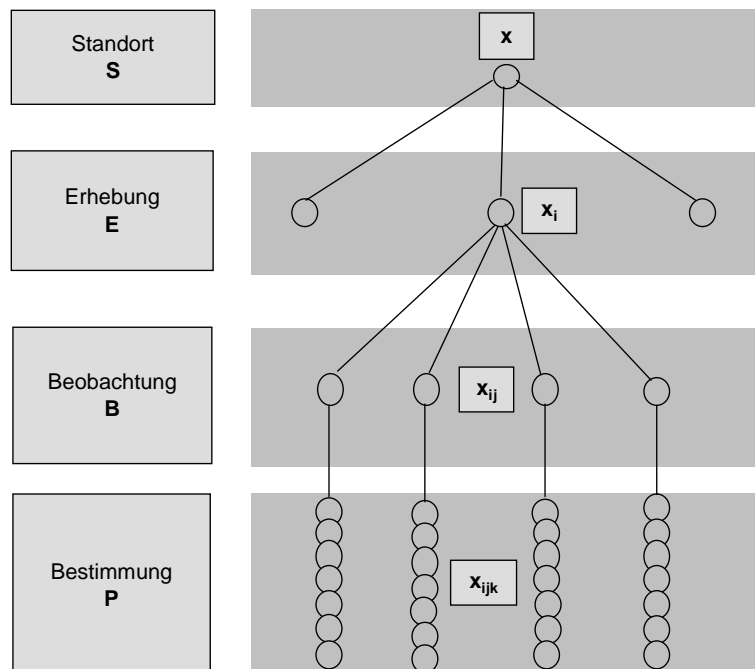


Langzeitbeobachtung von physikalischen und biologischen Bodeneigenschaften Pilotprojekt LAZBO

Teil 1 Einleitung und Grundlagen

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

Autoren

Peter Schwab , peter.schwab@art.admin.ch

Peter Weisskopf, peter.weisskopf@art.admin.ch

Hans-Rudolf Oberholzer, hansrudolf.oberholzer@art.admin.ch

Susanne Scheid

Markus Berli

Bezug

www.nabo.admin.ch > Bibliographie Nr. 142

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

Die Bodenfruchtbarkeit ist eng mit den physikalischen und biologischen Eigenschaften des Bodens verbunden. Deren zeitliche Entwicklung ist ein entscheidender Faktor für eine nachhaltige Bodennutzung. Mit der Revision des Umweltschutzgesetzes (USG, 1983) und der neuen Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo, 1998) wurde die Langzeitbeobachtung physikalischer und biologischer Bodeneigenschaften zur gesetzlichen Aufgabe.

Fehlende Grundlagen zur Planung, Ausführung und Interpretation einer Langzeitbeobachtung dieser Bodeneigenschaften führte zur Initiation des vorliegenden LAZBO-Pilotprojektes. mit dem Ziel, vorhandene Beprobungs- und Analysemethoden auf ihre Genauigkeit und Eignung für eine Langzeitbeobachtung zu testen. Die Schwerpunkte der Arbeit lagen dabei auf

- der Identifikation von methodischen Unsicherheiten bei der Bestimmung eines bodenphysikalischen bzw. –biologischen Parameters (z.B. durch Probenahme, Lagerung, Aufbereitung und Messung)
- der Optimierung des Probenahmeplanes für bodenphysikalische Untersuchungen sowie
- der Erfassung zeitlicher Veränderungen bodenphysikalischer und –biologischer Eigenschaften von Böden.

Dazu wurden bereits im Vorfeld des LAZBO-Pilotprojektes potentiell geeignete Parameter und Methoden auf Grund von Empfehlungen aus der Literatur sowie der an der Agroscope FAL Reckenholz etablierten Methoden ausgewählt. Weiterhin wurden die Kriterien Indikatorwert und Sensitivität des Parameters sowie Praktikabilität und Aufwand der Methode bei der Auswahl berücksichtigt. Als bodenphysikalische Parameter wurden Lagerungsdichte, Gesamtporenvolumen, Porengrößenverteilung (Grob- Mittel- und Feinporenanteil), Luftpermeabilität, Vorbelastung, Eindringwiderstand und Gefüge ausgewählt. Die bodenmikrobiologischen Parameter umfassen mikrobielle Biomasse, Basalatmung und N-Mineralisierung im aeroben Brutversuch. Mit Ausnahme des Eindringwiderstandes und des Gefügestandes, die mittels Feldmethoden erhoben wurden, wurden alle Parameter im Labor bestimmt. Die Untersuchung der bodenphysikalischen Parameter erfolgte an zwei Ackerstandorten und die der bodenmikrobiologischen Parameter an je drei Acker- und Grünlandstandorten mit unterschiedlichen Bewirtschaftungen.

Das Untersuchungskonzept basiert auf den fünf Verfahrensschritten (1) Probenahmeplan, (2) Probenahme, (3) Aufbereitung, (4) Lagerung und (5) Bestimmungsmethode, die zur Charakterisierung physikalischer und mikrobiologischer Bodenparameter an einem Standort nötig sind. Unter der Bestimmungsmethode wird im Rahmen des LAZBO-Pilotprojektes die eigentliche Analyse zusammen mit einer allfälligen Konditionierung, Behandlung, Inkubation oder Extraktion der Probe verstanden. Für die Verfahrensschritte (1) bis (5) wurde die Bezeichnung „**Erhebung**“, für (2) bis (5) die Bezeichnung „**Beobachtung**“ und für (3) bis (5) die Bezeichnung „**Bestimmung**“ eingeführt. Die Beobachtung basiert im bodenphysikalischen Teil auf der Einheit Block und im bodenmikrobiologischen Teil auf der Einheit Mischprobe. Für die Untersuchung der Genauigkeit von

Bestimmung, Beobachtung und Erhebung wurde ein dreistufiges hierarchisches Modell entworfen, dessen Resultate mit einer zweischichtigen Streuungszerlegung nach Ahrens (1968) analysiert werden können. Genauigkeit steht dabei als Überbegriff für **Präzision** und **Richtigkeit**, mit denen zufällige und systematische Fehler für Bestimmung, Beobachtung und Erhebung quantifiziert werden.

Die Bestimmungswerte werden für die bodenphysikalischen Untersuchungen an ungestörten Zylinderproben im Labor oder, im Falle des Eindringwiderstands und des Gefügestandes, direkt im Feld bestimmt. Für die Bestimmungswerte der bodenmikrobiologischen Untersuchungen werden Laborproben verwendet, die zufällig aus einer Mischprobe gezogen werden. Eine Mischprobe besteht dabei aus Bodenmaterial, das mit 25 Einstichen aus den Teilflächen eines lateinischen Quadrats auf einer Versuchsfläche von 10×10 m entnommen und dann zu einer Probe gemischt wird (Desaules & Dahinden, 2000). Für die Beobachtungswerte der bodenphysikalischen Untersuchungen wurden je vier bis zehn Bestimmungswerte aus einem Beobachtungsblock gemittelt. Ein Beobachtungsblock stellt eine Untereinheit der Versuchsfläche mit geringer räumlicher Heterogenität dar, in der Praxis gleichbedeutend mit der einzelnen Profilgrube aus der die Zylinderproben entnommen werden. Die Beobachtungswerte der bodenbiologischen Untersuchungen wurden aus vier Wiederholungen der Bestimmung im Labor pro Mischprobe gemittelt. Ein Erhebungswert ergibt sich für die bodenphysikalischen und –mikrobiologischen Untersuchungen aus dem Mittel von je vier Beobachtungswerten. Der Erhebungswert repräsentiert den Wert eines Parameters an einem Standort zu einem bestimmten Zeitpunkt und ist damit der „Zielwert“ des LAZBO-Pilotprojektes, dessen Streuungskomponenten es mittels einer Streuungszerlegung zu quantifizieren galt. Basierend auf den Teilstreuungen und der Anzahl Bestimmungen und Beobachtungen kann die Qualitätssicherung der Bestimmungen und Bestimmungsmethoden durchgeführt werden, der Probenahmeplan optimiert und damit insbesondere die Streuung der Erhebungswerte minimiert werden.

Genau bestimmbare Erhebungswerte stellen zwar die Grundsteine für eine erfolgreiche Langzeitbeobachtung dar. Von Interesse ist aber vor allem die zeitliche Entwicklung dieser Erhebungswerte und damit verbunden Fragen wie (a) wie gross muss der Unterschied zwischen zwei Erhebungswerten sein, damit sie als signifikant verschieden erkannt werden, (b) wie viele Erhebungswerte sind nötig, um eine relevante Veränderung des mittleren Standortwerts (Erwartungswert eines Parameters an einem Standort) signifikant nachweisen zu können (c) wie viele Erhebungswerte sind nötig, um das Grundrauschen eines Standorts (Streuung durch zufällige Abweichung der Erhebungswerte vom mittleren Standortwert) bestimmen zu können und schlussendlich (d) verändert sich der mittlere Standortwert mit der Zeit signifikant und relevant, d.h. weisen die Erhebungswerte einen Trend auf. Zur Beantwortung der Fragen (a) bis (c) wurden im Rahmen dieser Untersuchung die statistischen Grundlagen wie die bereits erwähnte zweischichtige Streuungszerlegung oder das zweiseitige Vertrauensintervall eingeführt und angewendet. Die Zeitreihenanalyse zur Beantwortung von Frage (d) sowie die Validierung der eingeführten statistischen Modelle werden im Rahmen der LAZBO-Testphase durchgeführt.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis (Teil 1-4)	III
Glossar	VI
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage	1
1.2 Projektziel	1
1.3 Vorgehen	1
2 Untersuchungskonzept	2
2.1 Allgemeines.....	2
2.2 Spezifische Voraussetzungen für bodenphysikalische Parameter und Methoden	5
2.3 Spezifische Voraussetzungen für bodenbiologische Parameter und Methoden	8
2.4 Definitionen zur Genauigkeit.....	11
2.5 Standorte	13
2.6 Probenahme.....	14
2.6.1 Probenahmeplan Bodenphysik.....	14
2.6.2 Probenahmeplan Bodenbiologie.....	15
2.6.3 Erhebungszeitpunkt.....	16
2.7 Datenstruktur und Auswertungskonzept.....	17
3 Statistische Grundlagen.....	19
3.1 Graphische Darstellung.....	19
3.2 Test auf Normalverteilung	19
3.3 Datenbereinigung	19
3.4 Quantifizierung von Präzision und Stabilität - Varianzanalyse	20
3.4.1 Hierarchische Streunungszerlegung	20
3.4.2 Vertrauensintervall des Mittelwertes.....	21
3.4.3 Zweiseitiges Vertrauensintervall der Mittelwertsdifferenz	22
3.5 Erfassung der zeitlichen Veränderung - Zeitreihenanalyse	23
4 Literaturverzeichnis.....	25
Anhang A: Definition der Summenquadrate SQ	29

Verzeichnis der Figuren

Figur 1:	Versuchskonzept - LAZBO-Pilotprojekt	3
Figur 2:	Unsicherheitsbudget für Erhebungs- und Bestimmungswerte.....	12
Figur 3:	Probenahmeplan der bodenphysikalischen Versuchsfläche.....	15
Figur 4:	Probenahmeplan Versuchsfläche Bodenbiologie.....	16
Figur 5:	Datenstruktur der bodenphysikalischen Untersuchungen im LAZBO-Pilotprojekt	17
Figur 6:	Datenstruktur Bodenbiologie im LAZBO-Pilotprojekt	18
Figur 7:	Definitionen zu den Box-and-Whisker-Plots	19
Figur 8:	Bestimmung der zeitlichen Entwicklung (Trend) mit einem Regressionsmodell.	24

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1:	Parameterauswahl und Methoden „Bodenphysik“ im LAZBO-Pilotprojekt.....	6
Tabelle 2:	Parameterauswahl und Methoden „Bodenbiologie“ im LAZBO-Pilotprojekt	9
Tabelle 3:	Die Begriffe Genauigkeit, Richtigkeit und Präzision am Beispiel von Trefferbildern	11
Tabelle 4:	Untersuchungsstandorte Bodenphysik und Bodenbiologie im LAZBO-Pilotprojekt.....	13
Tabelle 5:	Berechnung der Ausreisser-Kriterien nach Dixon und Signifikanzgrenzen für die verwendeten Stichprobenumfänge	20

Abkürzungsverzeichnis (Teil 1-4)

Parameter Bodenphysik

BewmK	Gefügebewertung mit Korrekturfaktor [Klasse]
BewoK	Gefügebewertung ohne Korrekturfaktor [Klasse]
EdW	dynamischer Eindringwiderstand [Mpa]
FP	Feinporen >15'000 hPa [Vol. %]
GGP 30	Grobe Grobporen 0-30 hPa [Vol. %]
GGP 60	Grobe Grobporen 30-60 hPa [Vol. %]
GGP 100	Feine Grobporen 60-100 hPa, [Vol. %]
GMP	Grobe Mittelporen 100-1000 hPa [Vol. %]
GP 100	Grobporen 0-100 hPa [Vol. %]
GP 30	Grobporen 0-30 hPa [Vol. %]
GP 60	Grobporen 0-60 hPa [Vol. %]
GPV	Gesamtporenvolumen [Vol. %]
LD	Lagerungsdichte [g/cm ³]
LPERM 30	logarithmierte Luftpermeabilität bei 30 hPa [10 ⁻¹⁰ cm ²]
LPERM 60	logarithmierte Luftpermeabilität bei 60 hPa [10 ⁻¹⁰ cm ²]
mDm	Mittlerer Aggregatdurchmesser [mm]
MMP+FMP	Mittlere und feine Mittelporen 1'000-15'000 hPa [Vol. %]
MP	Mittelporen 100-15'000 hPa [Vol. %]
pLp 30	Luftpermeabilität bei 30 hPa [Log10 10 ⁻¹⁰ cm ²]
pLp 60	Luftpermeabilität bei 60 hPa [Log10 10 ⁻¹⁰ cm ²]
VB _{Casa}	Vorbelastung nach Casagrande bestimmt aus Drucksetzungsuntersuchung mit Oedometer (nach der Methode Casagrande) [kPa]
VBmin	Vorbelastung minimal bestimmt aus Drucksetzungsuntersuchung mit Oedometer (modifizierte Bestimmung des Vorbelastungspunktes) [kPa]

Parameter Bodenbiologie

BA	Basalatmung [mg CO ₂ -C Kg ⁻¹ TS x 24 h]
BM-C (FE)	Mikrobielle Biomasse (Chloroform-Fumigation-Extraktions-Methode) [mg C _{mik} kg ⁻¹ TS]
BM-N (FE)	Mikrobielle Biomasse (Chloroform-Fumigation-Extraktions-Methode) [mg N _{mik} kg ⁻¹ TS]
BM-SIR	Mikrobielle Biomasse (Substratinduzierte Respirations-Methode), in mg-C kg ⁻¹ TS
N-Min.	Stickstoff-Mineralisierung [mg N _{min} kg ⁻¹ TS x 24 h]

Boden-/Nutzungs-/Belastungsparameter

Corg	Organischer Kohlenstoffgehalt [Gew. %]
Spur	Sichtbare Fahrspur durch Befahrung, Breite und Tiefe [cm]
WG	Gravimetrischer Wassergehalt [%]
GL	Grünlandnutzung
AK	Ackernutzung

Bestimmungsmethoden Bodenphysik

Gefüge	Bestimmung und Beurteilung des Gefüges aus Spatenproben
GZ	Bestimmung der Parmameter an ungestörten Volumenproben aus Grosszylindern mit 236ml Volumen (100mm Durchmesser, 30mm Höhe)
KIZ	Bestimmung der Parmameter an ungestörten Volumenproben aus Kleinzylindern mit 100ml Volumen (55mm Durchmesser, 42mm Höhe)

Bestimmungsmethoden mikrobielle Biomasse

FE	Chloroform-Fumigation-Extraktions-Methode
SIR	Substratinduzierte Respirations-Methode

Statistische Parameter

α	Irrtumswahrscheinlichkeit und Fehlerwahrscheinlichkeit 1. Art, eine wahre Nullhypothese abzulehnen
f	Freiheitsgrad der t-Verteilung nach Student
Max	Maximalwert
Min	Minimalwert
Mw	Mittelwert
n	Stichprobenumfang (allgemein)
N	Anzahl Bestimmungen insgesamt
n_B	Anzahl Beobachtungen pro Erhebung
n_E	Anzahl der Erhebungen pro Standort
n_p	Anzahl Bestimmungen pro Beobachtung
oVG	obere Vertrauensgrenze des Mittelwertes mit 5% Irrtumswahrscheinlichkeit
p	Wahrscheinlichkeit eines
qt	Quantil der t-Verteilung
s	geschätzte, empirische Standardabweichung einer Stichprobe
σ	theoretische Standardabweichung einer Zufallsvariablen
s^2	geschätzte, empirische Varianz einer Stichprobe
σ^2	theoretische Varianz einer Zufallsvariablen
$\hat{\sigma}_x^2$	geschätzte, empirische Varianz eines Mittelwertes
uVG	untere Vertrauensgrenze des Mittelwertes mit 5% Irrtumswahrscheinlichkeit
VI	95%-Vertrauensintervall des Mittelwertes
VI %	95%-Vertrauensintervall des Mittelwertes (in Prozent des Mittelwertes)
VK %	Variationskoeffizient (Standardabweichung relativ zum Mittelwert, in Prozent)
zVI	zweiseitiges Vertrauensintervall der Mittelwertsdifferenz mit 5% Irrtumswahrscheinlichkeit

übrige Abkürzungen

BAFU	Bundesamt für Umwelt (vormals BUWAL)
BE	Kanton Bern
BGS	Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz
BLW	Bundesamt für Landwirtschaft
BUWAL	Bundesamt für Umwelt Wald und Landschaft, seit 1.1.2006 BAFU
FAC	ehemalige Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene, Liebefeld-Bern
FAL	Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich Reckenholz
FAW	Eidgenössische Forschungsanstalt für Obst-, Wein- und Gartenbau, Wädenswil
LwG	Landwirtschaftsgesetz
NABO	Nationale Bodenbeobachtung
RAC	Eidgenössische Forschungsanstalt für Pflanzenbau, Changins
TG	Kanton Thurgau
USG	Umweltschutzgesetz, 1983
VBB	Vollzug Bodenbiologie (Arbeitsgruppe Bund und Kantone)
VBo	Verordnung über Belastungen des Bodens, 1998
VBo	Verordnung über Schadstoffe im Boden, 1986
ZH	Kanton Zürich

Glossar

Beobachtung	Kollektiv von Bestimmungen aus einer räumlichen Untereinheit der Versuchsfläche an einem Standort und mittlere Stufe im hierarchischen Probenahmeplan. Umfasst zusätzlich zu den Verfahrensschritten der Bestimmung auch den Vorgang der Probenahme im Feld.
Bestimmung	Einzelwert innerhalb einer Beobachtung gemessen z.B. an einer ungestörten Zylinderprobe (Bodenphysik) oder an einer von vier Laborproben, zufällig gezogen aus einer Mischprobe (Bodenbiologie) Die Bestimmung umfasst die Verfahrensschritte Aufbereitung, Lagerung und Bestimmungsmethode und ist die unterste Stufe im hierarchischen Probenahmeplan.
Bestimmungsmethode	Methode zur Bestimmung eines Einzelwerts; Berücksichtigt Konditionierung, Behandlung, Inkubation Extraktion und Analyse einer einzelnen Probe.
Bias	Systematische Abweichung eines (Mess-) Werts vom wahren Wert.
Beobachtungsblock	Untereinheit der Versuchsfläche mit möglichst homogenen Bodeneigenschaften (geringe räumliche Heterogenität), aus dem alle Einzelproben für die Bestimmungen einer Beobachtung der <i>bodenphysikalischen</i> Untersuchungen entnommen werden.
Effektivität	Mass für die Aussagekraft der Resultate in Vergleich zum Aufwand.
Erhebung	Kollektiv der Beobachtungen aus einer Versuchsfläche und zu einem Zeitpunkt an einem Standort und oberste Stufe im hierarchischen Probenahmeplan. Die Erhebung charakterisiert den Standort zu einem Zeitpunkt und umfasst zusätzlich zu den Verfahrensschritten der Bestimmung und der Probenahme auch den Einfluss der räumlichen Anordnung der Probenahmeorte.
Genauigkeit	Überbegriff für Präzision und Richtigkeit.
Grundrauschen	Streuung durch zufällige Abweichung der Erhebungswerte vom mittleren Standortwert (synonym zu Standortpräzision).
Indikatorwert	Mass zur Eignung eines Parameters als Indikator für ökologisch relevante Veränderungen von Bodeneigenschaften.
Mischprobe	Bodenmaterial, das mit 25 Einstichen aus den Teilflächen eines lateinischen Quadrats auf einer Versuchsfläche von 10 × 10 m entnommen und dann zu einer Probe gemischt wird. Eine Mischprobe enthält alle Laborproben für die Bestimmungen einer Beobachtung der <i>bodenbiologischen</i> Untersuchungen.
Präzision	Mass für den zufälligen Fehler einer Bestimmung, Beobachtung oder Erhebung.
Praktikabilität	technische und organisatorische Möglichkeiten, Proben zu nehmen, zu lagern, aufzubereiten und zu analysieren.
Probe	Volumenbezogen kleinste Bodeneinheit, die die zu untersuchende Bodeneigenschaft genügend umfassend (repräsentativ) enthält oder beschreibt. (Bodenphysik: ungestörte Einzelprobe/Messung im Feld, Bodenbiologie: Laborprobe als Teilprobe einer Mischprobe)
Probenahmeplan	Hierarchisches Schema zur (a) räumlichen Anordnung der Probenahmeorte für die Einzelproben und (b) Aggregation von Bestimmungswerten (unterste Stufe) zu Beobachtungswerten (mittlere Stufe) und schliesslich Erhebungswerten (oberste Stufe). In dieser Untersuchung ist für die bodenphysikalischen Untersuchungen der Einfluss der Probenahmeorte auf den Erhebungswert von besonderem Interesse.
Prüfwert	Grenzwert für zulässige Werte im Sinne des vorsorglichen Bodenschutzes. Bei Überschreitung müssen Massnahmen zur Reduktion geprüft werden.
Referenzstabilität	Mass für den absoluten Fehler einer Bestimmung durchgeführt zu verschiedenen Zeitpunkten mit der gleichen Methode im gleichen Labor <i>relativ zu einem definierten Referenzwert</i> . Ist in dieser Untersuchung von besonderem Interesse für den Einfluss der Probenlagerung auf die Bestimmungswerte der bodenbiologischen Untersuchungen.

Referenzwert	Stabiler Soll-, Richt- oder Prüfwert mit bekannter Streuung und (idealerweise) bekannter Abweichung vom wahren Wert.
Relevanz	In dieser Untersuchung verwendet für die tatsächliche Bedeutung und das Ausmass der Veränderung bodenphysikalischer und –biologischer Eigenschaften.
Repräsentativität	Mass für die Qualität einer Probe oder eines Probenahmeplans, eine zu untersuchende Bodeneigenschaft umfassend charakterisieren zu können.
Reproduzierbarkeit	Mass für den Unterschied zwischen Bestimmungen, Beobachtungen oder Erhebungen, durchgeführt mit denselben Methoden an identischem Probenmaterial. Je kleiner die Unterschiede, desto höher die Reproduzierbarkeit.
Richtigkeit, absolute	Mass für den absoluten Fehler einer Bestimmung, Beobachtung oder Erhebung <i>bezogen auf den wahren Wert</i> (siehe auch Bias).
Richtigkeit, relative	Mass für den absoluten Fehler einer Bestimmung, Beobachtung oder Erhebung <i>bezogen auf einen willkürlich definierten Referenzwert</i> (synonym: Stabilität).
Richtwert	Vorsorgewert im Bodenschutz, bei dessen Überschreitung die Bodenfruchtbarkeit als längerfristig nicht mehr gewährleistet gilt.
Robustheit	Die Robustheit beschreibt die Sensitivität einer Methode auf Störeinflüsse und ist ein Mass für die Reproduzierbarkeit von Bestimmungen, Beobachtungen und Erhebungen.
Sensitivität	Intensität der Veränderung eines Bestimmungs-, Beobachtungs- oder Erhebungswertes als Funktion externer Einflüsse (hier z.B. mechanische Belastung durch Befahrung und Bodenbearbeitung, Kultur...).
Signifikanz	Mass dafür, ob sich Bestimmungen, Beobachtungen oder Erhebungen untereinander zufällig oder systematisch unterscheiden. Resultat eines statischen Tests, dass die Null-Hypothese des Tests unter einer bestimmten Irrtumswahrscheinlichkeit verworfen werden kann.
Stabilität	Mass für den absoluten Fehler einer Bestimmung, Beobachtung oder Erhebung <i>bezogen auf einen (willkürlich) definierten Referenzwert</i> (synonym: relative Richtigkeit).
Standort	Der Standort bezeichnet den Boden und seine Einflussfaktoren an einem Ort im Feld, der für die Langzeitbeobachtung ausgewählt wurde.
Standortpräzision	Streuung durch zufällige Abweichung der Erhebungswerte vom mittleren Standortwert. Beschreibt die zufälligen zeitlichen Veränderungen eines Parameters an einem Standort (synonym zu Grundrauschen).
Standortwert, mittlerer	Räumlich und zeitlich gemittelter Wert eines bodenphysikalischen oder –biologischen Parameters, bedingt durch pedogene und nutzungsbedingte Eigenschaften am Standort.
Transekt	Bestimmungen oder Beobachtungen entlang einer Geraden. Verfahren zur Bestimmung von Bodeneigenschaften in einer definierten Richtung und Distanz.
Trend	Beschreibt eine systematische zeitliche Veränderung von Parametern an einem Standort.
Varianz	Zufällige Abweichung eines (Mess-) Werts.
Varianzkomponenten	Anteile der Varianzen von Bestimmung, Beobachtung und Erhebung an der totalen Varianz des Standortes (siehe auch Standortpräzision).
zeitlicher Auflösungsgrad	Abstand zwischen Erhebungszeitpunkten.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Bodenfruchtbarkeit ist eng mit den physikalischen und biologischen Eigenschaften des Bodens verbunden und ihre zeitliche Entwicklung wurde als entscheidender Faktor für eine nachhaltige Bodennutzung erkannt. Mit der Revision des Umweltschutzgesetzes (USG, 1983) und der neuen Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo, 1998) wurde die Langzeitbeobachtung physikalischer und biologischer Bodeneigenschaften auch zur gesetzlichen Aufgabe. Die Langzeitbeobachtung dient dabei zur Früherkennung und Prognose von Veränderungen physikalischer und biologischer Bodeneigenschaften und soll dem Gesetzgeber und der Landwirtschaft, wenn nötig, Entscheidungsgrundlagen zur Ergreifung von Massnahmen des vorsorglichen Bodenschutzes liefern. Die Langzeitbeobachtung leistet zudem einen Beitrag zur Kontrolle der ökologischen Nachhaltigkeit (Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlagen), wie sie im neuen Landwirtschaftsgesetz (LwG, 1998) und in der Nachhaltigkeitsverordnung (VBnL, 1998) gefordert wird.

Die bereits bestehende Langzeitbeobachtung zur Bodenbelastung im Rahmen der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) beschränkt sich in erster Linie auf chemische Belastungen durch anorganische und organische Schadstoffe im Boden. Gründe dafür sind einerseits die früheren gesetzlichen Vorgaben (VSBo, 1986), die sich nur auf chemische Schadstoffe bezogen, und andererseits der Mangel an validierten Methoden und an praktischer Erfahrung für die Bestimmung bodenphysikalischer und -biologischer Parameter über lange Zeiträume, wie sie für eine Langzeitbeobachtung im Rahmen des NABO (Artikel 3 VBBo) sowie der Bodenüberwachung der Kantone (Artikel 4 VBBo) benötigt werden.

Auf Grund dieser fehlenden methodischen Grundlagen hat sich die Agroscope FAL Reckenholz in ihrem Arbeitsprogramm 2000-2003 die Aufgabe gestellt, im Rahmen einer Pilotuntersuchung Beprobungs- und Analysemethoden für die Langzeitbeobachtung ausgewählter bodenphysikalischer und -biologischer Parameter zu validieren. Das Pilotprojekt „Langzeitbeobachtung von physikalischen und biologischen Bodeneigenschaften“ (LAZBO) (FAL-Projekt-Nummer 00.14.2.2) ist eine Machbarkeitsstudie zur Abklärung der Aufnahme von bodenphysikalischen und -biologischen Parametern ins NABO-Referenznetz und wird im Zeitraum von 2001 - 2006 durchgeführt. Das Projekt umfasst zwei Phasen – die LAZBO-Pilotphase im Zeitraum von 2001-2003 sowie die sich anschliessende LAZBO-Testphase im Zeitraum 2004-2006.

1.2 Projektziel

Ziel des LAZBO-Pilotprojektes ist es, die Eignung vorhandener Beprobungs- und Analyse-Methoden für die Langzeitbeobachtung physikalischer und biologischer Bodeneigenschaften zu beurteilen.

1.3 Vorgehen

Die Eignung ausgewählter potentiell geeigneter Beprobungs- und Analysemethoden wurde in Böden unterschiedlicher Standorte und Nutzungsformen in den Jahren 2001 - 2003 untersucht.

2 Untersuchungskonzept

2.1 Allgemeines

Das Untersuchungskonzept des LAZBO-Pilotprojektes orientiert sich an folgenden Anforderungen, die an Parameter und Methoden zur Eignung für die Langzeitbeobachtung physikalischer bzw. biologischer Bodeneigenschaften gestellt werden:

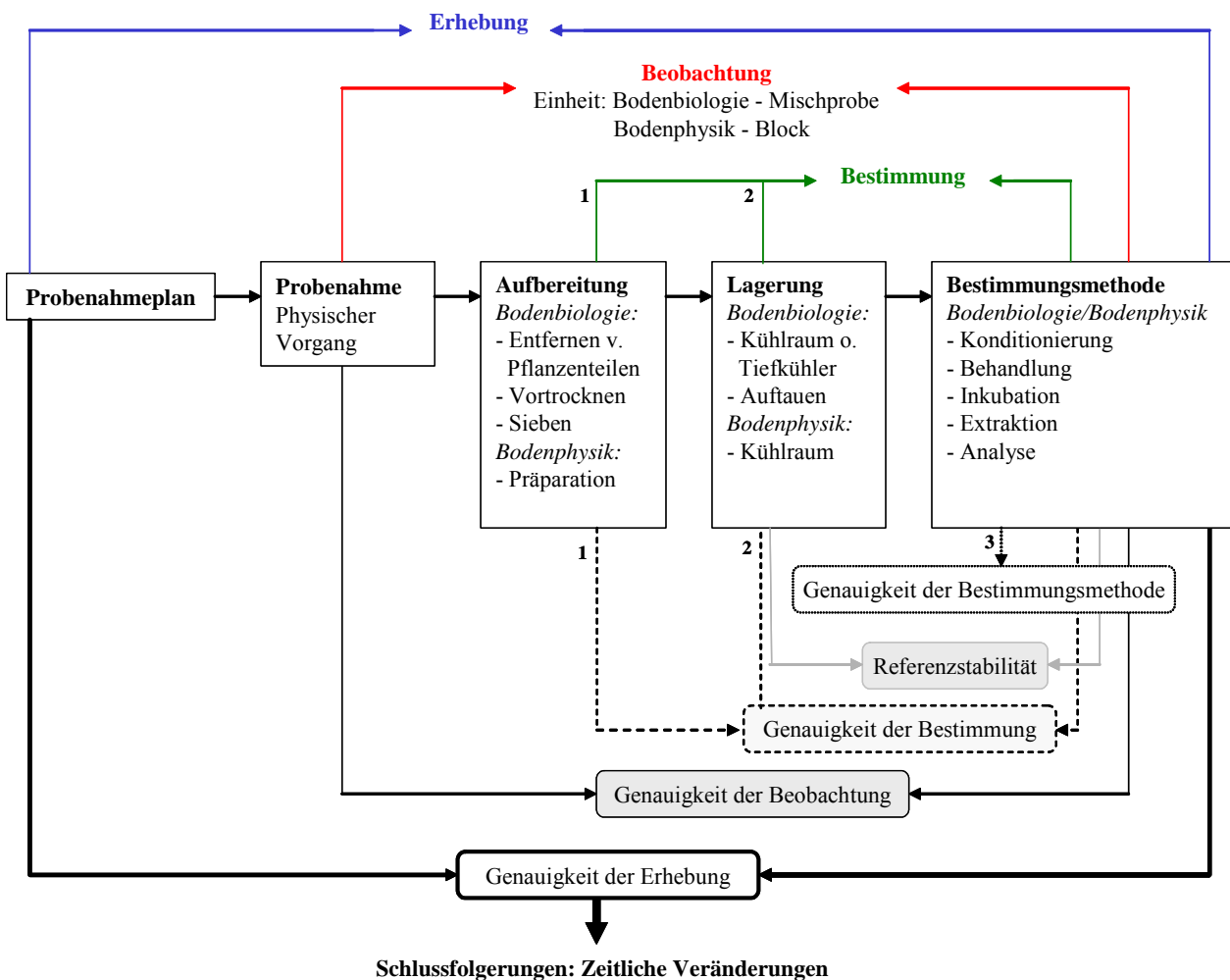
1. Die gewählten Parameter sind aussagekräftige Indikatoren für ökologisch relevante Veränderungen bodenphysikalischer bzw. –biologischer Eigenschaften.
2. Der Beprobungsplan ermöglicht eine räumlich repräsentative Stichprobe auf einer definierten Mindestfläche.
3. Die Genauigkeit von Probenahme, Aufbereitung, Lagerung und Bestimmungsmethode ist quantifizierbar (siehe Figur 1 und Figur 2).
4. Die gewählten Methoden sind sensitiv, d.h. bereits kleine Veränderungen des zu bestimmenden Parameters können signifikant erfasst werden.
5. Der Auflösungsgrad der Beprobung erlaubt die Erfassung zeitlicher Veränderungen der jeweiligen Parameter auf der Skala von Jahren, um Trends rechtzeitig erfassen zu können.
6. Die gewählten Methoden sind praktikabel und effektiv (Verhältnis von Aufwand und Aussagekraft).

Im Vorfeld des LAZBO-Pilotprojektes war bereits eine Auswahl an potentiell geeigneten Parametern und Methoden auf Grund von Empfehlungen aus der Literatur getroffen worden (FAL, FAW, RAC 1998; Mäder et al., 1993; Oberholzer & Höper, 2000). Einen Überblick über die ausgewählten Parameter sowie die spezifischen Anforderungen an die jeweiligen Methoden geben die anschließenden Kapitel 2.2 und 2.3. Die unter Punkt 4 aufgeführte Anforderung ist Gegenstand von prozessorientierten Spezialuntersuchungen, wie sie zum Beispiel an der Agroscope FAL Reckenholz im Rahmen des Projektes „Auswirkungen von Bodenverdichtungen auf Stoffumsetzungen und Bodenmikroorganismen sowie Regenerationspotential von verdichteten Böden (COREBA)“ in den Jahren 2004-2007 durchgeführt werden und wird im vorliegenden Projekt nicht berücksichtigt ebenso wie die Anforderungen unter Punkte 5 und 6, die Gegenstand der laufenden LAZBO-Testphase 2004 - 2006 sind.

Grundlage des Versuchskonzeptes sind die Verfahrensschritte: Probenahmeplan, Probenahme, Aufbereitung, Lagerung sowie Bestimmungsmethode, die jeweils pro ausgewähltem bodenphysikalischen bzw. –biologischen Parameter untersucht wurden. Die Gemeinsamkeiten und Unterschiede in den einzelnen Teilschritten für die Bodenphysik bzw. –biologie sind den Erklärungen in Figur 1 zu entnehmen. Des Weiteren sind folgende zentrale Begriffe zu unterscheiden, die gleichzeitig die Stufen des hierarchischen Modells für die Datenauswertung darstellen:

- **Bestimmung:** Die Bestimmung umfasst in der Bodenphysik die Verfahrensschritte Aufbereitung, Lagerung und Bestimmungsmethode (1). In der Bodenbiologie umfasst die Bestimmung die Verfahrensschritte Lagerung und Bestimmungsmethode (2), jedoch kann ein Einfluss der Aufbereitung nicht ausgeschlossen werden.

- **Beobachtung:** Die Beobachtung stellt eine Erweiterung des Begriffes Bestimmung um den Verfahrensschritt Probenahme dar. Die Beobachtung basiert in der Bodenphysik auf der Einheit „Block“ (s.a. Figur 3) und in der Bodenbiologie auf der Einheit „Mischprobe“ (s.a. Figur 4).
- **Erhebung:** Die Erhebung ist in der Bodenphysik eine Erweiterung des Begriffes Beobachtung um den Verfahrensschritt Probenahmeplan. In der Bodenbiologie wird eine Überprüfung des Probenahmeplans nicht durchgeführt, so dass die Erhebung vom Umfang der Verfahrensschritte dem der Beobachtung entspricht.



Figur 1: Versuchskonzept - LAZBO-Pilotprojekt, (1): Bodenphysik - Begriff Bestimmung: Verfahrensschritte Aufbereitung, Lagerung und Bestimmungsmethode; (2) Bodenbiologie - Begriff Bestimmung: Verfahrensschritte Lagerung und Bestimmungsmethode, ein Einfluss der Aufbereitung ist nicht auszuschliessen; (3) Genauigkeit der Bestimmungsmethode - Bodenphysik: Verfahrensschritt Bestimmungsmethode

Im Rahmen der Validierung der ausgewählten Parameter und Methoden werden folgende Aspekte überprüft:

- **Genauigkeit der Bestimmungsmethode:** Diese Untersuchung wird nur in der Bodenphysik durchgeführt und erlaubt aufgrund des Einsatzes stabiler Referenzmatrix Aussagen zur Präzision und Richtigkeit der betreffenden Bestimmungsmethode.
- **Referenzstabilität:** Die Referenzstabilität beschreibt den Einfluss der Bestimmungsmethode (und eventuell der Lagerung von Proben) auf die Bestimmung der bodenphysikalischen und –biologischen Parameter. Die Referenzstabilität ist ein entscheidender Aspekt im Rahmen der Qualitätssicherung und ist für die bodenbiologischen Untersuchungen im LAZBO-Pilotprojekt von besonderer Bedeutung.
- **Genauigkeit der Bestimmung:** Die Genauigkeit der Bestimmung erlaubt Aussagen zur Variabilität einzelner Messungen innerhalb einer Beobachtung.
- **Genauigkeit der Beobachtung:** Die Genauigkeit der Beobachtung erlaubt zum einen Aussagen über die Variabilität zwischen einzelnen Beobachtungen und zum anderen inwieweit die Bodeneigenschaften einer Flächen-Mischprobe (Bodenbiologie) bzw. eines Beobachtungsblocks (Bodenphysik) präzise und stabil erfasst werden können.
- **Genauigkeit der Erhebung:** Die Genauigkeit der Erhebung erlaubt Aussagen zur Variabilität zeitlich versetzter Beobachtungen an einem Standort. Mehrere, zeitlich gestaffelte Erhebungen erlauben Aussagen zum mittleren Standortwert eines bodenphysikalischen bzw. –mikrobiologischen Parameters in Abhängigkeit von der Nutzung des Bodens.

Des Weiteren werden die ausgewählten bodenphysikalischen und –biologischen Parameter überprüft:

- **der zeitlichen Veränderung von Bodeneigenschaften im Feld**, wobei zur Erfassung der zeitlichen Veränderung bodenmikrobiologischer Eigenschaften verschiedene Verfahren (Teil 3, Kapitel 1.3, Figur 1), die sich durch das Probenahmejahr (2001, 2002, 2003), die Behandlung (frisch, tiefkühlen) und Lagerung der Proben (frische Proben gekühlt, tiefgekühlt) sowie dem Zeitpunkt der Messung (jährlich, alle zu vergleichenden Proben gleichzeitig) unterscheiden, erarbeitet wurden.
- **der Relevanz im Vergleich zu Referenzwerten (nur Bodenbiologie)**
- **dem Indikatorwert bzw. der Aussagekraft (nur Bodenbiologie)**

2.2 Spezifische Voraussetzungen für bodenphysikalische Parameter und Methoden

Das **Bodengefüge**, die räumliche Anordnung von Bodenpartikeln oder Aggregaten zueinander, spielt eine zentrale Rolle für den Wasser-, Luft- und Wärmehaushalt, für Transport- und Speicherprozesse sowie als Lebensraum für (Mikro-) Organismen und Pflanzenwurzeln im Boden. Günstige Gefügeeigenschaften zu erzielen resp. zu erhalten, ist entscheidend für die Fruchtbarkeit von land- und forstwirtschaftlich genutzten Böden. Veränderungen des Bodengefüges können die Transporteigenschaften für Wasser und Luft verschlechtern sowie das Speichervermögen pflanzenverfügbaren Wassers verändern. Daraus resultierende ungünstige Auswirkungen für das Infiltrations- (Oberflächenabfluss, erhöhtes Erosionsrisiko) und Sickerverhalten (verringerte Grundwasserneubildung, schlechtere Filterkapazität) sowie den Gasaustausch (primär CO_2/O_2 : von aeroben zu anaeroben Lebensraumbedingungen) führen zu Aktivitätsbeeinträchtigungen bzw. -veränderungen bei Pflanzenwurzeln und Bodenorganismen samt entsprechenden Änderungen im Stoffwechsel und -produkten (Denitrifikation, Methanbildung). Die **Gefügestabilität**, d.h. der mechanische Widerstand des Gefüges gegen Veränderungen, ist dabei ein wichtiges Kriterium für die Anfälligkeit eines Bodens auf (negative) Veränderungen des Gefüges. Gefügeänderungen durch mechanische Belastungen und die damit einhergehende Zunahme der mechanischen Stabilität des Bodens wird für das Transportverhalten von Wasser und Luft sowie aus biologischer Sicht vorwiegend ungünstig beurteilt (Durchlässigkeit des Bodens nimmt ab, Eindringwiderstand für Pflanzenwurzeln und Bodentiere nimmt zu), obwohl die damit verbundene Zunahme der mechanischen Tragfähigkeit die Befahrbarkeit begünstigt.

Um Zustand und Stabilität des Bodengefüges im Rahmes eines Langzeit-Beobachtungsprogramms beurteilen zu können, wurden für das LAZBO-Pilotprojekt **Parameter und Methoden** für die bodenphysikalischen Untersuchungen nach den folgenden Kriterien ausgewählt:

Aussage: Bei den Parametern wurde unterschieden zwischen Messgrößen, die den Aufbau eines Bodengefüges und seine Funktionalität für die Speicherung und den Transport von Stoffen beschreiben und Messgrößen, die Hinweise auf die mechanische Stabilität des Gefügebauwerks geben können.

Bestimmungsort: Durch die Entnahme ungestörter Gefügeproben und die Bestimmung der Parameterwerte durch Labor-Messmethoden lassen sich standardisierbare Bestimmungen für mehrere Parameter am selben Gefügevolumen durchführen. Es wurden aber auch Methoden ausgewählt, bei denen der Parameterwert im Feld bestimmt wird bzw. bei denen die Messung nicht bei konditionierten, standardisierten Bedingungen durchgeführt werden kann. Der Vorteil dieser im Feld erhobenen Parameter ist, dass sie wegen ihrer einfachen und schnellen Messmethode eine kostengünstige Abklärung der räumlichen Variabilität erlauben (Messung des Eindringwiderstandes mittels Pandasonde) bzw. eine integrale Beurteilung der Gefügequalität ermöglichen (visuelle Gefügebewertung).

Praktikabilität: Für die Untersuchungen wurden Labormethoden ausgewählt, die erfahrungsgemäss eine zuverlässige und relativ rasche Bestimmung der Parameterwerte auch bei grösseren Untersuchungsserien ermöglichen und insbesondere eine punktuelle Bestimmung von absoluten Kenngrößen des Gefügestandes erlauben. Die verwendeten Feldmethoden werden einerseits in der Praxis oft eingesetzt (Pandasonde) oder versprechen eine kostengünstige integrale Gefügebewertung (visuelle Gefügebewertung).

Veränderungen der physikalischen Bodeneigenschaften lassen sich mit Parametern für Festsubstanz, Hohlraumvolumen, Funktionalität für Wasser- und Luftaustausch, Gefügestabilität und visuelle Gefügebeurteilung beschreiben. Für das LAZBO-Pilotprojekt wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Parameter und Erhebungsmethoden ausgewählt. Zusätzlich sind zum Zeitpunkt der Probenahme die Parameter C_{org} -Gehalt, pH-Wert, Körnung und Wassergehalt sowie das aktuelle Spurenmuster der Befahrungen zu bestimmen, da diese zur Interpretation der Ergebnisse erforderlich sind.

Tabelle 1: Parameterauswahl und Methoden „Bodenphysik“ im LAZBO-Pilotprojekt

Parameter (Einheit)	Erhebungsmethode				Bestimmungsmethoden	
	Laborbestimmung Kleinzylinder 100 cm ³	Laborbestimmung Grosszylinder 235 cm ³	Feldbestimmung Pandasonde	Feldbestimmung Spatenprobe	Bestimmungsprinzip	Referenz-Methode ¹⁾
Festsubstanz						
Lagerungsdichte (g/cm ³)					Gravimetrie nach Trocknung definierter Volumen	PVZYL-D
Hohlraumvolumen						
Gesamtporenvolumen (Vol.%)					Reelle Dichte & Lagerungsdichte	PV-DR
Grobporenvolumen 0 - 30hPa (Vol.%)					Desorption und Gravimetrie definierter Volumen	PVZYL-P
Grobporenvolumen 0 - 60hPa (Vol.%)						
Grobporenvolumen 0 - 100hPa (Vol.%)						
Mittelporenvolumen 100 - 15'000hPa (Vol.%)						
Feinporenvolumen >15'000hPa (Vol.%)						
Funktionalität						
Luftpermeabilität 0 - 30hPa (cm ²)					Luftdurchlässigkeit bei eingestellter Desorption	
Luftpermeabilität 0 - 60hPa (cm ²)						
Stabilität						
Vorbelastung (kPa)					Bodendruck an der Grenze zwischen elastischem und plastischem Deformationsverhalten	
Eindringwiderstand (MPa)					Eindringwiderstand für Kegelkörper 4cm ² Querschnittsfläche	
Visuelle Gefügebeurteilung						
Mittlere Gefügegrösse (mm)					Gewichtsanteile Aggregatgrösse (Siebfraktionen)	
Beurteilung (Beurteilungsklasse)					Beurteilung: Aggregatform & Gewichtsanteile Siebfraktion & Aggregatstabilität	

¹⁾ Schweizerischen Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten, Band 2: Bodenuntersuchungen zur Standortcharakterisierung (FAL, FAW, RAC 1998).

Ein weiteres Kriterium der Auswahl von Methoden für die LAZBO-Pilotuntersuchungen war die an der Agroscope FAL Reckenholz verfügbaren Methodenkenntnisse und -erfahrungen basierend auf den Schweizerischen Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten (FAL, FAW, RAC 1998).

Die Beprobungen bzw. Feldmessungen ausgewählter **Bodentiefen** beziehen sich auf die typische Horizontierung eines Bodens, die sich bei ackerbaulicher Bodennutzung auf der Basis einer regelmässigen und ganzflächigen Bodenbearbeitung ergeben:

- die Tiefe 10 - 15 cm entspricht einem typischen Ausschnitt aus der sowohl durch die Bodenbearbeitung als auch durch die Saatbettbereitung beeinflussten Bearbeitungsschicht des Oberbodens und ist typischerweise ein Ahp-Horizont.
- die Tiefe 35 - 40 cm entspricht einem durch Bodenbearbeitungsmassnahmen unbeeinflussten Unterboden jenseits allfälliger durch die Arbeit mit in Furchenpflügen verursachten Gefügebeeinträchtigungen („Pflugsohle“) und ist typischerweise als B-Horizont ausgeprägt.

Die **Wahl des jährlichen Erhebungszeitraumes** im Frühjahr spielt in zweierlei Hinsicht eine wesentliche Rolle für die Ergebnisse und Interpretation der Bodenuntersuchungen:

- Bei der Langzeitbeobachtung von Bodeneigenschaften wird nicht beabsichtigt, die kurzfristige Dynamik von Veränderungen der Gefügeeigenschaften im Verlaufe eines Jahres zu erfassen, sondern es soll beobachtet werden, wie sich der Gefügezustand aus dem Zusammenwirken von gefügebeeinträchtigenden und gefügebildenden Einflüssen im Verlaufe einer bzw. mehrerer Fruchtfolgeperioden mittel- bis langfristig entwickelt. Aus diesem Grund wurde angestrebt, die Erhebungen nur einmal pro Jahr in einem relativen Gleichgewichtszustand der Gefügeentwicklung durchzuführen. Ebenso wurde versucht, extreme Situationen des Gefügezustandes, beispielsweise ein frisch gelockertes Saatbett unmittelbar nach der Saat oder eine gerade erfolgte Verdichtung durch Befahrungen im Zusammenhang mit der Ernte, zu vermeiden. Mit dem Erhebungszeitpunkt im Frühjahr wurde beabsichtigt, die Beprobungen bzw. Messungen im Feld zu einem Zeitpunkt durchzuführen, an dem der Gefügezustand nicht durch kürzlich erfolgte Einflüsse von mechanischer Bodenlockerung oder -verdichtung bestimmt wird.
- Die Beprobungen und Messungen im Feld sollten unter Bedingungen stattfinden, die eine sinnvolle Interpretation der bestimmten Parameterwerte zulassen. Wenn der Boden zu trocken oder zu feucht ist, können Gefügeproben bei der Probenahme verändert werden (zerbrechen, plastisch verformen) oder Messungen im Feld nicht mehr sinnvoll interpretiert werden, weil die Bodenfeuchte den Parameterwert beeinflusst. Praktisch bedeutet dies, dass die Probenahme innerhalb einer grundsätzlich günstigen Zeitperiode erfolgen muss und die definitive Terminwahl letztlich kurzfristig durch den effektiven Bodenfeuchteverlauf bestimmt wird.

Die Beurteilung der Ergebnisse von bodenphysikalischen Untersuchungen im Hinblick auf ihre Bedeutung für die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit verlangt nach Interpretationsgrundlagen:

- Beurteilungsschemata zur Interpretation der Ergebnisse bezüglich vorsorglichem Bodenschutz liegen im rechtsverbindlichen Sinne nicht vor, weder in Form von Richtwerten für einzelne Parameter (samt Methodenvorschrift) noch hinsichtlich einer Anleitung zur gleichzeitigen Berücksichtigung mehrerer Parameter. Für drei ausgewählte Parameter sind allerdings Richt- und Prüfwerte vorgeschlagen worden (BGS, 2004).
- Kenntnisse über standorttypische Werte („Standortwert“).

Ausserdem erfordern Untersuchungen im Rahmen von Langzeituntersuchungen besondere Aufmerksamkeit zur Gewährleistung der Methodenstabilität und zur Sicherstellung einer absoluten Referenzstabilität. Diese Fragestellungen nahmen im Rahmen des Pilotprojektes eine zentrale Rolle ein.

2.3 Spezifische Voraussetzungen für bodenbiologische Parameter und Methoden

Mikroorganismen stellen sowohl zahlen- als auch mengenmässig den grössten Anteil der Organismen im Boden dar. Ihre wichtigste Funktion ist der Ab- und Umbau organischer Substanz. Durch die mikrobiologischen Prozesse werden organisch gebundene Nährstoffe aus Ernteresten, Streu und organischen Düngern in mineralischer Form freigesetzt und für Pflanzen erneut verfügbar gemacht. Neben dieser Mineralisierung organischer Substanzen ist auch die Fähigkeit der Mikroorganismen zum Abbau von dem Boden bewusst oder unbewusst zugeführten organischen Stoffen wie Pflanzenschutzmitteln oder organischen Schadstoffen von grosser Bedeutung.

Die mikrobiologischen Eigenschaften eines Bodens werden direkt von den chemischen, physikalischen und biologischen Eigenschaften bestimmt. Andererseits beeinflussen die Mikroorganismen durch ihre Tätigkeiten bis zu einem gewissen Grad auch die physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften von Böden (Bodengefüge, pH-Wert). Eine Abnahme der mikrobiellen Biomasse im Boden kann eine unmittelbare Gefährdung von mikrobiologischer Aktivität und Abbaufähigkeit anzeigen; langfristig würde dies auch die Gefahr von ungünstigen physikalischen und chemischen Veränderungen des Bodens sowie für schwerwiegende Beeinträchtigungen der Stoffkreisläufe erhöhen. Bodenmikrobiologische Kenngrössen sind deshalb eine wichtige Komponente bei der Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit. Sie sind Indikatoren, die kurz-, mittel- und langfristige Veränderungen von Bodeneigenschaften anzeigen, Hinweise zur Wirkung von Schadstoffen und ihrer Metaboliten am Wirkungsort geben (z.B. Bioverfügbarkeit und Mobilität von Schadstoffen) sowie synergistische Wirkungen verschiedener Belastungstypen integrieren (z.B. stoffliche und nichtstoffliche Wirkungen bei Schadstoffen in einem verdichteten Boden).

Von den zahlreichen sowohl national als auch international verwendeten bodenmikrobiologischen Kenngrössen werden die folgenden als Basisparameter zur Charakterisierung des mikrobiologischen Bodenzustandes empfohlen (Wegleitung zur Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit, BUWAL und FAC, 1991; Arbeitsgruppe „Vollzug Bodenbiologie“ in: Erläuterungen zu den Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten (RM-ERL-2), FAL, FAW, RAC, 1998.):

- Mikrobielle Biomasse
- Basalatmung
- N-Mineralisierung im aeroben Brutversuch.

Die mikrobielle Biomasse kann mit verschiedenen Methoden bestimmt werden. Die Arbeitsgruppe „Vollzug Bodenbiologie“ (VBB) sowie die Erläuterungen zu den Referenzmethoden der Eidgen. landw. Forschungsanstalten empfehlen die Methode „Substratinduzierte Respiration“ (SIR), weil diese schon in bisherigen Monitoringprogrammen angewendet wurde, sowie die „Fumigations-Extraktions-Methode“ (FE), weil diese die geringsten Einschränkungen bezüglich ihrer Einsatzmöglichkeiten aufweist und gegenüber kurzfristigen Einflüssen am unempfindlichsten ist (Mäder et al., 1993). Zusätzlich sind die Parameter C_{org} -Gehalt, pH-Wert und Körnung zu bestimmen, da diese zur Interpretation der Ergebnisse notwendig sind. Tabelle 1 gibt eine Zusammenfassung der ausgewählten Basisparameter und Methoden.

Tabelle 2: Parameterauswahl und Methoden „Bodenbiologie“ im LAZBO-Pilotprojekt

Parameter (Einheit)	Erhebungsmethode	Bestimmungsmethode ¹⁾ / Referenz-Methoden-Kürzel
Mikrobielle Biomasse		
Biomasse- Kohlenstoff (mg BM-C/kg TS)	Mischprobe	Substratinduzierte Respiration (SIR) / [B-BM-HM]
Biomasse- Kohlenstoff (mg C_{mic} /kg TS)		Fumigation, Extraktion (FE) / [B-BM-FE]
Biomasse- Stickstoff (mg N_{mic} /kg TS)		
Funktionalität		
Bodenatmung (mg CO_2 -C/kg TS x h)		Basalatmung [B-BA-IS]
Stickstoff- Mineralisierung (mg N_{min} / kg TS x 24h)		N-Mineralisierung [B-NM-BA]

¹⁾ Schweizerischen Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten, Band 2: Bodenuntersuchungen zur Standortcharakterisierung (FAL, FAW, RAC 1998).

Die bodenmikrobiologischen Basisparameter liefern folgende Aussagen:

- Mikrobielle Biomasse: Die Menge an Mikroorganismen in einem Boden stellt eine wichtige Kenngrösse dar, da diese Organismen sowohl für die Umsetzungsleistung im betreffenden Boden ausschlaggebend sind als auch einen Pool von schnell umsetzbaren und damit rasch verfügbaren Nährstoffen darstellen.
- Bodenatmung: Die Bodenatmung ist eine allgemein anerkannte, grundlegende Kenngrösse für die Beschreibung der mikrobiellen Aktivität in einem Boden (an einem Standort), die auch als Basalatmung bezeichnet wird.

- N-Mineralisierung im aeroben Brutversuch: Mit dieser Kenngrösse wird der zentrale biologische Prozess der Stickstoffdynamik eines Bodens erfasst, wobei das Mineralisierungspotential eines Bodens unter optimalen Bedingungen im Labor gemessen wird.

Grundsätzlich sind folgende Einschränkungen zu berücksichtigen:

- Veränderungen der bodenmikrobiologischen Parameter können sehr verschiedene Ursachen haben, so dass nicht unmittelbar eindeutige Ursache-Wirkungs-Beziehungen erkannt und entsprechende Empfehlungen abgeleitet werden können. Die eigentlichen Ursachen der Veränderungen (die Kausalität) muss zusätzlich ermittelt werden.
- Bodenmikroorganismen und Pflanzen können auf verschiedene Belastungen des Bodens unterschiedlich reagieren. Ungünstige Veränderungen der bodenmikrobiologischen Parameter müssen nicht unbedingt eine unmittelbare Beeinträchtigung der Bodenfunktion „Pflanzenproduktion,“ anzeigen.
- Mit diesen Methoden können keine Aussagen zur Diversität der Mikroorganismen gemacht werden. Entsprechend lassen sich auch keine Veränderungen in der Zusammensetzung der Mikroorganismenpopulation erkennen.

Die Beurteilung der Ergebnisse bodenmikrobiologischer Untersuchungen erfordert ein Beurteilungsschema, das Referenzwertbereiche und die Bedeutung abweichender Werte für die Bodenfruchtbarkeit enthält. In Untersuchungen von (Oberholzer et al., 1999) und (Oberholzer & Höper, 2000) wurde ein Verfahren zur Berechnung von Referenzwerten mittels Regressionsmodellen entwickelt, das für die Basisparameter „mikrobielle Biomasse“ und „Basalatmung“ angewendet werden kann und auf dessen Grundlage eine standortbezogene Interpretation der bodenmikrobiologischen Kenngrössen möglich wird (Teil 3, Kapitel 1.6).

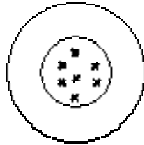
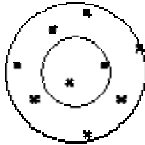

Bodenmikrobiologische Untersuchungen müssen nicht nur eine ökologische Bewertung ihrer Ergebnisse ermöglichen, sondern müssen auch gewährleisten, dass die eingesetzten Methoden eine hohe Stabilität aufweisen. Hinzu kommt, dass bei bodenmikrobiologischen Untersuchungen keine absolute Referenzgrösse als Bezugsbasis verfügbar ist. Im Rahmen des LAZBO-Pilotprojektes nahm dieser Aspekt der Qualitätssicherung eine zentrale Rolle ein.

Die Auswahl möglicher Standorte für die bodenmikrobiologischen Untersuchungen im LAZBO-Pilotprojekt erfolgte nach den gleichen Stratifizierungskriterien, wie sie bei der Nationalen Dauerbeobachtung (NABO) verwendet wurden (Desaules & Dahinden, 2000). Um hinsichtlich der zu beprobenden Fläche eine maximale Kompatibilität mit dem Vorgehen im bestehenden NABO-Referenzmessnetz zu erreichen, wurde für die Beprobungsfläche ebenfalls eine Grösse von 10×10 m gewählt.

2.4 Definitionen zur Genauigkeit

Die Quantifizierung der Genauigkeit der in den Kapiteln 2.2 und 2.3 vorgeschlagenen Methoden ist ein zentrales Anliegen des LAZBO-Pilotprojektes. Die **Genauigkeit** einer Methode lässt sich mit deren **Richtigkeit**, das heisst der systematischen Abweichung der gemessenen Werte vom wahren Sollwert m (ausgedrückt als Bias B), und deren **Präzision**, das heisst der Streuung der Messwerte um den Mittelwert aller Messwerte, ausgedrückt als Varianz V , beschreiben. Die praktische Bedeutung dieser Begriffe lässt sich am Beispiel von Trefferbildern veranschaulichen (Tabelle 3). Die Richtigkeit beschreibt, wie nahe das Mittel aller Treffer dem Ziel kommt (systematischer Fehler des Versuchs). Die Präzision besagt, wie nahe beisammen die einzelnen Treffer liegen (zufälliger Fehler des Versuchs). Ein Schiessversuch ist dann genau, wenn er richtige und präzise Trefferbilder liefert.

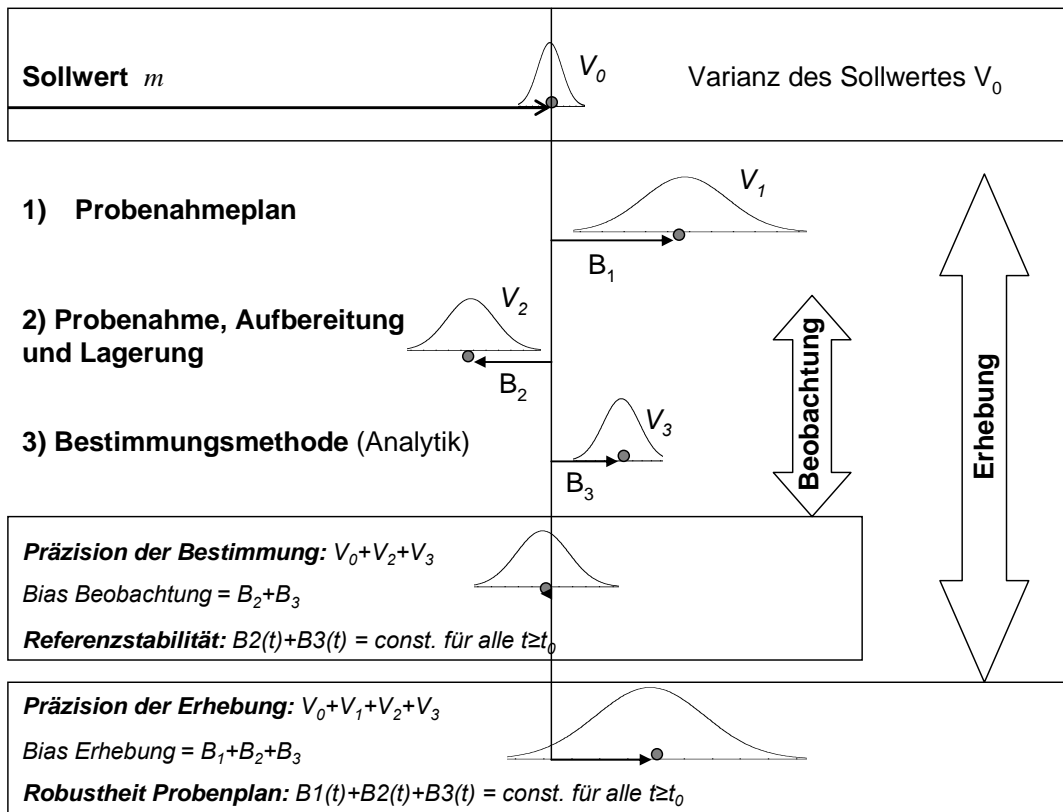
Tabelle 3: Die Begriffe Genauigkeit, Richtigkeit und Präzision am Beispiel von Trefferbildern

	wahrer Wert	zufälliger Fehler	systematischer Fehler
			
Richtigkeit	gut	gut	schlecht
Präzision	gut	schlecht	gut
Genauigkeit	gut	schlecht	schlecht

Im LAZBO-Pilotprojekt sind, im Unterschied zu einem Schiessversuch, die wahren Standortwerte der Parameter nicht bekannt; daher kann nur die **relative Richtigkeit** bzw. **Stabilität** der Methode bestimmt werden. Unter Stabilität wird dabei die Reproduzierbarkeit eines Wertes relativ zu einem Referenzwert im Verlauf der Zeit verstanden. Diese Einschränkung ist hinsichtlich der Eignung einer Methode für Langzeitbeobachtungen insofern weniger gravierend, als für diesen Zweck vor allem Präzision und Stabilität, jedoch weniger die absolute Abweichung vom wahren Wert interessieren. Im Rahmen der Qualitätssicherung ist es jedoch möglich, die **absolute Richtigkeit** einer Bestimmungsmethode mit geeigneten Massnahmen (regelmässige Eichung, Verwendung standardisierter Kontrollproben mit bekanntem wahren Wert) zu überprüfen. Bei bodenphysikalischen Messungen könnten dazu Sinterkörper mit bekannter Porosität, Porengrössenverteilung und Permeabilität eingesetzt werden. In der Bodenbiologie gibt es dagegen keine Möglichkeit die absolute Richtigkeit einer Bestimmungsmethode zu bestimmen.

Im Rahmen der Untersuchungen für das LAZBO-Pilotprojekt (Figur 1) wurden die Präzision und die Stabilität auf den beiden Stufen „Erhebung“ und „Beobachtung“ durch Addition der systematischen Abweichungen $B_i, i = 1..3$ bzw. der Varianzen $V_i, i = 1..3$ aus den Verfahrensschritten

„Probenahmeplan“, „Probenahme“, „Aufbereitung“, „Lagerung“ und „Bestimmungsmethode“ bestimmt (Figur 2). Die Details hierzu sind Kapitel 3.4. zu entnehmen.



Figur 2: Unsicherheitsbudget für Erhebungs- und Bestimmungswerte durch Addition der systematischen Abweichungen vom wahren Wert bzw. der Addition der Varianzen aus den entsprechenden Verfahrensschritten Probenahmeplan, Probenahme, Aufbereitung und Bestimmungsmethode (modifiziert nach Gy (1998))

Für die Bezeichnungen von Präzision und Stabilität auf den Stufen „Beobachtung“ und „Erhebung“ wurden die Begriffe „Präzision der Beobachtung“, „Stabilität der Beobachtung“ resp. „Präzision der Erhebung“ und „Stabilität der Erhebung“ gewählt. Diese entsprechen den Begriffen „Wiederholpräzision“, „Referenzstabilität“, „Erhebungswiederholpräzision“, und „Robustheit des Probenahmeplans“ wie sie im Nationalen Bodenbeobachtungsprogramm NABO verwendet werden (Desaules & Dahinden, 2000). Im LAZBO-Pilotprojekt wird, wie bereits erwähnt, die Referenzstabilität ausschliesslich im Rahmen der bodenbiologischen Untersuchungen zur Charakterisierung der Stabilität von Probenlagerung und Bestimmungsmethode verwendet (Kapitel 2.1).

In Hinblick auf die LAZBO-Testphase, in der mehrere Erhebungen in zeitlicher Abfolge an einem Standort im Zentrum stehen, werden nachfolgend auf der Stufe Standort die Begriffe Präzision und Stabilität eingeführt. Der Parameterwert an einem gegebenen Standort wird durch die natürlichen Bodeneigenschaften, die Witterung sowie die anthropogenen Nutzungseinflüsse bestimmt und als **mittlerer Standortwert** bezeichnet. Die zeitliche Veränderung des mittleren Standortwertes, im Zeitraum von mehreren Jahren in Abhängigkeit von der Bewirtschaftung und Fruchtfolge, kann als **Stabilität des Standortwertes** interpretiert werden, sofern kein zeitlicher Trend vorhanden ist. Die

Standortpräzision ist bestimmt durch die Varianz des mittleren Standortwertes und wird als **Grundrauschen** bezeichnet. Das Grundrauschen ist von zentraler Bedeutung für das Bodenmonitoring, da es die Bestimmbarkeit eines signifikanten zeitlichen Trends entscheidend beeinflusst. Bei einem grossen Grundrauschen müssen Veränderungen in den Bodeneigenschaften gross sein, um signifikant hervorzutreten. Umgekehrt kann bei einem kleinen Grundrauschen schon eine kleine Veränderung der Bodeneigenschaften als signifikanter Trend erfasst werden.

2.5 Standorte

Für das LAZBO-Pilotprojekt wurden sechs Standorte ausgewählt (Tabelle 4). Während für die bodenbiologischen Untersuchungen alle sechs Standorte beprobt wurden, erfolgten die bodenphysikalischen Untersuchungen nur an zwei der sechs Standorte.

Tabelle 4: Untersuchungsstandorte Bodenphysik und Bodenbiologie im LAZBO-Pilotprojekt

Standort Nr.	Untersuchungen		Nutzung (Code)	Ort (Höhe über Meer)	Bodentyp / Bodenart
	Biologie	Physik			
1	x		Grünland (GL)	Niederösch BE (488 m)	sehr tiefgründige, schwach saure Braunerde / schwach humoser lehmreicher Sand bis sandiger Lehm
2	x		Acker (AK)	Niederösch BE (488 m)	sehr tiefgründige, schwach saure Braunerde / schwach humoser lehmreicher Sand bis sandiger Lehm
3	x	x	Acker (AK)	Kleinandelfingen ZH (363 m)	mässig tiefgründige, alluviale Kalkbraunerde / schwach humoser sandiger Lehm über lehmreichem Sand
4	x		Grünland (GL)	Aadorf TG (537 m)	tiefgründige, schwach pseudogleyige Braun- erde / humoser toniger Lehm
5	x	x	Acker (AK)	Reckenholz ZH (441 m)	tiefgründige, pseudogleyige Braunerde / schwach humoser schluffreicher Lehm über tonigem Lehm
6	x		Grünland (GL)	Krummenau SG (904 m)	sehr tiefgründige, schwach gleyige Saure Braunerde / humoser Lehm

Von den sechs Standorten werden je drei als Acker bzw. Grünland genutzt und weisen unterschiedliche biotische Eigenschaften auf. Die für die bodenphysikalischen Untersuchungen ausgewählten zwei Ackerstandorte wiesen deutliche Unterschiede in den abiotischen Eigenschaften Bodenart und Wasserhaushalt auf, wobei auf Grund dieser Unterschiede auf eine unterschiedliche Verdichtungsempfindlichkeit sowie Bedingungen für die Probenahme geschlossen wurde.

An jedem der sechs Standorte wurden die Versuchsflächen für die bodenphysikalischen und – biologischen Untersuchungen eingemessen und mit einer Rastererhebung (Handbohrstock) auf die Heterogenität des Bodens überprüft. Es konnten zunächst keine relevanten Unterschiede in den Bodeneigenschaften innerhalb der Versuchsflächen festgestellt werden. Die Beschreibung der abio-

tischen Bodeneigenschaften der untersuchten Standorte in der Bodenphysik ist Teil 2 Anhang A bzw. der untersuchten Standorte in der Bodenbiologie Teil 3 Kapitel 1.2 zu entnehmen.

2.6 Probenahme

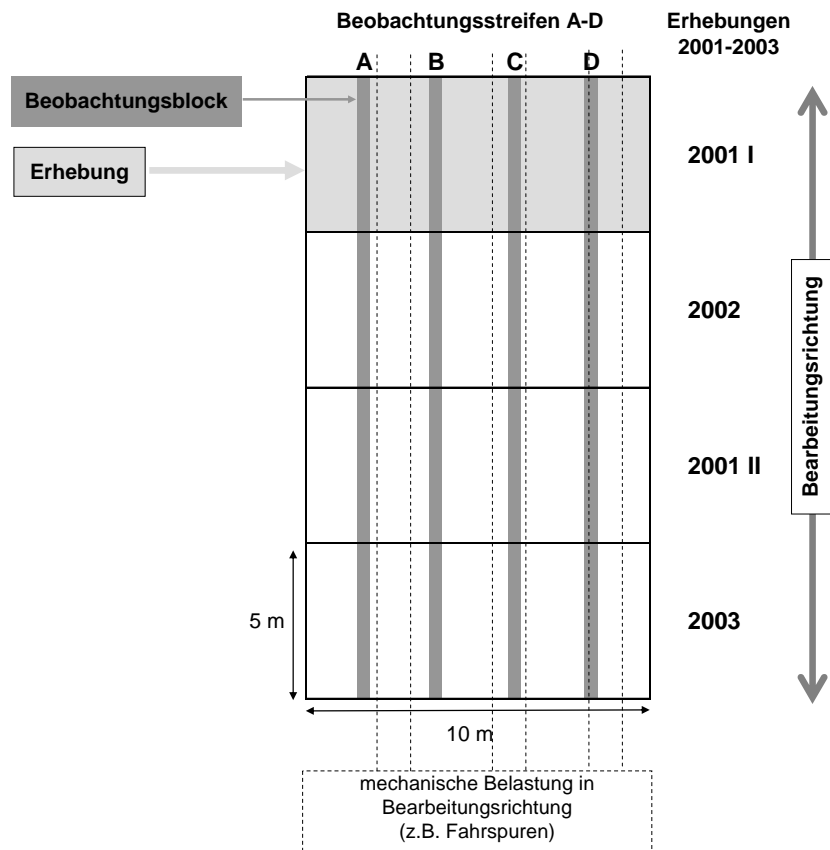
Der Probenahmeplan muss gewährleisten, dass innerhalb einer Versuchsfläche repräsentative Stichproben gezogen werden können, die die räumliche Heterogenität des Bodens am Standort erfassen. Zudem muss der Ortsbezug (Wiederauffindbarkeit) der Beprobungen gesichert sein, um zukünftige Beprobung innerhalb derselben Versuchsfläche zu ermöglichen und störende Einflüsse vorangegangener destruktiver Beprobungen ausschließen zu können. Für das LAZBO-Pilotprojekt wurde angenommen, dass eine repräsentative Versuchsfläche auf landwirtschaftlich genutztem Boden eine Mindestbreite von 10 m quer zur Bewirtschaftungsrichtung eines Schlages aufweisen muss. Diese Annahme basiert auf der maximalen Arbeitsbreite der verwendeten Mechanisierung.

Die Erhebungen von bodenphysikalischen und -biologischen Parametern unterscheidet sich bezüglich Stichprobenart (Einzelproben vs. Mischproben) und Stichprobenumfang deutlich. Da auch die Anforderungen an den Probenahmeplan für die bodenphysikalischen und -biologischen Versuchsflächen verschieden sind, werden die entsprechenden Vorgehensweisen bei den Probenahmen nachfolgend getrennt vorgestellt.

2.6.1 Probenahmeplan Bodenphysik

Untersuchungen am ungestörten Bodengefüge können bei destruktiven Beprobungen bzw. Mess- und Beurteilungsmethoden nicht mehrmals an derselben Stelle durchgeführt werden, was wechselnde Probenahmestellen für jede Untersuchung nötig macht. Da viele bodenphysikalischen Parameter an ungestörten Einzelproben bestimmt werden, hat die räumliche Anordnung der entnommenen Proben einen bedeutenden Einfluss auf die Parameterwerte. Schwerpunkte dieser Untersuchung waren (a) innerhalb der Versuchsfläche eine geeignete Anordnung der Probenahmeorte auf Stufe „Beobachtung“ zu definieren, (b) die Repräsentativität der auf diese Weise gezogenen Erhebungsstichprobe zu beurteilen, (c) die Varianzen zwischen den Beobachtungen einer einzelnen Erhebung zu charakterisieren sowie (d) den Unterschied zweier räumlich verschiedener, aber zeitgleich beprobten Erhebungen zu analysieren.

Für die bodenphysikalischen Untersuchungen wurde an den beiden Standorten 3 und 5 eine Versuchsfläche von 10×20 m ausgeschieden, die in vier „Erhebungstreifen“ von je 5 m Breite und 10 m Länge quer zur Bearbeitungsrichtung unterteilt wurden (Figur 3). Die Gesamtlänge der Versuchsfläche wurde auf 20 m festgelegt, damit mit der vorgesehenen Gesamtprobenzahl vier Erhebungen durchgeführt werden konnten. Innerhalb der Versuchsfläche wurden in Bearbeitungsrichtung vier Beobachtungstreifen A bis D (Figur 3) festgelegt, die die „Erhebungstreifen“ in vier Beobachtungsböcke pro Erhebung unterteilten. Pro Beobachtungsblock wurden die Proben für eine Beobachtung pro Erhebung genommen. Diese Anordnung der Beobachtungsböcke wurde gewählt unter der Annahme, dass die räumliche Heterogenität des Verdichtungszustandes durch die mechanische Belastung in Bearbeitungsrichtung bedingt ist und daher mit Proben aus vier Beobachtungen quer zur Bearbeitungsrichtung (Figur 3) repräsentativ erfasst werden kann.



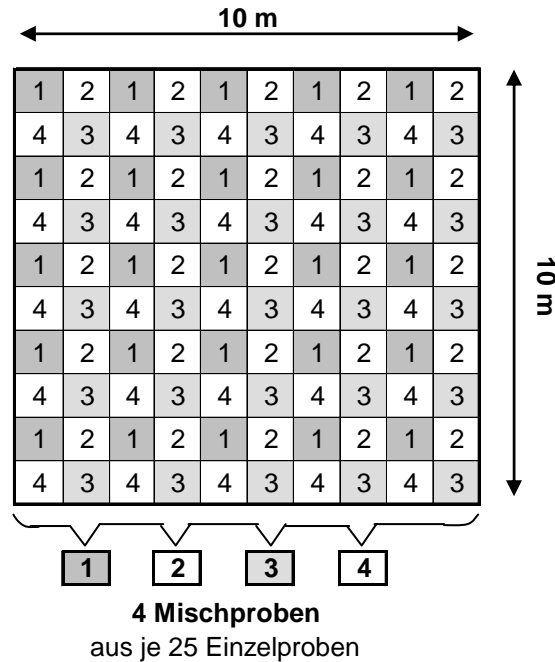
Figur 3: Probenahmeplan der bodenphysikalischen Versuchsfläche

Mit zusätzlichen Abklärungen wurden die Robustheit des Probenahmeplanes (Wiederholbarkeit der Erhebungen in Bearbeitungsrichtung) und die Repräsentativität der vier Beobachtungstreifen (bezogen auf die 10 m breite Versuchsfläche) mit Penetrometermessungen geprüft. Damit konnte die Stabilität des Probenahmeplanes für die beiden bodenphysikalischen Versuchsflächen bei der ersten Beprobung mit Stechzylindern abgeschätzt werden. Zur Bestimmung der bodenphysikalischen Parameter wurden ungestörte Zylinderproben aus 10 - 15 cm (Oberboden) und 35 - 40 cm (Unterboden) Bodentiefe und Spatenproben von 0 – 50 cm Bodentiefe entnommen sowie der Eindringwiderstand im Tiefenbereich 0 – 60 cm gemessen. Zur Ansprache und Beurteilen des Bodengefüges mit visuellen Mitteln wurden aus Ober- und Unterboden nach Nievergelt et al. (2002) Gefügeproben entnommen und analysiert.

2.6.2 Probenahmeplan Bodenbiologie

Die Probenahme für die bodenbiologischen Untersuchungen wurden entsprechend dem Probenahmeplan des NABO-Referenzmessnetzes (Desaules & Dahinden, 2000) durchgeführt, da sich dieser in den letzten 20 Jahren für bodenchemische Untersuchungen mit analogen Anforderungen an die Repräsentativität als robust erwiesen hat, so dass der Einfluss des Probenahmeplans auf den mittleren Standortwert nicht untersucht werden musste. Die Probenahme pro Erhebung erfolgte auf einer Fläche von 10 × 10 m mit vier Mischproben (Beobachtung) aus je 25 Einstichen (Figur 4).

Die Probenahme erfolgte in einer Tiefe von 0 – 20 cm bei Ackerstandorten und 0 – 10 cm auf Grünlandstandorten.



Figur 4: Probenahmeplan Versuchsfläche Bodenbiologie

Jede der Mischproben repräsentiert (im Unterschied zu den bodenphysikalischen Bestimmungen auf Stufe „Beobachtung“) die Ausprägung der *gesamten* Versuchsfläche und wird als Einzelbeobachtung der gesamten Fläche betrachtet. Die Varianz zwischen den Beobachtungen (Mischproben) beruht daher im Wesentlichen *nicht* auf der Heterogenität in der Fläche, sondern ist weitgehend abhängig von der Probenahme- sowie der Aufbereitung. Dieser prinzipielle Unterschied ist beim Vergleich der Varianzen zwischen bodenbiologischen und -physikalischen Untersuchungen zu beachten.

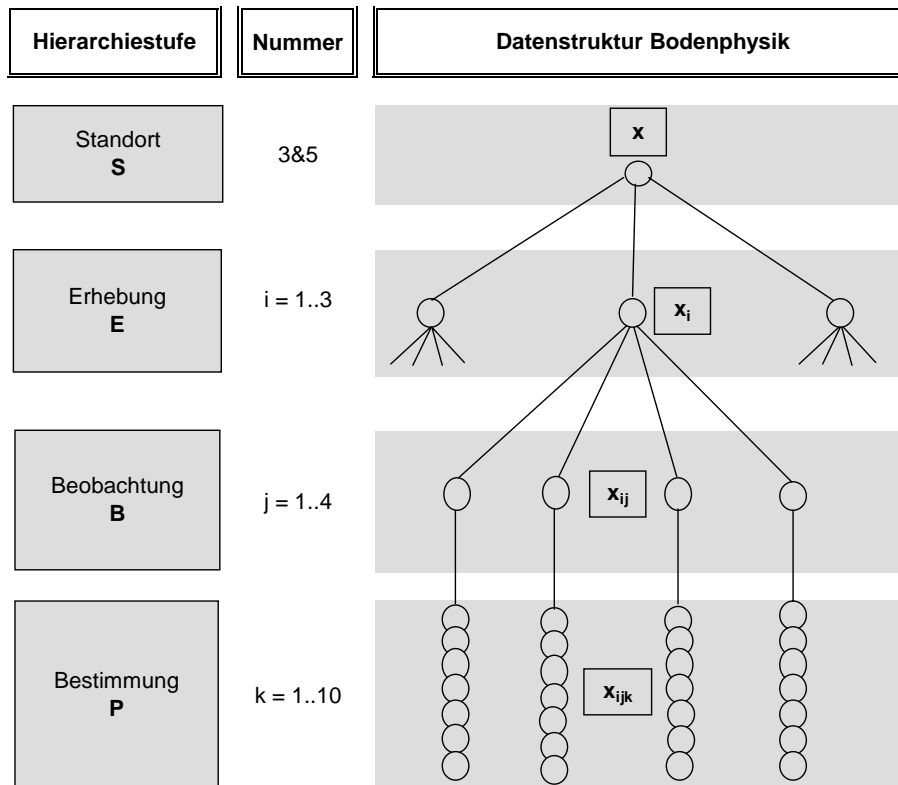
2.6.3 Erhebungszeitpunkt

Die Probenahme wurde jeweils im Frühjahr durchgeführt. Für die Bestimmung der bodenbiologischen Parameter erfolgte die Probenahme vor der ersten N-Düngung, frühestens aber 14 Tage nach dem letzten Bodenfrost. Mit der gleichmässigen Bodenfeuchtigkeitsverteilung am Ende der Winterruhe (d.h. ein gleichmässig abgetrockneter Boden bei Feldkapazität und gleichzeitig minimaler Transpiration) sind zu dieser Jahreszeit auch die einheitlichsten Bodenbedingungen für die Entnahme von ungestörten Zylinderproben für bodenphysikalische Bestimmungen gegeben. Zudem wurde angenommen, dass Bewirtschaftungseinflüsse auf das Bodengefüge nach der Winterruhe am geringsten sind, weil die letzten Bewirtschaftungsmassnahmen meist mehrere Monate zurück liegen und in den Wintermonaten natürliche Regenerationsprozesse aktiv sind. Der Bodenzustand zum Zeitpunkt der Probenahme (Bodenfeuchtigkeit und -temperatur, Nutzungs- bzw. Bearbeitungszustand; Lufttemperatur) wurde jeweils protokolliert, um bei der Datenanalyse einen allfälligen Einfluss von Bodenfeuchtigkeit oder Nutzung auf die Probenahme erkennen zu können.

2.7 Datenstruktur und Auswertungskonzept

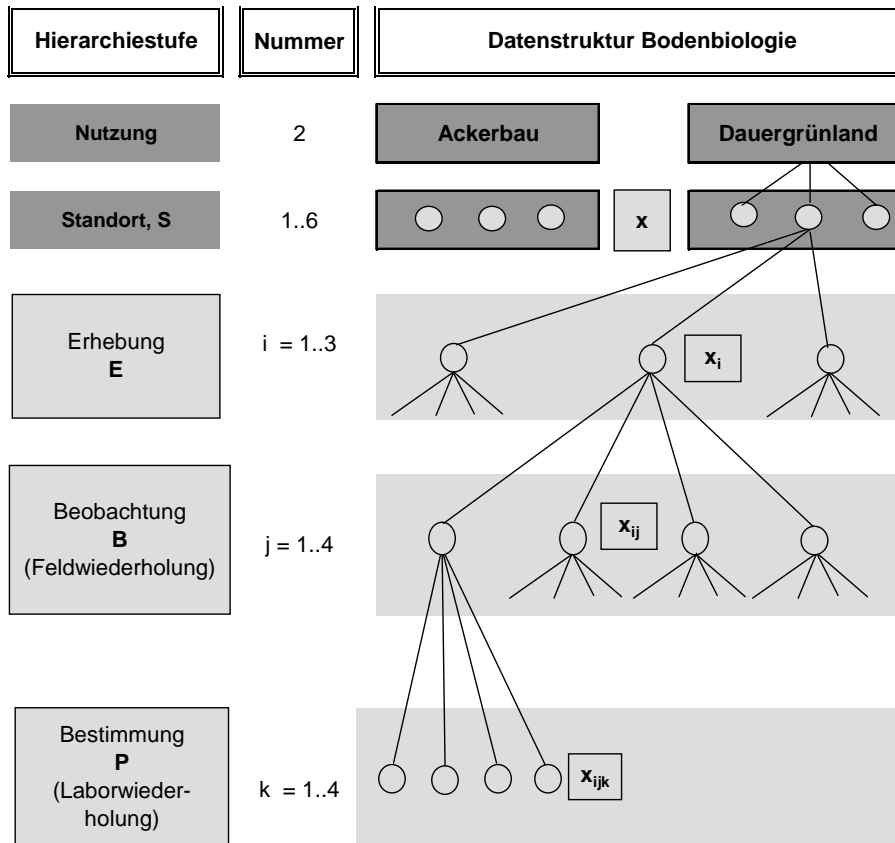
Die Daten der einzelnen Erhebungen liegen in einem zweischichtigen hierarchischen System vor. Aus dem Gesamtdatensatz auf der Stufe „Bestimmung“ werden die Daten auf den Stufen „Beobachtung“ und „Erhebung“ aggregiert und die entsprechenden Mittelwerte, Varianzen und Vertrauensintervalle bestimmt. Die Stufe „Standort“ wird detailliert in der LAZBO-Testphase untersucht.

Für die bodenphysischen Parameter (Figur 5) standen für die beiden Standorte Daten aus drei jährlichen Erhebungen mit je zwei Tiefen zur Verfügung, die sich in je vier räumlich getrennte Beobachtungen pro Erhebung und vier bis zehn Bestimmungen pro Beobachtung aufgliederten (total 16 bis 40 Einzelproben pro Erhebung und Tiefe). Zusätzlich wurde die Robustheit des Probenahmeplans, der Effekt der Bodenfeuchte auf die Parameterwerte bei Feldmessungen, der Einfluss der Lagerungsdauer von Zylinderproben auf die Parameterwerte sowie die Repräsentativität der Beobachtungen einer Erhebung untersucht.



Figur 5: Datenstruktur der bodenphysikalischen Untersuchungen im LAZBO-Pilotprojekt

Für die bodenbiologischen Parameter (Figur 6) standen pro Standort Daten aus drei Erhebungen mit je einer Tiefe zur Verfügung, die sich in je vier Beobachtungen (Mischproben) pro Erhebung und vier Wiederholungen pro Beobachtung aufgliederten.



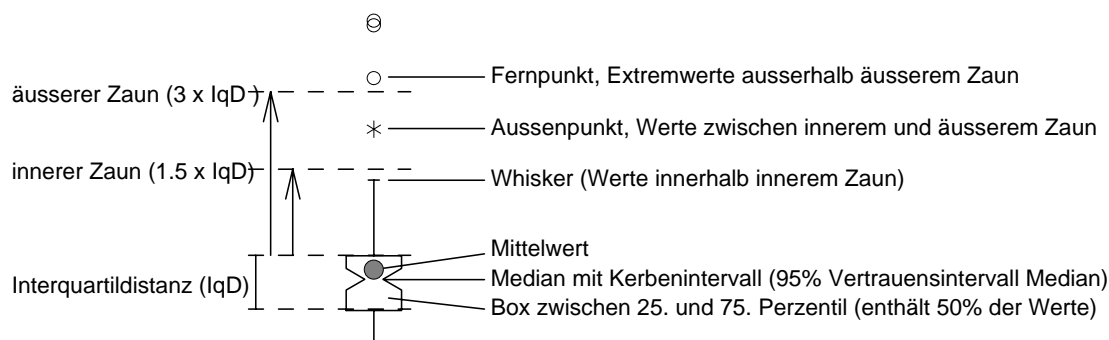
Figur 6: Datenstruktur Bodenbiologie im LAZBO-Pilotprojekt

Zur Quantifizierung von Präzision und Stabilität der im LAZBO-Pilotprojekt verwendeten Methoden wurden Mittelwerte und Varianzen für die Stufen „Bestimmung“, „Beobachtung“ und „Erhebung“ bestimmt. Auf Grund der hierarchischen Datenstruktur (Figur 5, Figur 6) sind die übergeordneten Standort-, Erhebungs- und Beobachtungswerte von den darunter liegenden Bestimmungswerten abhängig. Diese Abhängigkeit beeinflusst die Varianzen der einzelnen Stufen, was mittels einer hierarchischen Streuungszersetzung berücksichtigt werden kann (Kapitel 3.4.1). Die Mittelwerte auf der Stufe „Beobachtung“, „Erhebung“ und „Standort“ sind hingegen nichts anderes als die arithmetischen Mittel der ihnen direkt untergeordneten Stufen.

3 Statistische Grundlagen

3.1 Graphische Darstellung

Die Daten werden teilweise mit Box-and-Whisker-Plots dargestellt (Figur 7). Box-and-Whisker-Plots zeigen neben der mittleren Lage der Werte (Median und Mittelwert) deren 25%- und 75%-Quantil (als Box) sowie auffällige Werte (als Aussen- und Fernpunkte). Die Schiefe der Verteilung lässt sich dabei aus der Lage der Box relativ zu den Whiskers und der Differenz von Mittelwert und Median ablesen.



Figur 7: Definitionen zu den Box-and-Whisker-Plots

3.2 Test auf Normalverteilung

Bei den nachfolgend beschriebenen Ausreissertests und den parametrischen t-Tests wird vorausgesetzt, dass die Daten normal verteilt sind. Daher wurden alle Bestimmungswerte innerhalb einer Erhebung vor der Datenbereinigung und –analyse entweder mit Quantil-Quantil-Plots (Stahel, 2002, 233ff), dem Shapiro-Francia-Test (Hüsler & Zimmermann, 2001) (bodenphysikalische Untersuchungen) bzw. dem Shapiro-Wilks-Test (STATISTICA Version 6.1) (bodenbiologischen Untersuchungen) auf Normalverteilung geprüft. Log-normal verteilte Daten wurden vor der weiteren Auswertung durch Logarithmierung in normal verteilte Datenreihen transformiert (Stahel, 2002, 30f).

3.3 Datenbereinigung

Die Bestimmungswerte einer Beobachtung wurden vor der Auswertung von wahrscheinlichen Ausreissern bereinigt. Bei Stichprobenumfängen von $n < 26$ Bestimmungswerten innerhalb einer Beobachtung können potentielle Ausreisser nach den Kriterien von Dixon (Rey & Kreuter, 1986) auf ihre Zugehörigkeit zur Stichprobe überprüft werden. Dazu wurden die Bestimmungswerte einer Beobachtung zuerst nach Grösse sortiert ($x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$) und anschliessend für die zu prüfenden möglichen Ausreisser x_1 oder x_n das Kriterium $r_{ik,n}$ gemäss Tabelle 5 berechnet. Wenn dieses Kriterium grösser als ein tabellierter Prüfwert ($r_{ik,n} > r_{1-\alpha/2,n}$) ist, wird angenommen, dass der Wert nicht zur Stichproben-Grundgesamtheit gehört und wird als Ausreisser aus dem Datensatz entfernt (Signifikanzgrenzen: $(1 - \alpha)$ -Quantil, $\alpha = 0.05$ der $r_{ik,n}$ -Verteilung nach Dixon).

Tabelle 5: Berechnung der Ausreisser-Kriterien nach Dixon und Signifikanzgrenzen für die verwendeten Stichprobenumfänge

Stichprobenumfang n	Ausreisserprüfung für x_n	Ausreisserprüfung für x_1	Signifikanzgrenzen ($1-\alpha = 0.95$)	
			Stichprobenumfang n	$r_{1-\alpha/2,n}$
$4 \leq n \leq 7$	$r_{ik,n} = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1}$	$r_{ik,n} = \frac{x_2 - x_1}{x_n - x_1}$	4	0.765
$8 \leq n \leq 10$	$r_{ik,n} = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_2}$	$r_{ik,n} = \frac{x_2 - x_1}{x_{n-1} - x_1}$	8 10	0.554 0.477

3.4 Quantifizierung von Präzision und Stabilität - Varianzanalyse

3.4.1 Hierarchische Streuungszerlegung

Für die Berechnung der Varianzen auf den Stufen „Standort“, „Erhebung“, „Beobachtung“ und „Bestimmung“ wurde eine hierarchische Streuungszerlegung verwendet, welche in den nachfolgenden Abschnitten kurz erläutert wird. Ziel war es, die Varianzen der Bestimmungs-, Beobachtungs-, und Erhebungsmittelwerte als Mass für die Präzision auf den Stufen Bestimmung, Beobachtung und Erhebung zu bestimmen. Da sich die Untersuchungen im LAZBO-Pilotprojekt auf Wertevergleiche *innerhalb* der jeweiligen Standorte beschränkten und keine Vergleiche *zwischen* den Standorten berücksichtigt wurden, wurde eine zweischichtige Streuungszerlegung verwendet. Im Sinne einer Einführung zur hierarchischen Streuungszerlegung wird in den nachfolgenden Abschnitten nur jener Fall dargestellt, in dem pro Hierarchiestufe die gleiche Anzahl Werte vorliegen; für eine umfassende Beschreibung hierarchischer Varianzanalysen sowie für ausführlich durchgerechnete Anwendungsbeispiele wird auf die Literatur verwiesen, zum Beispiel auf Ahrens (1968, 120ff). In der vorliegenden Untersuchung wurde für die praktische Durchführung der Streuungszerlegung das Nested-Design-Modul des Programmpaketes STATISTICA (Version 6.1) verwendet.

Es wurde pro Standort eine zweischichtige hierarchischen Streuungszerlegung mit n_E Erhebungen, n_B Beobachtungen pro Erhebung und n_p Bestimmungen pro Beobachtung, insgesamt also jeweils $n_B n_p$ Beobachtungen bzw. $N = n_E n_B n_p$ Bestimmungen verwendeten. Für die Datenstruktur der bodenphysikalischen (Figur 5) und biologischen Untersuchungen (Figur 6) entsprechen $n_E = 3$, $n_B = 4$ und $n_p = 4.8$ oder 10 (Bodenphysik) resp. $n_p = 4$ (Bodenbiologie). Für den k -ten Bestimmungswert x_{ijk} innerhalb der j -ten Beobachtung und der i -ten Erhebung wird von folgender linearer Modellgleichung (1) ausgegangen:

$$x_{ijk} = m + a_i + b_{ij} + e_{ijk} \tag{1}$$

mit $i = 1..n_E$, $j = 1..n_B$, $k = 1..n_p$. Dabei ist m der wahre Wert von x_{ijk} ; a_i , b_{ij} und e_{ijk} sind zufällige Abweichungen von m mit Erwartungswert 0 und den Varianzkomponenten, $\sigma_{x_i}^2$, $\sigma_{x_{ij}}^2$ und $\sigma_{x_{ijk}}^2$ für die Einzelwerte auf den Stufen Erhebung, Beobachtung und Bestimmung, gegeben als

$$V(a_i) = \sigma_{x_i}^2, \quad V(b_{ij}) = \sigma_{x_{ij}}^2, \quad V(e_{ijk}) = \sigma_{x_{ijk}}^2 \quad \text{für alle } i, j, k \quad (2)$$

Die Gesamtvarianz σ^2 des Einzelwertes x_{ijk} lässt sich somit schreiben als $\sigma^2 = \sigma_{x_i}^2 + \sigma_{x_{ij}}^2 + \sigma_{x_{ijk}}^2$. Zur Schätzung der Varianzkomponenten auf den Stufen Erhebung ($s_{x_i}^2$) Beobachtung ($s_{x_{ij}}^2$) und Bestimmung ($s_{x_{ijk}}^2$) der Einzelwerte x_i , x_{ij} , und x_{ijk} mittels zweischichtiger hierarchischer Streuungszerlegung gibt Ahrens (1968) die folgende Gleichung (3) an:

$$s_{x_i}^2 = \frac{1}{n_B n_P} \left(\frac{SQ_E}{f_E} - \frac{SQ_B}{f_B} \right), \quad s_{x_{ij}}^2 = \frac{1}{n_P} \left(\frac{SQ_B}{f_B} - \frac{SQ_P}{f_P} \right), \quad s_{x_{ijk}}^2 = \frac{SQ_P}{f_P} \quad (3)$$

mit SQ_E , SQ_B , SQ_P den Summenquadraten, und $f_E = n_E - 1$, $f_B = n_E(n_B - 1)$, $f_P = N - n_E n_B$, den entsprechenden Freiheitsgraden auf den Stufen Erhebung, Beobachtung und Bestimmung. Anhang A gibt geschlossene Ausdrücke für die Summenquadrate SQ_E , SQ_B und SQ_P . Die Varianzen der Mittelwerte \bar{x}_E , \bar{x}_B , und \bar{x}_P auf den Stufen Erhebung ($s_{\bar{x}_E}^2$) Beobachtung, ($s_{\bar{x}_B}^2$), und Bestimmung, ($s_{\bar{x}_P}^2$), ergeben sich direkt als

$$s_{\bar{x}_E}^2 = \frac{s_{x_i}^2}{n_E} + \frac{s_{x_{ij}}^2}{n_E n_B} + \frac{s_{x_{ijk}}^2}{n_E n_B n_P}, \quad s_{\bar{x}_B}^2 = \frac{s_{x_{ij}}^2}{n_B} + \frac{s_{x_{ijk}}^2}{n_B n_P}, \quad s_{\bar{x}_P}^2 = \frac{s_{x_{ijk}}^2}{n_P} \quad (4)$$

Mit dem Modell von Gleichung (4) für die Varianz des Erhebungsmittelwertes $s_{\bar{x}_E}^2$ lässt sich für bekannte Varianzen $s_{x_i}^2$, $s_{x_{ij}}^2$ und $s_{x_{ijk}}^2$ der Einfluss der Anzahl Wiederholungen auf den Stufen Bestimmung (n_P), Beobachtungen (n_B) und Erhebungen (n_E) auf die Präzision des Erhebungsmittelwertes berechnen. Dies erlaubt es, den Mess- und Probenahmeplan sowie letztlich auch die Erhebungsintervalle so zu optimieren, dass mit einem Minimum an Bestimmungen, Beobachtungen und Erhebungen eine maximale Standortpräzision erreicht werden kann.

3.4.2 Vertrauensintervall des Mittelwertes

Als letzter Schritt zur Beantwortung der Frage, wie präzise sich ein Parameter bestimmen lässt, wurden Mittelwerte und die zugehörigen zu erwartenden Streubereiche mit Hilfe von **Vertrauensintervallen** (VI) ausgedrückt. Das Vertrauensintervall für einen Mittelwert \bar{x} definiert eine obere und eine untere Vertrauensgrenze oVG resp. uVG , zwischen denen der Mittelwert mit einer bestimmten Irrtumswahrscheinlichkeit α zu erwarten ist, $VI = \bar{x} \pm VI_\alpha$, mit VI_α der halben Breite des Vertrauensintervalls. Für eine Stichprobe bestehend aus n normal verteilten Einzelwerten mit Mittelwert \bar{x} und wahrer Varianz σ^2 ergibt sich das Vertrauensintervall des Mittelwertes $VI = \bar{x} \pm VI_\alpha$ mit

$$VI_\alpha = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} q_{1-\alpha/2} \quad (5)$$

wobei $q_{1-\alpha/2}$, dem $(1-\alpha/2)$ -Quantil entspricht (Stahel, 2002). Im LAZBO-Pilotprojekt wurden die Vertrauensintervalle so definiert, dass sich die Mittelwerte mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0.05$ innerhalb der Vertrauensgrenzen uVG resp. oVG befinden. Das $(1-\alpha/2)$ -Quantil erhält dabei den festen Wert 1.96 (Stahel, 2002).

Für Mittelwert \bar{x} und **geschätzte** Varianz s^2 kann das zugehörige Vertrauensintervall $VI = \bar{x} \pm VI_{0.05}^{t(n-1)}$ analog zu (5) wie folgt berechnet werden mit

$$VI_{0.05}^{t(n-1)} = \frac{s}{\sqrt{n}} q_{0.975}^{t(n-1)} \tag{6}$$

Das $(1-\alpha/2)$ -Quantil wird zusätzlich zur Irrtumswahrscheinlichkeit α auch eine Funktion der t -Verteilung nach Student mit $n-1$ Freiheitsgraden. Für $\alpha = 0.05$ und die in dieser Untersuchung häufigen Werte $n = 3, 4$ oder 10 ergeben sich die Faktoren $q_{1-\alpha/2}^{t(n-1)} = 4.3, 2.57$ oder 2.26 . Wie (6) zeigt, werden $VI_{0.05}^{t(n-1)}$ und damit auch VI mit zunehmendem Stichprobenumfang n kleiner und die Präzision der Mittelwertschätzung nimmt damit zu. Für den Erhebungs-, Beobachtungs-, oder Bestimmungsmittelwert erhält man $VI_{0.05}^{t(n-1)}$, indem der Mittelwert \bar{x} in Gleichung (6) durch \bar{x}_E, \bar{x}_B resp. \bar{x}_p , die Standardabweichung des Mittelwerts s/\sqrt{n} durch $s_{\bar{x}_E}, s_{\bar{x}_B}$, resp. $s_{\bar{x}_p}$ und der Stichprobenumfang n durch n_E, n_B resp. n_p ersetzt wird.

3.4.3 Zweiseitiges Vertrauensintervall der Mittelwertsdifferenz

Neben der Präzision stellt die Stabilität der Bestimmungen, Beobachtungen und Erhebungen einen der Schwerpunkte des LAZBO-Pilotprojektes dar. Eine zentrale Frage ist dabei, ob zum Beispiel zwei zeitlich aufeinander folgende Erhebungen signifikant verschiedene Mittelwerte \bar{x}_1 und \bar{x}_2 haben („Standortstabilität“) oder ob die Mittelwerte mehrerer Messwiederholungen aus derselben Probe signifikant verschieden sind und die Methode damit nicht stabil ist. Zur Prüfung, ob die Mittelwerte zweier unabhängiger Stichproben signifikant verschieden sind, werden statistische Hypothesentests verwendet (für Details, siehe Stahel, 2002). Ein einfaches Beispiel dafür ist das zweiseitige Vertrauensintervall der Mittelwertdifferenz, zVI . Die Breite des zVI entspricht der kleinsten Differenz zwischen den Mittelwerten \bar{x}_1 und \bar{x}_2 zweier normal verteilter Stichproben mit den Varianzen σ_1^2 und σ_2^2 sowie den Stichprobenumfängen n_1 und n_2 , die mit der Irrtumswahrscheinlichkeit α als statistisch signifikant betrachtet wird. Das zVI für Irrtumswahrscheinlichkeit α lässt sich analog zum VI schreiben als $zVI = |\bar{x}_1 - \bar{x}_2| \pm zVI_\alpha$ mit

$$zVI_\alpha = q_{1-\alpha/2} \hat{\sigma} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \tag{7}$$

und der Varianz der Mittelwertdifferenz $\hat{\sigma}^2$ als

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n_1 + n_2 - 2} [(n_1 - 1)\sigma_1^2 + (n_2 - 1)\sigma_2^2], \tag{8}$$

Für die Untersuchungen im Rahmen des LAZBO-Pilotprojektes mit $\alpha = 0.05$, Mittelwerten \bar{x}_1 und \bar{x}_2 , **geschätzten** Varianzen s_1^2 , s_2^2 und Stichprobenumfängen $n_1 = n_2 = n$ (zumindest innerhalb derselben Hierarchiestufe), kann das Vertrauensintervall der Mittelwertdifferenz $zVI = |\bar{x}_1 - \bar{x}_2| \pm zVI_{0.05}^{t(2n-2)}$ analog zu Gleichung (7) berechnet werden mit

$$zVI_{0.975}^{t(2n-2)} = q_{0.975}^{t(2n-2)} \hat{s} \sqrt{\frac{2}{n}} \quad \text{und} \quad \hat{s}^2 = \frac{1}{2} [s_1^2 + s_2^2] \tag{9}$$

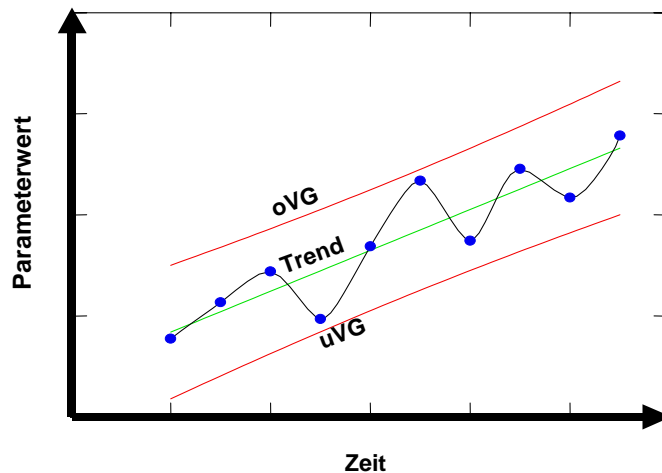
Die zwei Mittelwerte \bar{x}_1 und \bar{x}_2 gelten folglich als signifikant verschieden, wenn gilt

$$|\bar{x}_1 - \bar{x}_2| \geq zVI_{0.975}^{t(2n-2)} \tag{10}$$

Analog zum Vertrauensintervall eines Erhebungs-, Beobachtungs-, oder Bestimmungsmittelwerts, kann $zVI_{0.05}^{t(n-1)}$ für den Erhebungs-, Beobachtungs-, oder Bestimmungsmittelwert berechnet werden, indem die Mittelwerte \bar{x}_1 und \bar{x}_2 in Gleichung (10) durch Erhebungs-, Beobachtungs-, oder Bestimmungsmittelwerte, n durch den Stichprobenumfang der jeweiligen Hierarchiestufe n_E , n_B resp. n_p und die Varianzen s_1^2 und s_2^2 durch die Varianzen der Erhebungs-, Beobachtungs-, oder Bestimmungswerte $s_{x_i}^2$, $s_{x_{ij}}^2$ und $s_{x_{ijk}}^2$ ersetzt werden.

3.5 Erfassung der zeitlichen Veränderung - Zeitreihenanalyse

Für eine Langzeitbeobachtung bodenphysikalischer und –biologischer Parameter spielt neben Methodengenauigkeit und Probenahmeplan auch die zeitliche Auflösung der einzelnen Erhebungen eine Rolle. Die Intervalle zwischen den Erhebungen müssen so gewählt werden, dass relevante Veränderungen signifikant erfasst werden können. Dazu wurden in dieser Untersuchung die Grundlagen für eine Zeitreihen- und Regressionsanalyse eingeführt. Wie in Figur 8 dargestellt, ergeben sich für eine Zeitreihe von Daten kurzzeitliche Schwankungen zwischen aufeinander folgenden Daten auf der Zeitachse, die als Grundrauschen bezeichnet werden (siehe auch Kapitel 2.4). Wir nehmen an, dass es für physikalische und biologische Parameter ein „Grundrauschen“ der einzelnen Jahreswerte um einen standorttypischen Wert („mittlerer Standortwert“) gibt, das einerseits durch verfahrensbedingte Fehler (nicht standardisierte Methode), unterschiedliche Bodenzustände zum Zeitpunkt der Probenahme (Bodenfeuchte, Temperatur, Witterungsverlauf vor der Probenahme) sowie kulturspezifische Gründe (Zeitpunkt in der Fruchtfolge) verursacht wird. Die Erfahrungen vom Projekt VARITEMP (Desaules et al., 2004), wo Konzentrationsveränderungen von Schwermetallen (bei 6 Standorten mit je 6 Erhebungen) über 3 Jahre gemessen und analysiert wurden, bestätigten diese Vermutung für bodenchemische Parameter.



Figur 8: Bestimmung der zeitlichen Entwicklung (Trend) mit einem Regressionsmodell. Die unteren und oberen Vertrauensgrenzen der Regressionskurve (uVG, oVG) zeigen den Wahrscheinlichkeitsbereich des Grundrauschens und werden aus der Varianz des Trends bestimmt.

Längerfristige Veränderungen („Trend“) lassen sich mit einer genügend grossen Anzahl Erhebungen bestimmen. Die benötigte Anzahl wird dabei vom Ausmass des Grundrauschens bestimmt. Je kleiner das Grundrauschen, desto weniger Daten werden benötigt, um einen Trend ausweisen zu können.

Wie nahe der mittlere Standortwert \bar{x}_E am wahren Wert x liegt, lässt sich mit den Gleichungen (7) bis (10) für den Spezialfall $n_1 = \infty$ (der wahre Standortwert als Mittelwerte unendlich vieler Erhebungen) untersuchen. Für $n_1 \rightarrow \infty$ geht in Gleichung (8) $\hat{\sigma} \rightarrow \sigma$ (Regel von l’Hospital) und in Gleichung (7) wird $zVI_\alpha = q_{1-\alpha/2} \sigma/n_2$ mit σ der Standardabweichung des wahren Werts. Für die Stufe Erhebung gilt dann die Teststatistik

$$|x - \bar{x}_E| \geq q_{0,975}^{t(n_E-1)} \frac{s}{\sqrt{n_E}} \tag{11}$$

mit Quantil $q_{1-\alpha/2}^{t(n_E-1)} = 4.3, 2.57$ oder 2.26 für $n_E = 3, 6$ oder 10 , die Anzahl Erhebungen berücksichtigt in mittleren Standortwerten, und $\alpha = 0.05$ die Irrtumswahrscheinlichkeit (siehe dazu auch Gränicher, 1994). Schlüsselpunkt ist dabei die Voraussetzung, dass die Standardabweichung des einzelnen Erhebungswertes, s_{x_i} , ein guter Schätzer für die Standardabweichung des wahren Werts darstellt. Für prospektive Abschätzungen, zum Beispiel wie viele Erhebungen, n_E , nötig sind, um eine gewünschte Richtigkeit $|x - \bar{x}_E|$ des mittleren Standortwerte relativ zum wahren Wert, signifikant feststellen zu können, ist diese Voraussetzung im allgemeinen erfüllt (Gränicher, 1994).

Die hier gegebenen Ausführungen zur Zeitreihenanalyse dienen zur Diskussion der Präzision der Erhebungen aus dem LAZBO-Pilotprojekt. Eine umfassende Zeitreihenanalyse der vorliegenden Resultate zusammen mit den Ergebnissen der Erhebungen der LAZBO-Testphase ist Gegenstand der LAZBO-Testphase.

4 Literaturverzeichnis

- Ahrens, H., 1968. Varianzanalyse. Wissenschaftliche Taschenbücher Mathematik und Physik, 49. Akademie-Verlag, 198 pp.
- BGS, 2004. Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen, Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz. Dokument 13. Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz, Zollikofen. 56 pp.
- 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.
- Desaules, A., Keller, A., Schwab, P. & Dahinden, R., 2004. Analysen von Zeitreihen und Ursachen gemessener Konzentrationsveränderungen von Schwermetallen und Phosphor in Böden auf Dauerbeobachtungsflächen. Agroscope FAL Reckenholz, Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, 8046 Zürich.
- FAL, FAW & RAC, 1998. Schweizerische Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten. Band 2, Bodenuntersuchung zur Standortcharakterisierung. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL).
- Gränicher, W.H., 1994. Messung beendet - was nun? vdf Hochschulverlag AG, Zürich, und B.G. Teubner, Stuttgart, 120 pp.
- Gy, P., 1998. Sampling for Analytical Purposes. John Wiley & Sons, 153 pp.
- Hüsler, J. & Zimmermann, H., 2001. Statistische Prinzipien für medizinische Projekte. 3. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Verlag Hans Huber, 326 pp.
- LwG, 1998. Bundesgesetz über die Landwirtschaft vom 29. April 1998 (Stand am 27. April 2004). SR 910.1.
- Mäder, P., Nowak, K. & Alföldi, T., 1993. Literaturstudie zur Wahl der Methode für die Schätzung der mikrobiellen Biomasse im Boden sowie zur zeitlichen und räumlichen Variabilität der mikrobiellen Biomasse, der Bodenatmung und des Zelluloseabbaus. Bodenschutzfachstellen der Kantone Aargau, Bern und Solothurn, 146 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., 2000. Reference systems for the microbiological evaluation of soils. In: VDLUFA. Generalthema "Nachhaltige Landwirtschaft" Teil II Beiträge zum Thema "Biologische Bewertung von Böden", Stuttgart-Hohenheim. VDLUFA Schriftenreihe 55/II - 2000, Kongressband 2000, pp. 19-34.
- Oberholzer, H.-R., Rek, J., Weisskopf, P. & Walter, U., 1999. Evaluation of soil quality by means of microbiological parameters related to the characteristics of individual arable sites. Agribiological Research, 52 (2): pp. 113-125.
- Rey, G. & Kreuter, U., 1986. Statistik im Laboratorium. Schweizerische Laboratoriums-Zeitschrift (SLZ), 103 pp.
- Stahel, W.A., 2002. Statistische Datenanalyse. Vieweg, 379 pp.
- 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.
- VBNL, 1998. Verordnung über die Beurteilung der Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft vom 7. Dezember 1998 (Stand am 26. Januar 1999). SR 919.118.
- VSBo, 1986. Verordnung vom 9. Juni 1986 über Schadstoffe im Boden. SR 814.12. (ersetzt durch VBBo, 1998).

Anhang

Anhang A: Definition der Summenquadrate SQ

Zur Schätzung der Varianzkomponenten auf den Stufen Erhebung ($s_{x_i}^2$), Beobachtung ($s_{x_{ij}}^2$), und Bestimmung ($s_{x_{ijk}}^2$) der Einzelwerte x_i , x_{ij} , und x_{ijk} mittels zweischichtiger hierarchischer Streuungszerlegung (Gleichung (3)) sind die Summenquadrate SQ_E , SQ_B , und SQ_P nach Ahrens (1968) für einen Standort mit n_E Erhebungen, n_B Beobachtungen pro Erhebung und n_P Bestimmungen pro Beobachtung wie folgt definiert

$$\begin{aligned}
 SQ_E &= \sum_{i=1}^{n_E} \frac{X_{i..}^2}{n_B n_P} - \frac{X_{...}^2}{N} \\
 SQ_B &= \sum_{i=1}^{n_E} \sum_{j=1}^{n_B} \frac{X_{ij.}^2}{n_P} - \sum_{i=1}^{n_E} \frac{X_{i..}^2}{n_B n_P} \\
 SQ_P &= \sum_{i=1}^{n_E} \sum_{j=1}^{n_B} \sum_{k=1}^{n_P} x_{ijk}^2 - \sum_{i=1}^{n_E} \sum_{j=1}^{n_B} \frac{X_{ij.}^2}{n_P}
 \end{aligned} \tag{12}$$

, wobei gilt

$$X_{ij.} = \sum_{k=1}^{n_P} x_{ijk}, \quad X_{i..} = \sum_{j=1}^{n_B} \sum_{k=1}^{n_P} x_{ijk}, \quad X_{...} = \sum_{i=1}^{n_E} \sum_{j=1}^{n_B} \sum_{k=1}^{n_P} x_{ijk} \tag{13}$$