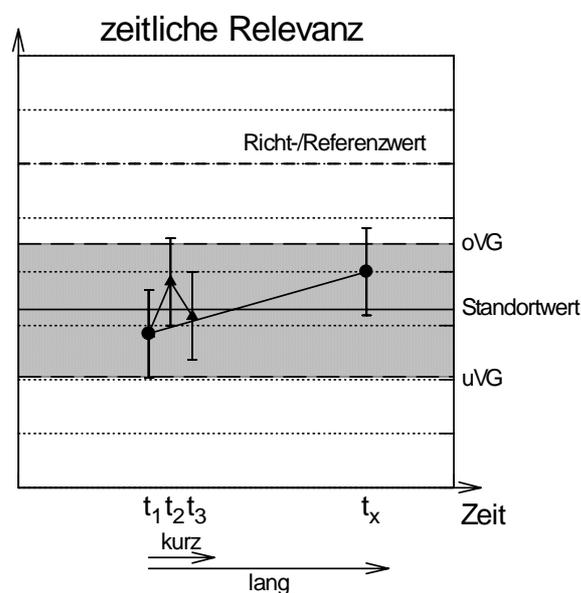


# Langzeitbeobachtung von physikalischen und biologischen Bodeneigenschaften Pilotprojekt LAZBO

## Teil 4 Folgerungen, Empfehlungen und Ausblick für die Langzeitbeobachtung

Peter Schwab, Peter Weisskopf, Hans-Rudolf Oberholzer  
Susanne Scheid, Markus Berli



April 2006

---

## **Projekt: 00.14.02.02 LAZBO**

Agroscope FAL Reckenholz, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau,  
Reckenholzstrasse 191, CH-8046 Zürich

[www.reckenholz.ch](http://www.reckenholz.ch)

## **Autoren**

Peter Schwab , [peter.schwab@art.admin.ch](mailto:peter.schwab@art.admin.ch)

Peter Weisskopf, [peter.weisskopf@art.admin.ch](mailto:peter.weisskopf@art.admin.ch)

Hans-Rudolf Oberholzer, [hansrudolf.oberholzer@art.admin.ch](mailto:hansrudolf.oberholzer@art.admin.ch)

Susanne Scheid

Markus Berli

## **Bezug**

[www.nabo.admin.ch](http://www.nabo.admin.ch) > Bibliographie Nr. 145

## **Dank**

Wir danken unseren Kollegen sowie den Mitgliedern der NABO-Begleitgruppe, die durch ihre Kommentare und Gestaltungsbeiträge zur Verbesserung des Berichts beigetragen haben. An der FAL waren dies Michael Winzeler, Franz Stadelmann, André Desaulles, Kirsten Rehbein und Hans Brunner, am BAFU Jürg Zihler und am BLW Anton Candinas.

## Prolog

Seit 1984 betreiben das Bundesamt für Umwelt BAFU (ehemals BUWAL) gemeinsam mit dem Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) das Nationale Beobachtungsprogramm „NABO“, das auf dem Umweltschutzgesetz (USG, 1983) und der Verordnung über Schadstoffe im Boden (VSBo, 1986) basiert. Zurzeit wird im NABO-Referenznetz die Belastung des Bodens mit anorganischen und organischen Schadstoffen schweizweit an über 100 Standorten mit unterschiedlicher Bodennutzung langfristig untersucht. Mit der Ablösung der VSBo (1986) durch die Verordnung über die Belastung des Bodens (VBBo, 1998), die neu neben chemischen auch physikalische und biologische Bodenbelastungen berücksichtigt, wurde der gesetzliche Auftrag für ein Bodenmonitoring ausgeweitet.

Um die zur Zeit fehlenden methodischen Grundlagen für eine Langzeitbeobachtung physikalischer und biologischer Bodeneigenschaften zu erarbeiten, wurde an der Agroscope FAL Reckenholz im Rahmen des Arbeitsprogramms 2000-2003 das Pilotprojekt „Langzeitbeobachtung von physikalischen und biologischen Bodeneigenschaften“ (LAZBO) initiiert. Der Zeitraum des gesamten Projektes umfasst sechs Jahre, beginnend im Jahr 2001. Im Rahmen der ersten Projektphase (2001-2003), dem LAZBO-Pilotprojekt, wurde die Eignung verfügbarer Beprobungs- und Bestimmungsmethoden für physikalische und biologische Bodeneigenschaften für die Langzeitbeobachtung untersucht und beurteilt.

Der vorliegende Schlussbericht für die erste Projektphase ist in folgende Teile gegliedert:

- Kurzfassung
- Teil 1: Einleitung und Grundlagen
- Teil 2: Bodenphysikalische Untersuchungen
- Teil 3: Bodenbiologische Untersuchungen
- Teil 4: Folgerungen, Empfehlungen und Ausblick.

Zum besseren Verständnis der Teile 2 und 3 wird empfohlen, sich zunächst in die Grundlagen und Begrifflichkeiten, die im Teil 1 ausführlich dargestellt sind, einzulesen.

An die erste Projektphase schliesst sich die LAZBO-Testphase (2003 – 2006) an, in der sowohl die bisherigen Ergebnisse überprüft werden als auch der bereits vorhandene Datensatz durch die Erfassung der physikalischen und biologischen Bodeneigenschaften in drei zusätzlichen Erhebungsjahren erweitert wird. Basierend auf diesem erweiterten Datenbestand kann das methodische Vorgehen zur Beurteilung der zeitlichen Veränderung dieser Bodeneigenschaften im Rahmen einer Langzeitbeobachtung erarbeitet werden.

## Zusammenfassung

Fehlende Grundlagen bezüglich der Planung, Ausführung und Interpretation von Langzeitbeobachtungen physikalischer und biologischer Bodeneigenschaften initiierten das vorliegende LAZBO-Pilotprojekt mit dem Ziel, die Eignung ausgewählter Parameter für die Langzeitbeobachtung physikalischer und biologischer Eigenschaften von Böden zu beurteilen. Das dafür ausgearbeitete Untersuchungskonzept umfasste unterschiedliche Standorte und Nutzungsformen des Bodens. Schwerpunkte des Projektes waren die Identifikation von methodischen Unsicherheiten bei der Bestimmung eines Parameters von der Probenahme über Lagerung und Aufbereitung bis zur Messung, die Überprüfung des Probenahmeplans (nur Bodenphysik) sowie die statistische Beurteilung zeitlicher Veränderungen der untersuchten Parameter.

**Bodenphysik:** Die Untersuchung der bodenphysikalischen Bestimmungsmethoden ergab auf Stufe „Beobachtung“ Variationskoeffizienten zwischen 5% (Lagerungsdichte, Gesamtporenvolumen) und 25% (Grobporenvolumen) bei 8 bis 10 Bestimmungen pro Beobachtung (entsprechend der Analyse von separaten Einzelproben). Die eher geringe Präzision der einzelnen Beobachtungen lässt sich durch die kleinräumige Heterogenität der untersuchten Bodeneigenschaften (Beispiel Grobporenvolumen) erklären und wird nur zu einem kleinen Teil durch den zufälligen Fehler der Bestimmungsmethode verursacht.

Die verwendeten bodenphysikalischen Bestimmungsmethoden sind generell stabil (Variationskoeffizienten von wenigen Prozenten). Die Qualitätssicherung der Labor-Bestimmungsmethoden kann aber durch systematische Eichmessungen noch weiter verbessert werden. Dabei können zum Beispiel Eichproben aus porösem Material bekannter Porengrößenverteilung und Durchlässigkeit routinemässig zusammen mit den Bodenproben gemessen werden. Für die Feldmethoden, insbesondere die Bestimmung des Eindringwiderstandes, sind Korrekturen für den Einfluss des Wassergehaltes auf den Eindringwiderstand unumgänglich, um für einen längeren Beobachtungszeitraum vergleichbare Werte zu erhalten.

Bei sachgerechter, sorgfältiger Lagerung von weniger als einem Jahr sind keine Effekte der Lagerung auf die Probenqualität zu erwarten.

Präzision und Repräsentativität der Untersuchungen können durch Optimierung des Probenahmeplans erhöht werden. Vorgeschlagen wird eine Erhöhung der Anzahl Beobachtungen im Feld von 4 auf 10 bei gleichzeitiger Reduktion der Anzahl Bestimmungen pro Beobachtung von 10 auf 4, sowie die zufällige Verteilung der Beobachtungsblocks auf der Versuchsfläche. Die drei bisherigen Erhebungen ermöglichten erste Schätzungen für die mittleren Standortwerte und deren Grundrauschen. Auf Grund der drei Erhebungen ist noch kein zeitlicher Trend bestimmbar. Mit der eingeführten Varianzanalyse kann die nötige Anzahl Erhebungen zur Bestimmung statistisch signifikanter und funktionell relevanter Effekte abgeschätzt werden. Die gewählten Methoden waren für beide untersuchten Böden praktikabel. Pro Standort und Erhebung müssen ca. 22 Arbeitstage für alle Laboruntersuchungen (inklusive Probenahme und Probenaufbereitung) sowie zwei Arbeitstage für die Felduntersuchungen veranschlagt werden. Abhängig von den Zielen eines Monitorings physikalischer Bodeneigenschaften lässt sich der Aufwand für alle Labormethoden praktisch halbieren, wenn bei gleichem Probenumfang nur mit einer Probengrösse, vorzugsweise Grosszylinder, gearbeitet wird.

**Bodenbiologie:** Für die Erfassung von Veränderungen bodenmikrobiologischer Parameter empfiehlt es sich, die Standorte so auszuwählen, dass in Abhängigkeit von der Nutzung des Bodens der gesamte Referenzwertbereich erfasst wird, da es im unteren Teil des Referenzwertbereiches schwierig ist, relevante Veränderungen statistisch nachzuweisen.

Der Probenahmeplan für die bodenmikrobiologischen Untersuchungen, der der Vorgehensweise bei der Beprobung im NABO entspricht, hat sich bewährt und wird für die anschliessenden Untersuchungen in der LAZBO-Testphase in den Jahren 2004 - 2006 beibehalten.

Jedoch sind die Einflüsse des Zeitpunktes und der Bedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit, aktuelle Kultur) während der Probenahme sowie der Probenaufbereitung auf die bodenmikrobiologischen Ergebnisse im Rahmen weiterer Untersuchungen abschliessend zu klären. Als äusserst wichtig erweist es sich, dass alle Messungen entweder an frischen oder an tiefgekühlten Proben durchgeführt werden. Dies sollte zu Beginn der Untersuchung festgelegt werden.

Die Untersuchungsergebnisse der vier Beobachtungen (Mischproben) pro Standort zeigen, dass bezüglich ihrer Präzision eine geringe Streuung ( $\leq 5\%$ ) zu erkennen ist und die bodenmikrobiologischen Parameter in der Fläche präzise erfasst werden können (Teil 3, Kapitel 2.3 und 3.2). Die ermittelten Signifikanzschwellen lassen erkennen, dass sich bereits geringe Unterschiede in den bodenmikrobiologischen Eigenschaften von 7% (mikrobielle Biomasse (SIR)) bis 15% (N-Mineralisation) als statistisch signifikante Veränderungen absichern lassen. Eine Verringerung des Probenumfangs von vier auf drei Beobachtungen (Mischproben) im Feld ist ohne relevante Einbussen in der Präzision möglich und für die Langzeitbeobachtung bodenmikrobiologischer Eigenschaften zu empfehlen.

Im Hinblick auf eine Langzeitbeobachtung ist es unerlässlich, der Qualitätssicherung grosse Beachtung zu schenken. Besondere Aufmerksamkeit erfordert hierbei die Referenzstabilität, wobei sich die Frage der Probenlagerung als ein kritisch zu hinterfragender Punkt erwiesen hat. Aufgrund der Erfahrungen aus dem LAZBO-Pilotprojekt kann geschlussfolgert werden, dass tiefgekühlte Proben geeignet sind, um als Referenzproben zur Qualitätssicherung eingesetzt zu werden. Die Referenzproben sollten in regelmässigen Abständen mitbestimmt werden, um eine gute Basis für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse über die Zeit zu erhalten.

Für die Auswertung von Langzeitbeobachtungen ist es grundsätzlich sinnvoll, mittels einer Regressionsanalyse zu prüfen, ob die Ergebnisse einen Trend für den beobachteten Zeitraum erkennen lassen. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die Daten einen Zeitraum repräsentieren, der nicht selbst für den Trend verantwortlich sein kann (z.B. sollte diese bei Ackerstandorten etwas mehr als eine Fruchtfolge umfassen). Aus statistischer Sicht ist ein Zeitintervall wünschenswert, das mindestens sechs bis zehn Zeitpunkte umfasst.

Das für die Beurteilung der Ergebnisse des bodenmikrobiologischen Parameters mikrobielle Biomasse (SIR) zur Verfügung stehende Referenzwertmodell hat gezeigt, dass die Datengrundlage vor allem für sandige Böden unzureichend ist und erweitert werden muss. Für die ebenfalls für eine Langzeitbeobachtung validierten bodenmikrobiologischen Parameter Basalatmung und N-Mineralisation, ist es erforderlich, aussagekräftige Referenzwertmodelle zu entwickeln, um für jeden Parameter nutzungsbezogene Referenzwerte zur Verfügung stellen zu können.

**Zusammenfassend wurden im vorliegenden LAZBO-Pilotprojekt folgende Ziele erreicht:**

1. Präzision und Richtigkeit der Bestimmungsmethoden der ausgewählten bodenphysikalischen und –mikrobiologischen Parameter konnten abgeschätzt werden und sind grundsätzlich quantifizierbar.
2. Entwerfen und Harmonisieren eines hierarchischen Probenahmeplanes für bodenphysikalische Untersuchungen, der eine repräsentative Probenahme über grössere Flächen erlaubt.
3. Entwerfen und Testen einer Probenlagerungs- und Analysestrategie, die referenzstabile bodenmikrobiologische Untersuchungen über lange Zeiträume ermöglicht.
4. Einführen statistischer Modelle zur Zeitreihenanalyse, mit denen mittlere Standortwerte und Grundrauschen physikalischer und mikrobiologischer Bodeneigenschaften über längere Zeiträume (Jahre bis Jahrzehnte) erfasst werden können.
5. Erfahrungen zur Praktikabilität und Quantifizieren von Aufwand für die bodenphysikalischen und –biologischen Erhebungen basierend auf drei Erhebungsjahren.

**Ausblick:** Im Rahmen der laufenden LAZBO-Testphase (2004 – 2006) werden der optimierte Probenahmeplan für die Bodenphysik sowie die im LAZBO-Pilotprojekt erarbeitete Methode für die Zeitreihenanalyse überprüft bzw. angewendet. Bis Ende 2006 stehen somit Erhebungswerte aus sechs Jahren zur Verfügung, womit verlässlichere mittlere Standortwerte und das Grundrauschen der untersuchten Standorte eingeschätzt werden kann. Zudem werden die Ergebnisse der sechs Jahre erstmals eine Trendanalyse zulassen.

Mit dem LAZBO-Pilotprojekt und der sich anschliessenden Testphase werden die methodischen Grundlagen für eine Langzeitbeobachtung physikalischer (NABOphys) und biologischer Bodeneigenschaften (NABObio) erarbeitet.

Im Hinblick auf ein Konzept zur Langzeitbeobachtung muss jedoch zunächst diskutiert werden, welches Ziel im Mittelpunkt der Beobachtung dieser Bodeneigenschaften steht. Aus bodenphysikalischer Sicht bietet sich die Langzeitbeobachtung als dringend notwendiges Instrument zur Verhinderung weiterer (Schad-)Verdichtungen von land- und forstwirtschaftlich genutzten Böden an. Die Langzeitbeobachtung bodenmikrobiologischer Parameter würde als Überwachungssystem einen entscheidenden Beitrag dazu liefern, um Auswirkungen von chemischen und physikalischen Einflüssen auf die biologischen Eigenschaften eines Bodens zu erfassen. Neben der konkreten Zielsetzung stellt sich die Frage nach der Sensitivität und des Indikatorwertes der potentiell ausgewählten Parameter. Diese Fragen wurden teilweise bereits in den Diskussionen zum Thema „Agrarumweltindikatoren“ behandelt. Eine weitere wichtige Rolle für das Beobachtungskonzept spielt die Stratifizierung der Untersuchungsstandorte. Dabei stellt sich neben praktischen Überlegungen (unterschiedliche Bedürfnisse bezüglich der Probenahme an den Standort von Bodenphysik und Bodenbiologie) die Frage, inwieweit chemische, physikalische und biologische Parameter am gleichen Bodenvolumen bestimmt werden können, um Korrelationen zwischen potentiellen Effekten von Belastungen auf bodenchemische, -physikalische und -mikrobiologische Parameter klar erkennen zu können. Da aus praktischen Gründen kein umfassendes Monitoring unter Berücksichtigung aller denkbaren Risikokonstellationen möglich ist, ist zu entscheiden, ob neben einem Kernnetz für die kontinuierliche Langzeitbeobachtung zusätzlich problembezogene Querschnittsuntersuchungen ins Konzept aufgenommen werden sollen, um ausgewählte potentielle Risikokonstellationen zu prüfen.

Eine zukünftige Langzeitbeobachtung, die neben chemischen Bodeneigenschaften auch bodenphysikalische und –mikrobiologische Eigenschaften von Böden erfasst, würde das bestehende Nationale Bodenbeobachtungsprogramm nicht nur ergänzen sondern auch eine wichtige Lücke im ganzheitlichen Ansatz der Schweizerischen Umweltschutzgesetzgebung schliessen und damit drängende Probleme des physikalischen und biologischen Bodenschutzes berücksichtigen, die über die Schweiz hinaus Signalwirkung haben könnte.



## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
2	Bodenphysikalische Untersuchungen .....	1
2.1	Präzision und Stabilität der Bestimmungen .....	1
2.2	Probenahmeplan .....	4
2.3	Zeitlicher Verlauf der Erhebungswerte über drei Jahre .....	6
2.4	Praktikabilität und Aufwand .....	9
3	Bodenbiologische Untersuchungen .....	12
3.1	Beobachtungsstandorte .....	12
3.2	Probenahme- / Erhebungskonzept .....	12
3.3	Parameterauswahl / Bestimmungsmethoden .....	14
3.4	Eignung von Parametern und Bestimmungsmethoden .....	14
3.5	Langzeitbeobachtung - Zeitliche Veränderung von Bodeneigenschaften im Feld .....	16
3.6	Relevanz .....	17
3.7	Praktikabilität und Aufwand .....	17
4	Ausblick .....	19
5	Literaturverzeichnis .....	23
	Anhang A: Probenahmeplan LAZBO-Testphase, Teil Bodenphysik .....	27

## Verzeichnis der Figuren

Figur 1:	Probenahmepläne Bodenphysik LAZBO-Pilotprojektes 2001-2003 und flächenbezogener Beprobungsplan der LAZBO-Testphase 2004-2006 .....	5
Figur 2:	Grobporenvolumen (Erhebungswerte mit ihren 95% Vertrauensintervallen) für die zwei untersuchten Standorte und Tiefen. ....	7
Figur 3:	Beurteilung und Interpretation von zeitlichen Veränderungen der Erhebungswerte.....	8
Figur 4:	Beispiel Probenahmeplan Standort Kleinandelfingen für Testphase 2004-2006. ....	27

## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1:	Arbeitsaufwand pro Untersuchungsstandort und Erhebung für Probenahme, Probenaufbereitung und Bestimmung bodenphysikalischer Untersuchungen.....	10
Tabelle 2:	Optimierung des Arbeitsaufwandes in Abhängigkeit von der Anzahl Beobachtungen (Mischproben) pro Erhebung sowie der Anzahl Wiederholungen der Bestimmung pro Beobachtung (Labor-WH) der bodenmikrobiologischen Untersuchungen .....	18

## 1 Einleitung

Der vorliegende Teil 4 des Schlussberichts enthält die Folgerungen und Empfehlungen des LAZBO-Pilotprojektes, das an der Agroscope FAL Reckenholz in den Jahren 2001-2003 durchgeführt wurde. Ziel des Projektes war es, ausgewählte bodenphysikalische und –biologische Parameter auf ihre Eignung für ein Langzeitmonitoring zu testen. Untersuchungskonzept und Vorgehen sind dem Bericht Teil 1 zu entnehmen. Folgerungen und Empfehlungen basieren auf den Resultaten, die in den Berichtteilen 2 (Bodenphysik) und 3 (Bodenbiologie) vorgestellt wurden.

## 2 Bodenphysikalische Untersuchungen

Im Rahmen des LAZBO-Pilotprojektes wurden an zwei Ackerstandorten aus Ober- (10 - 15 cm Tiefe) und Unterboden (35 – 40 cm Tiefe) die folgenden bodenphysikalischen Eigenschaften bestimmt: Lagerungsdichte, Gesamtporenvolumen, Porengrößenverteilung, Luftdurchlässigkeit, Vorbelastung, Eindringwiderstand und visuelle Gefügebeurteilung. Um die Eignung von Beprobungs- und Analyse-Methoden für eine Langzeitbeobachtung der gewählten physikalischen Bodeneigenschaften zu beurteilen, standen die folgenden Aspekte im Vordergrund:

1. Präzision und Stabilität der Bestimmung; Einfluss von Probengröße, Bodenfeuchte und Probenlagerung
2. Repräsentativität und Robustheit des Probenahmeplans
3. Kurzfristiger zeitlicher Verlauf der Erhebungswerte („Grundrauschen“, signifikante und relevante Veränderungen über drei Jahre)
4. Praktikabilität und Aufwand des Vorgehens

Die nachfolgenden Abschnitte zeigen Folgerungen und formulieren Empfehlungen zu den obigen vier Punkten, basierend auf den Resultaten, vorgestellt im Teil 2 des Schlussberichts des LAZBO-Pilotprojektes.

### 2.1 Präzision und Stabilität der Bestimmungen

*Präzision der Bestimmungen:* Die untersuchten bodenphysikalischen Methoden erreichen eine Bestimmungspräzision, ausgedrückt als Variationskoeffizient des Bestimmungsmittelwertes, von 5% (Lagerungsdichte, Gesamtporenvolumen) bis 25% (Grobporenvolumen). Diese mittleren Fehler sind grösser als bei bodenchemischen Bestimmungen (Variationskoeffizient < 10%, (Desaules & Dahinden, 2000)), aber im Rahmen bodenphysikalischer Untersuchungen auf Grund der räumlichen Variabilität der Eigenschaften ungestörter Einzelproben zu erwarten. Am Beispiel Lagerungsdichte, Gesamt- und Grobporenvolumen wurde der Einfluss der Analysemethoden auf die Präzision der Bestimmungen mittels Kalibrierung der Messsysteme mit Fehlerfortpflanzungsrechnungen und Eichmessungen genauer untersucht. Dabei zeigte sich, dass bei der Bestimmung von Lagerungsdichte und Gesamtporenvolumen 50% der Bestimmungsvarianz bereits durch die Messmethode bedingt ist

(v. a. Unsicherheit bei der Probenvolumenbestimmung); die verbleibenden 50% sind auf die räumlich bedingte Heterogenität des Probenmaterials sowie zufällige Einflüsse bei Probenahme, -aufbereitung und -lagerung zurückzuführen. Beim Grobporenvolumen war der Anteil der Messmethode an der Bestimmungsvarianz kleiner als 20%. Da Probenahme, Aufbereitung und Lagerung für Lagerungsdichte, Gesamt- und Grobporenvolumen identisch waren, kann für das Grobporenvolumen von 80% Varianz bedingt durch räumliche Heterogenität des Bodens ausgegangen werden. Da die Präzision der Bestimmung nicht nur durch die Bestimmungsmethode, sondern auch durch Probenahme, Aufbereitung und Lagerung beeinflusst wird, wurde versucht, diese zufälligen Fehlerquellen durch Standardisierung und Kontrolle des Vorgehens so klein als möglich zu halten. Wo bedeutende Fehlerquellen vermutet wurden (unterschiedliche Feuchtigkeit, Probengrösse, Lagerungsdauer), wurden gezielt Detailuntersuchungen durchgeführt (siehe unten).

*Stabilität der Bestimmung:* Bestimmungen von Lagerungsdichte, Gesamt- und Grobporenmessungen an Eichproben aus Sintermetall zeigten, dass die Stabilität der Messmethoden (d.h. deren absolute Richtigkeit), ausgedrückt als Variationskoeffizient im Bereich von wenigen Prozenten liegt. Diese gute Stabilität wurde wahrscheinlich dadurch erreicht, dass die Messungen durch dieselbe erfahrene Laborequipe durchgeführt wurde und dabei besonderen Wert auf die Standardisierung und Überwachung der Messverfahren gelegt wurde. Zur Qualitätssicherung zukünftiger Messungen für Langzeituntersuchungen würde sich trotzdem empfehlen, die Stabilität der Analysemethoden durch den Einbezug von Eichproben in die Analyseserien weiter systematisch zu sichern und zu dokumentieren. Dabei können zum Beispiel Eichproben aus porösem Material bekannter Porengrößenverteilung und Durchlässigkeit zum Einsatz kommen, deren physikalische Eigenschaften zusammen mit den jeweiligen Bodenproben zur Kontrolle mit gemessen werden.

*Einfluss der Bodenfeuchte:* Bei den Feldmethoden wurden die bekannten, von der Bodenart abhängigen Einflüsse der Bodenfeuchte auf die Bestimmungswerte beobachtet. Zum Beispiel nahm am Standort 5 Reckenholz ZH der Bestimmungsmittelwert des Eindringwiderstands um 64% von 0.55 auf 0.9 MPa zu, wenn der gravimetrische Wassergehalt von 20 auf 19% abnahm (Teil 2, Kapitel 3.3.4). Für die Feldmethoden, insbesondere Eindringwiderstandsbestimmungen, sind daher Korrekturen für den Einfluss des Wassergehaltes nötig, um über einen längeren Beobachtungszeitraum hinweg miteinander vergleichbare Bestimmungswerte zu erhalten.

*Einfluss der Probenlagerung:* Die fachgerechte Lagerung der Proben bis zu einem halben Jahr hat wenig Einfluss auf die gemessenen physikalischen Eigenschaften der Proben und hat praktisch vernachlässigbare Fehler zur Folge. Falls ein Bedarf an Rückstellproben mit voraussichtlich mehrjähriger Lagerungsdauer auftreten sollte, müsste deren Stabilität allerdings durch weitere Abklärungen noch nachgewiesen werden.

*Einfluss der Probengrösse:* Die Probengrösse kann je nach bodenphysikalischem Parameter einen signifikanten Einfluss auf dessen Bestimmungsmittelwert haben. Die Proben aus den kleinen Stechzylindern ergaben systematisch höhere Werte für Gesamt- und Grobporenvolumen sowie Luftdurchlässigkeit und leicht tiefere Werte für die Lagerungsdichte im Vergleich zu den Proben aus den grossen Stechzylindern. Allerdings waren nur die unterschiedlichen Luftdurchlässigkeitswerte überwiegend eine Folge der Probendimensionen; die übrigen Unterschiede waren v.a. auf Analy-

sendetails der mit den Stechzylindergrössen verbundenen Untersuchungsmethodik zurückzuführen. Basierend auf den zu bestimmenden bodenphysikalischen Parametern wäre zu überlegen, ob ein Kompromiss zwischen den beiden bisher verwendeten Zylindergrössen und Messsystemen besser geeignet wäre. Der Zylinderkompromiss meint nicht unbedingt die Verwendung einer einzigen Zylindergrösse, sondern von zwei für unterschiedliche Zwecke geeigneten Zylindergrössen; Grosszylinder = jetziges Parameterspektrum (evtl. ergänzt durch zusätzliche Desorptionsstufen im Grobporenbereich), Kleinzylinder = Untersuchungen im Mittel-/Feinporenbereich. Grund für diese Trennung in verschiedene Zylindergrössen ist die mit zunehmender Entwässerung abnehmende Wasserleitfähigkeit des Bodengefüges, so dass die Untersuchung grosser Proben nur noch schwierig möglich ist (Untersuchungsdauer, Homogenität der Entwässerung).

Aus den Ergebnissen lassen sich bezüglich Präzision und Stabilität der Bestimmungen die folgenden Empfehlungen ableiten:

- Im Hinblick auf das Monitoring physikalischer Eigenschaften einer definierten Untersuchungsfläche können Verbesserungen der Erhebungspräzision mit mehr Beobachtungen pro Erhebung erzielt werden. Die Anzahl Bestimmungen pro Beobachtung kann dabei reduziert werden, da der Einfluss der Bestimmungen auf die Präzision der Erhebung mit zunehmender Anzahl Beobachtungen abnimmt (siehe dazu Kapitel 2.2).
- Da die Präzision der Bestimmung nicht nur die Bestimmungsmethode, sondern auch Probenahme, Aufbereitung und Lagerung umfasst, wurde durch Standardisierung der Einfluss zufälliger Fehler aus Probenahme, Aufbereitung und Lagerung auf die Bestimmungswerte so klein wie möglich gehalten.
- Die Stabilität der Bestimmungsmethoden kann durch vermehrte Eichmessungen noch besser überprüft bzw. systematisch dokumentiert werden. Dabei können zum Beispiel Eichproben aus porösem Material bekannter Porengrössenverteilung und Durchlässigkeit routinemässig zusammen mit den Bodenproben gemessen werden.
- Für die Feldmethoden, insbesondere die Bestimmung des Eindringwiderstandes, sind Korrekturen für den Einfluss des Wassergehaltes nötig, um für einen längeren Beobachtungszeitraum vergleichbare Beobachtungswerte zu erhalten.
- Bei einer Probenlagerungsdauer von weniger als 1 Jahr sind bei sachgerechter, sorgfältiger Lagerung nur minime Effekte zu erwarten. Bei einer Probenlagerungsdauer von mehreren Jahren ist der Einfluss der Lagerungsdauer auf die Qualität von Rückstellproben vor allem bei Oberböden (wegen der biologischen Aktivität in oftmals wenig stabilen Gefügeformen) weiter abzuklären.
- Bezüglich Stechzylindergrösse sollte basierend auf den Zielen eines Monitorings jeweils abgeklärt werden, inwieweit sich an einer einzigen Probengrösse alle erforderlichen bodenphysikalischen Parameter bestimmen lassen. Diesbezüglich weist das Messsystem mit den verwendeten Grosszylindern bessere Voraussetzungen auf.

## 2.2 Probenahmeplan

Der Probenahmeplan ist für die bodenphysikalischen Untersuchungen von besonderer Bedeutung, da die Parameter im Vergleich zur Beprobung für bodenbiologische oder -chemische Untersuchungen (z.B. im NABO) (a) an relativ grossen Bodenproben mit ungestörtem Gefüge bestimmt werden müssen, (b) eine einzelne Probenahme viel mehr Raum der (beschränkten) Versuchsfläche beansprucht (ungünstiges Verhältnis zwischen beprobter Bodenfläche und durch die Beprobung gestörter Bodenfläche) und (c) die Bestimmung eines Parameters an einer einzelnen Probe nicht wiederholt werden kann (was die Qualitätssicherung der Analytik erschwert), sowie (d) die einzelnen Proben physisch nicht gemischt werden können und deshalb jede einzelne Probe einen separaten Volumenausschnitt des Bodens darstellt, so dass die **räumliche Variabilität** eines Bodens durch die Bestimmungen ebenfalls mit erfasst wird.

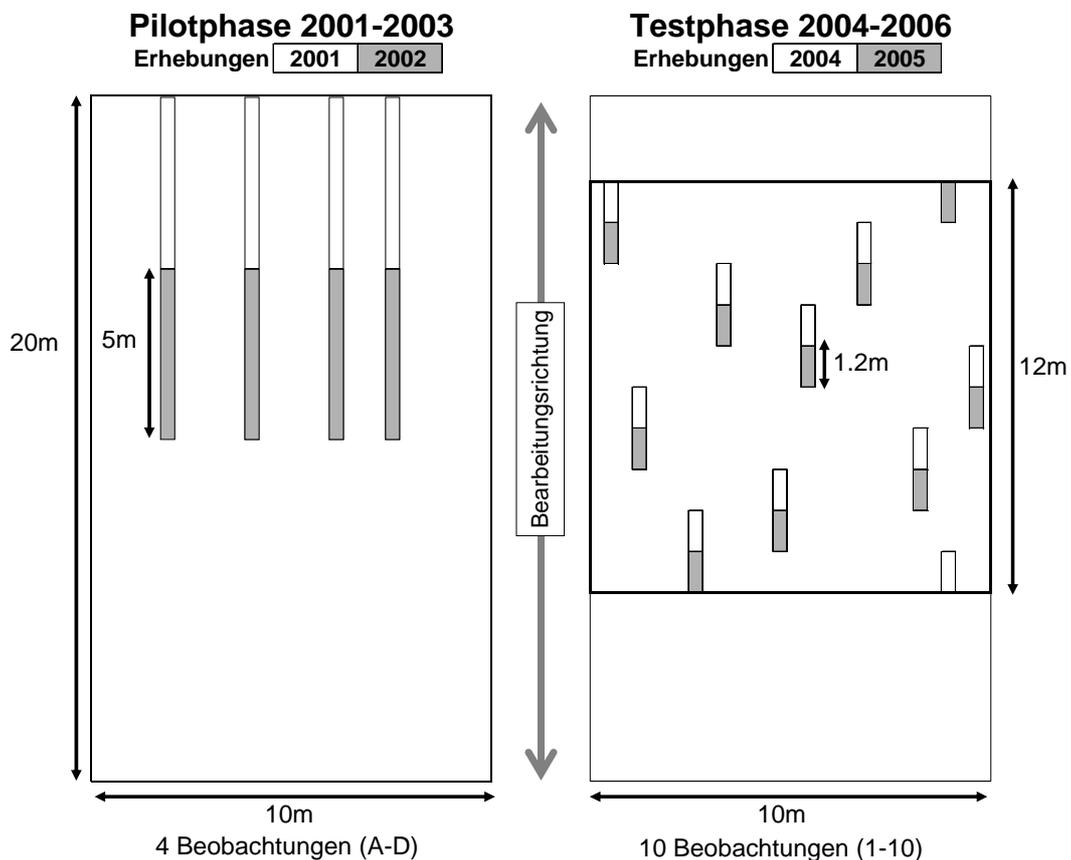
Ein Schwerpunkt dieser Untersuchung war es, einen Probenahmeplan zu entwerfen, der präzise und stabile Erhebungen bodenphysikalischer Parameter auf einer gegebenen Versuchsfläche ermöglicht.

*Eignung des Probenahmeplans:* Der gewählte Probenahmeplan (Figur 1, links) mit zehn Bestimmungen pro Beobachtung und vier Beobachtungen pro Erhebung, angeordnet in vier Streifen parallel zur Bearbeitungsrichtung, eignete sich für die methodische Fragestellung des LAZBO-Pilotprojektes. Für die Bedürfnisse einer flächenbezogenen Langzeitbeobachtung kann der Probenahmeplan durch die in den nachfolgenden Abschnitten dargestellten Massnahmen weiter verbessert werden:

1. Die Varianzanalyse (Teil 1, Gleichung 4) zeigte, dass beim Probenahmeplan des LAZBO-Pilotprojektes die Varianz des Erhebungsmittelwertes grösser ist als die eines Beobachtungsmittelwertes (Teil 2, Tabelle 12). Deshalb lässt sich die Präzision der Erhebungswerte verbessern, indem die Anzahl der Beobachtungen pro Erhebung erhöht wird; gleichzeitig kann die Anzahl der Bestimmungen pro Beobachtung reduziert werden, so dass der Aufwand für die Erhebung trotz verbesserter Präzision insgesamt gleich bleibt.
2. Für die Langzeitbeobachtung eines Ackerstandortes mit jährlich wechselnden Befahrungsmustern liefert der vorliegende Probenahmeplan zu wenig repräsentative Resultate. Bestimmungen in mechanisch besonders belasteten Teilen der Versuchsfläche, zum Beispiel in Fahrspuren, können – bezogen auf die Gesamtfläche eines Untersuchungsstandortes - durch ein festes und zu grobes Beprobungsraster quer zur Bearbeitungsrichtung in der gesamten Stichprobe übervertreten sein, so dass der mittlere flächenbezogene Verdichtungsgrad des Bodens überschätzt wird. Dadurch können gemessene Unterschiede fälschlicherweise als Bewirtschaftungseinflüsse interpretiert werden, obschon sie lediglich Folge einer bezüglich Bewirtschaftungseffekten flächenmässig nicht repräsentativen Beprobung sind. Flächenwirksame Bewirtschaftungseffekte können zu einer beträchtlichen räumlichen Heterogenität führen, wie die Ergebnisse zur Abklärung der Effekte von räumlich verschobenen Beobachtungen (Teil 2, Kapitel 3.2.1) und Erhebungen (Teil 2, Kapitel 3.3.2) zeigten.

*Vorschlag für einen optimierten Probenahmeplan:* Unter der Annahme, dass die Anzahl Bestimmungen pro Erhebung gleich bleiben soll (total 40 Bestimmungen pro Erhebung), können die bo-

denphysikalischen Eigenschaften der Versuchsfläche präziser erhoben werden, wenn die Anzahl der Bestimmungen pro Beobachtung von 10 auf 4 verkleinert und die Anzahl der Beobachtungen pro Erhebung von 4 auf 10 erhöht wird (siehe Teil 1, Gleichung 4). Dadurch lässt sich zum Beispiel das zweiseitige Vertrauensintervall (zVI) der Erhebungswerte für das Grobporenvolumen bei gleichem analytischem Gesamtaufwand um 30 – 40% reduzieren (siehe dazu auch Teil 2, Figur 26). Für eine verbesserte räumliche Repräsentativität der Erhebungen wird deshalb vorgeschlagen, die 10 Beobachtungen einer Erhebung in 10 Streifen parallel zur Bewirtschaftungsrichtung anzuordnen. Innerhalb der Streifen wird die Lage der einzelnen Beobachtungsblöcke zufällig gewählt. Dies ergibt den in Figur 1, rechts, dargestellten Probenahmeplan für eine Versuchsfläche in Form eines lateinischen Quadrats von 10 × 12 m Seitenlänge, welche total 10 Erhebungen pro Versuchsfläche ermöglicht. Mit diesem Beprobungsplan sollte sich (a) die räumliche Variabilität innerhalb der Versuchsfläche und (b) die Sensitivität der Erhebungen bezüglich Bewirtschaftungseinflüssen (mechanische Bodenbelastung, Nutzungsänderungen) oder bezüglich Einflüssen von Kofaktoren (wie z.B. der Bodenfeuchtigkeit) besser erfassen lassen.



**Figur 1: Probenahmepläne: links punktbezogener Beprobungsplan des LAZBO-Pilotprojektes 2001-2003 auf einer Erhebungsfläche von 10×20m, rechts flächenbezogener Beprobungsplan der LAZBO-Testphase 2004-2006 auf einer Erhebungsfläche von 10×12m; Beispiel der Anordnung von Beobachtungen für jeweils zwei aufeinander folgende Erhebungen.**

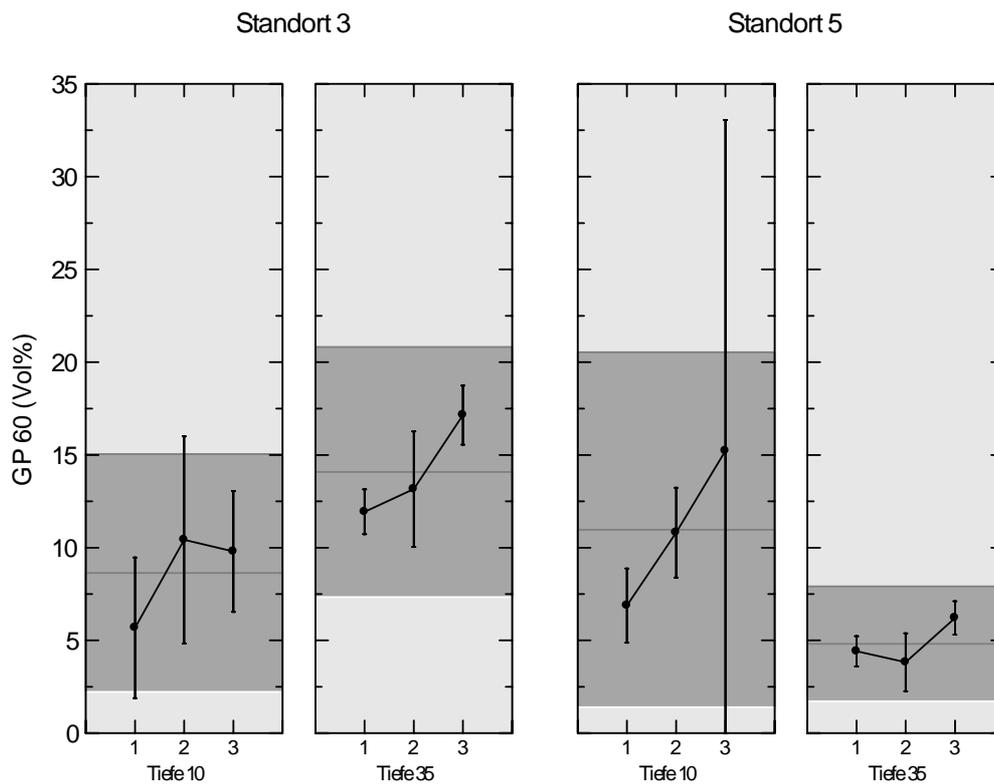
Die Skizze mit dem detaillierten Probenahmeplan für die LAZBO-Testphase, Teil Bodenphysik, befindet sich im Anhang A1.

Aus den Ergebnissen lassen sich bezüglich Probenahmeplan die folgenden Empfehlungen ableiten:

- Zur Validierung des neuen flächenbezogenen Probenahmeplans (Figur 1) werden in der LAZBO-Testphase einer Beobachtung 4 Bestimmungen und einer Erhebung 10 Beobachtungen zugeordnet, wobei die Beobachtungen in Form eines lateinischen Quadrates angeordnet sind.
- Die theoretisch berechnete optimale Anzahl von Bestimmungen und Beobachtungen pro Erhebung soll in der LAZBO-Testphase validiert werden.
- Die Gesamtfläche eines Untersuchungsstandortes wird nach der Anzahl auf einem Untersuchungsstandort vorgesehener Erhebungen bestimmt. Die Masse der Untersuchungsstandorte im LAZBO-Pilotprojekt wurden für total 10 Erhebungen ausgelegt.

### 2.3 Zeitlicher Verlauf der Erhebungswerte über drei Jahre

Im Untersuchungszeitraum des LAZBO-Pilotprojektes von drei Jahren wurden statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Erhebungswerten aus verschiedenen Jahren beobachtet. Diese Unterschiede befinden sich vermutlich aber im Bereich des so genannten „**Grundrauschens**“ des Mittelwertes aller Erhebungen (der auch als „mittlerer Standortwert“ bezeichnet werden kann, vgl. Definition Teil 1, Kapitel 3.4), wie es bei einem mit einer Fruchtfolge genutzten Ackerboden zu erwarten ist. Wird das 95%-Vertrauensintervall des Mittelwertes aller Erhebungen, das als Maß für dieses Grundrauschen eines Standorts betrachtet werden kann, mit einzelnen Erhebungswerten verglichen, so zeigt sich zum Beispiel für das „Groporenvolumen“ (Figur 2) dass sich nicht nur alle einzelnen Erhebungswerte, sondern auch die Mehrheit ihrer 95%-Vertrauensintervalle innerhalb des 95%-Vertrauensintervalles des Mittelwertes aller Erhebungen befinden (dunkelgrau hinterlegter Bereich). Allerdings muss berücksichtigt werden, dass dieses für das LAZBO-Pilotprojekt berechnete „Grundrauschen“ eher einem „worst case“ entspricht, weil die Probenahmetermine eher nach dem Kriterium „Kalenderdatum“ als nach „vergleichbarem Gefügestand“ (d.h. einem ähnlichen Setzungsgrad des Bodens) bestimmt wurden. Der zeitliche Verlauf physikalischer Eigenschaften von Ackerböden wird im Oberboden vor allem durch die Abfolge von jährlich wechselnden Kulturen innerhalb einer Fruchtfolge bestimmt. Daher ist nicht mit einem linearen zeitlichen Verlauf der Parameterwerte zu rechnen, sondern (je nach Beprobungsintensität) mit zyklisch wiederholten Veränderungen im Verlauf von Vegetations- bzw. Fruchtfolgeperioden, die je nach Probenahmetiefe und Jahreswitterung unterschiedlich stark ausgeprägt sein können. Zusätzlich kann ein kalendarisch festgelegter Beprobungstermin den Parameterwert je nach Kultur unterschiedlich beeinflussen.



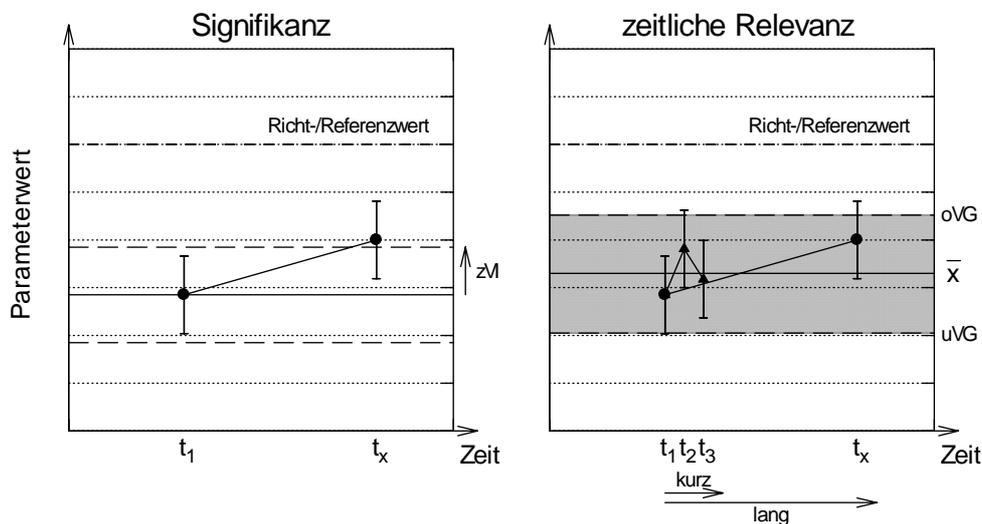
**Figur 2:** Grobporenvolumen (Erhebungswerte mit ihren 95% Vertrauensintervallen) für die zwei untersuchten Standorte und Tiefen, bestimmt mit Grosszylinderproben in drei Erhebungen. Mittelwerte der drei Erhebungen („Standortwert“, horizontale Linie) mit 95% Vertrauensintervall („Grundrauschen“, dunkelgraues Band).

Die während des LAZBO-Pilotprojektes beobachteten „zeitlichen Varianzen“ bodenphysikalischer Eigenschaften im Unterboden widerspiegeln wegen der im Unterboden deutlich geringeren Bewirtschaftungseinflüsse wahrscheinlich mehrheitlich die räumliche Variabilität des Bodens. Diese wird durch den flächenoptimierten Probenahmeplan mit 10 Beobachtungen repräsentativer erfasst und dadurch voraussichtlich kleiner. Mit den drei zusätzlichen Erhebungen der LAZBO-Testphase sowie durch den verbesserten Probenahmeplan sollte das 95%-Vertrauensintervall des Mittelwertes aller Erhebungen um mindestens 30% kleiner werden. Wegen der auf sechs jährliche Erhebungen verlängerten Zeitreihe wird erwartet, dass sich auch das Grundrauschen der Zeitreihen für die Dauer einer Fruchtfolge von sechs Jahren verlässlicher quantifizieren lässt.

Basierend auf den Daten zu Mittelwert und Varianz aus den drei Erhebungen des LAZBO-Pilotprojektes lässt sich mit dem statistischen Modell von Teil 1, Gleichung 11, die kleinste signifikante Abweichung vom mittleren Standortwert berechnen. Für das Beispiel „Grobporenvolumen“ am Standort 3 (Figur 2) können mit drei Erhebungen relative Veränderungen des Standortwerts über die gesamte Untersuchungsfläche betrachtet von mehr als 76% bzw. 46% (für die Tiefen von 10 bzw. 35 cm) mit 5%-Irrtumswahrscheinlichkeit als statistisch signifikant erkannt werden. Dieselben Grenzen würden für sechs Erhebungen rein rechnerisch bei 32% bzw. 20% liegen. Da die Variationskoeffizienten der Erhebungswerte für die entsprechenden Tiefen auch 31% bzw. 19%

betragen, ist mit sechs Erhebungen die maximal zu erwartende Präzision der Erhebung für das Grobporenvolumen voraussichtlich bereits erreicht.

Wichtig ist, dass die Parameterwerte aus zwei Erhebungen zu den Zeitpunkten  $t_1$  bzw.  $t_x$  sich zwar signifikant voneinander unterscheiden können (Figur 3 , linke Grafik), andererseits aber vor dem Hintergrund des Grundrauschens möglicherweise keine zeitliche Relevanz haben (Figur 3 , rechte Grafik). Veränderungen, die mit grosser Wahrscheinlichkeit eine zeitliche Relevanz aufzeigen sollen, müssen ausserhalb dieses Grundrauschens liegen. Wie Figur 3 (rechte Grafik) zeigt, liegt der Erhebungswert zum Zeitpunkt  $t_x$  innerhalb des 95 %-Vertrauensbereiches (d.h. zwischen der unteren und oberen Vertrauensgrenze [uVG bzw. oVG]) des mittleren Standortwertes  $\bar{x}_i$  (dem Mittel aus den Erhebungswerten der Zeitpunkte  $t_1$  bis  $t_3$ ), d.h. er liegt noch immer im Bereich des Grundrauschens.



**Figur 3: Beurteilung und Interpretation von zeitlichen Veränderungen der Erhebungswerte. Figur links: Erhebungswert  $x(t_1)$  signifikant verschieden von Erhebungswert  $x(t_x)$ , wenn  $|x(t_x) - x(t_1)| \geq zVI$ ; Figur rechts: Erhebungswert  $x(t_x)$  innerhalb halb des Grundrauschens, definiert durch den mittleren Standortwert  $\bar{x}$  mit dem 95%-Vertrauensband aus oberen und unteren Vertrauensgrenzen  $oVG$  und  $uVG$ .**

Neben der statistischen Signifikanz hat die funktionelle Relevanz eines möglichen Effekts eine zentrale Bedeutung. Statistisch signifikant nachweisbare Effekte können funktionell irrelevant sein, umgekehrt kann aber auch der Fall eintreten, dass sich funktionell relevante Effekte nicht statistisch signifikant nachweisen lassen. Analog zur statistischen Signifikanz kann das statistische Modell von Teil 1, Gleichung 11, auch verwendet werden, um den Erhebungsaufwand für die statistisch signifikante Bestimmung einer relevanten Veränderung zu berechnen. Als Kriterium für eine funktionelle Relevanz kann die Abweichung vom Mittelwert einer Untersuchungsreihe (zum Beispiel 5% des Standortwertes) oder von einem absoluten Referenzwert (z.B. in Form eines Richtwertes gemäss VBBo (1998)) gewählt werden. Mit der BGS-Arbeit zur Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen (BGS, 2004) stehen für mehrere physikalische Bodenparameter entsprechende Richt- und Prüfwertvorschläge zur Verfügung. Es ist zu beachten, dass zur sachlogisch richtigen

Interpretation zeitlicher Verläufe eines Bodenparameters Kenntnisse der funktionalen Zusammenhänge ebenso wichtig sind wie statistische Signifikanz.

Kenntnisse über **funktionale Zusammenhänge** bei Bodenprozessen und zwischen beschreibenden Parametern sind notwendig, um die Ergebnisse der Langzeitbeobachtungen sachlogisch richtig interpretieren zu können (statistische Signifikanz vs. sachlogische Relevanz); diese Informationen können nicht aus einem Langzeitbeobachtungsnetz stammen, sondern müssen mit Hilfe gezielter Experimente gewonnen werden.

Aus den Ergebnissen lassen sich bezüglich zeitlichem Verlauf der Erhebungswerte die folgenden Empfehlungen ableiten:

- Erhebungen an den beiden Untersuchungsstandorten müssen über mindestens weitere drei Jahre fortgesetzt werden, um das Grundrauschen der Erhebungswerte besser abschätzen und das vorhandene Modell der Varianzanalyse für die Zeitreihe validieren zu können.
- Basierend auf den laufend hinzukommenden Erhebungsdaten sollten die Möglichkeiten der Varianzanalyse weiterhin ausgeschöpft werden, um die bei einer gewünschten Erhebungspräzision nötigen Anzahl Erhebungen zur Bestimmung statistisch signifikanter und funktionell relevanter Effekte im Voraus abschätzen zu können.

## 2.4 Praktikabilität und Aufwand

*Praktikabilität der Probenahme, Aufbereitung und Bestimmung:* Die beiden für das LAZBO-Pilotprojekt ausgewählten Untersuchungsflächen konnten durch Einmessung von Fixpunkten und durch Markierung der Eckpunkte mit vergrabenen Magneten (Lokalisierung mit Hilfe eines Magnetdetektors) jährlich einwandfrei wieder gefunden werden. Auch die Einmessung der vorgängig festgelegten vier Beobachtungsblöcke pro Erhebung erwies sich als problemlos. Die Entnahme von ungestörten Volumenproben (Stechzylinderproben) in den Tiefen ab 10 cm bzw. ab 35 cm unter Bodenoberfläche konnte für die insgesamt 18 Stechzylinder pro Beobachtung schichtweise rasch und standardisiert durchgeführt werden. Für die einheitliche Bestimmung der Bodenoberfläche wurde eine praktikable Lösung gefunden, was eine reproduzierbare Bestimmung der Tiefe der Probenahme relativ zur Bodenoberfläche ermöglichte. Ein grundsätzliches Problem stellt allerdings nach wie vor die Einhaltung einer absoluten Probenahmetiefe dar, was insbesondere auf Ackerbaustandorten mit intensiver Bodenbearbeitung und intensiven Befahrungen zu unerwünschten Unschärfen führen kann. Die Einmessung und Probenahme von 10 Beobachtungsblöcken pro Erhebung gemäss neuem Probenahmeplan (Figur 1, rechts) ist auf Grund der Erfahrungen aus dem LAZBO-Pilotprojekt technisch machbar. Die einzige Schwierigkeit bestand im relativ engen Zeitfenster für eine optimale Probenahme in schwer bearbeitbaren Böden („Minutenböden“), wie sich am Beispiel des Standorts 5 zeigte. Je nach Fruchtfolge, aktuell vorhandener Kultur und Wetterverhältnissen ist eine Probenahme bei optimalen Bedingungen praktisch unmöglich.

Die Probenaufbereitung, Probenlagerung und Bestimmung der Parameter im Labor waren praktikabel und folgten den Schweizerischen Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten (FAL, FAW, RAC, 1998) wie etablierten Standards der Agroscope FAL Reckenholz. Dasselbe gilt für die beiden Feldmethoden „Penetrometer“ (FaBo ZH, 1998) und „Visuelle Gefügebeurteilung“ (Nievergelt et al., 2002)

*Aufwand für Probenahme, Probenaufbereitung und Bestimmung:* Der komplette Aufwand für eine Erhebung an einem Untersuchungsstandort umfassend Probenahme, Probenaufbereitung und Bestimmung der bodenphysikalischen Parameter im Labor betrug ca. 22 Arbeitstage. Für die beiden Feldmethoden „Penetrometer“ und „Visuelle Gefügebeurteilung“ zusammen betrug der Aufwand ca. zwei Tage.

**Tabelle 1: Arbeitsaufwand pro Untersuchungsstandort und Erhebung für Probenahme, Probenaufbereitung und Bestimmung bodenphysikalischer Untersuchungen; Angaben in Arbeitstagen (AT)**

<b>Methoden:</b>	<b>Grosszylinder (250 ml)</b>	<b>Kleinzylinder (100 ml)</b>	<b>Penetrometer (Pandasonde)</b>	<b>Visuelle Gefüge- beurteilung (aus Spatenprobe)</b>
<b>Anzahl Proben / Messungen:</b> (Anzahl Beobachtungen × Bestimmungen × Tiefen)	80 (4×10×2)	64 (4×8×2)	40 (4×10, 0-60cm)	32 (4×4×2)
<b>Anzahl Parameter:</b> Ergebnisse in Rohtabelle	6	9	1	3
<b>Einmessung Probenplan</b>	<b>0.25 AT</b>			
<b>Probenahme / * Messung im Feld</b>	<b>0.8 AT</b>	<b>0.6 AT</b>	<b>* 0.25 AT</b>	<b>0.25 AT</b>
<b>Bestimmungen im Labor</b>	<b>10 AT</b>	<b>10.1 AT</b>		<b>1 AT</b>
<b>Datenverarbeitung</b>			<b>0.25 AT</b>	
<b>Aufwand pro Methode ohne Einmessung Probenahmeplan:</b>	<b>10.8 AT</b>	<b>10.7 AT</b>	<b>0.5 AT</b>	<b>1.25 AT</b>
<b>Total Aufwand inkl. Einmessung Probenahmeplan</b>	<b>23.25 AT</b>			

Der Untersuchungsaufwand für die Bestimmung physikalischer Bodeneigenschaften für die Langzeitbeobachtung kann deutlich verringert werden, indem die parallele Untersuchung von Klein- und Grosszylindern, wie sie im LAZBO-Pilotprojekt aus Gründen des Methodenvergleiches durchgeführt wurde, auf ein Minimum reduziert bzw. ganz aufgegeben wird. Mit der Erfahrung von total sechs Untersuchungsjahren aus dem LAZBO-Pilotprojekt und der LAZBO-Testphase wird sich der Aufwand als Funktion der gewünschten Erhebungspräzision genauer abschätzen lassen.

Aus den Ergebnissen lassen sich bezüglich Praktikabilität und Aufwand die folgenden Empfehlungen ableiten:

- Die eingesetzten Untersuchungsmethoden waren für beide ausgewählten Versuchsstandorte praktikabel. Bei der Auswahl zukünftiger Versuchsflächen sollte dem Zeitfenster mit optimalem Bodenzustand (Feuchtigkeit, Absetzungsgrad) besondere Beachtung geschenkt werden (d.h. so genannte „Minutenböden“ sind ausserordentlich schwierig zu beproben).
- Pro Standort und Erhebung müssen ca. 22 Arbeitstage für alle Laboruntersuchungen (inklusive Probenahme und Probenaufbereitung) sowie 2 Arbeitstage für die Felduntersuchungen veranschlagt werden.
- Abhängig von den Zielen eines Monitorings physikalischer Bodeneigenschaften lässt sich der Aufwand für alle Labormethoden auf ca. 11 Arbeitstage pro Standort und Erhebung halbieren, wenn nur mit einer Zylindergrösse (bei gleichem Probenumfang) gearbeitet wird.

### 3 Bodenbiologische Untersuchungen

Im Rahmen des vorliegenden LAZBO-Pilotprojektes wurden je drei Acker- (0 - 20 cm) und Grünlandstandorte (0 - 10 cm) beprobt. Für eine Langzeitbeobachtung bodenbiologischer Eigenschaften von Böden wurden folgende Parameter untersucht:

- Mikrobielle Biomasse (Methoden: Substratinduzierte Respiration, Chloroform-Fumigations-Extraktion)
- Basalatmung
- Stickstoffmineralisation.

#### 3.1 Beobachtungsstandorte

Verglichen mit den 220 zufällig ausgewählten Ackerstandorten, die von Oberholzer et al. (1999) untersucht wurden und die zur Erarbeitung eines Referenzwertebereiches für den bodenmikrobiologischen Parameter mikrobielle Biomasse BM (SIR) dienten, sind die geringen Gehalte an mikrobieller Biomasse der für das LAZBO-Pilotprojekt ausgewählten Ackerstandorte im unteren Teil des Referenzwertbereiches einzuordnen. Dies ist jedoch durch die Bodenart (hoher Sandanteil) bedingt. Die Standorte können dementsprechend nicht als repräsentativ für schweizerische Ackerböden betrachtet werden. Die Ergebnisse für die Grünlandstandorte zeigten dagegen, dass verglichen mit den Resultaten von 151 Dauergrünlandflächen aus den Jahren 2001-2003 die ausgewählten Standorte für diesen Nutzungstyp als repräsentativ einzustufen sind (Oberholzer, unveröffentlicht).

Aus den Ergebnissen lassen sich bezüglich einer Standortauswahl für die Langzeitbeobachtung biologischer Parameter folgende Empfehlungen ableiten:

- Für die Erfassung von Veränderungen ist es empfehlenswert, entsprechend den Referenzwertebereichen die Standorte so auszuwählen, dass der gesamte Bereich erfasst wird, insbesondere darum, weil es im unteren Teil des Referenzwertbereiches schwierig ist, relevante Veränderungen statistisch nachzuweisen.
- Für die Interpretation der Ergebnisse zeigte es sich, dass es wichtig ist, dass Referenzwerte vorhanden sind. Damit müssten für Waldstandorte sowie für Standorte mit Sonderkulturen (Reben, Obst etc.) zunächst repräsentative Standorte zur Ableitung eines Referenzwertemodells untersucht werden. Generell gilt, dass die Qualität und Präzision der Referenzwerte davon abhängig ist, wie umfassend und repräsentativ die Datengrundlage im Vergleich zu den zu bewertenden Standorten ist.

#### 3.2 Probenahme- / Erhebungskonzept

Im LAZBO-Pilotprojekt wurde die Beprobung entsprechend der NABO-Vorgehensweise durchgeführt, die von der Empfehlung für die Probenahme für bodenmikrobiologische Parameter der VBB (Methode RM-ERL-2 der Schweizerischen Referenzmethoden der Eidg. landwirtschaftlichen For-

schungsanstalten) (FAL, FAW, RAC, 1998) abweicht. Während von der VBB eine Beprobung von vier separaten Teilflächen mit je einer Mischprobe pro Parzelle empfohlen wird, erfolgte die Beprobung für diese Untersuchungen gemäss NABO mit vier Mischproben auf einer Fläche von 10 x 10 m (Desaules & Dahinden, 2000). Diese Vorgehensweise ermöglicht es, die Wiederholbarkeit der Beprobung in einer Teilfläche zu analysieren, nicht aber die Standortrepräsentativität für eine untersuchte Fläche (z.B. Parzelle).

Neben dem Konzept der Probenahme spielen Faktoren wie Beprobungszeitpunkt sowie chemische und physikalische Standorteigenschaften eine wesentliche Rolle, um charakteristische bodenmikrobiologische Eigenschaften eines Standortes genau erfassen zu können. Im vorliegenden Projekt wurde die Beprobung der Standorte hauptsächlich im März der Jahre 2001 - 2003 durchgeführt (Teil 3, Kapitel 1.4, Tabelle 2). Damit orientierten sich die bodenmikrobiologischen Beprobungen im LAZBO-Pilotprojekt an den Beprobungszeitpunkten anderer Dauerbeobachtungsprogramme. Durch die mangelnde Variabilität hinsichtlich des Probenahmezeitpunktes konnte ein Einfluss dieses Faktors jedoch nicht überprüft werden. Bei der Auswahl der Begleitparameter wurde auf jene Parameter aus der Untersuchung zur Bestimmung von Referenzwertbereichen zurückgegriffen, die in den Referenzmodellen wesentliche Einflussfaktoren darstellten (pH-Wert,  $C_{org}$ -Gehalt, Ton-, Schluff- und Sandgehalt). Inwiefern diese Parameterauswahl abschliessend ist, kann momentan noch nicht endgültig beurteilt werden. Des Weiteren wurden die Bedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit, aktuelle Kultur) und Zeiträume (Aufbereitung, Bestimmungszeitpunkt) bei den Probenahmen sowie während der Probenvorbereitung protokolliert. Die Frage nach dem Einfluss dieser Faktoren auf das Ergebnis der Bestimmungen kann aufgrund der jeweils geringen Variabilität nicht beantwortet werden. Auf diese Einflussgrössen müsste jedoch vermutlich mehr geachtet werden. So ist es durchaus möglich, dass bei der im Zeitverlauf grundsätzlich konstanten Nutzung der Grünlandstandorte die zeitliche Variation durch Unterschiede bei der Probenvorbereitung begründet ist. Im Hinblick auf eine Standardisierung der Probenaufbereitung ist das Entfernen von Pflanzenteilen und Grobwurzeln der schwierigste Teil.

Bezüglich der Vorgehensweise bei der Beprobung kann für eine Langzeitbeobachtung empfohlen werden:

- Die präzise Erfassung der bodenmikrobiologischen Parameter in der Fläche ist mit vier Beobachtungen (Mischproben) pro Standort gewährleistet.
- Der Probenahmeplan wird für die sich anschliessende LAZBO-Testphase in den Jahren 2004 bis 2006 mit jeweils vier Beobachtungen (Mischproben) pro Standort beibehalten.
- Die Einflüsse des Zeitpunktes der Probenahme, den Bedingungen bei der Probenahme (Temperatur, Feuchtigkeit, aktuelle Kultur) sowie der Probenaufbereitung auf die bodenmikrobiologischen Ergebnisse sind im Rahmen weiterer Untersuchungen abschliessend zu klären.

### 3.3 Parameterauswahl / Bestimmungsmethoden

Die ausgewählten Parameter mikrobielle Biomasse, Basalatmung und N-Mineralisation entsprechen den von der VBB für bodenmikrobiologische Untersuchungen empfohlenen Standardparametern. Für die Bestimmung der mikrobiellen Biomasse stehen grundsätzlich zwei Methoden zur Verfügung. Neben der von der VBB empfohlenen Chloroform-Fumigations-Methode (FE) wurde auch die Bestimmung der mikrobiellen Biomasse mittels Substratinduzierter Respiration (SIR) durchgeführt, die als Methode z.B. in der Dauerbeobachtung des Landes Niedersachsen eingesetzt wird. Entgegen den meisten Langzeitbeobachtungsprogrammen, die die N-Mineralisation im aeroben Brutversuch nicht bestimmen, wurde dieser Parameter entsprechend der VBB-Empfehlung angewendet.

Grundsätzlich wurden alle Bodenproben bei 4°C im Kühlraum gelagert, sowohl bis zur Aufbereitung als auch danach. Tiefgekühlt gelagert wurden lediglich jene Teilproben, die zur Kontrolle und zur Prüfung der Referenzstabilität verwendet wurden. Dennoch lässt sich aus den Ergebnissen des LAZBO-Pilotprojektes folgern, dass für bodenmikrobiologische Untersuchungen nach Möglichkeit auf das Tiefkühlen der Proben verzichtet werden sollte. Der Grund dafür ist, dass bei tiefgekühlten Proben das Risiko für abweichende Ergebnisse in zweifacher Hinsicht steigt: Bei Parallelbestimmungen im Labor nimmt die Anzahl grösserer Variationskoeffizienten bei Mehrfachbestimmungen zu, bei den Wiederholungen im Feld werden die Variationskoeffizienten der Erhebungen grösser. Unabhängig vom erhöhten Risiko für Ausreisser und grösseren Streuungen sind die Ergebnisse der tiefgekühlten und frischen Proben bei den meisten Methoden nicht vergleichbar. Als Konsequenz daraus werden die Proben in der LAZBO-Testphase 2004-2006 aus frischen Proben analysiert.

Für die Planung einer Langzeitbeobachtung bedeutet dies:

- Alle Proben müssen entweder frisch oder tiefgekühlt bestimmt werden und dies muss zu Beginn festgelegt werden.

### 3.4 Eignung von Parametern und Bestimmungsmethoden

Die Validierung der bodenmikrobiologischen Referenzmethoden für die Langzeitbeobachtung erfolgte anhand von folgenden Kriterien:

- **Genauigkeit der Bestimmung (Genauigkeit der Beobachtung):** Bezogen auf die Präzision der Bestimmung lässt sich anhand der Variationskoeffizienten der 4fachen Wiederholung der Bestimmung einer Beobachtung (Mischprobe) im Labor für die einzelnen bodenmikrobiologischen Parameter erkennen, dass diese grundsätzlich für einen Einsatz in der Langzeitbeobachtung geeignet sind (Teil 3, Kapitel 2.2 und 3.1). Neben der mittleren Variabilität ist für die Beurteilung einer Bestimmung auch der Anteil von Proben mit einer hohen Streuung von Interesse. Mit Ausnahme des bodenmikrobiologischen Parameters N-Mineralisation zeigen die Ergebnisse, dass in 75% der Fälle die Streuungen unter 5% betragen. Die grössere Streuung bei der N-Mineralisation könnte sich auf eine stärkere Inhomogenität des Probenmaterials aufgrund der bei dieser Bestimmung nötigen durchzuführenden Inkubation der

Proben zurückführen lassen, schliesst jedoch diesen bodenbiologischen Parameter grundsätzlich nicht von der Langzeitbeobachtung aus. Vielmehr sind weitere Anstrengungen zur Verbesserung der Methodenstandardisierung im Bereich der Probenvorbereitung nötig. Bezüglich der Anzahl von Wiederholungen der Bestimmung einer Beobachtung (Mischprobe) im Labor zeigte sich, dass eine Reduktion der Anzahl wiederholter Bestimmungen im Labor einen geringen Einfluss auf das Vertrauensintervall von Mittelwertdifferenzen hat (Teil 3, Kap. 3.2). Somit kann die Anzahl Wiederholungen im Rahmen einer Langzeitbeobachtung ohne grossen Verlust an Genauigkeit reduziert werden. Für die LAZBO-Testphase sollte jedoch die bisherige Anzahl von vier Wiederholungen im Labor beibehalten werden, damit ein homogenes Datenset für die Gesamtauswertung der LAZBO-Untersuchungen zur Verfügung steht.

- **Genauigkeit der Erhebung:** Grundsätzlich zeigen die Ergebnisse für die Präzision der Erhebung, dass mit vier Beobachtungen (Mischproben) eine präzise Beschreibung der untersuchten Fläche möglich ist und somit die Reproduzierbarkeit der Probenahme, Aufbereitung, Lagerung und Bestimmungsmethode (Teil I, Figur 1) eine hohe Genauigkeit aufweist. Allerdings ist zu erkennen, dass die Variationskoeffizienten pro Standort für die verschiedenen bodenmikrobiologischen Parameter Unterschiede aufzeigen (Teil 3, Kap 3.2, Anhang C). Ein Vergleich der Variationskoeffizienten pro bodenmikrobiologischen Parameter über alle sechs Standorte lässt ebenfalls Unterschiede zwischen den Parametern erkennen. Am auffälligsten zeigt sich dies bei den bodenmikrobiologischen Parametern mikrobielle Biomasse-N (FE) und N-Mineralisation. Für eine Langzeitbeobachtung ist dieses Ergebnis für einen Einsatz beider Parameter als negativ zu betrachten.
- **Referenzstabilität:** Da es für bodenmikrobiologische Parameter nicht möglich ist, Rückstellproben über längere Zeit aufzubewahren, ist die Referenzstabilität, d.h. die zeitliche Reproduzierbarkeit der verwendeten Methoden über einen Zeitraum von mehreren Jahren für die Langzeitbeobachtung von grösster Wichtigkeit. Im Rahmen des LAZBO-Pilotprojektes wurde die Referenzstabilität der verwendeten bodenmikrobiologischen Methoden geprüft, indem tiefgekühlte Proben des Jahres 2001 in den Jahren 2001, 2002 und 2003 bzw. tiefgekühlte Proben des Jahres 2002 in den Jahren 2002 und 2003 bestimmt wurden (Teil 3, Kapitel 2.4 und 3.3). Für den bodenmikrobiologischen Parameter mikrobielle Biomasse (SIR) konnte eine sehr gute Referenzstabilität nachgewiesen werden. Die Ergebnisse der bodenmikrobiologischen Parameter mikrobielle Biomasse-C/N (FE), Basalatmung und N-Mineralisation zeigen, dass die entsprechenden Bestimmungsmethoden dieses wichtige Kriterium bezüglich der Eignung für die Langzeitbeobachtung momentan nicht erfüllen. Für den bodenmikrobiologischen Parameter Basalatmung kann die unzureichende Referenzstabilität vermutlich durch das Auftauen eines Teils der Proben auf Grund eines defekten Tiefkühlschranks begründet werden. Für die N-Mineralisation ist auf Grund der geringen Anzahl an Proben keine abschliessende Aussage zur Referenzstabilität möglich. Die bisherigen Ergebnisse zeigen jedoch eine geringe Abweichung. Die Widersprüche (Teil 3, Kapitel 3.3), die sich für den bodenmikrobiologischen Parameter mikrobielle Biomasse-C/N (FE) ergeben haben, können dagegen nicht kausal erklärt werden, so dass hier davon ausgegangen werden

muss, dass die Ergebnisse die tatsächliche Situation widerspiegeln und die Referenzstabilität dieser Methode unzureichend ist.

Für eine Langzeitbeobachtung können aus den Ergebnissen folgende Empfehlungen gegeben werden:

- Für weitere Arbeiten im Bereich der Langzeitbeobachtung einschliesslich der LAZBO-Testphase ist es unerlässlich, der Qualitätssicherung bezüglich Referenzstabilität der Bestimmungsmethoden grosse Beachtung zu schenken. Für die Qualitätssicherung eignen sich nach den Erfahrungen aus dem LAZBO-Pilotprojekt tiefgekühlte Proben als Referenzproben. Jedoch müssen diese zur Überprüfung der Stabilität von Messsystemen in regelmässigen Abständen mitbestimmt werden, damit allfällige bei tiefgekühlten Proben vermehrt zu beobachtende Ausreisser oder Extremwerte eliminiert werden können und somit eine gute Basis für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse über die Zeit erarbeitet werden kann.
- Die Bemühungen zur Erarbeitung von stabilen Referenzen über die Zeit sowie die Möglichkeit, Messanlagen absolut präzise eichen zu können, sind weiterhin erforderlich.

### 3.5 Langzeitbeobachtung - Zeitliche Veränderung von Bodeneigenschaften im Feld

Für die Erfassung zeitlicher Veränderungen von Bodeneigenschaften im Feld wurden zunächst für jeden Standort die Streuungen des Mittelwertes für jede Stufe des hierarchischen Modells berechnet (Beobachtung: Wiederholungen der Bestimmung pro Beobachtung (Mischprobe) im Labor, Erhebung: mehrere Beobachtungen (Mischproben) an einem Standort, mittlerer Standortwert: Erhebungen der drei untersuchten Jahre pro Standort). Diese Streuungsangaben bildeten die Basis für die Berechnung des zweiseitigen Vertrauensintervalls von Mittelwertsdifferenzen (zVI) zwischen Erhebungen am selben Standort, und entspricht der kleinsten gesicherten Differenz zwischen den Mittelwerten der Erhebungen (Teil 1, Kapitel 4.2.2). Dies erlaubt eine statistische Beurteilung von Unterschieden zwischen den Jahren 2001-2002, 2002-2003 sowie 2001-2003. Die zVI-Werte der Standorte wurden entsprechend der Nutzung (Acker, Grünland) zusammengefasst und stellen die mittlere Signifikanzschwelle pro Nutzung dar. Im Rahmen des LAZBO-Pilotprojektes wurde die zeitliche Veränderung mittels verschiedener Verfahren erfasst (Teil 3, Kapitel 1.3, Abschnitt Langzeitbeobachtung). Für die Verfahren 1–3 wurden im Durchschnitt als mittlere Signifikanzschwellen der Ackerstandorte für die mikrobielle Biomasse BM (SIR) 6.5% und jeweils für die mikrobielle Biomasse-C/N (FE), für die Basalatumung und die N-Mineralisation 13% bestimmt. Für die Grünlandstandorte liegen die Werte bei 8% für die mikrobielle Biomasse BM (SIR), 11% für die mikrobielle Biomasse-C/N (FE), 7.5% für die Basalatumung und 15% für die N-Mineralisation (Teil 3, Kapitel 2.5 und 3.4). Werden die ermittelten Signifikanzschwellen der Präzision der Bestimmung bzw. der Präzision der Erhebung gegenübergestellt, zeigt sich, dass sich mit dieser Vorgehensweise prinzipiell sehr geringe Unterschiede in den mikrobiologischen Bodeneigenschaften statistisch absichern und als signifikante Veränderungen darstellen lassen.

Für die Auswertung von Langzeitbeobachtungen ist es grundsätzlich sinnvoll, mittels einer Regressionsanalyse zu prüfen, ob die Ergebnisse einen Trend für die beobachtete Zeit erkennen lassen. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass für mindestens 6 bis 10 Zeitpunkte Daten vorliegen und diese einen Zeitraum repräsentieren, der nicht selbst für den Trend verantwortlich sein kann (z.B. sollte diese bei Ackerstandorten etwas mehr als eine Fruchtfolge umfassen).

Die Daten aus dem vorliegenden Pilotprojekt und der sich anschliessenden Testphase ergeben ein Datenset, das es ermöglicht, eine Regressionsanalyse durchzuführen und die Daten auf einen Trend zu analysieren. Allerdings ist der Zeitraum von sechs Jahren relativ kurz, so dass für die Ackerstandorte überprüft werden muss, ob ein zu beobachtender Trend nicht durch die Konstellation der Fruchtfolge verursacht wird bzw. als Grundrauschen interpretiert werden muss.

### 3.6 Relevanz

Ein Vergleich zwischen der festgestellten zeitlichen Veränderung an einem Standort und dem für den Standort typischen Referenzwert (Teil 3, Kap. 2.6 und 3.5,) erweist sich für die sachlogische Interpretation von beobachteten Veränderungen hinsichtlich ihrer funktionellen Bedeutung als sehr nützlich. Diese Beurteilung ist davon abhängig, ob sich die Veränderungen a) innerhalb der Spannweite des standorttypischen Referenzwertbereiches, b) in Richtung des Referenzwertes, oder c) in Richtung der unteren oder oberen Grenze des Referenzwertbereiches bewegen. Im Moment liegt lediglich für den bodenmikrobiologischen Parameter mikrobielle Biomasse (SIR) ein geeignetes Referenzwertmodell vor, mit dessen Hilfe in Abhängigkeit von bodenphysikalischen und – chemischen Eigenschaften eines Standortes die typischerweise zu erwartende mikrobielle Biomasse sowohl für Acker- als auch für Grünlandstandorte berechnet werden kann. Es hat sich jedoch gezeigt, dass dieses Modell für leichte, sandige Böden mit einer geringen mikrobiellen Biomasse nicht ausreichend abgestützt ist.

Für die Langzeitbeobachtung ist anzustreben, die Datengrundlage für das Referenzwertmodell des bodenmikrobiologischen Parameters mikrobielle Biomasse BM (SIR) zu erweitern. Für diejenigen bodenmikrobiologischen Parameter, die ebenfalls in einer Langzeituntersuchung untersucht werden sollen, sind ebenfalls Referenzwertmodelle zu entwickeln, damit für jeden Standort prinzipiell gut abgestützte nutzungsbezogene Referenzwerte abgeleitet werden können.

### 3.7 Praktikabilität und Aufwand

Für die Erhebung der bodenmikrobiologischen Parameter ergeben sich keine Einschränkungen hinsichtlich der Praktikabilität in der Anwendung.

Die Frage, inwieweit es möglich ist, den Arbeitsaufwand im Feld und im Labor zu reduzieren, ohne Einbussen in der Genauigkeit der Ergebnisse zu bekommen, lässt sich anhand der Ergebnisse für die Präzision der Bestimmung und der Erhebung beantworten. Würde die Anzahl Beobachtungen (Mischproben) pro Erhebung bei vier belassen, dagegen die Anzahl Wiederholungen der Bestim-

mung pro Beobachtung von derzeit vier auf drei bzw. zwei reduziert, könnte der Arbeitsaufwand um 7% bzw. 22% reduziert werden (Tabelle 2).

**Tabelle 2: Optimierung des Arbeitsaufwandes in Abhängigkeit von der Anzahl Beobachtungen (Mischproben) pro Erhebung sowie der Anzahl Wiederholungen der Bestimmung pro Beobachtung (Labor-WH) der bodenmikrobiologischen Untersuchungen, Angaben in Arbeitstagen (AT) bzw. Prozent**

Arbeitsschritt	Aufwand (AT)					Voraussetzungen/ Zusatzkosten
	Pilot- projekt <sup>1</sup>	6 Standorte 4 Mischproben <sup>2</sup> 3 Labor-WH <sup>3</sup>	6 Standorte 4 Mischproben 2 Labor- WH	6 Standorte 3 Mischproben 3 Labor-WH	6 Standorte 3 Mischproben 2 Labor-WH	
<b>Probenahme</b>	3.0	3.0	3.0	2.25	2.25	
<b>Probenaufbereitung, Entfernen von Pflanzenresten, Vortrocknen, Sieben</b>	3.0	3.0	3.0	2.25	2.25	
<b>Analyse</b>						
- TS/WHK <sup>4</sup>	1.8	1.8	1.2	1.35	0.9	Heinemeyeranlage
- mikr. BM (SIR)	3.5	2.6	1.8	1.97	1.3	
- mikr. BM-C/N (FE)						
a) Fumigation/Extraktion	3.4	3.4	2.3	2.55	1.7	TC/TN-Analysegerät, Chemikalien
b) Analytik	1.5	1.5	1.0	1.13	0.75	
- Basalatumg	2.3	1.7	1.2	1.3	0.86	Titrationsautomat Auftragsanalytik für NO <sub>3</sub> -N u. NH <sub>4</sub> -N
- N-Mineralisation	2.7	2.7	1.8	2.0	1.35	
<b>Datenverarbeitung</b>	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	
<b>Total</b>	<b>22.4</b>	<b>20.9</b>	<b>16.4</b>	<b>16.0</b>	<b>12.6</b>	
<b>Prozentuale Einsparung durch Reduktion der Anzahl Mischproben bzw. Labor-WH</b>		<b>6.5</b>	<b>22</b>	<b>24</b>	<b>40</b>	

<sup>1</sup>: 6 Standorte, 4 Beobachtungen (Mischproben), 4 Wiederholungen der Bestimmung pro Beobachtung (Labor-WH) für die bodenmikrobiologischen Parameter mikrobielle Biomasse (SIR) und Basalatumg, 3 Labor-WH für die bodenmikrobiologischen Parameter mikrobielle Biomasse-C/N (FE) und N-Mineralisation

<sup>2</sup>: Anzahl Beobachtungen (Mischproben) pro Erhebung

<sup>3</sup>: Labor-WH = Anzahl Wiederholungen der Bestimmung pro Beobachtung im Labor

<sup>4</sup>: TS – Trockensubstanz, WHK – Wasserhaltekapazität

Wird dagegen die Anzahl der Beobachtungen (Mischproben) pro Erhebung von vier auf drei reduziert, und beträgt die Anzahl der Wiederholungen der Bestimmung pro Beobachtung im Labor drei bzw. zwei, würde sich der Arbeitsaufwand um 24% bzw. 40% verringern. Bezüglich der Einbussen an Genauigkeit zeigt sich, dass sich das zweiseitige Vertrauensintervall von Mittelwertsdifferenzen (zVI) für die beiden letzteren Varianten im Maximum aller bodenmikrobiologischen Parameter um 3% verringern würde (Teil 3, Kapitel 3.2, Figur 43).

Für eine Langzeitbeobachtung kann aus den Ergebnissen folgende Empfehlung gegeben werden:

- Für die Planung einer Langzeitbeobachtung kann die Kombinationen der Entnahme von drei Beobachtungen (Mischproben) pro Erhebung im Feld sowie drei bzw. zwei Wiederholungen der Bestimmungen pro Beobachtung im Labor empfohlen werden.

## 4 Ausblick

Das vorliegende LAZBO-Pilotprojekt hatte zum Ziel, die Eignung ausgewählter Parameter und Methoden für die Langzeitbeobachtung physikalischer und biologischer Eigenschaften von Böden zu beurteilen. Dabei wurde erreicht,

1. Präzision und Richtigkeit der Bestimmungsmethoden der ausgewählten bodenphysikalischer und –mikrobiologischer Parameter abzuschätzen,
2. einen hierarchischen Probenahmeplan für bodenphysikalische Untersuchungen zu entwerfen und zu optimieren, der eine repräsentative Probenahme über grössere Flächen erlaubt,
3. eine Probenlagerungs- und Analysestrategie zu entwerfen und zu testen, die referenzstabile bodenmikrobiologische Untersuchungen über lange Zeiträume ermöglicht,
4. statistische Modelle zur Zeitreihenanalyse einzuführen, mit denen mittlere Standortwerte und Grundrauschen physikalischer und mikrobiologischer Bodeneigenschaften über längere Zeiträume (Jahre bis Jahrzehnte) erfasst werden können,
5. Praktikabilität und Aufwand basierend auf drei Erhebungsjahren zu quantifizieren.

Das LAZBO-Pilotprojekt liefert die methodischen Grundlagen für ein Konzept zur Langzeitbeobachtung physikalischer („NABOphys“) und mikrobiologischer Bodeneigenschaften („NABObio“). Mit der laufenden LAZBO-Testphase (2004 – 2006) werden der optimierte Probenahmeplan Bodenphysik sowie die im LAZBO-Pilotprojekt entworfene Zeitreihenanalyse getestet. Damit werden bis Ende 2006 Erhebungswerte aus weiteren drei Jahren vorhanden sein, womit verlässlichere mittlere Standortwerte zur Verfügung stehen und die Möglichkeit besteht, das Grundrauschen jedes Standortes zu erfassen. Zudem werden die Erhebungen aus sechs Jahren erstmals eine Trendanalyse zulassen.

Im Hinblick auf die Langzeitbeobachtung bodenphysikalischer und –mikrobiologischer Parameter stellen sich zusätzlich zu den methodischen Überlegungen von LAZBO-Pilotprojekt und Testphase die Fragen, welches Ziel NABOphys und NABObio erreichen soll und welche Bodeneigenschaften oder –funktionen dazu beobachtet werden müssen?

Aus bodenphysikalischer Sicht bringt die **Langzeitbeobachtung bodenphysikalischer Eigenschaften** ein dringend nötiges Instrument, um die (Schad-)Verdichtung von land- und forstwirtschaftlich genutzten Böden zu verhindern. 68'000 km<sup>2</sup> Land sind weltweit von Verdichtung betroffen (Oldeman et al., 1991). Weisskopf et al. (1988, S. 75) fanden für die Schweiz, dass ca. 15% der Unterböden in Fruchtfolgeflächen Grobporenvolumina kleiner als 7% aufweisen und damit unter dem Richtwerte nach BGS (2004) liegen. Damit ist Verdichtung flächenmässig ein wichtigster physikalischer Bodenschädigungsprozess, dessen Ausmass durch die laufend zunehmende Mechanisierung mit immer schwereren und leistungstärkeren Maschinen noch weiter zunehmen dürfte (Soane & Van Ouwerkerk, 1994; Soane & Van Ouwerkerk, 1995). Während Bodenverdichtungen durch hohe und kurzzeitig aufgebrachte („akute“) Belastungen mit schweren Maschinen bereits gut erfasst und auch vorhergesagt werden können (siehe z. Bsp. Berli, 2001; Gysi, 2000), sind niederschwelli-

ge aber über längere Zeit aufgebrauchte („chronische“) Belastungen und daraus resultierende, schleichende Verdichtungen ein ungelöstes Problem, dessen langfristigen Ausmasse und -Wirkungen noch praktisch unbekannt sind. Vor allem für die Schweiz mit ihren beschränkten Ressourcen an gutem Ackerland und dem damit verbundenen Druck hin zu immer intensiveren Nutzungen der vorhandenen Fruchtfolgeflächen ist ein Langzeitmonitoring bodenphysikalischer Eigenschaften von unschätzbarem Wert, da damit Verdichtungszustand und -entwicklung von Böden über längere Zeit erfasst und frühzeitig auf negative Trends reagiert werden kann. Auf Grund der globalen Bedeutung des Problems ergäbe sich für die Schweizerische Bodenverdichtungsforschung zudem die Möglichkeit, weltweit eine Vorreiterrolle einzunehmen. Neben spezifischen Anwendungen wie die Bestimmung von Verdichtungszustand und -trend wird NABOphys als Referenzmessnetz für standort- und nutzungsbedingte physikalische Bodeneigenschaften dienen. Letztlich lassen sich nur auf Grund verlässlicher Referenzwerte Massnahmen für den physikalischen Bodenschutz im Sinne von USG (1983) und VBBo (1998) empfehlen.

Die **Langzeitbeobachtung bodenmikrobiologischer Parameter** liefert als Überwachungssystem einen entscheidenden Beitrag, um die Auswirkungen von chemischen, physikalischen und biologischen Belastungen auf den Boden zu erfassen.

Für die Planung eines NABObio, insbesondere für die Auswahl geeigneter Standorte ist es deshalb eine unumgängliche Voraussetzung, die Ziele einer Langzeitbeobachtung mit bodenmikrobiologischen Parametern zu erarbeiten. Mögliche Ziele könnten sein:

- Beobachtung des Einflusses diffuser Belastungen
- Beobachtung von Standorten mit vermuteten konkreten (starken) spezifischen chemischen oder physikalischen Belastungen
- Beobachtung des Einflusses einer landwirtschaftlichen (forstwirtschaftlichen) Nutzung bzw. von Naherholungsräumen.

In Abhängigkeit von der entsprechenden Zielsetzung wird die Auswahl der Standorte, der zu untersuchenden bodenmikrobiologischen Parameter und erforderlichen Begleitparameter (pH-Wert, Corg, Körnung) sowie weiteren zusätzlichen chemischen und physikalischen Parametern unterschiedlich ausfallen (Oberholzer und Höper, 2006). Die NABO-Standorte sind grundsätzlich so ausgewählt, um diffuse chemische Belastungen für die Schweiz repräsentativ zu erfassen und könnten möglicherweise für die erste Fragestellung geeignet sein. Teilweise könnten mit diesen Standorten auch konkrete landwirtschaftliche Belastungen erfasst werden. Im Hinblick auf die zweite Fragestellung wäre zu prüfen, inwieweit die NABO-Standorte genutzt werden können. Bei der systematischen Auswahl von Standorten ist zu beachten, dass die ausgewählten Standorte eine bestimmte Anzahl von Bodeneigenschaften, Klimazonen, Bewirtschaftungssystemen sowie –typen repräsentieren.

Das LAZBO-Pilotprojekt zeigte auch, dass zusätzlich zu den bereits in den Kapiteln 2 und 3 gegebenen Empfehlungen die folgenden Aspekte in einem Konzept für eine Langzeitbeobachtung berücksichtigt werden müssen:

- *Sensitivität und Indikatorwert der Parameter:* Das Konzept für eine Langzeitbeobachtung muss festlegen, welche Parameter ins Monitoring aufgenommen werden sollen. Entscheidend dafür sind neben der methodischen Eignung, wie im LAZBO-Pilotprojekt bereits abgeklärt wurden, Sensitivität und Indikatorwert der Parameter. Die Sensitivität beschreibt, wie stark oder wie schnell ein Parameter auf eine Belastung reagiert. Die Sensitivität von Bodenparametern wird mit Feld- oder Laborversuchen abgeklärt, wo der Effekt bekannter Belastungen auf den Boden beobachtet werden kann, wie zum Beispiel im Rahmen des Feldversuchs COREBA (**C**ompaction **R**egeneration **B**iological **A**ctivity), der zurzeit an der Agroscope FAL Reckenholz durchgeführt wird. Der Indikatorwert gibt an, wie wichtig die Veränderung eines Parameters auf den zu beobachtenden Bodenzustand oder die Bodenfunktion ist. Diese Zusammenhänge wurden im Bodenkonzep für die Schweiz dargestellt und diskutiert (Candinas et al., 2002). Der Indikatorwert wird ebenfalls aus Feld- und Laborversuchen gewonnen, wo zum Beispiel Veränderungen bodenphysikalischer oder biologischer Eigenschaften auf das Pflanzenwachstum oder die Artenvielfalt im Boden untersucht werden. Wichtig ist dabei auch, Veränderungen des Kollektivs der bodenphysikalischen und -biologische Parameter zu betrachten. Gibt es einzelne Parameter oder bestimmte Konstellationen verschiedener Parameter, deren Veränderungen substantielle Änderungen von Bodenfunktionen anzeigen? Es fehlen dazu Regeln die festlegen, welche und wie viele verschiedene Parameter sich verändern müssen, um zum Beispiel eine Schadverdichtung feststellen zu können. Die Ausarbeitung solcher Regeln ist wichtig und könnten im Zusammenhang mit der Revision der bestehenden Wegleitung zur Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit (BUWAL & FAC, 1991) durchgeführt werden, weil sie nicht nur für die Langzeitbeobachtung, sondern für die Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit generell benötigt werden.
- *Wahl und Stratifizierung der Untersuchungsstandorte:* Das Konzept für eine Langzeitbeobachtung muss festlegen, welche Standorte mit welchen Ausprägungen/Bewirtschaftungen untersucht werden. Es stellt sich die Frage, ob künftige NABOchem, NABObio und NABOphys dieselbe Grundgesamtheit an Standorten erfassen sollen (was für gemeinsame Erhebungsstandorte sprechen würde) oder ob spezifische Risiken zu berücksichtigen sind (was für getrennte Beobachtungsnetze sprechen würde). Möglicherweise könnte eine optimale Lösung so aussehen, dass an einer kleinen Anzahl von Standorten alle drei Untersuchungsaspekte in einem verschränkten Beprobungsdesign zusammengeführt, ansonsten aber problemspezifisch separat geführt werden. Ein derartiges Schnittstellenmodell könnte europäische Vorstellungen zum Monitoring der Bodenqualität aufnehmen, indem an den Schnittstellen („Super Sites“) gleichzeitig die drei Untersuchungsgebiete der Langzeitbeobachtung zusammengeführt und mit zusätzlichen funktionellen Studien verknüpft werden, die zusätzlich auch die Kurzzeitdynamik der Systeme erfassen könnte. Neben der Berücksichtigung methodischer Aspekte (technische und zeitliche Praktikabilität) wäre eine Verknüpfung zwischen den Risikobewertungen von Seiten des Bodenschutzes (BAFU) und der Bodennutzung (BLW) sinnvoll, um die entsprechenden Anliegen des Ressourcenschutzes und der

nachhaltigen Ressourcennutzung durch kombiniertes Monitoring mit direkten und indirekten Indikatoren möglichst effizient umzusetzen. Im Interesse der effizienten Nutzung vorhandener Bodendaten sollten auch die vereinzelt vorhandenen Beobachtungsreihen aus anderen Quellen, zum Beispiel aus Untersuchungen der Kantonalen Bodenschutzfachstellen systematisch und koordiniert ausgewertet werden.

- *Zeitreihe vs. Querschnittsuntersuchungen:* Weil aus Gründen mangelnder zeitlicher und finanzieller Ressourcen kein umfassendes Monitoring mit Einbezug aller denkbaren Risikokonstellationen möglich ist, müssen neben einem Kernnetz für die kontinuierliche Langzeitbeobachtung zusätzlich problembezogene Querschnittsuntersuchungen durchgeführt werden, um potentielle Problemkonstellationen zu prüfen; dieses Vorgehen würde allerdings nur dann eine sinnvolle Ergänzung darstellen, wenn Methodik und Qualitätssicherung dem Standard der Langzeitbeobachtung entsprechen würden.
- *Integrale Bodenbeobachtung chemischer, physikalischer und biologischer Parameter:* Gleichzeitige Beobachtung chemischer, physikalischer und biologischer Bodeneigenschaften war im Rahmen des LAZBO-Pilotprojektes nicht realisierbar, weil methodenbedingt unterschiedliche Beprobungsstrategien verwendet wurden. Direkte Vergleiche physikalischer und biologischer Parameter sind deshalb nur auf der Stufe Erhebung möglich. Auf dieser Ebene sind die Beziehungen zwischen den aggregierten Grössen jedoch unscharf, da sie aus unterschiedlichen Beprobungsvolumina stammen. Korrelationsanalysen sind daher nur innerhalb der mikrobiologischen oder der physikalischen Parameter möglich, die aus denselben Mischproben bzw. denselben Probenzylindern bestimmt wurden. Weitergehende Möglichkeiten zur Korrelation chemischer, physikalischer und biologischer Parameter würden besondere Beprobungsdesigns erfordern, die gewährleisten, dass bei allen Untersuchungsstandorten dasselbe Bodenvolumen untersucht wird. Um gemessene Parameter auf dasselbe Bodenvolumen beziehen zu können, muss eine absolute Probenahme- bzw. Messtiefe eingehalten werden können. Für Untersuchungen im Zusammenhang der C-Sequestrierung befindet sich eine entsprechende Methode in Vorbereitung, eine allgemeinere technische Lösung wäre jedoch auch für biologische und physikalische Untersuchungen erforderlich. Das Festlegen eines absoluten Tiefenbezuges würde z.B. auch die Interpretation chemischer Analyseergebnisse verbessern, indem die Analyseergebnisse aus kleinsten Feinerde-Stichproben sinnvoll auf Bodenvolumina in natürlicher Lagerung („Gesamtbodenvolumen“, inkl. Steinen) zurückgerechnet werden könnten.
- Schliesslich stellt sich aus praktischen Gründen die Frage, wie häufig für Bodenphysik/Bodenbiologie beprobt wird (gegeben durch Relevanz-Niveau der Parameter, Grundrassen und Trend der Erhebungen) und wie viele Standorte aus Gründen der zur Verfügung stehenden Ressourcen beprobt werden können.

Eine Langzeitbeobachtung bodenphysikalischer und –mikrobiologischer Parameter wird nicht nur das bestehende Nationale Bodenbeobachtungsprogramm NABO ergänzen und damit eine wichtige Lücke im gesamtheitlichen Ansatz der Schweizerischen Umweltschutzgesetzgebung schliessen, sondern drängende Probleme des physikalischen und biologischen Bodenschutzes von internationaler Bedeutung in einer Art angehen, die über die Schweiz hinaus Signalwirkung haben wird.

## 5 Literaturverzeichnis

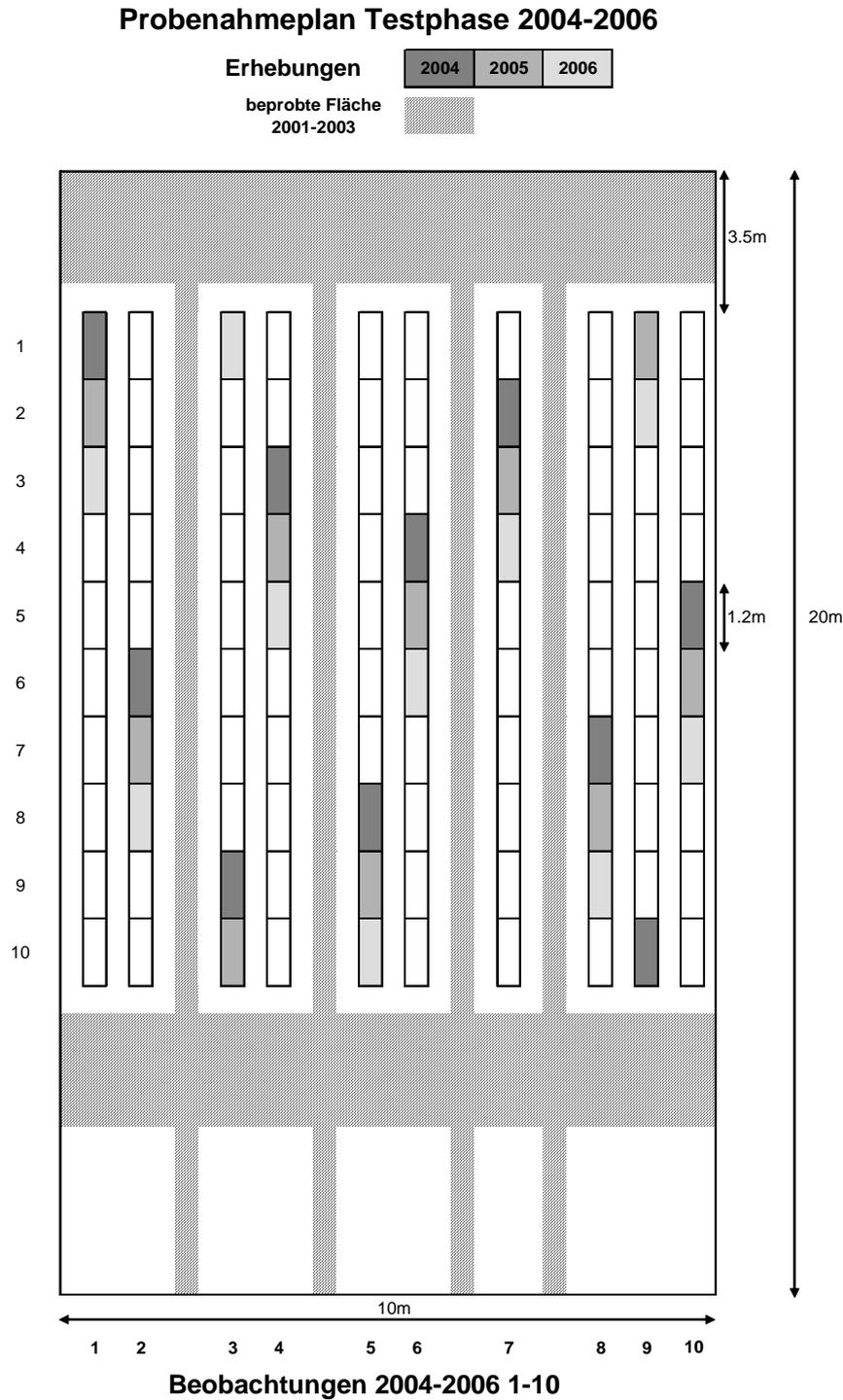
- Berli, M., 2001. Compaction of Agricultural Subsoils by Tracked Heavy Construction Machinery, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, 108 pp.
- BGS, 2004. Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen, Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz. Dokument 13. Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz, Zollikofen. 56 pp.
- BUWAL & FAC, 1991. Wegleitung zur Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, 3003 Bern / Eidg. Forschungsanstalt für Agrarkulturchemie und Umwelthygiene, 3097 Liebefeld.
- Candinas, T., Neyroud, J.-A., Oberholzer, H.-R. & Weisskopf, P., 2002. Ein Bodenkonzept für die Landwirtschaft in der Schweiz: Grundlagen für die Beurteilung der nachhaltigen landwirtschaftlichen Bodennutzung. Bodenschutz(3): pp. 90-98.
- Desaules, A. & Dahinden, R., 2000. Nationales Boden-Beobachtungsnetz - Veränderungen von Schadstoffgehalten nach 5 und 10 Jahren. Schriftenreihe Umwelt Nr. 320. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), 3003 Bern. 129 pp.
- FaBo ZH, 1998. Messungen von Bodenverdichtungen im Feld, Teilprojekt Methodik. Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich, Amt für Landschaft und Natur, Direktion der Volkswirtschaft, Zürich. 44 pp.
- FAL, FAW & RAC, 1998. Schweizerische Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten. Band 2, Bodenuntersuchung zur Standortcharakterisierung. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL).
- Gysi, M., 2000. Soil Compaction due to Heavy Agricultural Wheel Traffic, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, 94 pp.
- Nievergelt, J., Petrasek, M. & Weisskopf, P., 2002. Bodengefüge - Ansprechen und Beurteilen mit visuellen Mitteln. Schriftenreihe der FAL 41. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL), 8046 Zürich. 93 pp.
- Oberholzer, H.-R. & Höper, H., 2006. Soil Quality Assessment and Long-Term Field Observation with Emphasis on Biological Soil Characteristics. In: Benckiser, G. and Schnell, S. (Editors), Biodiversity in Agricultural Production Systems. CRC Press, p. in press.
- Oldeman, L.R., Hakkeling, R.T.A. & Sombroek, W.G., 1991. World Map of the Status of Human-Induced Soil Degradation: An Explanatory Note. International Soil Reference and Information Center (ISRIC), Wageningen.
- Soane, B.D. & Van Ouwerkerk, C., 1994. Soil compaction problems in world agriculture. In: Soane, B.D. and Van Ouwerkerk, C. (Editors), Soil Compaction in Crop Production. Developments in Agricultural Engineering. Elsevier, pp. 1-21.
- Soane, B.D. & Van Ouwerkerk, C., 1995. Implication of soil compaction in crop production for the quality of the environment. Soil & Tillage Research, 35: pp. 5-22.
- USG, 1983. Bundesgesetz über den Umweltschutz vom 7. Oktober 1983 (Stand am 30. Dezember 2003). SR 814.01.
- VBBo, 1998. Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) vom 1. Juli 1998. SR 814.12.
- Weisskopf, P., Schwab, P., Jäggli, F., Kramer, E., Peyer, K. & Studer, R., 1988. Die Verdichtungsgefährdung schweizerischer Ackerböden - Ursachen, Ausmass und Vermeidung von Verdichtungen. Nationales Forschungsprogramm. 20. Eidg. Forschungsanstalt für landwirtschaftlichen Pflanzenbau, Eidg. Forschungsanstalt für Betriebswirtschaft und Landtechnik, Liebefeld-Bern. 128 pp.



## **Anhang**



## Anhang A: Probenahmeplan LAZBO-Testphase, Teil Bodenphysik



**Figur 4:** Beispiel Probenahmeplan Standort Kleinandelfingen für Testphase 2004-2006 mit 10 Beobachtungen in einem „lateinischen Quadrat“ angeordnet in reduzierter Versuchsfläche (noch nicht beprobte Restfläche der Versuchsfläche 2001-2003).