests. The sample diameter was 6 cm and initial height about 1.5 cm. The vertical load was increased by steps of 1.1, 15, 60, 125, 250, 500 and 1000 kPa. Each stress step lasted at least 24 h to reach deformation equilibrium. The corresponding saturated water contents are shown in figure 1 and final value of 20 % that corresponds to the critical void ratio was retained. This water content, $\theta_{mcl} = 20 \%$, will serve as a reference for water content to quantify the soil compaction.

2.5. Expected reaction

In a double porosity media, two types of reaction can be distinguished in compacted soil (ALAOUI, 2005):

- 1) no significant increase of soil moisture indicating the destruction of the structure due to the compaction.
- 2) increase of soil moisture. In this case, a detailed analysis of the hydrodynamical processes is needed according to Figure 1 to demonstrate which domain is affected.

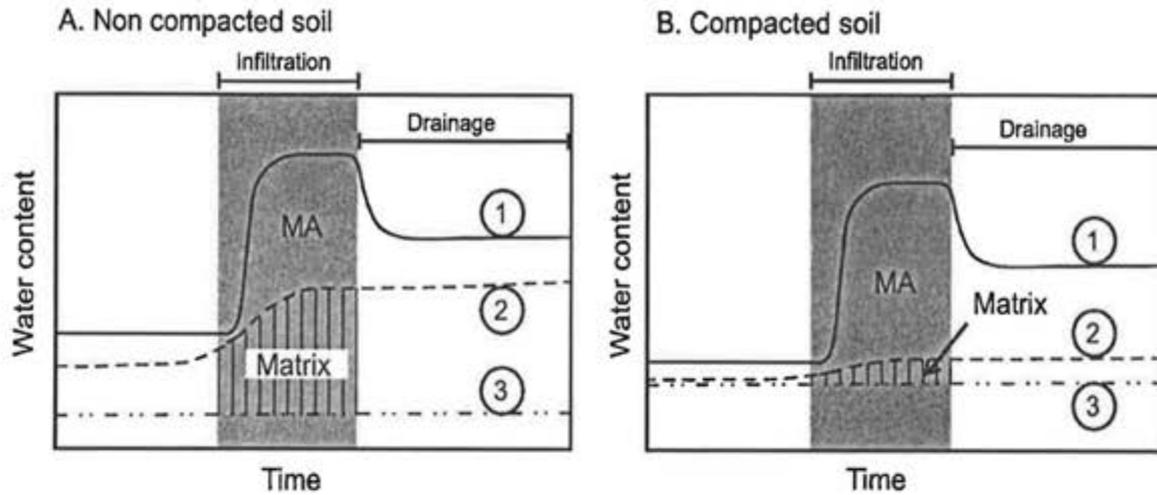


Figure 1. Example of compaction affecting the matrix; 1) measured water content, 2) boundary between micropores and macropores resulting from the Macro simulation (JARVIS 1994), 3) water content at maximum compression obtained from the oedometer test

3. Results and discussion

Project 1

In the control, water content dropped dramatically after rainfall ceased, as is characteristic of macropore flow showing the aeration of soil during drainage (Fig. 2).

The existence of macropores showed by the in situ analysis of soil profile supported those observations, as they indicate the active contribution of macropores to water flow in intact soil. On the other hand, soil with multiple passages does not show any significant increase of soil moisture indicating the destruction of its structure or at least of the structure allowing rapid flow. This fact was interpreted as a consequence of soil compaction. Indeed, during the infiltration experiments, the water directly and instantaneously infiltrated the soil of intact plot, whereas it was ponding at the surface of the compacted soil. In the control plot, the increase of soil moisture occurred to a depth of 70 cm (Fig. 2).

In summary, these investigations show the discontinuity of structure between topsoil and subsoil as a consequence of soil compaction.

Project 2

The two measurement points 1 and 2, located in the pasture (Parcel A) show both positive reactions (increase of soil moisture) in spite of their compacted soil. The soil reaction of the pasture resulted exclusively from the macropores as confirmed by the modeling results and the dye tracer (ALAOUI and HELBLING, 2006). In the two points (1 and 2), the best simulations were obtained considering two-flow domains. In fact, estimated-macropore volume, which represents only 0.23 to 2 % of total soil volume, transported about 70 to 100 % of total water flow in the soil of the pasture with the remaining flow attributable to matrix-water flow. This fact shows the reduced role of the microporosity due to the compaction and the dominance of macropore flow. Moreover, in reconstructed soils, micropores provide the totality of flow, as demonstrated by the modeling results (Fig. 3). In fact, the best simulations were obtained considering one flow domain excluding preferential flow. Macropores are not yet developed in these young soils.

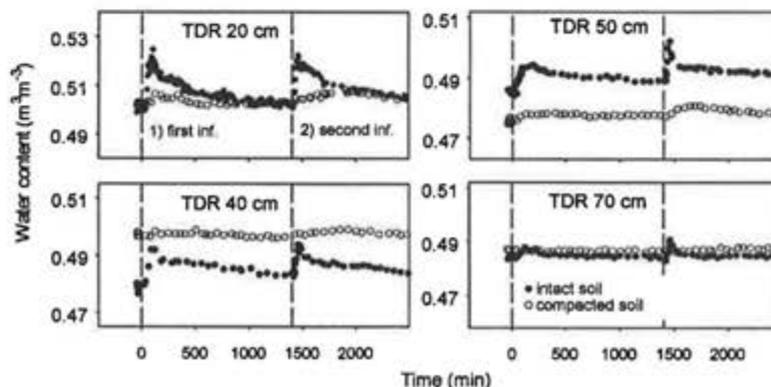


Figure 2. Soil reaction to the irrigation; F1) intact soil; F2) compacted soil (multiple passages), site 1, I

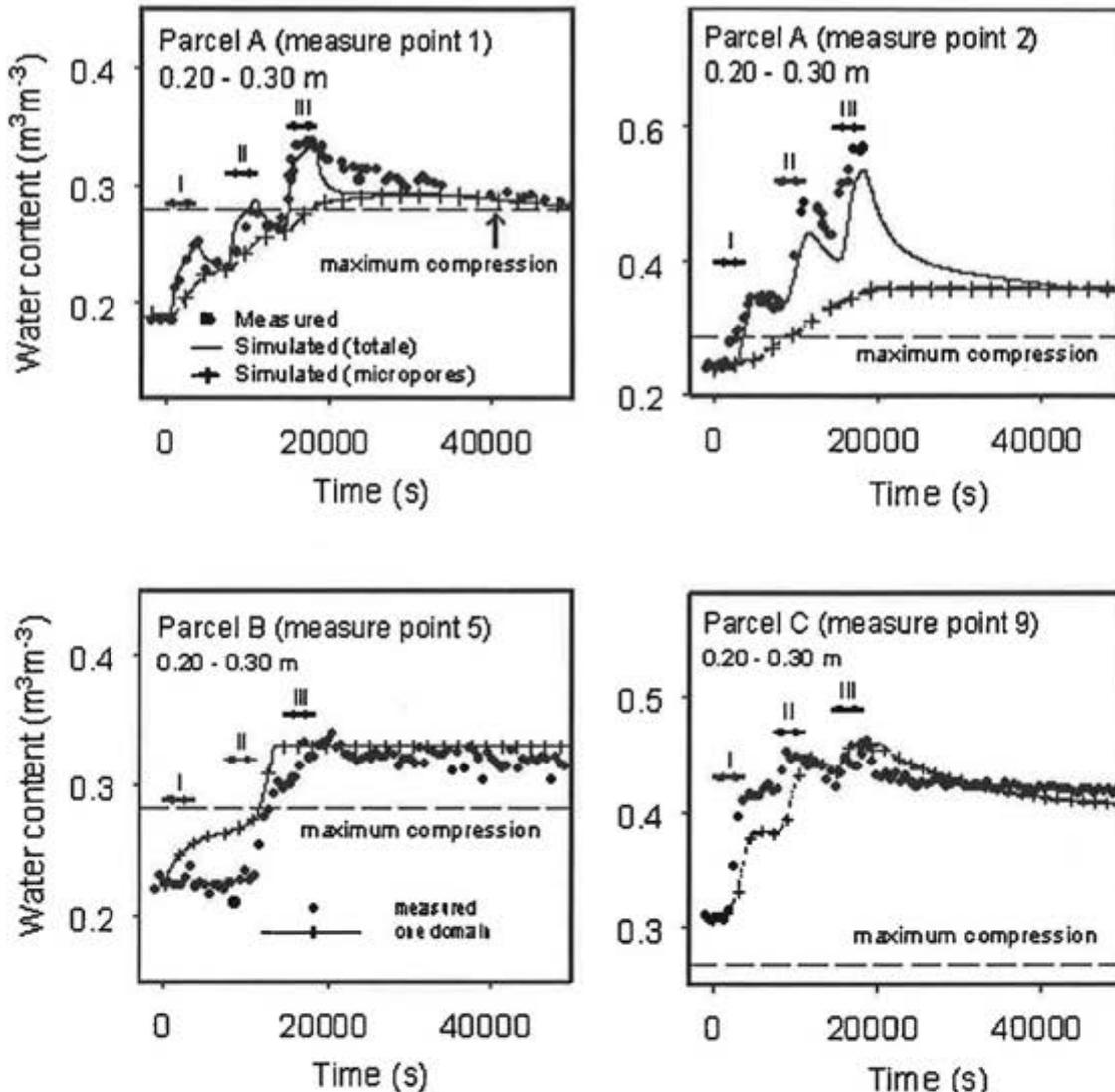


Figure 3: Soil moisture variations at depth of 0.20-0.30 m at parcels A, B and C: the points represent measured values, the line represents the simulated one, the dots represent the maximum compression obtained by the means of the oedometer-compression test and the plus represents the micropore domain

4. Concluding remarks

A simple and non-destructive method, allowing the evaluation of the effect of the compaction on soil structure is proposed. It is based on soil moisture measurements via TDR method. In this study, two types of compaction effects on soil structure can be distinguished.

1. Compaction by load traffic implying a decrease of structure. Consequently, no flow occurred downward. In fact, in the multiple passage plot, TDR measurements show a poor continuity of pores between topsoil and subsoil. This observation was confirmed by the measurements of density, macroporosity, and dye infiltration experiments.

2. Compaction by intensive stock trample in which micropores are reduced whereas macropores are well developed and are resistant to the vertical compression in compacted soil and therefore dominated the water flow. Moreover, the MACRO model was shown to be useful in determining the part of the contribution of the micropores and macropores.

Acknowledgments

This study was supported by the Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape SAEFL, grant no. UFT 0095.12.03/ IDM 2003.0317.

References

- ALAKUKKU, L. (1996): Persistence of soil compaction due to high axle load traffic: I. Short-term effects on the properties of clay and organic soils. *Soil Till. Sci.* 37, 211–222.
- ALAOUI, A. (2005): Evaluation of soil compaction by means of TDR Method: Use manual. Swiss Agency of Environment, Forests and Landscape SAEFL, 74 p.
- ALAOUI, A., GERMANN, P., JARVIS N. and ACUTIS, M. (2003): Dual-porosity and kinematic wave approaches to assess the degree of preferential flow in an unsaturated soil. *Hydrol. Sci. J.* 48(3), 455–472.
- ALAOUI, A. and HELBLING, A. (2006): Evaluation of soil compaction using hydrodynamic water content variation: comparison between compacted and non compacted soil, *Geoderma*, 134, 97-108.
- BRUAND, A., COUSIN, I. and Le, LAY, (1997): Formation of relict macropores in a clay-loamy soil by wheel compaction. In: *Soil Micromorphology: Studies on Soil (Diversity, Diagnostics and Dynamics)* (eds S. Shoba, M. Gerasimova & R. Miedema), pp. 247-254. Printing Service Centre Van Gils B.V., Wageningen.
- BRUAND, A. and COUSIN I. (1995): Variation of textural porosity of a clay-loam soil during compaction. *European Journal of Soil Science*, 46, 377–385.
- HAKANSSON, I. (1990): A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil Till. Res.*, 16, 105–120.
- HAKANSSON, I. and LIPIEC, J. (2000): A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil Till. Res.*, 53, 71–85.
- JARVIS, N. (1994): The MACRO model Version 3.1. Technical description and sample simulations. Reports and Dissertations no. 19, Department of Soil Science, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden, 51 p.
- KOOISTRA, M.J. (1994): Effects of compaction on soil microstructure. In: *Soil Compaction in Crop Production* (eds B.D. Soane & C. van Ouwerkerk), pp. 91–111. Elsevier, Amsterdam.
- RICHARD, G., COUSIN, I., SILLON, J.F., BRUAND, A., and GUERIF, J. (2001): Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. *European Journal of Soil Science*, 52, 49–58.

Methoden zur Beurteilung von Strukturschäden in Böden

Samuel Isler Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich

Zusammenfassung

Eine fundierte feldbodenkundliche Beurteilung reicht in vielen Fällen aus, um schädliche Strukturveränderungen in Böden festzustellen. Soll aber ein Indikatorensystem mit Richt- und Prüf-werten eingeführt werden, um im Streitfall den Nachweis von Schadverdichtungen möglichst objektiv erbringen zu können, kommt den Messmethoden eine zentrale Bedeutung zu. Anhand der k_{sat} - und Grobporenbestimmung werden die methodischen Schwierigkeiten aufgezeigt.

Abstract: Methods to assess structural damages in soils

A serious assessment by experts in the field is often sufficient to find negative changes in soil structure. If however a system of indicators with critical values is to be introduced, in order to provide objective evidence of soil compaction in a lawsuit, then the focus must be on the reliability of the measurement methods used. In this paper some of the difficulties in measuring k_{sat} and air capacity are discussed.

keywords: soil compaction, methods, k_{sat} , air capacity

Einleitung

Die politischen und finanziellen Rahmenbedingungen für den Bodenschutz werden zusehends schlechter und zwingen die für den Vollzug zuständigen kantonalen Stellen zu pragmatischem Handeln, insbesondere zur Priorisierung ihrer Aufgaben. Überlegungen zu Aufwand und Ertrag werden immer wichtiger.

Die Untersuchung von stofflichen Belastungen in Böden ist zum Routinegeschäft geworden. Probenahme und Analytik wurden in den vergangenen Jahren laufend überarbeitet und standardisiert. Die Methoden sind heute weitgehend akzeptiert und die zu ergreifenden Massnahmen bei Schadstoffbelastungen in Böden sind gesetzlich geregelt. Wenn es aber darum geht, Schadverdichtungen bei natürlichen Böden zu diagnostizieren, resp. die Qualität von anthropogenen Böden (bei Bodenrekultivierungen) zu beurteilen und daraus Massnahmen abzuleiten, fehlt es noch an verbindlichen Wegleitungen. Schäden in der Bodenstruktur kann man nie direkt messen. Immer müssen mehrere Indikatoren herangezogen werden, da sich schädliche Gefügeveränderungen auf alle Bodenfunktionen auswirken können.

Will man verbindliche Regeln zur Beurteilung von Schadverdichtungen in Böden, muss eine zuverlässige und effiziente Diagnostik etabliert sein. Prioritäres Ziel ist daher die Standardisierung und Validierung von geeigneten Methoden.

Feldansprache vs Messmethoden

Einer Untersuchung der Fachstelle Bodenschutz des Kantons Zürich aus dem Jahr 2003 lag u.a. folgende Fragestellung zugrunde: Wie klein kann der Aufwand gehalten werden, um die Qualität von Rekultivierungen zu beurteilen?

Die Studie hat gezeigt, dass eine fundierte bodenkundliche Beurteilung im Feld in vielen Fällen ausreicht, um wesentliche bodenphysikalische Mängel festzustellen.

An zehn Standorten wurde ein Vergleich zwischen künstlich geschütteten Böden (Auffüllungen) und Referenzböden in ihrer unmittelbaren Nähe ange-

stellt. Der ungestörte Referenzboden musste jeweils zur gleichen Kartiereinheit (gemäss landwirtschaftlicher Bodenkarte des Kantons Zürich) gehören wie der ursprüngliche Boden am Ort der Auffüllung. Es wurden 21 Qualitätsmerkmale (Bodeneigenschaften / Indikatoren) herangezogen, um Auffüllung und Referenz miteinander zu vergleichen.

Elf Eigenschaften gehörten zum Typ 1 'Bodenansprache am Profil' (z.B. Wurmaktivität, Wasserhaushalt, pflanzennutzbare Gründigkeit, Schichtmächtigkeiten, Lagerung im Profil).

Die zehn anderen Eigenschaften oder Indikatoren gehörten zum Typ 2 'Feld- und Labormessungen' (z.B. Gefügequalität, Eindringwiderstand, Porenvolumen, Wasserleitfähigkeit, Lagerungsdichte). Acht Bodeneigenschaften wurden getrennt nach Ober- und Unterboden erhoben (z. B. Feinerde-körnung, Skelettgehalt, Schichtmächtigkeit, Porenvolumen). Für jede untersuchte Fläche ergaben sich somit maximal 29 Positionen, denen jeweils eine Bewertung zwischen -2 (sehr schlecht) und +2 (sehr gut) zugeordnet wurde.

Durch die Gegenüberstellung der totalen Punktzahl von Auffüllung und Referenzboden gelang es, den Qualitätsunterschied an jedem der zehn Standorte objektiv zu quantifizieren.

Wurden für die Bewertung die Indikatorgruppen (Typ 1 und Typ 2) einzeln berücksichtigt, war das Resultat in jedem Fall das gleiche. Oder anders ausgedrückt: Beim Qualitätsvergleich zwischen Bodenrekultivierungen und Referenzflächen brachten die aufwendigen Messungen in der Tendenz keinen anderen Befund zu Tage als eine seriöse Bodenansprache im Feld.

Messbare Indikatoren

In Streitfällen sowie in der Langzeitbeobachtung genügt aber die Feldansprache kaum. Wenn der Nachweis von Schadverdichtungen möglichst objektiv, basierend auf Zahlenwerten, erbracht werden muss, brauchen wir ein Indikatorensystem mit Schwellen- oder Interventionswerten wie es im Dokument Nr. 13 der BGS (2004) vorge-

schlagen wurde. Labormessungen sind unumgänglich und den entsprechenden Methoden kommt nun eine zentrale Bedeutung zu. In diesem Artikel werden exemplarisch zwei der vier Indikatoren aus dem erwähnten BGS-Dokument besprochen:

1. Die Wasserleitfähigkeit des Bodens im gesättigten Zustand (k_{sat})
2. Die Luftkapazität (Groporenvolumen)

Beides sind Indikatoren, deren Aussagekraft bezüglich schädlichen Veränderungen in Böden grundsätzlich akzeptiert ist. In der Analytik müssen aber noch grosse Anstrengungen unternommen werden, da die herkömmlichen Messmethoden nur bedingt taugen; sie müssen überarbeitet und wenn möglich validiert werden.

k_{sat} Messung

Leitfähigkeiten lassen sich im Feld oder im Labor bestimmen. Im Feld sind die Randbedingungen problematisch, dafür wird der Boden in seiner natürlichen Lagerung untersucht. Bei Labormethoden sind die Randbedingungen eindeutig und kontrollierbar, dafür gibt es Probleme u.a. bei der Probengrösse, bei der Probenahme und mit den Randeffekten.

BUCHTER und MATILE (1998, 2000b) optimierten im Auftrag der FaBo ZH die Probenahme und die Labormethode inkl. Apparatur zur Messung der Leitfähigkeit. Die wichtigsten Erkenntnisse aus diesen Arbeiten werden hier vorgestellt.

1 Streuung / Leitfähigkeit der Apparatur

Die Bandbreite der Leitfähigkeiten in natürlich gelagerten Böden ist enorm. Das Verhältnis k_{sat} eines sehr gut durchlässigen Bodens zu k_{sat} eines schlecht durchlässigen Bodens beträgt ca. $1:10^6$, (was etwa dem Verhältnis 1 Tropfen pro Stunde zu 300 Tropfen pro Sekunde entspricht)!

Da keine Apparatur diesen Messbereich vollständig abdecken kann, müssen zwingend die Messgrenzen der Apparatur (des Permeameters) bestimmt werden. Mit einem Permeameter kann eine bestimmte maximale Leitfähigkeit gemessen werden, da es auch ohne Probe dem Wasserfluss Widerstand bietet. Dieser Widerstand hängt u.a. von den Durchmessern der zu- und wegführenden Schläuche und Schlauchverbindungen, und von der Grösse des Vorratsgefässes ab (sofern es klein ist wie im Falle einer Burette).

BUCHTER und MATILE (1998, 2000b) schlagen vor, gemessene Leitfähigkeiten von Proben, die nicht mindestens 10-mal kleiner als diejenige des Permeameters ohne Probe sind, nicht zu berücksichtigen.

2 Probenahme

Bei der Probenahme sind folgende Punkte zu beachten:

- a) **Skelettgehalt:** bei mehr als 25-30 % Skelettanteil können keine ungestörten Zylinderproben gestochen werden.

- b) **Anzahl Proben:** 5-6 Proben pro Horizont sind mindestens notwendig.

- c) **Stauchungen:** Die Probenlänge immer mit der entstandenen Lochtiefe vergleichen. Falls keine Übereinstimmung, Probe verwerfen. Um Stauchungen zu vermeiden ist ein Schneidring mit einem im Vergleich zum Transportzylinder kleineren Innendurchmesser empfehlenswert.

- d) **Transportzylinder:** Die Probe wird in einen durchsichtigen PVC-Zylinder im Innern des Entnahmegärts gestossen. Dies erlaubt die Betrachtung des ganzen Randbereichs der Probe. Aufgrund unnatürlicher Strukturen im Randbereich (Scherrisse) können Proben verworfen werden. Proben aus nicht bindigen, sandigen Böden werden in Stahlzylinder gestossen, in diesen transportiert und im Labor gemessen.

3 Dimensionierung der Proben

Die im Labor gemessene Leitfähigkeit ist nicht nur vom Boden, sondern auch von der Dimension der Probe, vor allem von der Länge abhängig.

Kürzere Proben tendieren zu grösseren Werten, denn je kürzer die Probe, desto wahrscheinlicher ist die Beeinflussung von k_{sat} durch 'kurze' Makroporen, die für den Boden insgesamt keine grosse Bedeutung haben. Die häufig verwendete Länge von 4 cm ist eindeutig zu kurz. Bei tonigen, dichten Böden können sich die Messwerte von 'kurzen' und 'langen' Proben um mehr als eine Zehnerpotenz unterscheiden. Auffallend ist auch die enorme Streuung der kurzen Proben (Abb. 1).

BUCHTER und MATILE (1998, 2000b) schlagen 10 cm lange Proben vor. Diese Länge stellt einen vernünftigen Kompromiss dar, weil die Entnahme und die Messung von noch längeren Proben problematisch wird.

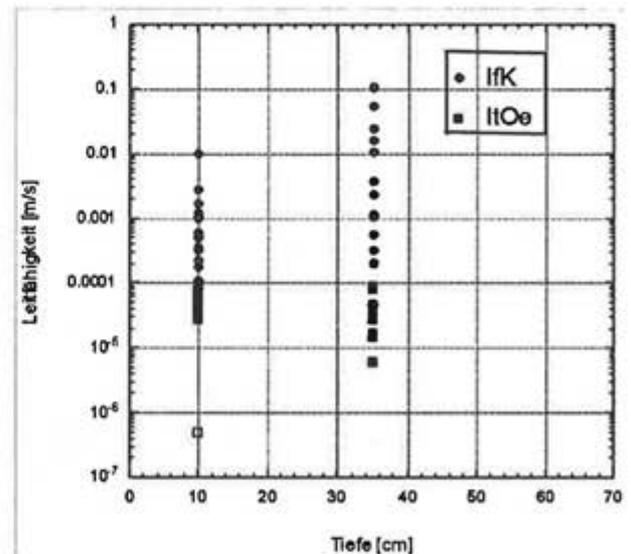


Abbildung 1

Mit der Methode des IfK (= Institut für Kulturtechnik der ETH, Probenlänge: 4.2 cm) und des ItOe (= Institut für terrestrische Ökologie der ETH, Probenlänge: 10 cm) gemessene Leitfähigkeiten. Standort: Höngrgerberg, Messungen in 10 und 35 cm Tiefe.

4 Randeffekte

Sehr häufig existieren zwischen der Bodenprobe und der Wand des Transportzylinders präferentielle Fließwege (unnatürliche Grobporen), die vor allem bei schlecht durchlässigen Proben die Messung unbrauchbar machen. Der Spielraum zwischen satt sitzender Probe ohne Zwischenraum und gestauchter und damit verdichteter Probe ist klein. Deshalb sollten die Bodenproben grundsätzlich paraffiniert werden (Abb. 2).

Den PVC-Transportzylinder schneidet man im Labor auf, und versieht die Probe ringsum mit einer möglichst glatten, etwa 2 mm dicken Paraffinschicht. In der Messvorrichtung (Abb. 3) sorgt eine Gummimanschette unter Druck für eine optimale Abdichtung und damit für die weitgehende Vermeidung von Randeffekten.

(Bei nicht bindigen, sandigen Proben ist das Paraffinieren nicht möglich. Hier sind Randeffekte aber aufgrund der guten Durchlässigkeit praktisch vernachlässigbar).

Empfehlenswert ist weiter die Messung von dichten "Proben" (Paraffin, Gips, Beton, etc.) und die Messung der Leitfähigkeit der leeren Apparatur, um die Grenzen des Permeameters zu erfassen. Falls beim ersten Test ein Wert von $k_{sat} < 10^{-8}$ m/s gemessen wird, ist der Wasserfluss zwischen Probe und Apparatur vernachlässigbar.

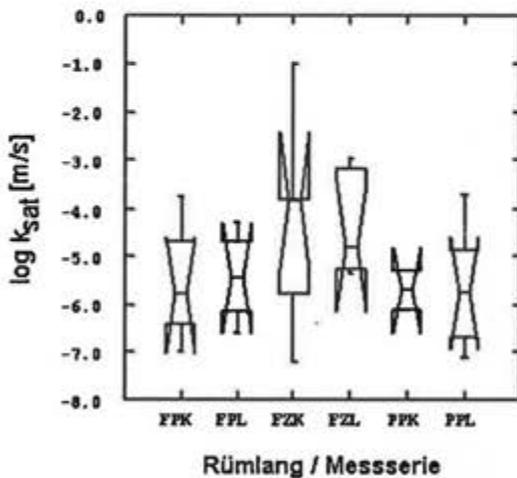


Abbildung 2

k_{sat} -Messungen an einem Standort in Rümlang. (Alle sechs Serien aus dem gleichen Horizont). An den zwei Serien ohne Paraffinierung (ohne "P" im Probencode) wurden deutlich höhere Leitfähigkeiten gemessen.

5 Messvorrichtung

Für möglichst zuverlässige Resultate wird ein Permeameter mit folgenden Eigenschaften empfohlen:

- Sowohl mit fallender Druckhöhe (Normalbetrieb) als auch bei konstantem Druck (für sehr durchlässige Proben) betreibbar
- Proben mit unterschiedlichen Durchmessern und Probenlängen messbar
- Druckregulierung für Dichtungsmanschetten zur Unterbindung von Randeffekten

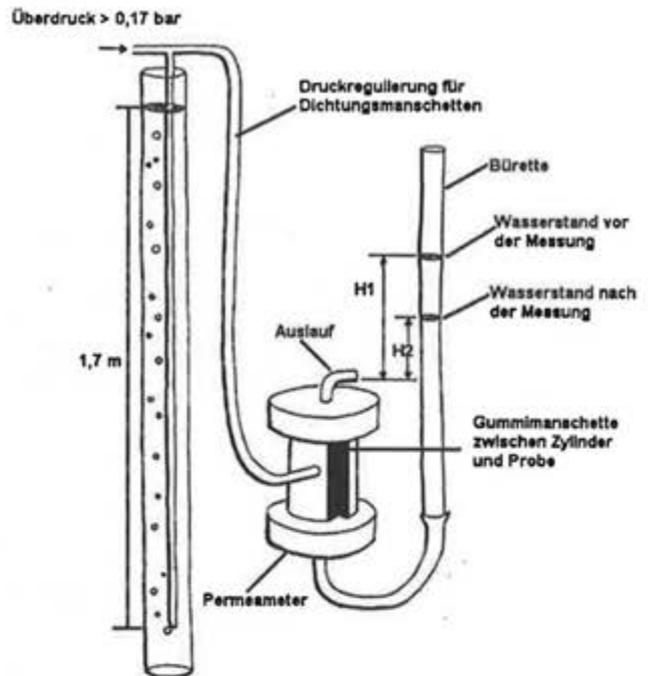


Abbildung 3

Skizze des Permeameters und der Druckregulierung. Der Überdruck (0.17 bar), der durch die Wassersäule (1.7 m) konstant gehalten wird, presst die Gummimanschette an die paraffinierte Probe. Die Probe wird von unten nach oben durchflossen. Gemessen wird die Zeit, während der sich der Wasserstand in der Bürette von H1 auf H2 absenkt.

6 Einteilung der Leitfähigkeit in Klassen

Wie gezeigt, ist die Leitfähigkeitsmessung schwierig und fehleranfällig. Die Ergebnisse sind mit grösster Vorsicht und nur in Kenntnis der verwendeten Methode zu interpretieren.

Daraus folgt, dass eine Klasseneinteilung der Leitfähigkeiten nicht zu eng sein darf. Ähnlich wie bei den Widerständen in der Elektronik ist die Einteilung von der Ungenauigkeit des Messwertes abhängig. Aufgrund der Messfehler und Variabilität des Bodens sollte die Einteilung der Leitfähigkeit in Schritten von 1 zu 10 erfolgen.

BUCHTER und MATILE (1998, 2000a, 2000b) schlagen folgende neue Einteilung vor:

Durchlässigkeitsklasse	Leitfähigkeit [m/s]
sehr gross	$> 10^{-4}$
gross	$10^{-5} - 10^{-4}$
normal	$10^{-6} - 10^{-5}$
klein	$10^{-7} - 10^{-6}$
sehr klein	$< 10^{-7}$

Diese Einteilung richtet sich also nach der erzielbaren Messgenauigkeit und der möglichen Aussagekraft der Messwerte für den Boden.

Weiter wird empfohlen, die Leitfähigkeit nicht als k_{sat} -Wert, sondern analog zum pH als

$pK_{sat} = -\log_{10}(K_{sat})$ anzugeben.

7 Output: Angabe der Resultate / Fehlerrechnung

Wie in anderen Wissensgebieten muss auch in der Bodenphysik das Fehlerdenken verankert werden. Was auf den ersten Blick kompliziert erscheint, lässt sich leicht programmieren und übersichtlich darstellen. Die Genauigkeit der Ergebnisse bei der K_{sat} -Messung hängt logischerweise von der Genauigkeit der verwendeten Messgrößen wie Probenhöhe, Messzeit u.a. ab. Diese wirken sich jedoch unterschiedlich aus. Um abschätzen zu können, welche Messgrößen mit welcher Genauigkeit erhoben werden müssen, damit die gewünschte Genauigkeit der berechneten Durchlässigkeit erreicht wird (z.B. 10 %), ist eine Fehlerrechnung notwendig.

Es wird empfohlen, jede Probe 3x zu messen. Dabei wird der Wert jeder Messung zusammen mit dem prozentualen Messfehler (basierend auf der Fehlerrechnung) protokolliert. Der K_{sat} -Wert einer Probe ist dann der gewichtete Mittelwert aus den 3 Messungen.

Messung der Luftkapazität (Groporenvolumen, Makroporosität)

Die Desorptionskurve beschreibt die charakteristische Beziehung zwischen Matrixpotential (Saugspannung) und Wassergehalt eines Bodens.

Ihre Bestimmung wurde zum Zweck der Effizienzsteigerung in der Bewässerungslandwirtschaft im Südwesten der USA eingeführt.

Um die Desorptionskurve zu bestimmen, werden die sog. 'ungestörten Bodenproben' in ihrem Stahlzylinder üblicherweise zuerst in einer Sandbox und dann auf einer porösen Platte im Drucktopf entwässert (desorbiert). Die Details unterscheiden sich je nach Labor.

Allen Methoden ist gemeinsam, dass die Bodenproben nicht am gleichen Ort gesättigt und entwässert werden. Bei der Überführung vom Ort der Sättigung zur Sandbox oder zur porösen Platte kann die Probe aus den grössten Poren Wasser verlieren. Ausserdem weisen die Bodenproben an der Oberkante bereits eine Saugspannung von mindestens 4 hPa auf, was ebenfalls zu einer minimalen Entwässerung führt. Bei der Desorption in der Sandbox besteht zudem immer die Unsicherheit, ob die angelegte Saugspannung, (Unterdruck) im gewünschten Mass auf die Proben wirkt. Alle üblicherweise angewandten Methoden führen demzufolge zu Fehlern, deren Ausmass unklar ist. Diese Fehler sind für die Bestimmung der Desorptionskurve nicht relevant, fallen aber bei der Erfassung des Groporenanteils (z.B. für die Festsetzung von Richt- oder Prüfwerten) entscheidend ins Gewicht.

Mit dem Ziel, die Luftkapazität oder Makroporosität möglichst fehlerfrei zu bestimmen, liess die FaBo ZH im Jahr 2001 durch B. Buchter und L. Matile eine Apparatur bauen, die sich dadurch auszeichnet, dass die Bodenproben am gleichen Ort gesättigt und desorbiert werden (Abb. 4).

Ausserdem wird das Volumen des desorbierten Wassers nicht aufgrund der Differenz des Probengewichts sondern direkt an einer Bürette ab-

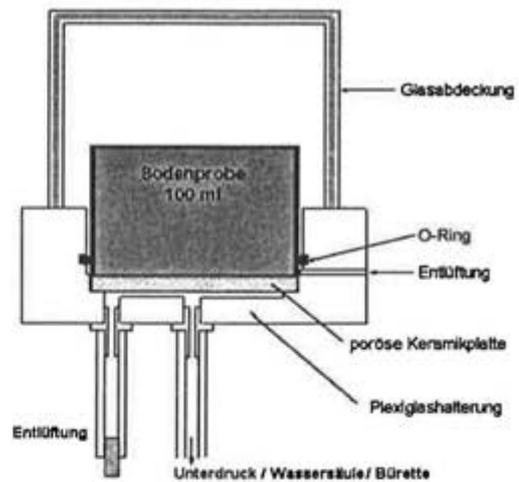


Abbildung 4

Volumetrische Methode mit Hängender Wassersäule (VHW) nach Buchter und Matile (2002): Die Probe wird am selben Ort aufgesättigt und desorbiert. Das Volumen des desorbierten Wassers wird nicht anhand der Differenz des Probengewichts, sondern direkt mit einer Bürette bestimmt.

abgelesen, wodurch sich eine aufwändige Fehlerrechnung erübrigt. Die Methode ist einfach, physikalisch unproblematisch und gut überwachbar, allerdings relativ zeitintensiv.

Mit der VHM-Methode wurden bei vier von fünf Messreihen immer signifikant höhere Groporen-Anteile ermittelt als mit der Sandbox. Dies spricht dafür, diesen Ansatz weiter zu verfolgen.

Abbildung 5 zeigt das Resultat zweier Serien.

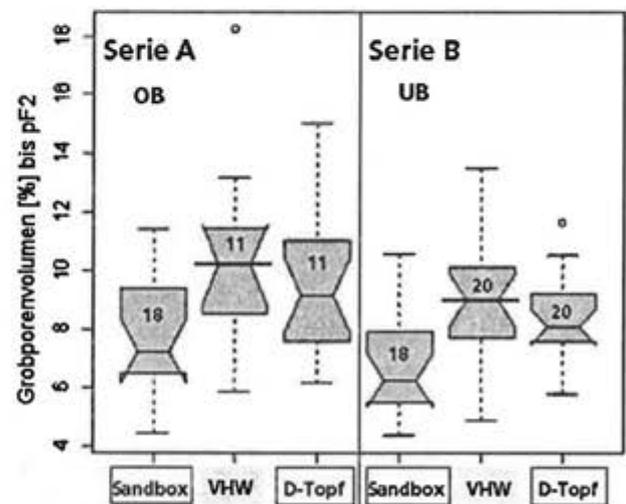


Abbildung 5

Groporenvolumen (bis pF 2) bestimmt an zwei Serien mittels VHW-Methode, Drucktopf und Sandbox. (Die Zahlen in den Box-Plots stehen für die Anzahl gemessener Proben).

Literatur

Buchter B. Matile L. (1998): Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (k_{sat}) an 'ungestörten' Bodenproben, FaBo ZH
 Buchter B. Matile L. (2000a): Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (k_{sat}) an ausgewählten Standorten, FaBo ZH
 Buchter B. Matile L. (2000b): Messung der gesättigten Wasserleitfähigkeit (k_{sat}): Laboranleitung, FaBo ZH
 Buchter B. Matile L. (2002): Verfahrensoptimierung bei der Bestimmung von Groporen, FaBo ZH
 Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz (2004): Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen / Dokument 13

Effects of trafficking by heavy agricultural machinery on mechanical and structural properties of restored soil

Beat Schäffer¹, Martin Stauber², Ralph Müller² and Rainer Schulin¹

¹ Institute of Terrestrial Ecology, ETH Zürich, Universitätsstrasse 16, CH-8092 Zürich.

² Institute for Biomedical Engineering, University and ETH Zürich, Moussonstrasse 18, CH-8044 Zürich.

Abstract

More and more fertile agricultural soil is temporarily excavated and later restored. In order to study the mechanical stability of a soil that was restored according to current regulations, we conducted two traffic experiments (2 and 10 passes) in two subsequent years on a soil which had been restored 4 years prior to the beginning of the experiments. Whereas 2 passes mainly reduced coarse porosity, 10 passes decreased coarse porosity even stronger and also changed the mechanical properties and macro-pore structure. Precompression stress was increased, while the slope of the virgin compression line was decreased. This latter effect may be related to the convention that moisture conditioning of the samples relates to water tension (field capacity) and not to water content. Visualization by computed tomography revealed that larger macro-pore spaces were more affected during compaction than smaller ones. The remaining macro-pores were much less interconnected than without trafficking. In summary, although the soil had partially regained mechanical strength within 4 to 5 years after its restoration, it still remained susceptible to compaction.

Keywords: soil restoration, compaction, precompression stress, compression index, macro-pore structure, computed tomography

Zusammenfassung: Auswirkungen der Befahrung mit schwerem landwirtschaftlichem Gerät auf die mechanischen und strukturellen Eigenschaften einer Rekultivierung

Immer mehr landwirtschaftlich genutzte Böden werden vorübergehend ausgehoben und später rekultiviert. Um die mechanische Stabilität eines nach geltenden Richtlinien rekultivierten Bodens zu testen, führten wir zwei Befahrungsexperimente (2 und 10 Befahrungen) in zwei aufeinander folgenden Jahren auf einer Rekultivierung durch, welche 4 Jahre vor Beginn der Versuche angelegt worden war. Während 2 Befahrungen vor allem die Grobporosität verminderten, reduzierten 10 Befahrungen diese noch stärker und veränderten ausserdem das mechanische Verhalten und die Struktur der Makroporen. Die Vorbelastung war erhöht, die Steigung der Erstverdichtungsgerade aber vermindert. Letzteres kann damit zusammenhängen, dass die Proben standardmässig auf ein bestimmtes Wasserpotential (Feldkapazität) und nicht auf einen bestimmten Wassergehalt konditioniert werden. Von den mittels Computertomographie visualisierten Makroporen wurden die grösseren mehr in Mitleidenschaft gezogen als die kleineren. Die verbleibenden Makroporen waren viel schwächer vernetzt als ohne Befahrung. Fazit: Obwohl sich der Boden in den 4 bis 5 Jahren nach Beginn der Rekultivierung teilweise stabilisiert hatte, war er immer noch empfindlich gegenüber Verdichtung.

1. Introduction

More and more fertile agricultural soil is excavated due to construction activities and gravel exploitation. A large fraction of this soil is removed only temporarily for later restoration. Freshly restored soils are very susceptible to compaction, as the disruption of soil structure weakens mechanical stability. Therefore, Swiss guidelines like BUWAL (2001) or FSK (2001) allow only gentle cultivation for at least 3 to 4 years after restoration. However, how much mechanical stability is regained during that time has not yet been studied systematically.

The objective of this study was to investigate the effects of the first use of heavy agricultural machinery on the mechanical and structural

properties of a restored soil after several years of regeneration under restricted cultivation as prescribed by the Swiss guidelines. In particular, we wanted to test if the conventional concept of precompression stress provides a useful and valid model to describe the mechanical behaviour of a restored soil.

2. Materials and Methods

The test area was located on the restoration site "Birchi", near Solothurn (7°33' E, 47°12' N). After temporary removal for the open-cast construction of a highway tunnel, the site was restored in 1999 and gently cultivated as grassland, avoiding any trafficking by heavy machines and trafficking under wet conditions. The soil material used for

restoration originated from a Eutric Cambisol (in FAO terms). The texture was classified as a loam to sandy loam according to US soil taxonomy (USDA, 1997).

In 2003 and 2004, we performed two traffic experiments using a fully loaded combine harvester with a weight of approximately 10 Mg and mean ground contact pressures of 119 and 205 kPa under the front and rear tyres, respectively. The test area was wetted prior to the experiments, resulting in a soil water potential of around -2 to -4 kPa at the time of trafficking. On a single day each year, two passes were made with the combine harvester on the test area in 2003 and ten passes in 2004. After trafficking, soil cores were sampled at 0.12 – 0.22 m and 0.27 – 0.37 m depth, below and beside the tracks, at two locations that were approximately 20 meters apart from each other (denoted as plot 1 and 2). In total, 96 cylindrical soil cores were sampled per experiment for the determination of coarse porosity and mechanical properties. Additionally, 39 and 96 cuboid cores were sampled after the first and second experiment, respectively, for the analysis of the macro-pore structure.

Coarse porosity (equivalent diameters > 50 μm) was determined as the air-filled pore volume drained after desorption to a water potential of -6 kPa. The drained samples were then used to conduct confined uniaxial compression tests as described by BERLI et al. (2004). From the obtained pressure-consolidation curves we determined the **precompression stress** (σ_p) according to the graphical procedure by CASAGRANDE (1936) and the **compression index** (CI), i.e. the slope of the virgin compression line (Fig. 1).

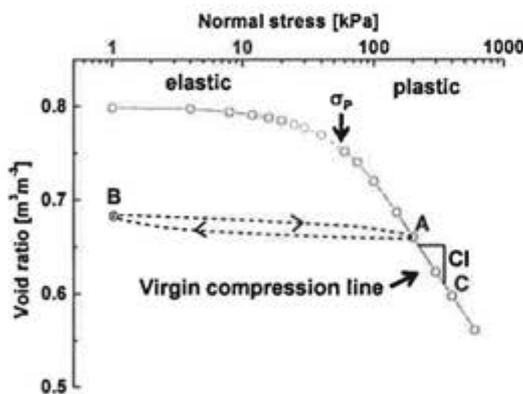


Fig. 1: Concept of precompression stress.

Precompression stress has been proposed e.g. by HORN (1981) and KIRBY (1991) as the upper limit to which a soil may be loaded without damage. According to the conventional concept of precompression stress (Fig. 1), deformation below σ_p is elastic (reversible) and above σ_p (point A in Fig. 1) plastic (irreversible). Compression above σ_p occurs along the virgin compression line. Upon unloading, the maximum applied

stress (point A) becomes the new σ_p , and upon reloading to even higher loads (point C), the soil is further compressed along the original virgin compression line. Thus, this concept implies that σ_p increases, whereas CI remains unchanged during compaction.

Using computed tomography (CT), we visualized and quantified the soil structure of samples that were conditioned to a water potential of -6 kPa. A short introduction to the principles of CT can be found for example in CLAUSNITZER and HOPMANS (2000). For our study, we used a high resolution quantitative CT system designed for *in vivo* measurements of human extremities (pQCT, Scanco Medical AG, Bassersdorf, Switzerland). Photon energy was set to 60 kVp. With an isotropic voxel-resolution of 90 μm^3 , macro-pores with diameters less than 90 μm could not be detected. For analysis, reconstructed grey-level images were binarized ("black and white image") to separate macro-pores from the solid phase using a global thresholding procedure (Fig. 2).

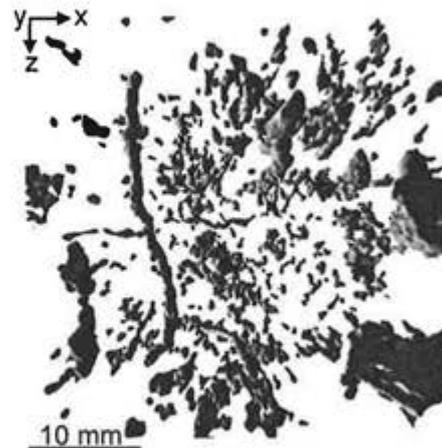


Fig. 2: Example of a three-dimensional CT image of the soil macro-pore space.

From these images several structural parameters were assessed using three-dimensional quantitative image analysis techniques (HILDEBRAND et al., 1999). In short, macro-pore volume was calculated as the volume enclosed by the triangulated surface of the macro-pore space. The **macro-porosity** is the macro-pore volume divided by the sample volume. The **mean pore diameter** of the macro-pore space was determined using the procedure proposed by HILDEBRAND and RÜEGSEGG (1997). The **mean pore separation** was calculated by applying the same procedure to the solid phase. The **connectivity density**, i. e. the number of handles (or redundant paths) per unit soil volume, was determined according to ODGAARD and GUNDERSEN (1993).

To test whether differences in parameters between control and experimental groups were statistically significant, non-parametric Wilcoxon-Mann-Whitney U-tests were used.

3. Results

As was already indicated by deeper wheel ruts, ten passes had much stronger effects on the soil properties than two passes.

Two passes significantly reduced **coarse porosity** ($P < 0.05$ in three of four cases, Fig. 3), but only slightly affected the mechanical properties and the parameters of the macro-pore structure (data not shown).

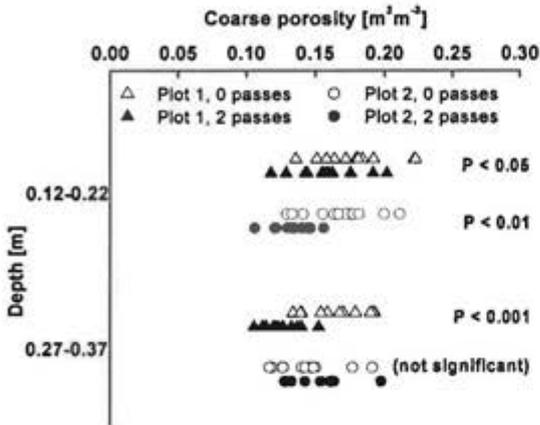


Fig. 3: Coarse porosity of non-trafficked and twice trafficked locations.

Ten passes decreased **coarse porosity** much stronger than two passes ($P < 0.001$ in all four cases, Fig. 4) and also strongly changed the pressure consolidation curves and the parameters of the macro-pore structure.

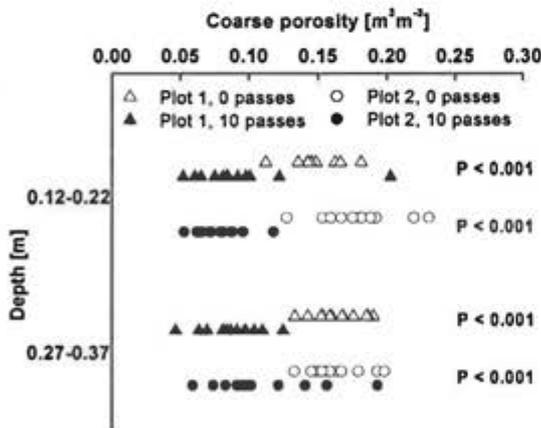


Fig. 4: Coarse porosity of non-trafficked and tenfold trafficked locations.

Fig. 5 shows the pressure-consolidation curves (averages of 6 to 11 experimental curves) of the non-trafficked and tenfold trafficked locations. After 10 passes the transition zone between elastic and plastic behaviour was shifted towards higher normal stresses. Consequently, the **pre-compression stress** was increased ($P < 0.05$ in three of four cases, data not shown). In addition, the **compression index** was highly significantly

decreased ($P < 0.001$, data not shown) and in close correlation to the initial void ratio ($R^2 = 0.43$, data not shown). This relationship was not altered by the experimental trafficking: The slope of the virgin compression line decreased with decreasing void ratio. Consequently the curves converged with increasing applied stresses (Fig. 5).

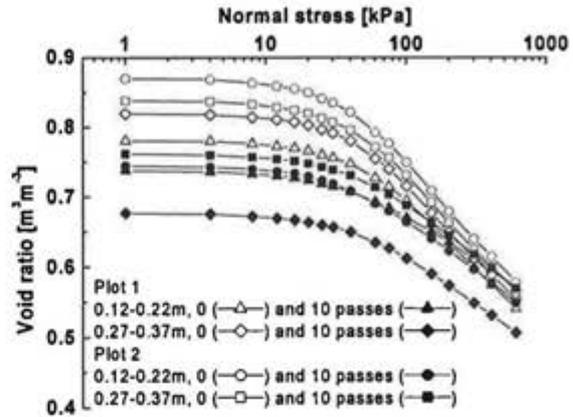


Fig. 5: Mean pressure-consolidation curves of non-trafficked and tenfold trafficked locations.

The **macro-porosity** was significantly reduced after 10 passes ($P < 0.01 - 0.001$, data not shown). The **mean pore diameter** was decreased in the topsoil and in tendency also in the subsoil (Fig. 6). This most likely means that larger macro-pores were more affected during compaction than smaller ones. In contrast to the general trend, four samples of the trafficked locations had very large mean pore diameters (Fig. 6). These samples contained at least one very large pore each.

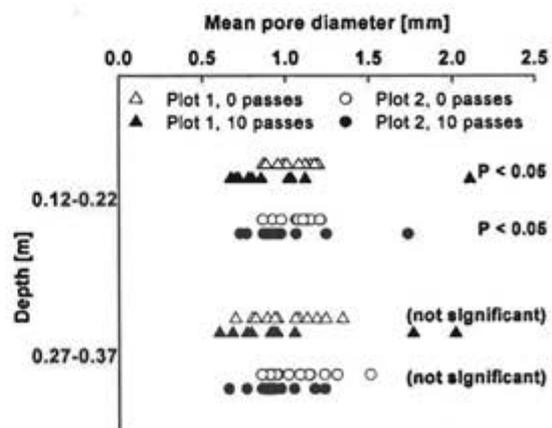


Fig. 6: Mean pore diameter of the macro-pore space of non-trafficked and tenfold trafficked locations.

Compaction also increased the **mean pore separation** ($P < 0.001$ in three of four cases, data not shown). As a consequence, the remaining pores were more isolated and the pore network became less interconnected; the **connectivity density** was reduced to almost zero (Fig. 7).

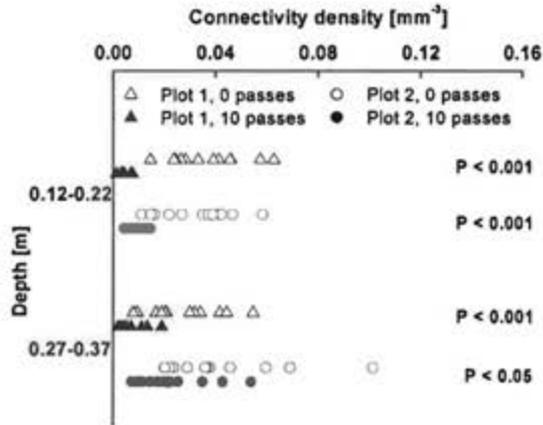


Fig. 7: Connectivity density of the macro-pore space of non-trafficked and tenfold trafficked locations.

4. Discussion and Conclusions

Soil compaction was much more severe after ten than after two passes. The effects of repeated trafficking were to some extent obviously cumulative.

10 passes not only increased σ_p , but also reduced CI. In laboratory compression tests, samples are loaded and reloaded without changing their water content, and CI remains unchanged. We conditioned all samples to the same water potential prior to the compression tests. For the soil cores representing the trafficked locations, this corresponded to a sample conditioning, i.e. to a change in water content, between loading (traffic experiment) and reloading (compression test). Whether this change fully explains the decrease in CI is not known. Certainly, there is an urgent need to further investigate the relations between moisture conditions and the mechanical behaviour of soils.

Ten passes strongly changed the macro-pore structure which was assessed by CT. Although macro-porosity was generally reduced, some large macro-pores resisted the high mechanical loads. The strong decrease in connectivity density indicates that air and water conductivity of the soil have been substantially reduced.

The investigated restored soil had regained some mechanical stability during the period of restricted cultivation, which is prescribed by the Swiss guidelines. Even under fairly wet conditions it could withstand 2 passes by a combine harvester

without major damage. But 10 successive passes resulted in strong compaction and collapse of the soil pore space.

5. References

- BERLI, M., B. KULLI, W. ATTINGER, M. KELLER, J. LEUENBERGER, H. FLÜHLER, S.M. SPRINGMAN, and R. SCHULIN, 2004: Compaction of agricultural and forest subsoils by tracked heavy construction machinery. *Soil Till. Res.* 75, 37-52.
- BUWAL (2001): Bodenschutz beim Bauen, Leitfaden Umwelt, Vol. 10. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL/SAEFL), Bern, 83 pp.
- CASAGRANDE, A. (1936): The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. III. Harvard University, Cambridge, pp. 60-64.
- CLAUSNITZER, V., and J.W. HOPMANS, 2000: Pore-scale measurements of solute breakthrough using microfocus X-ray computed tomography. *Water Resour. Res.* 36, 2067-2079.
- FSK (2001): Schweizerischer Fachverband für Sand und Kies (FSK), FSK-Rekultivierungsrichtlinie, Richtlinie für den fachgerechten Umgang mit Böden. Haller und Jenzer AG, Burgdorf, 81 pp.
- HILDEBRAND, T., and P. RÜEGSEGGER, 1997: A new method for the model-independent assessment of thickness in three-dimensional images. *J. Microsc.* 185, 67-75.
- HILDEBRAND, T., A. LAIB, R. MÜLLER, J. DEQUEKER, and P. RÜEGSEGGER, 1999: Direct three-dimensional morphometric analysis of human cancellous bone: microstructural data from spine, femur, iliac crest, and calcaneus. *J. Bone Miner. Res.* 14, 1167-1174.
- HORN, R., 1981: Eine Methode zur Ermittlung der Druckbelastung von Böden anhand von Drucksetzungsversuchen. *Z. f. Kulturtechnik und Flurbereinigung* 22, 20-26.
- KIRBY, J.M., 1991: Strength and deformation of agricultural soil: measurement and practical significance. *Soil Use Manage.* 7, 223-229.
- ODGAARD, A., and H.J.G. GUNDERSEN, 1993: Quantification of connectivity in cancellous bone, with special emphasis on 3-D reconstructions. *Bone* 14, 173-182.
- USDA (1997): *Keys to Soil Taxonomy* by the Soil Survey Staff, Soil Cons. Serv., U.S. Dept. Agr., 7th ed. Pocahontas Press Inc., Blacksburg, Virginia, 545 pp.

Können Bodenverdichtungen durch das Beschränken der mechanischen Belastung auf Werte kleiner als die Vorbelastung vermieden werden?

Thomas Keller^{a,*}, Peter Weisskopf^b und Johan Arvidsson^a

^a Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Soil Sciences, Box 7014, SE-75007 Uppsala, Sweden

^b Swiss Federal Research Station for Agroecology and Agriculture (FAL), Reckenholzstrasse 191, CH-8046 Zürich, Switzerland

* Corresponding author: Tel.: +46-18-671210; Fax: +46-18-672795; E-mail: thomas.keller@mv.slu.se

Zusammenfassung

In der Landwirtschaft werden zunehmend schwerere Maschinen eingesetzt, was das Risiko von Bodenschadverdichtungen erhöht. Allgemein wird davon ausgegangen, dass Bodenverdichtungen verhindert werden können, wenn die mechanische Belastung eines Gefüges geringer ist als dessen Vorbelastung.

Der Einfluss von Probengrösse, Belastungsdauer, Art des Verdichtungstests und Auswertungsmethode auf den Wert der Vorbelastung wird diskutiert. Es kann festgestellt werden, dass die Vorbelastung als exakter Wert nicht eindeutig bestimmbar ist, sondern von verschiedenen Faktoren beeinflusst wird.

Um das Konzept der Vorbelastung als Grenzwert zwischen elastischer und plastischer Deformation zu testen, wurden Befahrungsversuche mit Landwirtschaftsmaschinen durchgeführt. Bei jedem Experiment wurden vertikale Druckspannungen und Setzungen in verschiedenen Bodentiefen gemessen; zudem wurden jeweils die entsprechenden Vorbelastungswerte im Labor bestimmt.

Die Resultate der Befahrungsversuche zeigen, dass die Vorbelastung kein echter Grenzwert zwischen elastischer und plastischer Deformation ist: auch wenn die mechanische Belastung kleiner war als der Vorbelastungswert, wurden geringe bleibende Bodendeformationen gemessen. Weiter konnte gezeigt werden, dass Bodenverdichtungen vermieden werden können, wenn die Druckspannung im Unterboden auf Werte unter 50 kPa beschränkt wird. Dies bedeutet für die Praxis, dass nur relative geringe Radlasten und Reifendrücke eingesetzt werden dürfen, um Bodenverdichtungen vollständig zu verhindern.

Abstract: Can soil compaction be avoided by limiting the applied load to values below the precompression stress?

The weight of agricultural machinery is increasing, which increases the risk of soil compaction. Generally it is assumed that soil compaction can be avoided by limiting the applied load to values below the precompression stress.

The effect of sample size, loading time, nature of compaction test, and determination method on the value of the precompression stress is discussed. It can be noted that the precompression stress is not an exact value, but affected by a number of factors.

In order to test the concept of precompression stress as a threshold between elastic and plastic soil deformation, wheeling experiments were conducted with agricultural machinery. During each experiment, vertical stress and vertical displacement were measured at different depths, and the corresponding precompression stress was determined in the laboratory.

The results of the wheeling experiments showed that the precompression stress is not a real threshold between elastic and plastic deformation: even when the mechanically applied stress was smaller than the precompression stress, small irreversible deformations were measured. Furthermore it was shown that soil compaction could be avoided by limiting the stress in the subsoil to values below 50 kPa. For practical purposes, this implies that only relatively small wheel loads and tyre inflation pressures must be used in order to completely avoid soil compaction.

Keywords: soil compaction, precompression stress, soil stress, soil displacement, oedometer

1. Einleitung

Die steigenden Anforderungen an Zugkraft und Leistungsfähigkeit von Landwirtschaftsmaschinen haben höhere Maschinengewichte zur Folge. Somit steigt das Risiko von Bodenschadverdichtungen. Da mechanische Massnahmen zur Regeneration schadverdichteter Böden ihr Ziel meist verfehlen und zudem sehr teuer sind, müssen Bodenverdichtungen verhindert werden. Das Risiko der Entstehung von Bodenverdichtungen kann minimiert werden, indem die z.B. durch Landwirtschaftsmaschinen mechanisch aufgebrachte Belastung beschränkt wird. Allgemein wird davon ausgegangen, dass Bodenverdichtungen verhindert werden können, wenn die mechanische Belastung geringer ist als der sogenannte Vorbelastungswert (z.B. *HORN und LEBERT, 1994*). Die Vorbelastung markiert theoretisch den Übergang vom elastischen zum plastischen Deformationsverhalten eines Bodens. Ziel dieses Artikels ist es, verschiedene Faktoren, die den Vorbelastungswert beeinflussen können, zu diskutieren, gemessene Druckspannungen und Deformationen aus Befahrungsversuchen den im Labor ermittelten Vorbelastungswerten gegenüberzustellen sowie die Eignung der Vorbelastung als Grenzwert zur Vermeidung von Bodenverdichtungen zu diskutieren.

2. Den Vorbelastungswert beeinflussende Faktoren

Es ist grundsätzlich fraglich, ob in strukturierten Böden ein abrupter Übergang von elastischem zu plastischem Deformationsverhalten stattfindet und ob sich in diesen Fällen überhaupt ein Grenzwert im Sinne des Vorbelastungskonzeptes bestimmen lässt. *BERLI (2001)* schreibt etwa, dass der Vorbelastungspunkt gewöhnlich nicht anhand eines scharfen Knicks der Drucksetzungskurve erkannt werden kann, sondern dass er ein eher operativ definierter Punkt in einem eher kontinuierlichen Übergang zwischen Wiederbelastungs- und Erstbelastungsgerade der Drucksetzungskurve ist. Ähnliches wurde etwa von *SALIRE et al. (1994)*, *ARVIDSSON und KELLER (2004)* sowie *KELLER et al. (2004)* berichtet.

Obwohl die Vorbelastung als Wert häufig verwendet wird, gibt es keine Norm zu deren Bestimmung. Die Methode von *CASAGRANDE (1936)* ist als Standardmethode anerkannt und wird am häufigsten angewendet. Kern dieser Methode ist es, denjenigen Punkt auf der Drucksetzungskurve zu bestimmen, an dem die Drucksetzungskurve den kleinsten Krümmungsradius aufweist. Dies ist jedoch wegen der im vorhergehenden Abschnitt erläuterten Probleme oft schwierig. Deshalb gibt es andere (einfachere) Methoden zur Bestimmung der Vorbelastung, die jedoch zu unterschiedlichen Vorbelastungswerten

führen können (*DIAS JUNIOR und PIERCE, 1995*; *ARVIDSSON und KELLER, 2004*; *KELLER et al., 2004*).

Weiter gilt es zu beachten, dass der Vorbelastungswert von der Art und Weise des durchgeführten Verdichtungsversuches abhängig ist. Im Labor wird die Vorbelastung normalerweise im Ödometerversuch ermittelt; dabei wird die Probe entweder sequentiell (aufgrund mehrerer unterschiedlicher Druckstufen) oder mit konstanter Deformationsrate zusammengedrückt, wobei die jeweilige Belastungsdauer einen grossen Einfluss auf den resultierenden Wert der Vorbelastung hat (*LEBERT et al., 1989*). Generell ist der Vorbelastungswert umso höher, je kürzer die Belastungsdauer ist. Dies liegt daran, dass das Porenwasser bei kurzer Belastungsdauer nicht schnell genug wegdrainieren kann.

Der Wert der Vorbelastung ist zudem abhängig von der Probengrösse. Mit zunehmender Probenhöhe steigt die Reibung entlang der Zylinderwandung, was zu einer Unterschätzung der Setzung und damit normalerweise zu einer Überschätzung der Vorbelastung führt. *KOOLEN (1974)* analysierte den Einfluss der Wandreibung und folgerte, dass Proben für Ödometerversuche mit einem Verhältnis von Durchmesser d zu Höhe h von maximal 2 bis 3 die Wandreibung soweit beschränken, dass eine akzeptable Genauigkeit resultiert. Andererseits ist der relative Fehler durch Störungen an den Seiten- und Stirnflächen der Proben umso grösser, je geringer die Probenhöhe ist. *MUHS und KAHNY (1954)* schätzten, dass sowohl Fehler aufgrund von Wandreibung wie auch aufgrund von Probenstörungen für Zylinderproben mit einem Verhältnis von d zu h von 1 am geringsten sind. Der Einfluss der Probengrösse auf den Vorbelastungswert wurde auch von *BERLI (2001)* aufgezeigt. Er führte ihn vor allem auf die räumliche Variabilität und Probenstörungen zurück.

Um diese durch die Reibung an der Zylinderwandung und die Störungen bei der Probenahme und -aufbereitung entstehenden Probleme zu umgehen, kann das Drucksetzungsverhalten eines Bodens direkt im Feld mittels Plattenversuch ermittelt werden. Für kleine Deformationen ist das Drucksetzungsverhalten eines Bodens im Ödometerversuch ähnlich seinem Verhalten im *in situ* Plattenversuch (*EARL, 1997*). In diesem Deformationsbereich kann der Vorbelastungswert bestimmt werden (*DAWIDOWSKI et al., 2001*). Die Vorbelastungswerte aus Plattenversuchen und Ödometerversuchen sind oft vergleichbar (*DAWIDOWSKI et al., 2001*; *KELLER et al., 2004*). Für grössere Deformationen unterscheidet sich aber das Drucksetzungsverhalten im Ödometer und im Feld: während im Ödometerversuch Setzungen ausschliesslich durch Verdichtung hervorgerufen werden, sind Setzungen im Plattenversuch vor allem das Resultat lateraler Deformationen.

3. Befahrungsversuche

3.1. Material und Methoden

Während der Jahre 2000-2004 wurden an 11 Standorten in Schweden und Dänemark Befahrungsversuche mit Landwirtschaftsmaschinen durchgeführt. Die Textur der Böden variierte von sandigem Lehm bis Ton. Bei jedem Experiment wurden vertikale Druckspannungen und Setzungen in verschiedenen Tiefen des Unterbodens (typischerweise in 0,3, 0,5 und 0,7 m Tiefe) gemessen. An jedem Standort wurden üblicherweise drei Wiederholungen (an drei Stellen) durchgeführt. Die Messmethode ist in *ARVIDSSON und ANDERSSON (1997)* beschrieben. Die vertikale Deformation lässt sich aus den in zwei unterschiedlichen Bodentiefen gemessenen Setzungen berechnen.

An jedem Standort wurden gleichzeitig zu den Befahrungsversuchen in verschiedenen Tiefen Bodenproben entnommen und an ihnen der Vorbelastungswert im Ödometerversuch nach der Methode von *CASAGRANDE (1936)* bestimmt. Die Resultate der Befahrungsversuche (Druckspannung, Setzung) wurden dann der gemessenen Vorbelastung gegenübergestellt.

3.2. Resultate und Diskussion

Abbildungen 1 und 2 zeigen die Messergebnisse aller Standorte. Dieses Vorgehen mag unzulässig erscheinen, da sich die Bodenart zwischen den

Standorten unterscheidet, erlaubt aber eine generelle Übersichtsanalyse und liefert interessante Anhaltspunkte. Die Saugspannung variierte nur unwesentlich zwischen den Standorten und lag nahe der Feldkapazität. In Abbildung 1 wurde die Bodenart zudem indirekt via Vorbelastung berücksichtigt.

Die Zusammenstellung von gemessener Druckspannung und vertikaler Deformation einerseits und ermittelter Vorbelastung andererseits zeigt, dass sich bleibende vertikale Deformationen auch dann einstellten, wenn die Druckspannung geringer war als die Vorbelastung, d.h. wenn das Verhältnis zwischen Druckspannung und Vorbelastung kleiner als 1,0 war (Abbildung 1).

Bodendeformationen bei Druckspannungen, die kleiner als die Vorbelastung waren, wurden auch von *BLUNDEN et al. (1994)*, *ARVIDSSON et al. (2002)*, *TRAUTNER & ARVIDSSON (2003)* und *KELLER et al. (2004)* gemessen.

Hier muss angemerkt werden, dass mit der in dieser Studie verwendeten Messmethode volumetrische Deformationen im Feld nicht ermittelt werden konnten. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass laterale Deformationen im Unterboden vernachlässigbar sind (*KOOLEN und KUIPERS, 1983*). Ebenso müssen Unsicherheiten bei den Druckspannungsmessungen berücksichtigt werden. Nach *KIRBY (1999a,b)* wird die Druckspannung und damit das Verhältnis zwischen Druckspannung und Vorbelastung mit den verwendeten Sensoren eher leicht über- als unterschätzt.

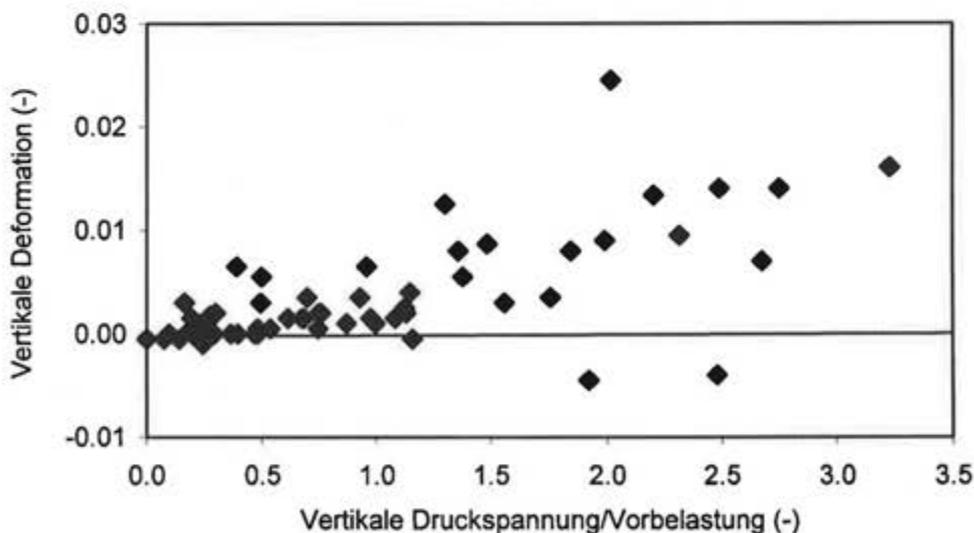


Abbildung 1. Gemessene vertikale Deformation als Funktion des Verhältnisses zwischen gemessener vertikaler Druckspannung und Vorbelastung an 11 Standorten

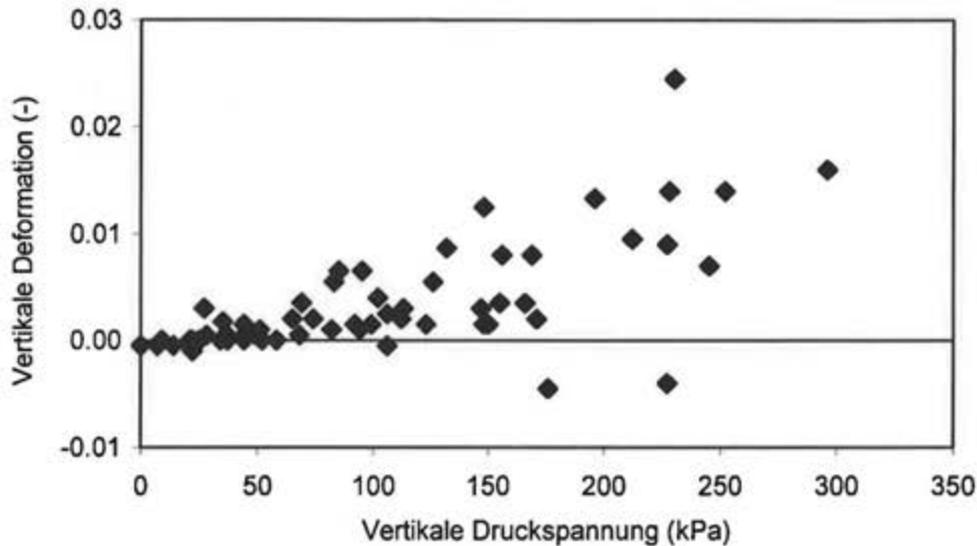


Abbildung 2. Gemessene vertikale Deformation als Funktion der gemessenen vertikalen Druckspannung an 11 Standorten

Die vertikale Deformation nahm mit steigendem Verhältnis von vertikaler Druckspannung zu Vorbelastung zu. Erstaunlich ist, dass die Zunahme ungefähr linear verlief (Abbildung 1). War der Druckspannungswert geringer als etwa die Hälfte des Vorbelastungswertes, wurden praktisch keine bleibenden Deformationen gemessen.

Abbildung 2 zeigt die gemessene vertikale Deformation als Funktion der gemessenen vertikalen Druckspannung. Die vertikale Deformation ist praktisch null, solange die unmittelbar auf das Bodenelement einwirkende Druckspannung geringer ist als etwa 50 kPa. Deshalb könnte die folgende Daumenregel vorgeschlagen werden: Bodenverdichtungen können verhindert werden, wenn die Druckspannung im Unterboden kleiner ist als 50 kPa. Diese Regel macht Sinn und steht in Einklang mit RUSANOV (1994), der für direkt auf den Unterboden einwirkende Druckspannungen einen maximal zulässigen Richtwert von 25 bis 50 kPa (je nach Bodenfeuchtigkeit) vorschlägt. Für die Praxis würde das bedeuten, dass – selbst unter Berücksichtigung des Druckspannungs-abbauens infolge der Druckausbreitung – nur relativ geringe Radlasten und geringe Reifendrücke eingesetzt werden dürften.

Das in Abbildung 1 und 2 gezeigte Verhalten von Böden kann verschiedene Gründe haben. Druckspannungen im Feld unter einem vorbeifahren Rad sind dynamisch, d.h. ändern ständig ihre Grösse und Richtung – im Gegensatz zum Spannungszustand im Ödometerversuch. Der Spannungszustand in der Bodenprobe im Ödometer unterscheidet sich deshalb

unter Umständen stark vom Spannungszustand im Feld unter einem vorbeifahren Rad (HARTGE und SOMMER, 1980; BAKKER et al., 1995). HORN (1990) folgerte, dass dynamische Belastungen die Scherfestigkeit eines Bodens intensiver verringern als statische Belastungen. Zudem treten Scherbrüche unter Feldbedingungen zuerst bei grossen („schwachen“) Bodenstrukturelementen auf, die eventuell in Zylinderproben nicht erfasst werden können.

Das Drucksetzungsverhalten eines Bodens im Ödometerversuch und im Feld ist in Abbildung 3 dargestellt. Während die an Zylinderproben im Ödometerversuch gemessene Drucksetzungskurve glatt ist und keinen Wendepunkt hat (Abbildung 3a), ist die im Feld unter einem vorbeifahren Rad gemessene Drucksetzungskurve unruhig, enthält Wendepunkte und besteht aus mehreren Bogenabschnitten (Abbildung 3b). Abbildung 3 zeigt auch, dass sich das Drucksetzungsverhalten im Ödometer und im Feld bei grossen Druckspannungswerten unterscheidet: während sich die Drucksetzungskurve im ersteren Fall einer Horizontalen annähert, nähert sich die Kurve im letzteren Fall einer Vertikalen an.

Nach KIRBY (1991) müssen Bodenschadverdichtungen im Feld unter einem vorbeifahren Rad bei einem vertikalen Druckspannungswert erwartet werden, der etwas unterhalb des Vorbelastungswertes liegt, da Scherspannungen in Kombination mit Druckspannungen stärkere Gefügedeformationen hervorrufen als Druckspannungen alleine.

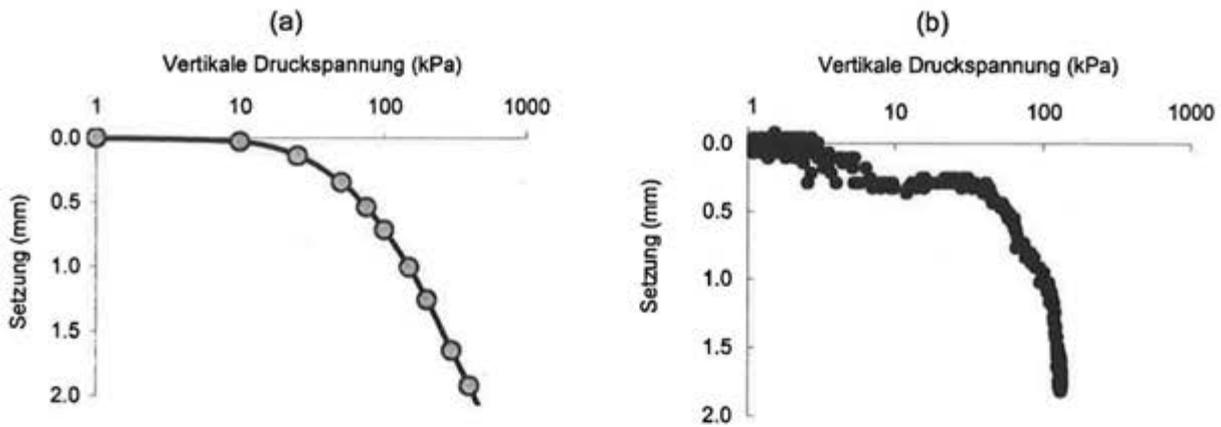


Abbildung 3. Drucksetzungs-Diagramm eines lehmigen Schluffes bei Feldkapazität aus (a) Ödometerversuch und (b) Befahrungsversuch im Feld

Obwohl in den meisten bodenmechanischen Modellen vorausgesetzt wird, dass das Drucksetzungsverhalten eines Bodens im Spannungsbereich unterhalb des Vorbelastungswertes rein elastisch ist, entspricht diese Annahme nicht den tatsächlichen Gegebenheiten (ATKINSON, 1993). Nach ATKINSON (1993) ist der rein elastische Bereich des Drucksetzungsverhaltens eines Bodens sehr klein. In den Befahrungsversuchen wurden rein elastische Deformationen nur dann gemessen, wenn das Verhältnis zwischen gemessener Druckspannung und Vorbelastung kleiner als etwa 0.15 war; wenn das Verhältnis zwischen Druckspannung und Vorbelastung dagegen grösser 0.5 war, wurden bis auf ein paar Ausnahmen immer plastische Deformationen gemessen (Abbildung 1).

4. Ausblick

Aus den vorhergehenden Abschnitten geht hervor, dass die Vorbelastung als Grenzwert für die in einem Boden maximal tolerierbare Druckspannung fragwürdig ist. Deshalb müssen alternative Ansätze diskutiert werden. Aus den Befahrungsversuchen auf verschiedenen Böden ging hervor, dass Verdichtungen verhindert werden können, wenn die unmittelbar auf ein Bodenelement einwirkenden Druckspannungen geringer als 20 bis 50 kPa sind (Abbildung 2). Ebenso konnte gezeigt werden, dass Druckspannungen grösser 50 kPa praktisch immer zu Verdichtungen des Bodengefüges führen. Ein Grenzwert für die maximal tolerierbare Druckspannung könnte andererseits von einem Bodenfunktionsparameter, z.B. dem Porenvolumen, abgeleitet werden. Dabei wäre die maximal tolerierbare Spannung eine direkte Funktion der Bodenqualität. Dies im Gegensatz

zur Vorbelastung, die ausschliesslich von der Form der Drucksetzungskurve abhängig ist.

5. Schlussfolgerungen

Die Vorbelastung stellt keinen exakt bestimmbareren Wert dar, sondern ist von Faktoren wie Art des Verdichtungsversuches, Bestimmungsmethode und Probengrösse abhängig. Die Vorbelastung ist zudem auch nur annähernd ein Grenzwert zwischen elastischer und plastischer Deformation: auch wenn die mechanische Belastung eines Bodenelementes geringer ist als der Vorbelastungswert, muss mit geringen bleibenden Bodendeformationen gerechnet werden.

Die Vorbelastung eignet sich deshalb nur bedingt als Entscheidungskriterium für die maximal zulässige Druckspannung, mit dessen Hilfe sich Bodenschadverdichtungen vermeiden lassen. Im Hinblick auf das Ausarbeiten von Prüfwerten ist es deshalb interessant, z.B. einen maximal tolerierbaren Porenverlust für einen bestimmten Boden zu diskutieren, um dann aus dem Drucksetzungs-Diagramm die entsprechende maximal zulässige Druckspannung abzuleiten.

Die Resultate aus Befahrungsversuchen zeigen, dass Bodenverdichtungen vermieden werden können, wenn die Druckspannung im Unterboden auf Werte von unter 50 kPa beschränkt wird. Dies bedeutet für die Praxis, dass nur relative geringe Radlasten und Reifendrucke eingesetzt werden dürfen, um Bodenschadverdichtung vollständig zu verhindern.

Literatur

- ARVIDSSON, J., and S. ANDERSSON, 1997: Determination of soil displacement by measuring the pressure of a column of liquid. Proceedings of the 14th Conference of ISTRO, Pulawy, Poland, pp. 47-50.
- ARVIDSSON, J., and T. KELLER, 2004: Soil precompression stress I. A survey of Swedish arable soils. *Soil & Tillage Research* 77, 85-95.
- ARVIDSSON, J., TRAUTNER, A., and T. KELLER, 2002: Influence of tyre inflation pressure on stress and displacement in the subsoil. In: Pagliari, M., and Jones, R. (eds.): *Sustainable Land Management – Environmental Protection. Advances in GeoEcology* 35, Catena Verlag, Reiskirchen, pp. 331-338.
- ATKINSON, J., 1993: *An Introduction to the Mechanics of Soils and Foundations through Critical State Soil Mechanics*. McGraw-Hill International Series in Civil Engineering, London, 337pp.
- BAKKER, D.M., HARRIS, H.D., and K.Y. Wong, 1995: Measurement of stress path under agricultural vehicles and their interpretation in critical state space. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 31, 1309-1314.
- BERLI, M., 2001: *Compaction of agricultural subsoils by tracked heavy construction machinery*. ETH Dissertation No. 14132, Institute of Terrestrial Ecology (ItOe), ETH Zurich, Switzerland.
- BLUNDEN, B.G., McBRIDE, R.A., DANIEL, H., and P.S. BLACKWELL, 1994: Compaction of an earthy sand by rubber tracked and tyred vehicles. *Australian Journal of Soil Research* 32, 1095-1108.
- CASAGRANDE, A., 1936: Determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 22-26 June 1936, Vol. III, Cambridge, pp. 60-64.
- DAWIDOWSKI, J.B., MORRISON, J.E., and M. SNIEG, 2001: Measurement of soil layer strength with plate sinkage and uniaxial confined methods. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 44, 1059-1064.
- DIAS JUNIOR, M.S., and F.J. PIERCE, 1995: A simple procedure for estimating pre-consolidation pressure from soil compression curves. *Soil Technology* 8, 139-151.
- EARL, R., 1997: Assessment of the behaviour of field soils during compaction. *Journal of Agricultural Engineering Research* 68, 147-157.
- HARTGE, K.H., and C. SOMMER, 1980: The effect of geometric patterns of soil structure on compressibility. *Soil Science* 130, 180-185.
- HORN, R., 1990: Aggregate characterization as compared to soil bulk properties. *Soil & Tillage Research* 17, 265-289.
- HORN, R., and M. LEBERT, 1994: Soil compactibility and compressibility. In: Soane, B.D., and van Ouwerkerk, C. (eds.): *Soil Compaction in Crop Production*. Elsevier, Amsterdam, pp. 45-69.
- KELLER, T., ARVIDSSON, J., DAWIDOWSKI, J.B., and A.J. KOOLEN, 2004: Soil precompression stress II. A comparison of different compaction tests and stress-displacement behaviour of the soil during wheeling. *Soil & Tillage Research* 77, 97-108.
- KIRBY, J.M., 1991: Strength and deformation of agricultural soil: measurement and practical significance. *Soil Use Management* 7, 223-229.
- KIRBY, J.M., 1999a: Soil stress measurement: Part 1. Transducer beneath a circular loaded area. *Journal of Agricultural Engineering Research* 72, 151-160.
- KIRBY, J.M., 1999b: Soil stress measurement: Part 2. Transducer in a uniform stress field. *Journal of Agricultural Engineering Research* 72, 141-149.
- KOOLEN, A.J. 1974: A method for soil compactibility determination. *Journal of Agricultural Engineering* 19, 271-278.
- KOOLEN, A.J. and H. KUIPERS, 1983: *Agricultural Soil Mechanics*. Advanced Series in Agricultural Sciences Vol. 13. Springer Verlag, Heidelberg, 241 pp.
- LEBERT, M., BURGER, N., and R. HORN, 1989: Effects of dynamic and static loading on compaction of structured soils. In: Larson, W.E., Blake, G.R., Allmaras, R.R., Voorhees, W.B., and Gupta, S. (eds.): *Mechanics and Related Processes in Structured Agricultural Soils*. NATO ASI Series E, 172, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 73-80.
- MUHS, H. und M. KANY, 1954: Einfluss von Fehlerquellen bei Kompressionsversuchen. In: *Fortschritte und Forschungen im Bau-wesen*. Heft 17, Franckh'sche Verlags-handlung, Stuttgart, Germany, pp 125-152.
- RUSANOV, V.A., 1994: USSR standards for agricultural mobile machinery: permissible influences on soils and methods to estimate contact pressure and stress at a depth of 0.5 m. *Soil & Tillage Research* 29, 249-252.
- SALIRE, E.V., HAMMEL, J.E., and J.H. HARDCASTLE, 1994: Compression of intact subsoil under short-duration loading. *Soil & Tillage Research* 31, 235-248.
- TRAUTNER, A., and J. ARVIDSSON, 2003. Subsoil compaction caused by machinery traffic on a Swedish Eutric Cambisol at different soil water contents. *Soil & Tillage Research* 73, 107-118.

Untersuchungen der winterlichen Erosion auf Versuchsflächen in Kirchberg am Walde (Oststeiermark) sowie die Umsetzung der gewonnenen Ergebnisse in die Praxis

Othmar Nestroy

Institut für Angewandte Geowissenschaften, Technische Universität, Rechbauerstrasse 12, A-8010 Graz

Zusammenfassung

Um das Ausmass einer winterlichen Erosion annähernd zahlenmässig erfassen zu können, wurden in den Wintermonaten der Jahre 1996/97, 1998/99 und 1999/2000 24 Parzellen von je 800 m², die nach fünf Fruchtfolgevarianten bewirtschaftet wurden, beobachtet und eventuell aufgetretene Erosionsformen nach einem engmaschigen Raster nach Form und Ausmass im Gelände kartiert. Aufgrund dieser Aufnahme erfolgte dann die Berechnung des transportierten Bodens.

Die Auswertung der erfassbaren Erosionsereignisse während dieser drei winterlichen Perioden lässt folgende Fakten erkennen: Während neben einer permanenten Gründecke oder Konturpflügen auch der Anbau von Silomais als wirksamste Erosionsschutzmassnahmen gesehen werden können, löst vor allem eine maschinelle Bearbeitung in der Falllinie gravierende Erosionen aus. Da insgesamt fünf verschiedene Anbauvarianten untersucht wurden, können dem Landwirt mehrere Möglichkeiten für einen optimalen Erosionsschutz angeboten werden. Die Umsetzung und Propagierung geeigneter Massnahmen bedingt eine „kundenorientierte“ Kommunikation, bei der jedoch ein grosser Nachholbedarf besteht.

Abstract: Investigation of winter erosion on test sites in Kirchberg am Walde (eastern Steiermark) and implementation of the results into practice

Winter erosion was studied on twenty-four 800 m² plots under different crop rotation systems, during the winter seasons of the years 1996/97, 1998/99 and 1999/2000. The erosion forms identified were mapped according to the shape and extent using a tight grid. This was used as a basis for calculating the quantities of transported soil. Evaluation of the erosion events mapped during these three winter seasons leads to the following conclusions: while a permanent green cover and contour ploughing together with the cultivation of silo maize can be considered as an efficient means of erosion protection, the mechanical downhill tillage is one of the main factors causing severe erosion. As five different cultivation methods were studied, several methods for achieving optimal erosion protection can be offered to the farmers. The implementation and propagation of suitable measures requires a customer-oriented communication that itself shows, however, essential lacks.

Keywords: Oststeiermark, winterliche Bodenerosion, erosionsmindernde Massnahmen.

1. Einleitung

PRASUHN (2004) vermittelt im Bulletin 27 der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz mit dem Hinweis, dass in einem Testgebiet im Berner Mittelland mit 270 ha Ackerfläche bei Erosionsschadkartierungen sechs Jahre hindurch in den Wintermonaten mehr Boden erodiert wurden als in den Sommerhalbjahren, nämlich 59%, einen fundierten Einblick in das winterliche Erosionsgeschehen an Standorten in der Schweiz. Zugleich wird auch die Bedeutung dieses Bodenverlustes unterstrichen, da rund 20% des erodierten humosen Oberbodens in die Vorfluter gelangen und so zu deren Eutrophierung beitragen. Diese Aussagen über Boden- und Nährstoffverluste müssen auch im Lichte einer weiteren Aussage gesehen werden.

In einer Studie aus dem Jahre 2004 stellt KNÖBL fest, dass durch die Kombinationskriterien von Seehöhe (im Schnitt mindestens 500 m) und Hangneigung (im Schnitt mindestens 15%) des jeweiligen Gemeindegebietes rund 58% der landwirtschaftlichen Nutzfläche Österreichs als Berggebiet abzugrenzen und somit erosionsgefährdet sind.

Dies lässt vermuten, dass in Österreich auch der winterlichen Erosion durch Wasser eine besondere Bedeutung zukommt.

2. Versuchsanlage und Standortbeschreibung

Für diesbezügliche Untersuchungen bot der Grossparzellenversuch der Land- und Forstwirtschaftlichen Fachschule Kirchberg am Walde (vgl. Abb. 1 und Abb. 2) optimale Bedingungen.



Abbildung 1. Lage der Grossparzellenversuchsanlage

50km

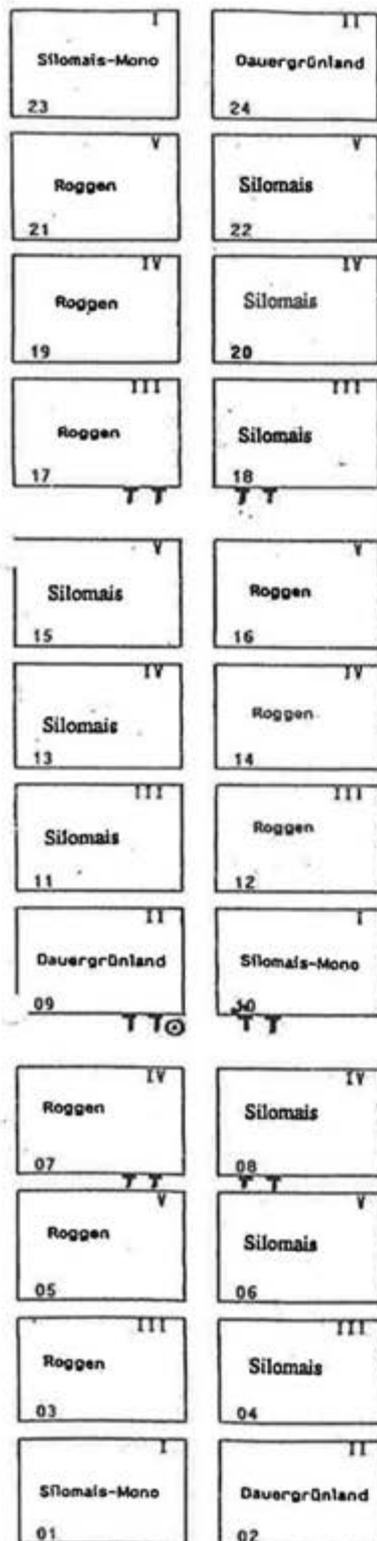


Abbildung 2. Anlage des Grossparzellenversuches

Die Versuchsanlage kann wie folgt beschrieben werden:

Testfelder: Blockanlage mit 3 Wiederholungen

Parzellengrösse: 25m x 32m = 800m²

Versuchsgrösse: 24 Parzellen x 800m² = 1,92 ha

Hangneigung: ca. 18%

Versuchsfragen:

- a) Erosionsminderung im Silomaisbau in Hanglagen;
- b) Auswirkungen dieser Erosionsschutzmassnahmen auf den Ertrag;
- c) Langjähriger Netto-Ertragsvergleich zwischen einer Dauerwiesenneuansaat und Silomais;
- d) Tatsächlicher Bodenabtragsvergleich mit Hilfe von Erosionsfallen

Vermittelt Abbildung 1 die Lage des Grossparzellenversuches in der Oststeiermark, im Bereich zwischen Masenberg im Süden und Wechselmassiv im Norden gelegen, so ist auf Abbildung 2 die Gesamtanlage des Versuches zur Erosionsminderung im Silomaisbau ersichtlich. Das Gebiet befindet sich an der tektonischen Grenze vom Ostalpinen Deckenstockwerk mit stark verwitterten Gneisen und Schiefen des polymetamorphosen Wechselmassivs und der neogenen Beckenfüllung. Das bodenbildende Substrat besteht jedoch aus stark verwitterten sowie sehr dicht lagernden und deshalb kaum wasserdurchlässigen Wanderschuttdecken mit einem hohen Glimmeranteil. Aus diesem Substrat haben sich grossflächig Carbonatfreie Braunerden mit unterschiedlich starker Pseudovergleyung entwickelt. Die Ursachen für die Anlage des Grossparzellenversuches in diesem Bereich sind darin begründet, dass eine bodenmässig relativ einheitliche und für die ortsübliche landwirtschaftliche Nutzung repräsentative Fläche zur Verfügung stand und eine begleitende Betreuung seitens der landwirtschaftlichen Fachschule gesichert war. Diese Versuchsanlage liegt auf einem südostschauenden Mittelhang und weist eine Neigung um 18% auf. Der Bodenprofilaufbau

kann nach der Österreichischen Bodensystematik 2000 (ÖBS 2000) (NESTROY et al., 2000) folgendermassen beschrieben werden:

ApP 0-30 cm: lehmiger Schluff, geringer Grus- und geringer Kiesanteil, schwach humos; Struktur: feinblockig-kantenscharf, schwach feinporös; Konsistenz: plastisch, klebend; Farbe nach Standard Soil Color Charts im Zustand der Fließgrenze (FG): 10 YR 5/6 (gelblich braun); schwach gefleckt, gering durchwurzelt, allmählich übergehend

S1 30-55 cm: lehmiger Schluff, vereinzelt Kiese; Struktur: feinblockig-kantenscharf, dicht gelagert; Konsistenz: stark plastisch, klebend; Farbe (FG): 10 YR 5/8 (gelblich braun); marmoriert, einige Eisen- und Manganflecken, Wurzeln auslaufend, allmählich übergehend

S2 55-90 cm: lehmiger Schluff; Struktur: mittelblockig-kantenscharf, schwach feinporös; Konsistenz: stark plastisch, klebend; Farbe (FG): 10 YR 6/6 (hellgelblich braun); mehrere Fahl- und Rostflecken, mehrere Eisen- und Manganflecken, allmählich übergehend

S3 90-110+ cm: lehmiger Schluff; Struktur: mittelblockig-kantenscharf, schwach feinporös; Konsistenz: stark plastisch, klebend; Farbe (FG): 10 YR 6/8 (hellgelblich braun); einige Eisen- und Fahlflecken, mehrere Eisen- und Manganflecken.

Dieser Boden ist unterzünftig und wird nach der ÖBS 2000 als pseudovergleyte Carbonatfreie Braunerde bezeichnet und entspricht einem Stagnic Cambisol nach der WRB (FAO, 1998).

3. Geländeerhebungen und Ergebnisse

Dieser langjährige und bestens betreute Versuch, bei dem schon seit Jahren auch Untersuchungen über die sommerliche Erosion durchgeführt wurden, war in den Winterhalbjahren 1996/97, 1998/99 und 1999/2000 Objekt der Beobachtung und Kartierung des Erosionsgeschehens. Die Aufnahme der Erosionsereignisse erfolgte nach Hinweisen und Richtlinien von BERNSDORF et al. (1995). Entsprechend den speziellen Standortbedingungen wurde jedoch ein flexibler Kartierschlüssel erstellt sowie ein Fünfmeter- bzw. Einmeter-Raster diesen Erhebungen zugrunde gelegt.

Es darf aber nicht übersehen werden, dass das Erfassen der winterlichen Erosion mit einigen Schwierigkeiten verbunden ist. Da mit Temperaturen weit unter dem Nullpunkt gerechnet werden muss, wurde ein beheizbarer Ombrograph installiert (vgl. Abb. 3), der nicht nur eine Messung des winterlichen Niederschlages -



Abbildung 3. Ombrograph und Versuchspartellen in Kirchberg am Walde

meist in Form von Schnee -, sondern auch eine Registrierung der jeweils herrschenden Lufttemperatur ermöglichte. Es ist nämlich für das Erosionsgeschehen von besonderer Bedeutung, ob vor dem herbstlichen Einschneien die Bodenoberfläche gefroren ist, oder ob der Schnee auf den noch offenen Boden fällt, der noch Wasser aufnehmen kann. Ferner ist im ausklingenden Winter die Zahl der Frostwechsellage von besonderer Bedeutung, da diese die Bodenstruktur stark beeinflussen. Infolge des von Jahr zu Jahr sehr unterschiedlichen Witterungsverlaufs war zumindest diese dreijährige Untersuchungsreihe erforderlich, um einigermaßen gesicherte Aussagen formulieren zu können. Die vollständige Arbeit wurde 2003 (GERLICH et al.) publiziert.

Dem auf Tabelle 1 dargestellten Schema über die Fruchtfolgen ist zu entnehmen, dass Variante I Silomais in Monokultur und Variante II Dauergrünland bedeuten. Die folgenden Varianten sind Silomais und Winterroggen in Rotation mit drei verschiedenen Erosionsschutzmassnahmen, wie Mais-Direktsaat in abfrostendes Gemenge (Variante III), Mulchsaat in überwinterndes Klee gras (Variante IV) und schliesslich Mulchsaat in abfrostendes Gemenge (Variante V).

Tabelle 1. Versuchsvarianten.

Variante I	Silomais in Monokultur ohne Erosionsschutz
Variante II	Dauergrünland mit ständiger Bodenbedeckung.
Variante III – IV	Zweischlägige Fruchtfolgen mit den Hauptfrüchten Silomais und Winterroggen; innerhalb dieser Fruchtfolgen werden verschiedene Erosionsschutzmassnahmen getestet.
Variante III	Mais-Direktsaat in abfrostendes Gemenge.
Variante IV	Mulchsaat nach rotierender Bodenbearbeitung mit zapfwellengetriebenem Gerät in überwinterndes Klee gras.
Variante V	Mulchsaat nach Grubber-einsatz in abfrostendes Gemenge.

Die Form der Kartierung wird in Abb. 4 beispielhaft angeführt; die gesamten Ergebnisse

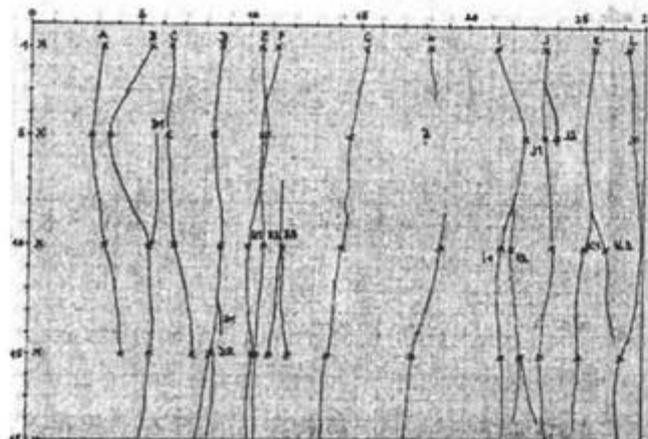


Abbildung 4. Erosionskartierungsbeispiel (Parzelle 10)

mögen dem schon oben zitierten Aufsatz von GERLICH et al. (2003) entnommen werden. An dieser Stelle sei nur soviel festgehalten, dass als Erosionsgefahr Nummer eins im Herbst angelegte Geräte- und Traktorensuren in der Falllinie, als beste Gegenmassnahmen die Variante II (Dauergrünland), Konturpflügen und die Variante IV (Mulchsaat in überwinterndes Klee gras) gesehen werden müssen. Ein Befahren der Flächen in der Falllinie nach der Vegetationszeit sollte nach Möglichkeit vermieden

werden, da diese Spuren Leitbahnen für eine spätere Erosion darstellen. Es handelt sich hier um seit langem bekannte Fakten, doch müssen diese (nochmals) wiederholt und in Zukunft auch umgesetzt werden. Erosionsmindernd sind jedenfalls der Anbau von abfrostendem Gemenge (im vorliegenden Falle Rübsen und Chinakohl) oder Silomais, soweit dies die betriebswirtschaftliche Ausrichtung ermöglicht. Somit kann der erste Teil dieses Beitrages als abgeschlossen angesehen werden.

4. Umsetzung in die Praxis

Der zweite Teil hat Ansätze zur Umsetzung des eben Gesagten zum Inhalt.

Dafür bieten sich verschiedene Wege an, von denen einige, die sich bewährt haben, hier genannt werden sollen.

Um Massnahmen umsetzen zu können, muss häufig als erstes eine psychologische Barriere überwunden werden. Die Bodenerosion durch Wasser ist in Österreich selten so gravierend, dass diese „unter den Nägeln brennt“. Somit bleibt dieses Phänomen meist in einem überschaubaren und somit auch beherrschbaren Bereich, was auch bedeutet, dass die eingetretenen Schäden relativ einfach auszugleichen sind. Es wäre vollkommen falsch, mit erhobenem Zeigefinger auf Schäden hinzuweisen – es soll in erster Linie nur die Problematik angesprochen werden und deshalb steht logischerweise die Frage nach vorbeugenden Massnahmen an der ersten Stelle.

Hier bietet sich eine breite Palette von Massnahmen an, auf die bereits oben Bezug genommen wurde. Von den möglichen prophylaktischen Massnahmen kommen jedoch nur jene in die engere Auswahl, die in Einklang mit den standörtlichen und regionalen Faktoren stehen, wobei die letzte Entscheidung beim jeweiligen Grundeigentümer liegt: Es gibt hier keine Patentrezepte! Voraussetzung dafür ist die genaue Kenntnis des Bodens und seiner bestimmenden physikalischen wie chemischen Parameter. Welche Möglichkeiten der Erosionsminderung bieten sich im gegenständlichen Fall an? Zu nennen wäre eine permanente Gründedecke, konservierende Bodenbearbeitung, Konturpflügen sowie garefördernde Fruchtfolgen zur Hebung der Krümelstabilität. Eine und mehrere Massnahmen sollten angewandt werden, um das ins Auge gefasste Ziel auch langfristig zu erreichen.

Die Ergebnisse über das winterliche Erosionsgeschehen wurden zunächst in der Schule in Form einer Pressekonferenz vorgestellt. Den

Reportern – und dies halte ich für wichtig – wurde eine etwa halbseitige Kurzfassung zur Verfügung gestellt, auf der die wichtigsten Fakten in einer kurzen und leicht fasslichen Form zu Papier gebracht wurden. Wir dürfen nicht aus den Augen verlieren, dass die Bodenkunde eine sehr komplexe Disziplin ist und dadurch von Aussenstehenden oft nur schwer und nur zum Teil erfasst werden kann. Es muss vor der Veröffentlichung eine Aufbereitung erfolgen, doch diese soll und kann nur von bodenkundlichen Experten vorgenommen werden! Neben Vertretern der Printmedien und elektronischen Medien waren auch andere an dieser Thematik Interessierte anwesend, die, erkennbar an dem Frage-und-Antwortspiel, von diesen Ergebnissen positiv beeindruckt waren.

Ein weiterer Informationspfad führt über die Schüler und über die Eltern der Schüler. Die Erosionsversuchsflächen befinden sich in zugänglichem Gelände, sodass sich jeder Interessierte vor Ort vom Geschehen informieren kann. Der Zugang zu dieser Information wird einerseits durch die Schüler, die im Verlauf des Unterrichts dort arbeiten, verstärkt, andererseits auch durch die Berichte der Schüler im Elternhaus.

Weitere Information sollten über gute Schulbücher erfolgen. Dies müsste schon in der Volksschule ansetzen und über die Allgemeinbildenden Höheren Schulen bis zu den Universitäten reichen. Hier besteht in Österreich ein grosser Mangel an fachlich wie optisch gut aufbereiteter Information und somit ein grosser Nachholbedarf. Die Qualität so mancher bodenkundlicher Druckwerke lässt nach wie vor sehr zu wünschen übrig. Meistens sind diese nicht benutzerfreundlich aufbereitet, oft ist die fachliche Kompetenz zu vermissen. So überrascht die mangelnde Akzeptanz durch den Leser nicht, der sich durch die komplizierte Materie und unzureichende Aufbereitung überfordert fühlt. Wir besitzen in Österreich eine Reihe von fundierten bodenkundlichen Grundlagen in Form diverser Bodenkarten und ergänzender Erläuterungen, die es verdienten, eine weitere Verbreitung zu erhalten.

Dieser Nachholbedarf könnte dadurch behoben werden, dass verständliche Informationen in Form von Foldern oder kleinen Broschüren an potentielle Benutzer herangebracht werden. Die Gestaltung des Inhalts solcher Broschüren ist aber Aufgabe bodenkundlicher Experten, denn die vorhandenen Materialien sind viel zu wertvoll (und auch kompliziert), um diese Arbeit Nichtfachleuten zu überlassen. Eine ansprechende graphische Gestaltung sollte zwecks einer

adäquaten Qualität von Inhalt und Form dann einvernehmlich mit dem entsprechenden Experten vorgenommen werden.

Ich bin überzeugt, dass in Abstimmung mit den Betriebsinhabern eine dem jeweiligen Standort angepasste, d.h. standortsadäquate Empfehlung zur Erosionsminderung gefunden werden kann, die weder den natürlichen Standortbedingungen noch den Intensionen des Betriebsinhabers zuwiderlaufen darf.

Diese zu Papier gebrachten Gedanken sind nur als ein erster Ansatz für weitere Anregungen und Aktivitäten zu werten.

5. Literatur

- BERNSDORF, B., G. RICHTER und R.-G. SCHMIDT (1995): Die Kartierung der Schneeschmelz-Erosion. Forschungsstelle Boden-erosion – Universität Trier, Heft 14. Trier.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)(1998): World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Reports 84. Rome.
- GERLICH, J., B. JORDAN und O. NESTROY (2003): Investigation about the Soil Erosion by Water during the Wintertime at the Test Area at Kirchberg am Walde (Styria). In: Aspects of the Erosion by Water in Austria, Hungary and Slovakia. Soil Science and Conservation Research Institute Bratislava, Bratislava, S. 39-62.
- KNÖBL, I. (2004): Zehn Jahre EU-Mitgliedschaft und ländliche Entwicklung. Agrarische Rundschau, nr. 7, S. 11-16.
- Nestroy O., O.H. Danneberg, M. Englisch, A. Gessl, H. Hager, E. Herzberger, W. Kilian, P. Nelhiesel, E. Pecina, A. Pehamberger, W. Schneider und J. Wagner (2000): Systematische Gliederung der Böden Österreichs (Österreichische Bodensystematik 2000). Mitt. d. Österr. Bodenkundl. Ges., H. 60, 99 S.
- PRASUHN, V. (2004): Kartierung aktueller Erosionsschäden im Berner Mittelland. Bulletin BGS 27, S. 79-84.

Do-It-Your-Soil – a Virtual Course in Applied Soil Science

Andreas Schönborn*, Rainer Schulin**

* Do-It-Your-Soil contact office, c/o armadillo media gmbh, Güterstr. 3, Postfach 2116, CH-6002 Luzern, schoenborn@armadillo-media.ch

** Institut für Terrestrische Ökologie, ETHZ, Grabenstrasse 11a, CH-8952 Schlieren

Zusammenfassung

Do-It-Your-Soil (DOIT) ist ein virtueller Kurs in angewandter Bodenkunde. Zielgruppe sind Lernende mit Grundwissen in Bodenkunde und ersten Erfahrungen im Umgang mit Bodenprofilen im Feld.

Do-It-Your-Soil besteht aus 5 Modulen:

1. Wasserspeicherung in Böden
2. Dynamik organischer Böden
3. Bodenerosion
4. Bodenbelüftung und -verdichtung
5. Bodenversauerung

Ziel ist, praktisches Wissen über diese wichtigen Bereiche der angewandten Bodenkunde anschaulich zu vermitteln, so dass die Lernenden dieses Wissen bei der Problemlösung in der Praxis anwenden können. Do-It-Your-Soil möchte dazu beitragen, das Wissen und Verständnis von Böden zu verbreiten und ihre nachhaltige Nutzung zu fördern.

Abstract:

Do-It-Your-Soil (DOIT) is a virtual course in applied soil science. Target group are learners with a general background in soil science including first field experiences with soil profiles.

Do-It-Your-Soil consists of 5 modules:

1. Soil and water supply
2. Organic matter decomposition
3. Soil erosion and re-formation
4. Soil consolidation and aeration
5. Soil acidification and buffering

Do-It-Your-Soil wants to facilitate the understanding of these important areas of applied soil science. Learners should be able to apply the knowledge for problem solving in their practical work. Do-It-Your-Soil also wants to help create knowledge and understanding of soils, as well as promote their sustainable use.

Keywords: Applied Soil Ecology, Didactic Design, E-Learning, Information Structure, Flash, WebCT

1. Introduction

In recent years increased relevance of soil sciences in connection with environmental problems has led to completely new tasks for experts in the field of applied soil ecology. In order to respond to the new demand on education, modules of environmental soil science have been newly implemented or considerably extended in many Swiss university curricula (as part of disciplinary sciences as well as in form of completely new curricula) or in postgraduate courses.

Soil is a system of extreme heterogeneity and complexity. Any action intended to manage and protect this precious environmental resource must be fine-tuned to the particular site conditions. This requires the capability to recognize and take adequate account of relevant site characteristics. Furthermore, soil cannot simply be treated as a physico-chemical reactor because also biological processes play a dominating role in soil formation and reactions. Thus, an ecological perspective is required for

proper management and protection. One of the major difficulties in teaching soil sciences is to bridge the discrepancy between real soils in the field and abstract model concepts which can be used to anticipate and analyse effects of actions and impacts and design appropriate solutions of management and protection problems.

"Do-It-Your-Soil" (DOIT) is an online course designed to tackle these problems. It was financed by the Swiss Virtual Campus and developed by a joint team of the Universities of Zurich and Neuchâtel and the Swiss Federal Institute of Technology (ETHZ) in Zurich. The idea is to teach problem-solving using example cases of real-world problems. DOIT addresses students which have a general background in soil science including first field experiences. This paper presents an overview of Do-It-Your-Soil.

Do-It-Your-Soil material exists in **German** and **French** language.

2. Frame conditions

The production of web based teaching material requires a fundamentally different approach from e.g. the production of a book or a handout. The reasons for that are the boundary conditions of the medium internet and the changes they impose on human learning behaviour:

- Reading text materials on a screen is experienced as tiresome by many (THISSEN 2000). Size and granularity of the information must be adapted to the screen. (SCHULMEISTER 1996)
- Reading assignments that exceed 1/2 - 1 A4 page should also be available as printouts. This leads to the necessity to integrate online and printable material with each other.
- On the other hand, the computer offers unique opportunities for visualization and simulation. Short movies and sound can be integrated into text sequences.
- Another chance is the cooperation of learners at different places with different backgrounds. However, cooperation needs to be organized and integrated into a schedule.

3. Structure of Do-It-Your-Soil

The didactic design of DOIT follows the idea of the so called "Leitprogramm", i.e. guided learning by solving structured problems (FREY & FREY-EILING 1994). The "Leitprogramm" ideas were modified in the course of DOIT development, in order to allow for more flexibility in choosing learning paths through the material. Advantages of the "Leitprogramm" approach are:

- Students can determine themselves how fast they proceed
- Students proceed step-wise - the next exercise can (or rather: should) only be started when they have mastered the previous one ("mastery principle")
- Examples show how exercises have to be solved and what is expected from the students
- Feedback is given immediately

DOIT consists of **5 modules** on the following topics:

6. Soil and water supply
7. Organic matter decomposition
8. Soil erosion and re-formation
9. Soil consolidation and aeration
10. Soil acidification and buffering

The modules develop from an applied soil

ecological problem, such as the "impacts of acid rain on soil pH" or the "effects of a lowered water table on plant productivity". The problem is presented in the form of a **case**, i.e. with data for a specific site.

Each module consists of 3-5 **sequences** (see Fig. 1). At the beginning of each module and of each sequence, students are informed about the learning objectives. Each module ends with a test related to the case presented in the beginning.

The smallest didactical unit of a sequence we call a **brick**. It is usually identical to one screen. The need for scrolling is avoided wherever possible.

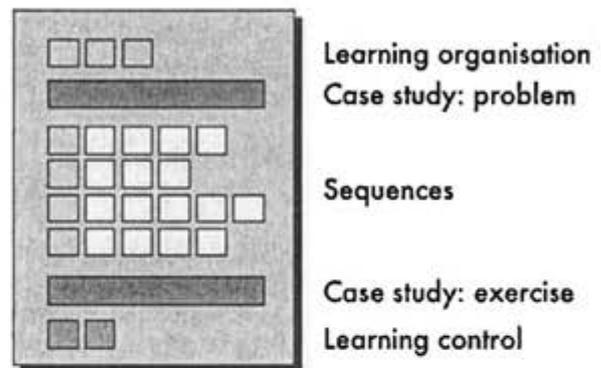


Fig. 1: Structure of a module with 4 sequences.

The flow of information in a sequence is organized as an **interactive track** and a **theory track** (see Fig. 2). The **interactive track** contains all interactive elements of a sequence. It is a sequence of "bricks" put in line according to growing complexity. Typically, an introductory "brick" is followed by an interactive "brick" – usually a Flash animation - and concluded by a summary "brick". An overview about the learning activities here involved has been published by FRISCHHERZ et al. 2003.

The **interactive track** may contain one or several **self test bricks** (with no tutor being involved). A typical DOIT self test is e.g. the drag-and-drop exercise shown in Fig. 3. The correct choice with the correct feedback can be printed out in the end, to give yet another incentive to do the self test.

The **theory track** (see Fig. 2) is a collection of text and images related to the topic of the module. It can be either read online or downloaded as PDF and printed out. The online version contains active links back to the interactive track.

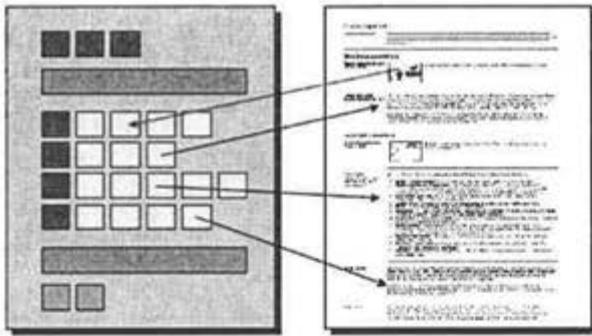


Fig. 2: In Do-It-Your-Soil, the interactive track (left) and the theory track (right) complement each other.

A module is concluded by a final test, the **learning control**, trying to evaluate the learning progress of the students. This test can be set up in different ways, according to the wishes and needs of each individual teacher. Students can, e.g., perform a task and publish their results in a discussion forum, write their solution into a text file and mail it to their tutor or even have a face-to-face test in a room.

Students must complete all modules to receive their ECTS credit points. They should be able to work through 1 sequence within 1 1/2 hours, which adds up to 6-8 hours for one module.

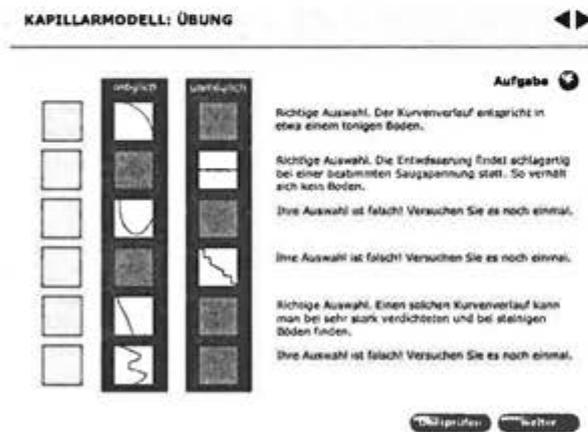


Fig. 3: Drag-and Drop self test on the understanding of curve patterns. The student's task is, to decide whether a curve shape represents a desorption curve or not. The curve pattern is dragged onto the chosen position with the mouse. Clicking "überprüfen" gives direct feedback.

The amount and quality of **tutoring** is crucial for the success of any eLearning project (SEUFERT, BACK & HÄUSLER 2001). However, the role tutors will actually play in a course can be modified by the teacher, depending for example on whether DOIT is used as an online course, or as add-on of a lecture. In an online course setting, tutors will need to be present in the online discussion forums. They can potentially control

the efforts of their students by using the tracking tools of WebCT and by browsing through the solutions students have submitted. They may also be present in a startup workshop and in the final examination.

4. Two examples

The first example is taken from module 4 "soil consolidation and aeration" and shows a thematic unit with 5 bricks (Figures 4-8) taken from sequence 1. In this thematic unit, students learn about soil respiration and the factors that influence it.

In step 1 (Fig. 4), the thematic unit is introduced and the general picture is drawn. In step 2 (Fig. 5), a cartoon character (the "small green rock chomper") is used as a metaphor for soil respiration in an explanatory animation, in order to make the abstract concept of soil respiration more tangible.



Fig. 4: Introduction to the thematic unit (step 1).

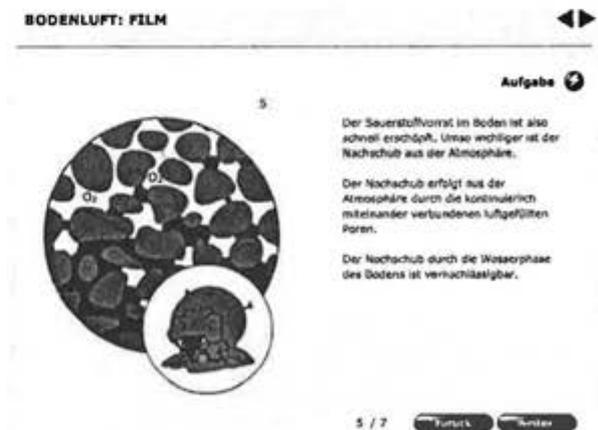


Fig. 5: The "small green rock chomper" in an explanatory animation: The character stands for soil respiration and the living beings that cause it. Step by step, the reactions of this character to increasing soil water content are helping the students to understand soil respiration better (step 2).

In step 3, the animation is followed by an exercise (Fig. 6), where students can directly apply what they have learned to a problem related to agronomy. In the following quiz (step 4, Fig. 7) the students are then confronted with a set of tricky self test questions related to soil respiration.

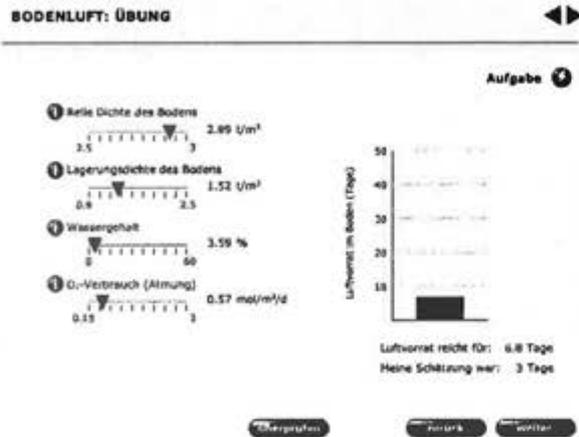


Fig. 6: An exercise on root survival time in the air caught in a loamy soil after a heavy rain event (step 3).



Fig.7: Self test on questions related to soil respiration (step 4).



Fig. 8: Synthesis of the thematic unit (step 5).

Finally, in step 5 the thematic unit is summarized (Fig. 8), in order to encourage the reflection of the learning material.

The second example (Fig. 9, taken from sequence 3 of module 4) demonstrates the potential of computer supported teaching to facilitate the understanding of complex relations in soil science.

In this simulation model, students can examine heavy machinery and their pressure transmission into the soil. They can compare different types of construction machinery, vary chain length and width and look at different pressure bulbs. By playing with the model, the understanding of the underlying Fröhlich equation is facilitated in an intuitive way.

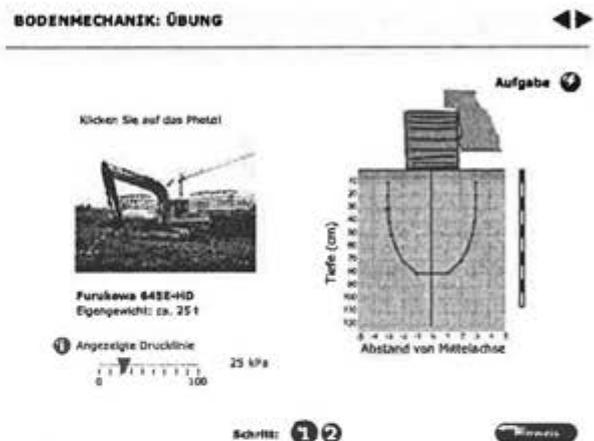


Fig. 9: Simulation model on pressure transmission by heavy machinery to the soil.

In the course of DOIT development, more than 80 animations, calculation models and simulations were conceptualized and developed. More about animations and simulations as learning objects and the background of their development can be found in FRISCHHERZ et al. 2004.

5. Software requirements

The following software is required by users to access DOIT :

- A reasonably modern internet browser, such as "Internet Explorer 5" or newer (Windows), "Safari 1.03" or newer (Mac) or "Firefox 1.0" or newer.
- The plugin "Flash Player 6" or newer
- At minimum a 56k modem connection to the internet
- Java and JavaScript must be activated

On the server side, we are using WebCT as basic framework for registration, content organization, communication and learning controls. However,

DOIT is highly **client based**. If WebCT's communication tools are not required, DOIT will also run on any modern webserver and even on any local PC without problems.

6. First experiences

DOIT so far has been used in various test settings and in a limited number of courses. Full use will only start this year (2005). In general, feedback by students and tutors was positive and encouraging. A number of our students already had some - positive and negative - experiences with online course material. One of them said: "If course material needs to be online, it should be like Do-It-Your-Soil".

Do-It-Your-Soil's key features are:

- the modular structure of the content, offering different paths through the learning material
- the hybridization of online and offline material in the "interactive" and the printed out "theory tracks"
- the extensive use of Flash animations for the visualization of content and for interaction with exercises and models

We can already conclude that DOIT may considerably help students to understand soil science and apply theory to practical problems. It can, however, not completely substitute person-to-person contacts between teachers and students, and it ~~can't~~ cannot replace field trips. The "smell-and-feel" of soil cannot be transmitted via the internet. We see this course as a valuable complement to traditional forms of teaching soil science and not simply as a substitute.

7. How you can use Do-It-Your-Soil

DOIT has relations to a number of different disciplines, such as, e.g., agronomy, biology, biogeochemistry, ecology, hydrology, environmental engineering, forestry etc.

Lecturers or teachers of a university or a university of applied science, within or outside Switzerland, can use DOIT for their teaching, free of charge. There are two options:

1. Using DOIT on our WebCT server
2. Installing DOIT on a server at your school (protected by a password or in the intranet)

Before access is provided, any interested person needs to enter an agreement with the DOIT leading house, regulating copyright issues and further distribution of DOIT-. Thereafter, you will

receive either access to DOIT on WebCT, or the material.

For an impression of DOIT and some more background information, please check the demo website at <http://www.unine.ch/doityoursoil/>

8. References

- FREY, K., FREY-EILING, A., 1994, Allgemeine Didaktik, Arbeitsunterlagen zur Vorlesung, 7. Auflage
- FRISCHHERZ, B., SCHÖNBORN, A., 2004, Animations and simulations as learning objects - modelling process and quality criteria. Presented at the 6th International Conference on New Educational Environments, Neuchâtel, Copy available from the author.
- FRISCHHERZ, B., SCHÖNBORN, A., SCHULIN, R., 2003, More than facts and figures - a typology of e-learning activities for the natural sciences (with an example from Do-It-Your-Soil), in: Jutz, C., Flückiger, F., Wäfler, K., 5th International Conference on New Educational Environments, 133-138
- SCHULMEISTER, R., 1996, Grundlagen hypermedialer Lernsysteme, Theorie, Didaktik, Design, Addison-Wesley, Bonn & Paris
- SEUFERT, S., BACK, A., HÄUSLER, M., 2001, E-Learning. Weiterbildung im Internet, Das "Plato-Cookbook" für internetbasiertes Lernen, SmartBooks, Kilchberg
- THISSEN, F., 2000, Screen Design Handbuch, Springer, Berlin, Heidelberg, New York

L'évaluation des seuils critiques de risque de perte de phosphore estimé à partir des analyses agronomiques des sols de Genève

Fredi Celardin

Ecole d'ingénieurs HES de Lullier, Filière Agronomie, CH-1254 Jussy (Genève)

Résumé

Le niveau du phosphore dans les sols du canton de Genève est mesuré en routine par deux extractions indépendantes (1:10 poids de solide/volume de solution), temps d'extraction 60 minutes): 1) acétate d'ammonium 0.5 M+ EDTA 0.02 M (pH 4.65) (AAE); 2) H₂O. Le pool extrait par AAE représente le P-mobilisable (P_{AAE}) et celui extrait par H₂O représente le P-mobile (P_{H2O}).

Les meilleures corrélations entre les deux pools de P sont obtenues lorsque les données provenant des analyses de 1023 sols de grandes cultures de Genève, dans l'intervalle des années 1994-2000, sont séparées en deux catégories de pH (4.6 à 6.5, n= 166 et 6.6 à 8.6, n= 857).

La forme générale des relations est:

$$P_{AAE} = a P_{H2O}^b \quad (0 < b < 1).$$

La dérivée de cette courbe (dP_{AAE} / dP_{H2O}) peut être considérée comme représentative du pouvoir tampon apparent des sols vis-à-vis du phosphore (PTP). En prenant comme cible la région de PTP optimum, on peut obtenir des plages P_{AAE} et P_{H2O} dont le minimum est le seuil de risque de lixiviation et le maximum la concentration optimum de solubilité de P pour une pratique culturale soucieuse de l'environnement.

	P _{H2O} (mg/kg)	P _{AAE} (mg/kg)
pH (4.6-6.5):	1.3 – 3.8	19.7 – 37.0
pH (6.6-8.6):	1.3 – 2.5	20.6 – 46.5

A Genève, environ 5% des sols acides et 25% des sols neutres et alcalins se trouvent en dessous du seuil de lixiviation et > 50% des sols acides et >40% des sols neutres et alcalins se trouvent en dessus du seuil de disponibilité. Environ 50% des mesures se trouvent dans la région de PTP optimal (>9 et >15.2) relatif à un bon fonctionnement du sol.

Abstract: Evaluation P loss risk by P-test values of canton Geneva

The phosphorus (P) status of the soils of Geneva canton is routinely determined by two independent chemical extractions representative of mobilizable and mobile pools of P: 1) ammonium acetate 0.5 M + EDTA 0.02M (pH:4.65); 2) H₂O. The best correlations between these two pools are obtained when the data from 1023 crop field soils of Geneva analysed in the period 1994-2000, are separated into two categories of soil pH (4.6 - 6.5, n= 166 et 6.6 - 8.6, n= 857). The general form of the correlations is:

$$P_{AAE} = a P_{H2O}^b \quad (0 < b < 1).$$

The derivative of this correlation (dP_{AAE}/dP_{H2O}) is representative of apparent P-buffering power (PBP) of the soils. The range of P_{AAE} and P_{H2O} values derived taking the high PBP region of the curves as the optimum soil function, are indicative, in the lower limit, of P-loss risk threshold and in the upper limit, of the optimum solubility for environmentally sound plant nutrition:

	P _{H2O} (mg/kg)	P _{AAE} (mg/kg)
pH (4.6-6.5):	1.3 – 3.8	19.7 – 37.0
pH (6.6-8.6):	1.3 – 2.5	20.6 – 46.5

In Geneva about 5% of acid soils and 25% of neutral and alkaline soils lie below the lixiviation threshold and over 50% of acid soils 40% neutral and alkaline soils lie above the availability threshold. Around 50% of the measurements show an optimal PBP (>9 and >15.2) as indicators of adequate soil P availability.

Keywords: soil P-test, P-buffering power, pH

1. Introduction

L'eutrophisation des eaux naturelles est devenue un problème dans les pays industrialisés. Le phosphore est reconnu comme un important contributeur à l'eutrophisation. L'agriculture est identifiée comme une des sources d'émission de phosphore. Pour trouver des solutions à ce problème, une meilleure connaissance des processus générateurs des émissions de phosphore est nécessaire (Projet COST 832). La fertilisation est une des sources principales de l'accumulation de phosphore dans les sols agricoles. Elle accroît les risques d'émission par ruissellement et lixiviation. Une des actions préventives envisageables consiste à moduler les doses de fertilisant apporté en fonction du résultat de l'analyse.

De nombreuses méthodes d'analyse sont disponibles, dont les résultats sont interprétés en termes de risque de perte ou de conseil de fumure. Malheureusement, ces interprétations sont souvent divergentes. Sibbesen et Sharpley (1997) proposent de réduire les apports conseillés de phosphore en rapprochant les barèmes agronomiques des valeurs-seuils de lixiviation.

Les corrélations entre les valeurs agronomiques (P-test) et les concentrations dans les eaux de drainage ont été calculées dans le but d'évaluer par des analyses agronomiques courantes le risque de pertes par lixiviation (Heckrath et al., 1995; Sharpley, 1995).

Il a été observé que ces relations varient selon les types de sol à cause des différences de leur pouvoir tampon vis-à-vis du phosphore (Sharpley et al. 1996).

Des méthodes basées sur un indice de saturation de P défini par le pourcentage de phosphore extractible par rapport au maximum de P adsorbable permettent une meilleure estimation des risques d'émission (Sharpley, 1995). Pour les sols acides on calcule le quotient entre le P et la somme de (Fe + Al) extraits à l'oxalate acide (Breeuwsma et al., 1997)

Pour les sols calcaires on calcule le quotient entre le P extrait au bicarbonate (P-Olsen) et l'indice d'adsorption de P (PSI) de Bache and Williams (1971) (Hughes et al., 2000).

Ces méthodes sont plus simples que celles qui ont recours à l'établissement de l'isotherme de Langmuir pour l'évaluation du P maximum adsorbable.

Le pouvoir tampon peut aussi être mesuré par la comparaison des rendements d'extraction du P par un réactif tamponné à un pH acide (Quantité) et par un second réactif non

tamponné, au pH du sol (Intensité). Le pouvoir tampon est exprimé par le rapport Q/I.

Les réactifs d'extraction de phosphore peuvent être grossièrement classés en deux catégories suivant leur pH et leur pouvoir tampon. Les uns sont indicateurs de quantité les autres indicateurs d'intensité.

On peut estimer le pouvoir tampon P des sols à partir de ces données (Celardin 1991).

Dans cet article, nous présentons les résultats des analyses de 1023 échantillons de sols genevois de grande culture obtenus entre 1994 et 2000 selon 2 méthodes d'extraction (P_{AAE} et P_{H_2O}) et nous proposons un concept d'interprétation des résultats tenant compte du pouvoir tampon des sols.

2. Matériel et Méthodes

Les échantillons moyens de sol à l'échelle des parcelles en grande culture sont constitués de 16 piqûres à la tarière, à 0-20 cm. Ils sont séchés à 40°C et tamisés à 2 mm.

Le carbone organique est mesuré par oxydation sulfochromique selon la méthode Walkley et Black.

La texture du sol est mesurée par la méthode de sédimentation: prélèvements à la pipette à différents intervalles de temps.

Le pH et le phosphore (P) sont analysés selon les méthodes Agroscope standardisées (Anonyme 1996) : pH dans l'eau (pH-H₂O) (1:2.5 poids / volume).

P_{AAE} et P_{H_2O} sont extraits par l'acétate d'ammonium 0.5 M + EDTA 0.02 M (pH 4.65) (AAE) et par de l'eau déionisée (H₂O) respectivement. La concentration de la suspension est 1:10 poids/volume, la durée d'extraction est de 60 minutes.

Détermination des points critiques par la méthode des tangentes (Celardin 2003)

La relation entre teneur en P_{AAE} (Quantité) et P_{H_2O} (Intensité) est représentée par une courbe concave (Figure 1). Le point critique (pc) correspondant à une variation sensible de I pour une variation donnée de Q peut être obtenu avec une bonne approximation par la valeur de l'abscisse du point d'intersection (pi) des deux tangentes aux extrémités de la courbe et de la valeur Q correspondante (dans le domaine des données disponibles).

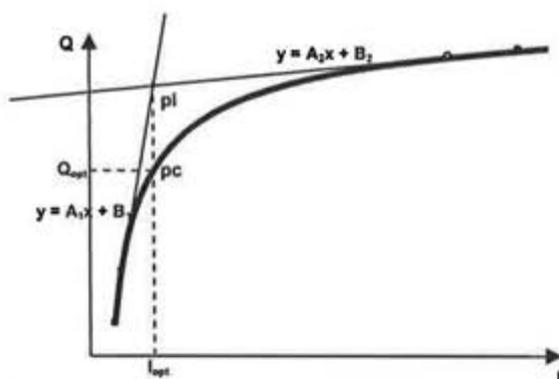


Figure 1. Schéma d'obtention du point critique de la relation entre Quantité et Intensité

Pour chaque segment de droite passant par deux points de coordonnées (x_1, y_1) et (x_2, y_2)

$$y = Ax + B$$

$$A = (y_2 - y_1) / (x_2 - x_1)$$

$$B = (x_2 y_1 - x_1 y_2) / (x_2 - x_1)$$

Les coordonnées du point d'intersection (pi) sont:

$$x = (B_2 - B_1) / (A_1 - A_2)$$

$$y = (A_2 B_1 - A_1 B_2) / (A_2 - A_1)$$

Les valeurs x et y représentent le statut du P par son intensité I (P_{H_2O}) et sa quantité Q (P_{AAE}).

La coordonnée x du point d'intersection correspond à la valeur optimum de l'intensité $I_{optimum}$. En introduisant cette valeur dans l'équation mathématique de la courbe (Q/I) on détermine la valeur $Q_{optimum}$.

La même démarche de calcul est appliquée pour le seuil de lixiviation, avec à l'ordonnée le pouvoir tampon P.

3. Résultats et discussion

Les distributions statistiques des éléments caractéristiques des sols analysés sont présentées dans le Tableau 1.

Le statut du P des sols dépend de plusieurs propriétés telles que type de minéraux argileux, matière organique, pH. Dans la population de sols genevois analysés les meilleures corrélations entre Q et I ont été obtenues lorsque les données ont été groupées en deux catégories de pH : (4.6 à 6.5, n= 166 et 6.6 à 8.6, n= 857). Nous observons au Tableau 1 que les médianes des teneurs en argile et du rapport (P_{AAE} / P_{H_2O}) représentant le pouvoir tampon-P (PTP) sont significativement plus élevées pour les sols alcalins.

La figure 2 présente la relation entre P_{AAE} et P_{H_2O} après transformation logarithmique.

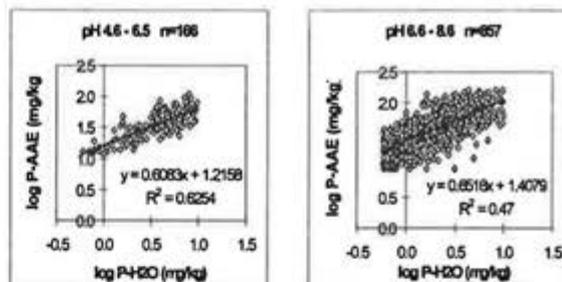


Figure 2. Corrélations entre P_{AAE} et P_{H_2O}

Les coefficients de détermination (R^2) sont moyennement significatifs. La dispersion des valeurs exprime à la fois la diversité des propriétés des sols, celle des pratiques de fertilisation et celle des prélèvements qui s'étendent sur plusieurs années.

Les courbes entre les valeurs P_{AAE} et P_{H_2O} sont exprimées dans les équations suivantes:

$$\text{pH } 4.6 - 6.5 : (P_{AAE}) = 16.40 (P_{H_2O})^{0.61}; \quad n = 166 \quad R^2 = 0.625 \quad (1)$$

$$\text{pH } 6.6 - 8.6 : (P_{AAE}) = 25.59 (P_{H_2O})^{0.65}; \quad n = 857 \quad R^2 = 0.470 \quad (2)$$

La pente de la courbe P_{AAE} (Quantité) en fonction de P_{H_2O} (Intensité) en chacun de ses points peut être comprise comme représentative du PTP.

Détermination du point critique de disponibilité

L'offre optimale du sol en P dépend de son pouvoir tampon P. Les coordonnées du point de courbure critique (Figure 1) correspondent à l'offre de P optimum Q et I pour la population de sols analysés.

Afin d'obtenir pour chaque groupe de pH, les coordonnées de ce point critique par la méthode des tangentes, la courbe est tout d'abord lissée en recalculant P_{AAE} à l'aide des paramètres des équations (1) et (2) et des valeurs P_{H_2O} mesurées.

Les valeurs de disponibilité optimales obtenues sont:

$$\text{pH } 4.6 - 6.5: \quad (P_{H_2O}) = 3.8 \text{ mg kg}^{-1} \\ (P_{AAE}) = 37.0 \text{ mg kg}^{-1}$$

$$\text{pH } 6.6 - 8.6: \quad (P_{H_2O}) = 2.5 \text{ mg kg}^{-1} \\ (P_{AAE}) = 46.5 \text{ mg kg}^{-1}$$

	centile	pH (H ₂ O)	Matière org. %	Argile %	Silt %	Sable %	P-H ₂ O mg/kg	P-AAE mg/kg	P-AAE / P-H ₂ O
pH 4.6 - 6.5 n = 166	0.05	5.5	1.6	12	29	22	1.2	16	5
	0.25	5.9	1.9	14	36	35	2.7	28	7
	0.5	6.2	2.2	17	41	41	4.8	39	9
	0.75	6.4	2.5	20	46	49	6.4	54	12
	0.95	6.5	3.7	30	50	58	8.7	76	17
pH 6.6 - 8.6 n = 857	0.05	6.7	1.6	16	29	12	0.7	13	8
	0.25	7.2	2.2	21	38	25	1.2	25	14
	0.5	7.6	2.6	25	41	33	2.0	43	20
	0.75	7.9	3.0	31	45	40	3.2	63	29
	0.95	8.2	4.0	41	52	51	6.6	111	49

Tableau 1. Distributions statistiques des caractéristiques des sols en grandes cultures de Genève pour la période 1994-2000.

Détermination du point critique de lixiviation

Le risque de lixiviation du P est relié au PTP du sol (Breeuwsma et al, 1997, Hughes et al., 2000). Le point critique de lixiviation se calcule de manière analogue à celle du point critique de disponibilité, mais en prenant pour ordonnée le PTP c'est-à-dire dP_{AAE}/dP_{H2O} . Le point de courbure critique du tracé du PTP en fonction de P_{H2O} ou de P_{AAE} permet l'évaluation du seuil de perte de P par lixiviation.

Les PTP correspondant à chaque valeur de P_{H2O} ou de P_{AAE} sont calculées à partir de l'équation de la dérivée première de la relation (1) ou de la relation (2)

pH 4.6-6.5 :

$$(dP_{AAE} / dP_{H2O}) = 9.99 (P_{H2O})^{-0.39} \quad (3)$$

$$(dP_{AAE} / dP_{H2O}) = 25.4 (P_{AAE})^{-0.40} \quad (4)$$

pH 6.6-8.6 :

$$(dP_{AAE} / dP_{H2O}) = 16.7 (P_{H2O})^{-0.35} \quad (5)$$

$$(dP_{AAE} / dP_{H2O}) = 32.6 (P_{AAE})^{-0.25} \quad (6)$$

La Figure 3 représente les courbes PTP en fonction de P_{AAE} et P_{H2O} . Les seuils de risque de perte de P par lixiviation obtenus par la méthode des tangentes sont:

pH 4.6 - 6.5: $(P_{H2O}) = 1.3 \text{ mg kg}^{-1}$
 $(P_{AAE}) = 19.7 \text{ mg kg}^{-1}$

pH 6.6 - 8.6: $(P_{H2O}) = 1.3 \text{ mg kg}^{-1}$
 $(P_{AAE}) = 20.6 \text{ mg kg}^{-1}$

En insérant $P_{H2O} = 1.3 \text{ mg kg}^{-1}$ dans les équations (3) et (5) on obtient les PTP optimum pour les deux catégories de sols, soit:

pH 4.6 - 6.5 : $(dP_{AAE} / dP_{H2O}) = 9.0$

pH 6.6 - 8.6 : $(dP_{AAE} / dP_{H2O}) = 15.2$

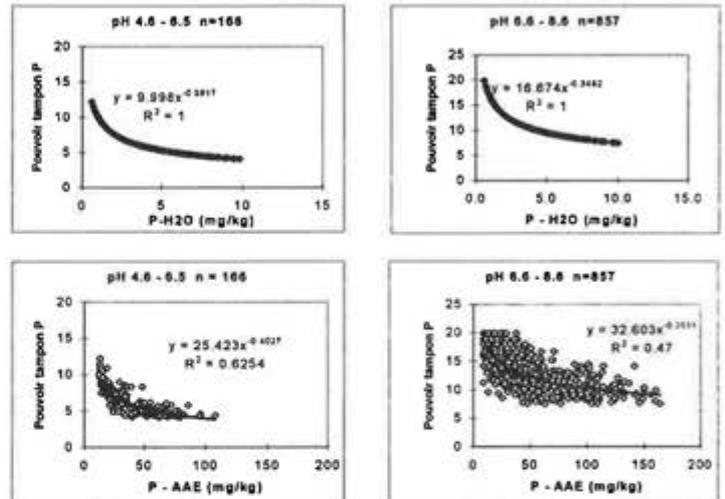


Figure 3 Graphiques du pouvoir tampon P en fonction de P_{H2O} et P_{AAE} pour deux catégories de pH d'échantillons de sol

Les valeurs critiques de lixiviation et de disponibilité calculées permettent de distinguer trois domaines : i) inférieur au seuil de lixiviation : risque négligeable et disponibilité de P entravée; ii) risque accru et disponibilité légèrement entravée; iii) risque élevé et disponibilité excessive.

Pour les deux groupes de sols de grande culture de Genève, les valeurs optimales de disponibilité sont $P_{H2O} < 3.8$ et $< 2.5 \text{ mg kg}^{-1}$ et $P_{AAE} < 37.5$ et $< 46.5 \text{ mg kg}^{-1}$ et les valeurs seuil de lixiviation $P_{H2O} > 1.3 \text{ mg kg}^{-1}$ $P_{AAE} > 20 \text{ mg kg}^{-1}$ pour les deux groupes de pH (Tableau 1).

Nous constatons qu'environ 5% des sols acides et 25 % des sols neutres et alcalins se trouvent en dessous du seuil de lixiviation et que plus de 50% des sols acides et plus de 40% des sols neutres et alcalins se trouvent en

dessus du seuil de disponibilité. Par ailleurs, environ 50% des mesures se trouvent dans la région de PTP optimal (>9 et >15.2) relatif à un bon fonctionnement du sol.

4. Conclusion

Les pertes de P par lixiviation peuvent être réduites en adoptant des valeurs critiques qui tiennent compte du fonctionnement du sol. Afin de tendre vers des pratiques de fertilisation compatibles avec une gestion durable des sols et un impact réduit sur l'environnement nous préconisons pour les sols de grande culture de Genève des valeurs indicatives intermédiaires soit environ $P_{H_2O}: 3 \text{ mg kg}^{-1}$ et $P_{AAE} 30 \text{ mg kg}^{-1}$. En l'absence de valeurs de lixiviation mesurées in situ, le pouvoir tampon-P du sol (PTP) estimé à partir de P_{AAE} et P_{H_2O} constitue un bon moyen pour déterminer les valeurs optimales à respecter.

5. Note

Ce texte qui s'appuie sur un travail précédent (Celardin 2003) est le compte-rendu de l'exposé présenté dans le cadre des sessions scientifiques de la Société Suisse de Pédologie, du 25-26 Mars 2004 à Lausanne.

6. Bibliographie

ANONYMOUS, 1996: Méthodes de Référence des Stations Fédérales de Recherches Agronomiques, vol.1, Analyse de Terre pour Conseil de Fumure. Edition des Stations Fédérales, Zürich-Reckenholz, Switzerland.

BACHE, B.W., and WILLIAMS, E.G. 1971: A phosphate sorption index for soils. *Journal of soil science* 22:289-301.

BREEUWSMA, A., REIJERINK, J.G.A., and SCHOUmans O. (1997): Occurrence and effects of phosphate saturated soils. In: H. TUNNEY, O.T. CARTON, P.C. BROOKES and A.E. JOHNSTON (ed): Phosphorus loss from soil to water. CAB International, Wallingford, pp 438-440.

CELARDIN, F. 1991: Méthode d'estimation du pouvoir fixateur du sol: application au phosphore dans les sols genevois. *Archives des Sciences, Genève*. 44, 245-251.

CELARDIN, F. 2003: Evaluation of soil P-test values of canton Geneva/Switzerland in relation to P loss risks. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 166, 416-421.

HECKRATH, G., BROOKES, P.C., POULTON, P.R., GOULDING, K.W.T. 1995: Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment. *Journal of Environmental Quality* 24:904-910.

HUGHES S., REYNOLDS B., BELL S.A. and GARDNER C. 2000: Simple phosphorus saturation index to estimate risk of dissolved P in runoff from arable soils. *Soil use and management* 16:206-210.

SHARPLEY, A.N. 1995. Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus. *Journal of Environmental Quality* 24: 920-926.

SHARPLEY, A.N., DANIEL, T.C., SIMS, J.T., POTE, D.H. 1996: Determining environmentally sound soil phosphorus levels. *Journal of soil and water conservation* 51:160-166.

SIBBESEN E. and SHARPLEY A.N. (1997). Setting and justifying upper critical limits for phosphorus in soils". In: H.TUNNEY, O.T. CARTON, P.C. BROOKES and A.E. JOHNSTON (ed): Phosphorus loss from soil to water. CAB International Wallingford, pp 151-176.

Publikationen der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz

Bestellungen, Versand: Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale LmZ
 Länggasse 79
 3052 Zollikofen
 Tel. 031 910 50 60
 Fax 031 910 50 70
 E-Mail lmz@edition-lmz.ch
 Internet <http://www.edition-lmz.ch>

BGS-Bulletins Preis: Fr. 15.- (ab No. 24 Fr. 25.-) pro Stück **ohne** Porto und Verpackung

Nummer	Jahr	Bestellnummer	Nummer	Jahr	Bestellnummer
3	1979	970 801	19	1995	970 816
5	1981	970 802	20	1996	970 817
6	1982	970 803	21	1997	970 818
8	1984	970 805	22	1998	970 819
11	1987	970 808	23	1999	970 870
12	1988	970 809	24	2000	970 871
14	1990	970 811	25	2001	970 872
15	1991	970 812	26	2002	970 873
16	1992	970 813	27	2004	970 874
17	1993	970 814	28	2005	970 875
18	1994	970 815			

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

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

Nummer	Jahr	Thema	Bestellnummer
1 f	1984	Exploitation du gravier et agriculture	970 840
2 f	1985	Estimation et protection des sols	970 841
3 d	1986	Bodenschädigung durch den Menschen	970 822
4 d	1989	Lysimeterdaten von schweizerischen Messstationen	970 823
5 d	1994	Aktuelle Bodenforschung in der Schweiz	970 824
6 d	1995	Aktuelle Bodenforschung in der Schweiz II	970 825
7 d	1995	Aktuelle Bodenforschung in der Schweiz III	970 826
8 d	1996	Aktuelle Bodenforschung in der Schweiz IV	970 827
9 d	1999	Physikalischer Bodenschutz	970 828
9 f	1999	Protection des sols contre les atteintes physiques	970 842
10 d	2000	Umfrage Bodenkartierung	970 829
11 d	2001	Bodenkunde und Bodenkundler in der Schweiz 1855 – 1962	970 830
12 d	2003	Sanfte Bodensanierung	970 831
13 d	2004	Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen	970 832
14 d	2004	Bodeninformation Schweiz BI-CH - Schlussbericht 2003	970 833

No. 1 und 2 deutsch vergriffen

Weitere Publikationen Preis: Fr. 15.- pro Stück **ohne** Porto und Verpackung

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

