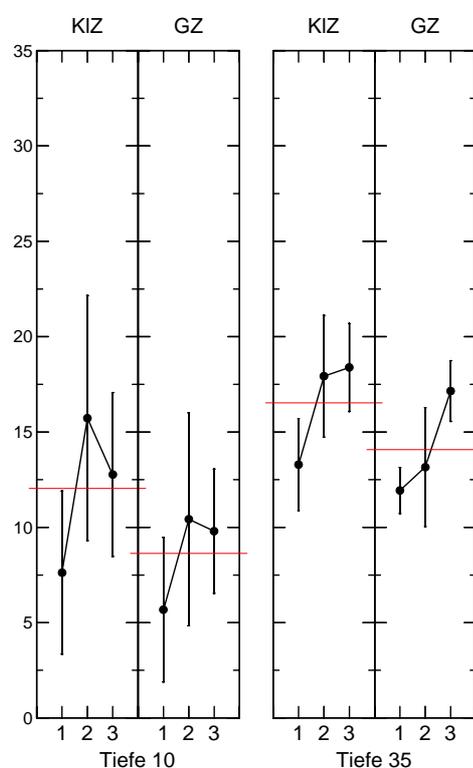


Langzeitbeobachtung von physikalischen und biologischen Bodeneigenschaften Pilotprojekt LAZBO

Teil 2 Bodenphysikalische Untersuchungen

Peter Schwab, Peter Weisskopf, Markus Berli, Kirsten Rehbein,
Hans Brunner, Susanne Scheid, Marlies Sommer, Barbara Ropka



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

Markus Berli,

Kisten Rehbein,

Susanne Scheid

Hans Brunner

Mitarbeit

Marlies Sommer

Barbara Robka

Bezug

www.nabo.admin.ch > Bibliographie Nr. 143

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

In der mechanisierten Land- und Forstwirtschaft ist das Bodengefüge durch den Einsatz von Maschinen zunehmenden mechanischen Belastungen ausgesetzt. Mit Blick auf die nachhaltige Nutzung der Ressource Boden sind Kenntnisse über die langfristige Wirkung dieser Belastungen auf die physikalischen Eigenschaften der Böden unabdingbar. Ziel der vorliegenden Untersuchungen war es, an ausgewählten bodenphysikalischen Parametern deren Bestimmungsmethoden zu validieren und einen Probenahmeplan zu entwerfen, um Gefügeveränderungen von Böden frühzeitig erkennen zu können. Den Untersuchungen lagen die folgenden speziellen Fragestellungen zugrunde:

- Wie genau sind Probenahme, Aufbereitung und Lagerung sowie die bodenphysikalischen Bestimmungsmethoden?
- Wie muss ein Probenahmeplan für eine repräsentative Probenahme gestaltet sein?
- Wie genau können zeitliche Veränderung von physikalischen Bodeneigenschaften für einen Standort erfasst und wie häufig müssen diese erhoben werden?
- Wie praktikabel und aufwendig sind die bodenphysikalischen Bestimmungsmethoden?

Im Labor wurden an ungestörten Zylinderproben von zwei unterschiedlichen Grössen die bodenphysikalischen Parameter Lagerungsdichte, Gesamtporenvolumen, Porengrössenverteilung (Grob-Mittel- und Feinporenanteil), Luftpermeabilität und Vorbelastung (Ödometertest) bestimmt. Im Feld wurde der Eindringwiderstand mit der Panda-Sonde bestimmt und das Bodengefüge mittels visueller Gefügebeurteilung angesprochen (Nievergelt et al., 2002). Mit den Einzelwerten der Bestimmungen wurden gemäss dem gewählten hierarchischen Probenahmeplan Mittelwerte und Varianzen für die übergeordneten Stufen Beobachtung und Erhebung berechnet, wie in den folgenden Abschnitten genauer ausgeführt wird.

Die Untersuchung 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 Ver-

suchsfläche. 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.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Fragestellung	1
2	Material und Methoden	3
2.1	Versuchsstandorte	3
2.2	Versuchsaufbau	4
2.2.1	Versuchsfläche und Probenahmeplan:	4
2.2.2	Versuchsfragen und ihre Beantwortung:	5
2.3	Probenahme	8
2.4	Analysemethoden	11
2.5	Richt- und Prüfwerte	15
2.6	Statistische Auswertung	15
3	Ergebnisse	17
3.1	Statistische Kenngrößen	17
3.1.1	Verteilung	17
3.1.2	Prüfung auf Ausreisser	17
3.1.3	Deskriptive Statistik - Bereinigte Datensätze	17
3.2	Genauigkeit der Bestimmung	20
3.2.1	Präzision der Bestimmungen = Variation der Parameterwerte innerhalb einer Beobachtung	20
3.2.2	Vergleich der Parameterwerte aus verschiedenen Untersuchungssystemen: Klein- vs. Grosszylinder	22
3.2.3	Stabilität der Bestimmungen	23
3.3	Genauigkeit der Erhebungen	27
3.3.1	Variation der Beobachtungen innerhalb einer Erhebung	27
3.3.2	Robustheit des Probenplanes	29
3.3.3	Repräsentativität der Beobachtungen einer Erhebung	36
3.3.4	Vergleich von Erhebungen bei unterschiedlichem Bodenzustand	37
3.3.5	Zusammenhang zwischen sichtbaren Fahrspuren und Parameterwerten	38
3.4	Langzeitbeobachtung: Beurteilen der langfristigen Veränderung von Bodeneigenschaften vor dem Hintergrund räumlicher Heterogenität und kurzzeitiger Schwankungen	39
3.4.1	Analyse der Variabilitätsursachen von bodenphysikalischen Parameterwerten	39
3.4.2	Zeitliche Entwicklung der bodenphysikalischen Parameterwerte zwischen den Erhebungen 2001-2003	41
3.4.3	Beurteilung der zeitlichen Veränderungen aufgrund von statistischen Signifikanzschwellen	43
3.4.4	Funktionelle Relevanz	46

4	Diskussion.....	49
4.1	Genauigkeit der Bestimmungen und Auswirkungen auf die Lagebestimmung und Interpretation von Veränderungen	49
4.1.1	Genauigkeit der Bestimmungsmethode	49
4.1.2	Genauigkeit der Bestimmungen.....	51
4.2	Genauigkeit der Erhebungen und Auswirkungen auf die Interpretation von Veränderungen	54
4.2.1	Präzision der Erhebungen	54
4.2.2	Robustheit des Probenahmeplanes.....	56
4.2.3	Repräsentativität	58
4.2.4	Effekt des Erhebungszeitpunktes bzw. des Bodenzustandes	58
4.3	Relevanz.....	59
4.4	Indikatorwert und Aussagekraft.....	60
4.5	Langzeitbeobachtung: Beurteilen der langfristigen Veränderung von Bodeneigenschaften vor dem Hintergrund räumlicher Heterogenität und kurzzeitiger Schwankungen	61
5	Literaturverzeichnis	63
Anhang A	Bodenkennwerte der Untersuchungsstandorte für die Jahre 2001-2003	67
Anhang B	Präzision der Bestimmungen - Variation der Parameterwerte innerhalb einer Beobachtung.....	69
Anhang C	Referenzstabilität Werte der Erhebung 2002(1) aus Kleinzylinder- und Grosszylindersystem	75
Anhang D	Variation der Beobachtungen innerhalb einer Erhebung.....	79
Anhang E	Robustheit des Probenplanes – Vergleich zweier zum gleichen Zeitpunkt beprobten, aber räumlich verschobenen Beobachtungen.....	83
Anhang F	Robustheit des Probenplanes– Vergleich zweier zum gleichen Zeitpunkt beprobten, aber räumlich verschobenen Erhebungen:	87
Anhang G	Genauigkeit der Erhebung – Vergleich von Erhebungen bei unterschiedlichem Bodenzustand	91
Anhang H	Zusammenhang zwischen sichtbaren Fahrspuren und Parameterwerten.....	93
Anhang I	Zeitliche Veränderung – Zeitliche Entwicklung der bodenphysikalischen Parameterwerte zwischen den Erhebungen 2001-2003	95
Anhang J	Beurteilung der zeitlichen Veränderungen aufgrund von statistischen Signifikanzschwellen	99
Anhang K	Optimierung der Probenverteilung.....	103

Verzeichnis der Figuren

Figur 1:	Versuchsaufbau der bodenphysikalischen Untersuchungen	5
Figur 2:	Genauigkeit der Beobachtungen bzw. der Erhebungen: Realisierte Probenahme für die bodenphysikalischen Untersuchungen 2001.....	7
Figur 3:	Genauigkeit der Erhebungen: Verschiedene Probenahmepläne „virtueller Beprobungen“, basierend auf der realisierten Probenahme für die bodenphysikalischen Untersuchungen 2001.....	7
Figur 4:	Mess- und Probenahmeplan der jährlichen bodenphysikalischen Untersuchung einer Beobachtung (eines „Blockes“)	9
Figur 5:	Untersuchungsablauf und untersuchte bodenphysikalische Parameter bei Klein- und Grosszylinderproben	12
Figur 6:	Präzision der Bestimmungen für den bodenphysikalischen Parameter Lagerungsdichte (LD).....	20
Figur 7:	Präzision der Bestimmungen ausgedrückt als Variationskoeffizienten (VK %) der Parameterwerte innerhalb der Beobachtungen, zusammengefasst über alle Erhebungen, Standorte und Tiefen.....	21
Figur 8:	Vergleich der mittleren Lagerungsdichte von Proben der Erhebung 2002 nach unterschiedlichen Probenlagerungsdauern.....	24
Figur 9:	Vergleich des mittleren Grobporenvolumens (0-60 hPa) von Proben der Erhebung 2002 nach unterschiedlichen Probenlagerungsdauern	24
Figur 10:	Gesamt- und Grobporenvolumen (0-60 hPa) von 3 Sinterkörpern. Mittelwert mit 95% Vertrauensintervall sowie berechnetes zweiseitiges 95%-Vertrauensintervall für Mittelwertsdifferenzen (zVI).....	25
Figur 11:	Variation der Lagerungsdichte (LD) zwischen den jeweils vier Beobachtungen der Erhebungen 2001(I), 2001(II), 2002 und 2003 bei Untersuchungen mit dem Klein- bzw. dem Grosszylindersystem, ausgedrückt als Variationskoeffizient (VK%).....	27
Figur 12:	Variation der Beobachtungswerte innerhalb einer Erhebung bei den einzelnen bodenphysikalischen Parametern, ausgedrückt als Variationskoeffizienten über alle Erhebungen, Standorte und Tiefen.....	28
Figur 13:	Vergleich der mittleren Lagerungsdichte (LD) mit 95% Vertrauensintervall (VI) der Beobachtungen A-D in der Erhebung 2001(I) (links) mit den entsprechenden Werten der Beobachtungen in der räumlich verschobenen Erhebung 2001(II) (rechts).	30
Figur 14:	Vergleich der mittleren Grobporenvolumen 0-60 hPa (GP 60) mit 95% Vertrauensintervall (VI) der Beobachtungen A-D in der Erhebung 2001(I) (links) mit den entsprechenden Werten der Beobachtungen in der räumlich verschobenen Erhebung 2001(II) (rechts).....	30
Figur 15:	Relative Abweichungen (%) der bodenphysikalischen Parameterwerte aus den Beobachtungen der Erhebung 2001(I) von den entsprechenden Werten der	

	Beobachtungen in der räumlich verschobenen Erhebung 2001(II), zusammengefasst über beide Standorte und Tiefen.	31
Figur 16:	Vergleich der mittleren Lagerungsdichte der Erhebung 2001(I) mit jener der räumlich verschobenen Erhebung 2001(II).....	32
Figur 17:	Vergleich des mittleren Grobporenvolumens 0-60hPa der Erhebung 2001(I) mit jener der räumlich verschobenen Erhebung 2001(II).....	33
Figur 18:	Relative Abweichung in % der bodenphysikalischen Parameterwerte zwischen der Erhebung 2001(II) und der räumlich verschobenen Erhebung 2001(I), dargestellt pro Standort und Tiefe und im Mittel.	34
Figur 19:	Vergleich der Eindringwiderstands-Mittelwerte für die Beobachtungen A-D mit den entsprechenden Mittelwerten aus den Transekten-Untersuchungen.	36
Figur 20:	Eindringwiderstandswerte 2002 bei unterschiedlicher Bodenfeuchte zu den vier Zeitpunkten.	37
Figur 21:	Zusammenhang zwischen sichtbaren Fahrspuren und den bodenphysikalischen Parameterwerten für Eindringwiderstand (links) und Grobporenvolumen 0-60hPa GZ (rechts).	38
Figur 22:	Lagerungsdichte (LD) aus den Bestimmungen mit dem Kleinzylinder- (KIZ) und dem Grosszylindersystem (GZ) in den Jahren 1 = 2001(I), 2 = 2002 und 3 = 2003.	41
Figur 23:	Grobporenvolumen 0-60 hPa (GP 60) aus den Bestimmung mit dem Kleinzylinder- (KIZ) und dem Grosszylindersystem (GZ) in den Jahren 1 = 2001(I), 2 = 2002 und 3 = 2003.	42
Figur 24:	Log Luftpermeabilität bei 60 hPa (pLP60) aus den Bestimmungen mit dem Kleinzylinder- (KIZ) und dem Grosszylindersystem (GZ) in den Jahren 1 = 2001(I), 2 = 2002 und 3 = 2003.	42
Figur 25:	Relative Veränderungen bodenphysikalischer Parameterwerte zwischen den Erhebungsjahren (Balken) im Vergleich zu den berechneten relativen 95%- Signifikanzschwellen für Mittelwertsdifferenzen (zVI).	45
Figur 26:	Optimierung des Probenahmeplanes zur Verbesserung der 95%- Signifikanzschwelle von Mittelwertsdifferenzen (zVI) durch Erhöhung der Anzahl Beobachtungen bei gleichem Gesamtumfang der Beprobung (N=40); Beispiel Grobporen bei 60 hPa, Grosszylindersystem.	55

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Bodenkennwerte der Versuchstandorte, Mittelwerte der Jahre 2001-2003	3
Tabelle 2: Aktuelle Kultur und Bodenzustand zum Zeitpunkt der Probenahmen und Messungen („Erhebungen“) 2001-2003	10
Tabelle 3: Datum der Probenahmen sowie gravimetrische Wassergehalte (WG) bei den bodenphysikalischen Untersuchungen der Jahre 2001-2003	10
Tabelle 4: Auftreten und Flächenanteil sichtbarer Fahrspuren zum Zeitpunkt der Erhebungen	11
Tabelle 5: Bezeichnungen der Porengrössenklassen, zugehörige Saugspannungspunkte und entsprechende Äquivalentdurchmesser der kleinsten gerade noch entwässerten Poren	13
Tabelle 6: Verwendete Porengrössenklassen im LAZBO-Pilotprojekt - Zusammenfassung der Porenklassen.....	13
Tabelle 7: Vorschläge für Richt- und Prüfwerte bodenphysikalischer Parameter	15
Tabelle 8: Anzahl Ausreisser	18
Tabelle 9: Deskriptive statistische Kenngrössen für die bodenphysikalischen Parameterwerte, basierend auf den 3 Erhebungen 2001 (I), 2002 (1) und 2003.....	19
Tabelle 10: Prozentuelle Abweichung der Parameterwerte bei der Bestimmung aus Kleinzyylinderproben (KlZ) im Vergleich zu Grosszyylinderproben (GZ).....	22
Tabelle 11: Zweiseitiges 95%-Vertrauensintervall für Mittelwertsdifferenzen (zVI), bezogen auf Messreihen für Grobporen- und Gesamtporenvolumen; Daten von Messungen an den Sinterkörpern	26
Tabelle 12: Varianzkomponenten aus der hierarchischen Varianzanalyse für die Stufen Bestimmung, Beobachtung und Erhebung; Datengrundlage: Erhebungen 2001(I), 2002 und 2003.....	39
Tabelle 13: Zweiseitiges Vertrauensintervall von Erhebungsdifferenzen (zVI) für die bodenphysikalischen Parameter für die einzelnen Standorte und Bodentiefen des LAZBO-Pilotprojektes.....	43
Tabelle 14: Anzahl signifikanter Differenzen zwischen Erhebungswerten der untersuchten bodenphysikalischen Parameter an den zwei untersuchten Standorten und Tiefen.....	46
Tabelle 15: Erhebungswerte und deren Veränderungen in Prozent des Richtwertvorschlages für die bodenphysikalischen Parameter Lagerungsdichte (LD), Grobporenvolumen (GP_60) und dynamischer Eindringwiderstand (EdW).....	47

1 Einleitung und Fragestellung

In der mechanisierten Land- und Forstwirtschaft ist das Bodengefüge durch den Einsatz von Maschinen wiederholten mechanischen Belastungen ausgesetzt. Mit Blick auf die nachhaltige Nutzung der Ressource Boden sind Kenntnisse über die Auswirkungen mechanischer Belastung auf die bodenphysikalischen Eigenschaften unabdingbar. Im Rahmen der vorliegenden Eignungsprüfung bodenphysikalischer Methoden zur Langzeitbeobachtung stehen zum Einen Genauigkeit (mit den Aspekten „Präzision“ und „Richtigkeit“) und Aussagekraft der gewählten Parameter, Bestimmungsmethoden und Probenahmepläne im Blickpunkt, und zum Anderen ökonomische Kriterien. Den Untersuchungen lagen im Wesentlichen vier Kriterien der Langzeitbeobachtung mit folgenden speziellen Fragestellungen zugrunde (vgl. Teil 1):

1. Genauigkeit der Bestimmung

- Ergeben die Untersuchungen mit den beiden Probenahme- und Analyseverfahren „Kleinzylinder“ und „Grosszylinder“ vergleichbare Aussagen?
- Wie gross ist die Präzision der Bestimmungsmethoden?
- Wie gross sind die absoluten Messunsicherheiten?
- Wie stabil sind die Bestimmungen bzw. während welchem Lagerungszeitraum können die Proben als stabil betrachtet werden (Stichworte „Referenzstabilität“ bzw. „Lagerungseffekt“)?
- Wie gross ist die zeitliche Stabilität des Messsystems?

2. Genauigkeit der Beobachtungen bzw. der Erhebungen

- Gewährleistet der vorliegende Probenahmeplan eine reproduzierbare, flächentreue Datenerhebung (Stichworte „Robustheit Probenahmeplan“ und „Repräsentativität“)? Wie gross ist die räumlich bedingte Variabilität zwischen einzelnen Beobachtungen und Erhebungen?
- Hat die Bodenfeuchte zum Mess- bzw. Beprobungszeitpunkt einen Einfluss auf die Parameterwerte („Feuchteeffekt“)?
- Besteht ein direkter Zusammenhang zwischen sichtbaren Fahrspuren und den bodenphysikalischen Parameterwerten im Oberboden (10-15 cm) („Spureffekt“)?

3. Zeitliche Veränderung von physikalischen Bodeneigenschaften im Feld

- Wie gross ist die Variabilität zwischen jährlichen Erhebungen und wie ist diese im Hinblick auf eine Langzeitbeobachtung des Bodens einzuschätzen?
- Wie gross sind die Veränderungen zwischen jährlichen Erhebungen und wie sind diese aus statistischer Sicht („Signifikanz“) zu beurteilen?
- Welche Bedeutung („Relevanz“) haben die Veränderungen im Vergleich zum mittleren Erhebungswert über drei Jahre („Standortwert“) bzw. zu den vorgeschlagenen Richt- und Prüfwerten?

4. Praktikabilität und Aufwand

- Wie praktikabel sind die geprüften Methoden hinsichtlich Probenahme und Bestimmung für die Langzeitbeobachtung?
- Wie gross ist der Aufwand für eine Erhebung?

Ziel der Untersuchungen war es, geeignete Parameter, validierte Methoden und effiziente Probenahmepläne für die Langzeitbeobachtung bodenphysikalischer Eigenschaften zur Verfügung zu stellen, anhand derer Veränderungen der Gefügeeigenschaften einer Referenzfläche frühzeitig erkannt werden können.

2 Material und Methoden

2.1 Versuchsstandorte

Im Rahmen der bodenphysikalischen Untersuchungen wurden zwei Ackerstandorte in Kleinandelfingen ZH und Reckenholz ZH beprobt. Die mittleren Bodenkennwerte der Feinerdezusammensetzung sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Angaben zur örtlichen und zeitlichen Variabilität der bestimmten Bodenkennwerte sind in Anhang A zusammengestellt.

Tabelle 1: Bodenkennwerte der Versuchstandorte, Mittelwerte der Jahre 2001-2003

Standort-Nr.	Standort	Nutzung	Tiefe (cm)	pH-Wert (H ₂ O)	Körnung (Gew.%)			C _{org} (Gew.%)
					Ton	Schluff	Sand	
3	Kleinandelfingen ZH	AK	10-15	7.7	18	17	63	1.04
			35-40	7.9	18	17	64	0.48
5	Reckenholz ZH	AK	10-15	6.3	26	48	24	1.47
			35-40	6.5	30	47	22	0.65

Der Boden des Standortes 3 Kleinandelfingen ZH ist eine mässig tiefgründige alluviale Kalkbraunerde und mit der Bodenart „humusarmer bis schwach humoser sandiger Lehm“ ein Vertreter der leichten Böden. Der Boden des Standortes 5 Reckenholz ZH, eine tiefgründige pseudogleyige Braunerde, ist mit der Bodenart „schwach humoser schluffreicher Lehm bis toniger Lehm“ bei den mittelschweren bis schweren Böden einzuordnen. Aufgrund der standörtlichen Gegebenheiten und den Interaktionen mit den physikalischen Belastungen durch die Bewirtschaftung bestehen die grösseren Verdichtungsrisiken für den Boden des Standortes 5 Reckenholz ZH.

Beide Standorte weisen gemäss Klimaeignungskarte der Schweiz (EJPD & EVD, 1977) eine lange Vegetationsperiode von über 210 Tagen auf. Die Niederschlagsverhältnisse des Standortes 3 Kleinandelfingen ZH sind als mässig trocken (Klimazone A2), jene des Standortes 5 Reckenholz ZH als ausgeglichen (Klimazone A3) eingestuft.

Der Standort 3 Kleinandelfingen ZH wird mit der Fruchtfolge „Winterweizen (mit anschliessender Gründüngung) – Mais – Zuckerrüben – Sonnenblumen (oder Wintergetreide) – Mais“ von einem viehlosen Ackerbaubetrieb genutzt. Im Jahr 2001 wurde die letzte Kultur der fünfjährigen Fruchtfolge angebaut. Wegen der mehrheitlichen Minimalbodenbearbeitung, der Planung früher Erntezeitpunkte im Herbst sowie Befahrungen nur bei abgetrocknetem Bodenzustand kann die Bewirtschaftung dieses Standortes als bodenschonend bezeichnet werden.

Der Standort 5 Reckenholz ZH wird als Versuchsfläche der FAL mit der Fruchtfolge „Hafer – Winterweizen – Mais – Winter-/Sommerweizen – Kartoffeln – Winterweizen - Zuckerrüben/Raps – zweijährige Kunstwiese“ genutzt. 2001 wurde die zweite Kultur der neunjährigen Fruchtfolge angebaut. Die Bewirtschaftung ist als weniger bodenschonend einzustufen, da durch strengere Vorgaben zur Realisierung der geplanten Versuche nur eine geringe Flexibilität bei der Bewirtschaftungsplanung möglich ist (d.h. Bewirtschaftungsmassnahmen können häufig bei nicht optimalen Bedingungen durchgeführt werden) und der Boden intensiver bearbeitet wird (häufiger Pflugeinsatz).

2.2 Versuchsaufbau

2.2.1 Versuchsfläche und Probenahmeplan:

Grundlage des Probenahmeplanes bildeten die Annahmen, dass die Versuchsfläche bodenkundlich genügend homogen ist, und dass in der Versuchsfläche die typischen bewirtschaftungsbedingten mechanischen Belastungen repräsentativ auftreten.

Die gesamte **Versuchsfläche** hatte eine Grösse von 10 x 20 m, die Versuchs-Teilfläche der einzelnen Jahre eine von 10 x 5 m (Figur 1). Bei der räumlich-zeitlichen Strukturierung der Beprobungen und Messungen wird zwischen den Elementen „Beobachtungstreifen“, „Beobachtung“ und „Erhebung“ unterschieden.

- Jeder der vier „*Beobachtungstreifen*“ A, B, C und D umfasst in Bearbeitungsrichtung jeweils alle Probenahmeflächen („Blöcke“) des gesamten Versuchszeitraumes 2001-2003.
- Unter dem Begriff „*Beobachtung*“ (** in Figur 1) wird die einzelne Beprobung bzw. werden die Messungen in der Probenahmefläche („Block“) eines Beobachtungstreifens A, B, C oder D verstanden.
- Die „*Erhebung*“ (***) in Figur 1) fasst die vier einzelnen Beobachtungen eines Jahres aus den Beobachtungstreifen A, B, C und D zusammen.

Die vier Beobachtungstreifen wurden so ausgewählt, dass sie in Bearbeitungsrichtung in zufälligen Abständen von ca. 1.4 – 1.8 m verlaufen und repräsentative Stichproben einer zufälligen mechanischen Belastung (z.B. als Fahrspur) darstellen. Als Erhebung zusammengefasst sollten sie dagegen einen reproduzierbaren Ausschnitt der typischen mechanischen Belastungen abbilden. Wegen der stärker an den Untersuchungsmethoden orientierten Fragestellungen während des LAZBO-Pilotprojektes wurden eher weniger, dafür im Zeitverlauf vergleichbare Werte liefernde Probenahmeflächen ausgewählt. Der Abstand der Beobachtungstreifen zur äusseren Begrenzung der Versuchsfläche betrug jeweils ≥ 2 m, die Breite der einzelnen Beobachtungstreifen war 0.5 m.

Im Jahr 2001 wurde die Beprobung auf zwei voneinander unabhängigen Teilflächen durchgeführt, bezeichnet als „Erhebung 2001(I)“ und „Erhebung 2001(II)“. Im Jahr 2002 wurden an zwei bis vier verschiedenen Zeitpunkten mit Hilfe von Pandasondenmessungen Eindringwiderstände gemessen und der Gefügestand anhand von Spatenproben visuell beurteilt. Die entsprechenden Erhebungen werden als „Erhebung 2002(1)“ bis „Erhebung 2002(4)“ bezeichnet. Zusätzlich wurden in den Jahren 2001 und 2003 Pandasondenmessungen in einem Transekt quer zur Bearbeitungsrichtung durchgeführt.

Da bei volumenbezogenen bodenphysikalischen Untersuchungen im strengen Sinne

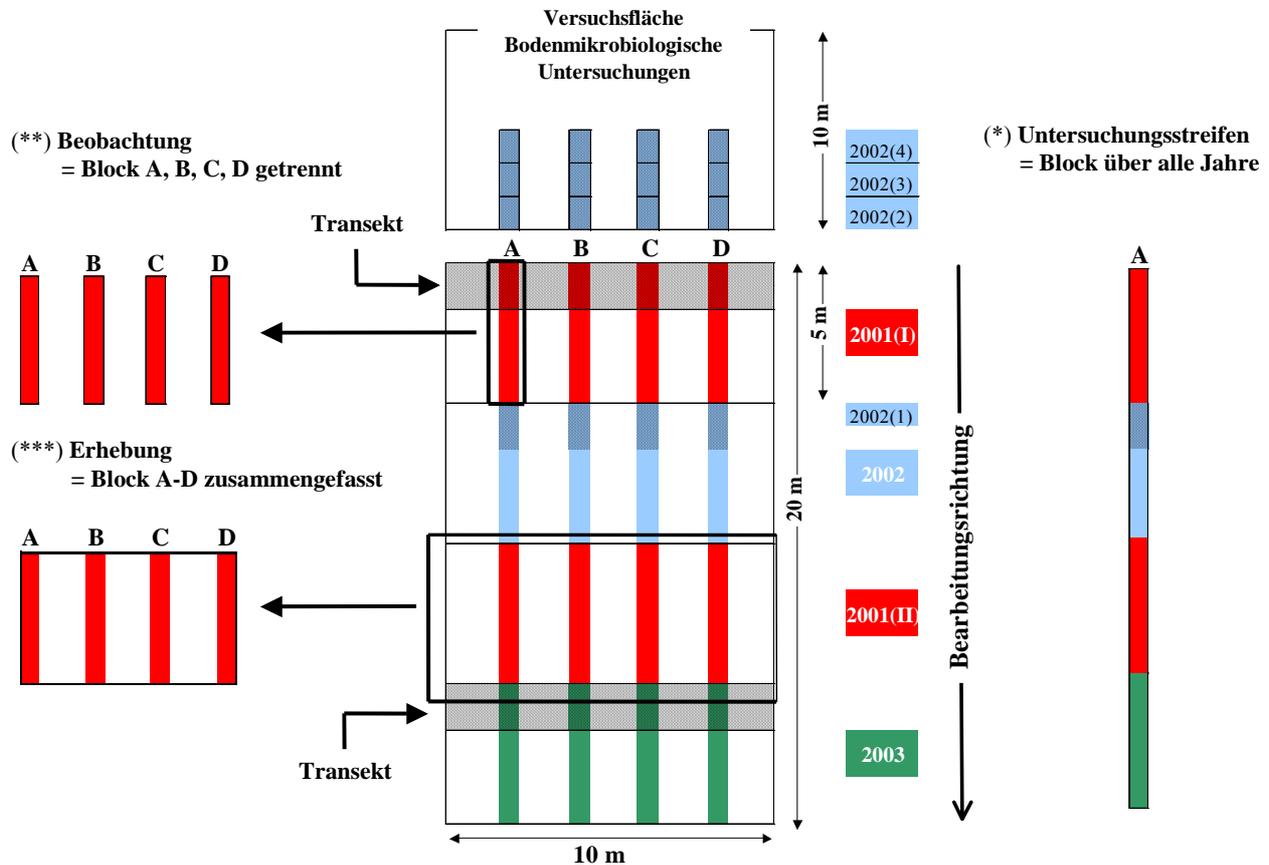
→ keine wiederholten Messungen möglich sind,

→ dasselbe Probenvolumen nicht mehrfach im selben Zustand untersucht werden kann, und

→ die Herstellung absolut einheitlicher Mischproben nicht möglich ist,

muss die Methodengenauigkeit („Präzision“ und „Richtigkeit/Stabilität“) bei der Validierung von

Referenzmethoden für bodenphysikalische Langzeitbeobachtungen völlig anders beurteilt werden als bei bodenchemischen oder bei bodenbiologischen Referenzmethoden.



Figur 1: Versuchsaufbau der bodenphysikalischen Untersuchungen

2.2.2 Versuchsfragen und ihre Beantwortung:

Für die Validierung des methodischen Vorgehens wurden die grundlegenden Versuchsfragestellungen anhand folgender Kenngrößen bzw. Versuchseinheiten überprüft:

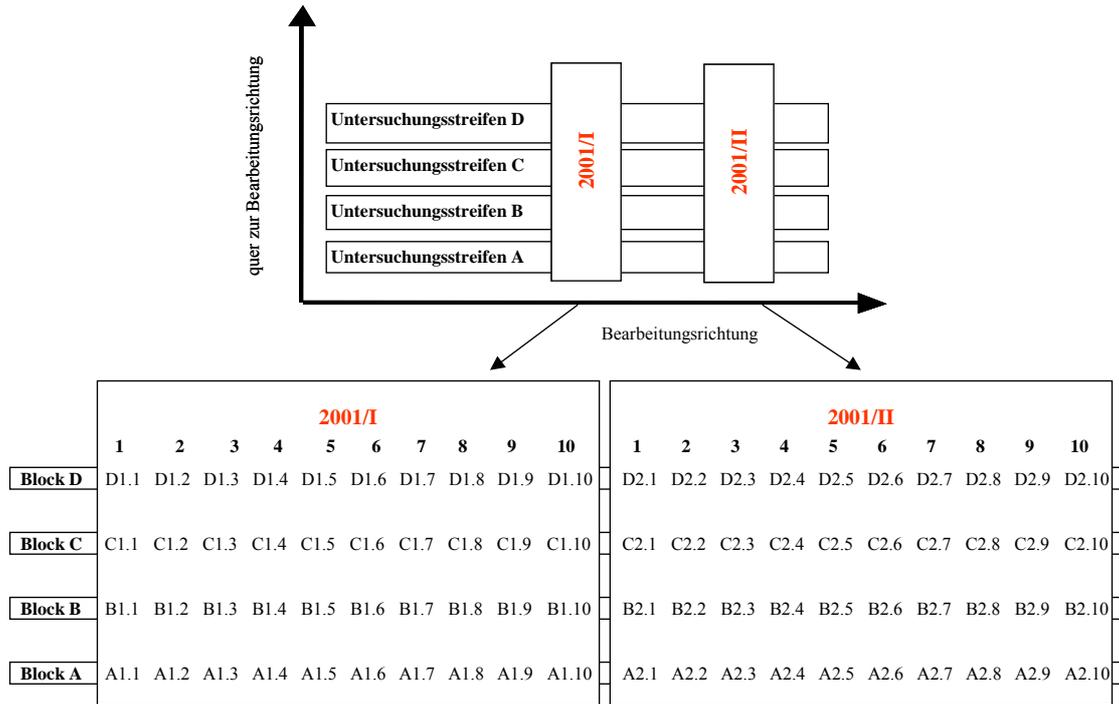
- **Genauigkeit der Bestimmungen:**

- **Präzision:** Variabilität der Parameterwerte innerhalb einer Beobachtung (A-D) in den Erhebungen 2001(I+II), 2002(1) und 2003 für Klein- und Grosszylinderuntersuchungen sowie in den Erhebungen 2001(I+II), 2002(1-4) und 2003 für Pandasondenmessungen und visuelle Gefügebeurteilungen.
- **Vergleich** der Parameterwerte aus den Bestimmungen mit Klein- und Grosszylindern.
- **Referenzstabilität:** Stabilität der Bestimmungsergebnisse von Klein- und Grosszylinderanalysen in der Erhebung 2002(1) nach unterschiedlichen Lagerungsdauern von 2, 5 und 8 Monaten.

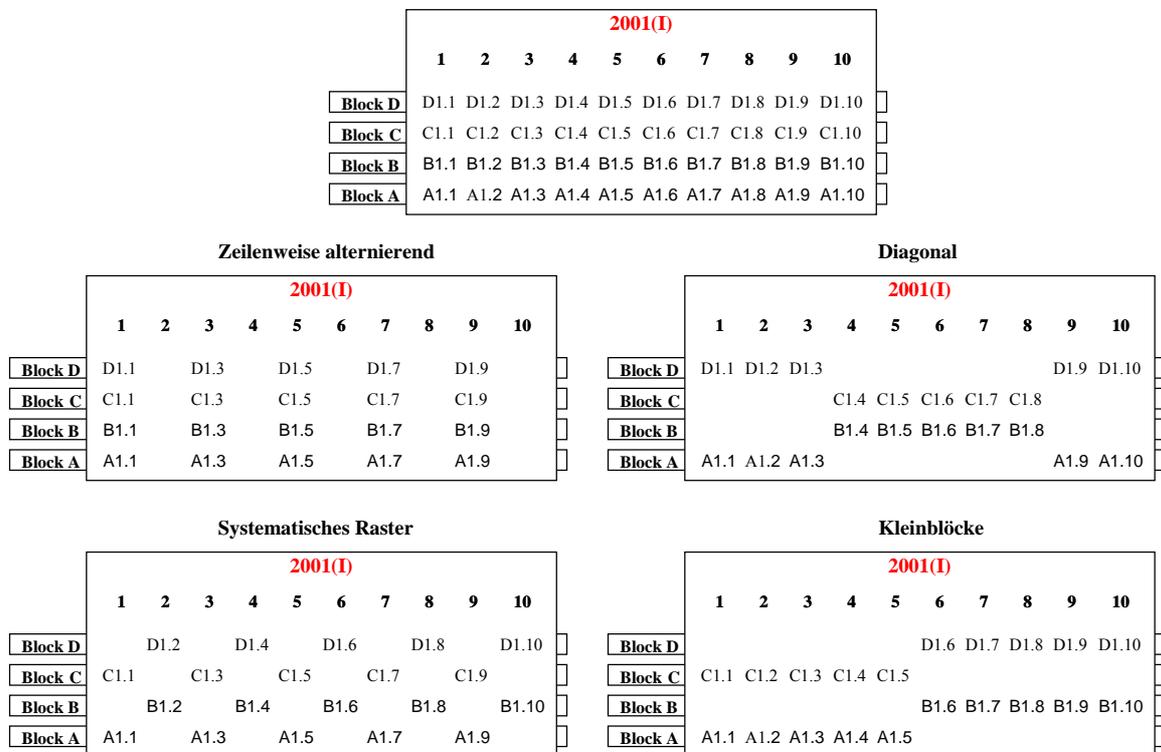
- **Stabilität des Messsystems** für Gesamt- und Grobporenvolumen anhand der Ergebnisse wiederholter Kontrollmessungen an einer stabilen Referenzmatrix.
- **Genauigkeit der Beobachtungen bzw. der Erhebungen:**
 - **Präzision einer Erhebung:** Variation der Beobachtungsmittelwerte innerhalb einer Erhebung.
 - **Robustheit Probenahmeplan:** Räumliche Variabilität zwischen den Parameterwerten der Beobachtungen A-D aus den Erhebungen 2001(I) und 2001(II) sowie zwischen den Erhebungswerten 2001(I) und 2001(II).
 - **Einfluss unterschiedlicher Probenahmepläne** auf den Parameterwert einer Erhebung am Beispiel von unterschiedlich ausgewählten Zylinder-Stichproben aus den Erhebungen 2001(I) und 2001(II) („virtuelle Probenahmen“, siehe Figur 3).

Spezielle Abklärungen:

- **Repräsentativität der Versuchsfläche:** Vergleich der Lageschätzung für den Eindringwiderstandswert aufgrund einer Stichprobe aus 4 Beobachtungen und aufgrund von 20 Beobachtungen in einem Transekt.
- **Einfluss des Erhebungszeitpunktes (bzw. des Bodenzustandes) bei Feldmethoden:** Vergleich der Parameterwerte aus Pandasondenmessungen und visuellen Gefügebeurteilungen bei unterschiedlicher Bodenfeuchte an 2 bis 4 Erhebungszeitpunkten 2002.
- **Zusammenhang zwischen Belastung und Parameterwert („Spureffekt“):** Vergleich der Parameterwerte im Oberboden (10-15 cm) zwischen Spur- und Nichtspur-Bereichen in den Erhebungen 2001(I) und (II).
- **Langzeitbeobachtung: Zeitliche Veränderung von Bodeneigenschaften im Feld**
 - Vergleich der Parameterwerte aus den Erhebungen 2001(I), 2002 (1) und 2003: Bestimmung der **zeitlichen Verläufe** und Beurteilung der Veränderungen bezüglich statistischer **Signifikanz**, auch hinsichtlich der Lage relativ zum mittleren Standortwert. Beurteilung der funktionellen **Relevanz** der Parameterwerte und ihrer Veränderungen für die Parameter Lagerungsdichte, Grobporenvolumen und Eindringwiderstand mit Bezug auf entsprechende Richtwert-Vorschläge.
- **Praktikabilität und Aufwand**
 - Sammeln von Erfahrungen bezüglich Praktikabilität und Aufwand für die Erhebung (Probenahme und Bestimmung) von bodenphysikalischen Eigenschaften an zwei unterschiedlichen Standorten.



Figur 2: Genauigkeit der Beobachtungen bzw. der Erhebungen: Realisierte Probenahme für die bodenphysikalischen Untersuchungen 2001. Codes entsprechen der Lage einzelner Zylinderproben in den realisierten Beprobungen bzw. Erhebungen.



Figur 3: Genauigkeit der Erhebungen: Verschiedene Probenahmepläne „virtueller Beprobungen“, basierend auf der realisierten Probenahme für die bodenphysikalischen Untersuchungen 2001.

2.3 Probenahme

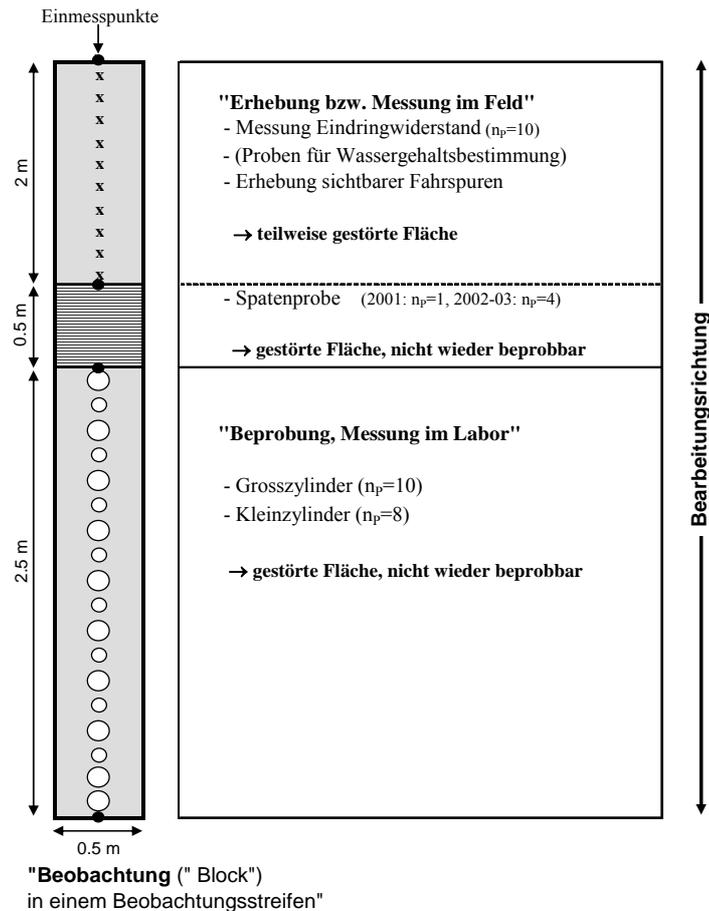
Die Probenahme innerhalb des gewählten Probenahmeplanes erfolgte unter der Annahme, dass die physikalischen Eigenschaften des Bodens zum Zeitpunkt der Probenahme in Bearbeitungsrichtung (innerhalb der einzelnen Beobachtungstreifen) vergleichbar sind, d.h. dass in Bearbeitungsrichtung einerseits eine geringe Heterogenität des Bodens auftritt und andererseits eine homogene Bewirtschaftungssituation vorliegt. Die jährlichen Untersuchungen der vier einzelnen Beobachtungen A-D sollten somit die zeitliche Veränderung der bodenphysikalischen Eigenschaften aufgrund von vier unterschiedlichen Belastungs- und Regenerationssituationen repräsentieren. Gleichzeitig würde die Erfüllung dieser Annahmen innerhalb der einzelnen Beobachtungstreifen einen Methodenvergleich ermöglichen.

Entsprechend den Voraussetzungen und Vorsichtsmassnahmen für bodenphysikalische Beprobungen wurden ungestörten Bodenproben gemäss den Referenzmethoden RM-ERL-2 und PYZYL-PN der Eidg. landwirtschaftlichen Forschungsanstalten FAL, FAW und RAC (BGS, 2004) entnommen. Die Anordnung der verschiedenen Probenahme- und Messsysteme ist dem Probenahmeplan in Figur 4 zu entnehmen.

Für die Probenahme wurden folgende Geräte bzw. Hilfsmittel eingesetzt:

- **Kleinzylinder:** Metallzylinder für Desorptionsanalysen mit 100 cm^3 Volumen, Abmessungen $55 \times 42 \text{ mm}$ (Durchmesser x Höhe).
- **Grosszylinder:** Metallzylinder für Oedometeruntersuchungen mit 236 cm^3 Volumen, Abmessungen $100 \times 30 \text{ mm}$ (Durchmesser x Höhe).
- **Pandasonde (Panda = Pénétrromètre Automatique Numérique Dynamique Assisté par ordinateur):** Schlagpenetrometer zur Messung des dynamischen Eindringwiderstandes der Firma SOL SOLUTION, Riom, France. Verwendete Sondespitze: Querschnittfläche 4 cm^2 mit Konuswinkel von 90° . Bei den Messungen wurde ein Minimalabstand von 20 cm zwischen den einzelnen Messungen eingehalten. Die Messungen erfolgten gemäss dem Methodenbeschrieb des Fachberichtes der FaBo Zürich (FaBo ZH, 1998).
- **Spaten.:** Flacher Torfspaten zur Entnahme von ungestörten Gefügeproben für die visuellen Gefügebeurteilungen.

Die aktuelle mittlere Lage der Bodenoberfläche als Ausgangsniveau für die Festlegung der Beprobungstiefe wurde mit einer 1 m langen Holzlatte quer zur Bearbeitungsrichtung festgelegt, so dass das Bezugsniveau für die Tiefenbestimmungen nicht einem allfälligen Spurgrund, sondern der umliegenden nicht befahrenen Bodenoberfläche entsprach.



Figur 4: Mess- und Probenahmeplan der jährlichen bodenphysikalischen Untersuchung einer Beobachtung (eines „Blockes“)

Der Boden wurden in folgenden **Tiefen** (bezogen auf die aktuelle mittlere Bodenoberfläche, siehe oben) beprobt:

- Klein- und Grosszylinder: 10-15 cm („Oberboden“), 35-40 cm („Unterboden“)
- Pandasonde: kontinuierliche punktuelle Messung von 0-60 cm, Berechnung des mittleren Eindringwiderstandes für die Bodenschichten 10-15 cm und 35-40 cm
- Gefügeprobe: 0-12 cm, 12-24 cm, 24-36 cm und 36-48 cm; dabei wurden die Probtiefe 12-24 cm den Oberbodenproben 10-15cm und die Probtiefe 36-48 cm den Unterbodenproben 35-40cm zugeordnet.

In einem Transekt wurde 2001 (und 2003 nur Standort 3) der Eindringwiderstand quer zur Bearbeitungsrichtung mit der Pandasonde in 16-27 Beobachtungen gemessen.

Fürs Ansprechen und Beurteilen des Bodengefüges mit visuellen Mitteln wurden im Jahr 2001 eine und in den Jahren 2002-03 jeweils vier Gefügeproben pro Beobachtung entnommen.

Als **Zeitpunkt** für die jährliche Probenahme wurde das Frühjahr bei Vegetationsbeginn und abgetrocknetem Bodenzustand festgelegt. Grund dafür war die Annahme, dass die Beeinflussung der bodenphysikalischen Eigenschaften durch kurzzeitige, kulturspezifische Belastungen zu diesem Zeitpunkt am geringsten ist und kulturspezifische Einflüsse des Vorjahres durch natürliche regene-

relative Prozesse bis zu diesem Moment am stärksten ausgeglichen worden sind (vgl. Teil I, Kapitel 2.2). In dieser Jahreszeit sind die Beprobungsbedingungen in den oberen Bodenschichten zudem meist günstig und relativ einheitlich; ausserdem verändert sich der Bodenwasserhaushalt wegen der noch geringen Transpiration nur langsam, so dass die Probenahme bei relativ einheitlichen, günstigen Bedingungen erfolgen kann und ausserdem einfacher planbar ist.

Die aktuelle Kultur und der aktuelle Bodenzustand der Versuchsflächen zum Zeitpunkt der Probenahmen und Messungen ist in der nachfolgenden Tabelle 2 zusammengestellt; Angaben zum Datum der Probenahmen sowie zu den entsprechenden mittleren Wassergehalten (WG, Mittelwert der Beobachtungen A-D) sind Tabelle 3 zu entnehmen

Tabelle 2: Aktuelle Kultur und Bodenzustand zum Zeitpunkt der Probenahmen und Messungen („Erhebungen“) 2001-2003

Erhebung (Termin)	Kultur	Bodenzustand
Standort 3 Kleinandelfingen ZH		
2001	brach vor Maissaat	Sonnenblumenstoppeln bearbeitet
2002 (1+2)	Winterweizen	abgesetzter Boden
2002 (3+4)	brach nach Winterweizen	Getreidestoppeln, abgesetzter Boden
2003	brach vor Maissaat	Winterweizenstoppeln, Minimalbodenbearbeitung im Vorjahr
Standort 5 Reckenholz ZH		
2001	Winterweizen	abgesetzter Boden
2002 (1+2)	brach vor Maissaat	abgesetztes Saatbett
2002 (3)	Brach nach Maisernte	Maisstoppeln, abgesetzter Boden
2003	Sommerweizen	schlecht abgesetzter Boden

Tabelle 3: Datum der Probenahmen sowie gravimetrische Wassergehalte (WG) bei den bodenphysikalischen Untersuchungen der Jahre 2001-2003; kursiv: Ausschliesslich Pandasondenmessungen und visuelle Gefügebeurteilungen.

Standort	Klein- und Grosszylinder, Pandasonde, Spaten								
	Datum	2001		2002			2003		
		WG (Gew.%)		WG (Gew.%)			WG (Gew.%)		
		10-15 cm	35-40 cm	Datum	10-15 cm	35-40 cm	Datum	10-15 cm	35-40 cm
3 Kleinandelfingen ZH	03.04.	21%	17%	14.03.	19%	16%	27.03.	20%	16%
				15.04.	22%	16%			
				13.08.	20%	16%			
				03.10.	19%	17%			
5 Reckenholz ZH	23.05.	28%	23%	13.03.	30%	24%	19.05.	25%	21%
				08.04.	29%	26%			
				21.11.*	*	*			

* Beim Standort 5 konnte wegen ungünstiger Verhältnisse (plastischer Boden infolge hoher Bodenfeuchte) am 21.11. nur Eindringwiderstandsmessung durchgeführt werden (keine Gefügebeurteilung und WG-Bestimmung möglich).

Die Ergebnisse der Erhebung von sichtbaren Fahrspuren in den einzelnen Beobachtungen und in der gesamten Versuchsfläche sind als Hinweis auf kürzlich erfolgte mechanische Belastungen des Bodens in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Auftreten und Flächenanteil sichtbarer Fahrspuren zum Zeitpunkt der Erhebungen

Erhebung	Anzahl Beobachtungen mit Fahrspuren / (Beobachtungen mit Fahrspuren)	Vergleich zwischen Stichprobe aus Beobachtungen A-D vs. Versuchsfläche mit %-Anteil Fahrspuren / (mittlere Spurtiefe in cm)	
		Beobachtungen A-D	Versuchsfläche
Standort 3 Kleinandelfingen ZH			
2001	2 / (A, D)	50% / (4.75cm)	45.8% / (4.5cm)
2002 (1+2)	0	0% / (0cm)	0% / (0cm)
2002 (3+4)	3 / (A, C, D)	75% / (2.3cm)	29.5% / (2.5cm)
2003	0	0% / (0cm)	0% / (0cm)
Standort 5 Reckenholz ZH			
2001	1 / (D)	25% / (4cm)	9.1% / (5.3cm)
2002 (1+2)	0	0% / (0cm)	0% / (0cm)
2002 (3)	1 / (A)	25% / (4cm)	21.7% / (6.3cm)
2003	0	0% / (0cm)	0% / (0cm)

Unmittelbar nach ihrer Entnahme wurden die Klein- und Grosszylinderproben bis zu ihrer Analyse jeweils mit Verdunstungsschutz bei 5° C im Kühlraum gelagert, entsprechend dem in der Referenzmethode PYZYL-PA der Eidg. landw. Forschungsanstalten {FAL, 1998 #279} beschriebenen Vorgehen.

2.4 Analysemethoden

Parameterbestimmung aus Zylinderproben:

An jeder einzelnen der ungestörten Zylinderproben wurden jeweils möglichst viele bodenphysikalische Parameter bestimmt. Der Untersuchungsablauf, getrennt für Klein- und Grosszylinder, sowie die untersuchten Parameter sind Figur 5 zu entnehmen. Da die Bodenproben der Klein- und Grosszylinder durch verschiedene Personen mit unterschiedlichen Untersuchungsgeräten in verschiedenen Labors untersucht wurden, ergibt der Vergleich der Untersuchungsergebnisse für Klein- und Grosszylinder nicht nur Aussagen über den Einfluss unterschiedlicher Probengrößen auf die Bestimmungsergebnisse; zusätzlich entspricht diese Konstellation einem Systemvergleich von Bestimmungsmethoden und ermöglicht damit einen unabhängigen Vergleich der absolut bestimmten Parameterwerte im Sinne einer Genauigkeitsprüfung.

Kleinzylinder		Grosszylinder	
Arbeitsschritt	Parameter	Arbeitsschritt	Parameter
Präparation		Präparation	
Wassersättigung		Wassersättigung	
Desorption 30 hPa	→ GGP 30	Desorption 60 hPa	→ GGP 60
Luftdurchlässigkeit 30 hPa	→ LPERM 30, pLP 30	Luftdurchlässigkeit 60 hPa	→ LPERM 60, pLP 60
Desorption 60 hPa	→ GGP 60	Drucksetzung	→ VB_{Casa}, VB_{min}
Luftdurchlässigkeit 60 hPa	→ LPERM 60, pLP 60	Trocknung, Wägung	→ LD
Desorption 100 hPa	→ GGP 100	Wasserpyknometer	→ GPV
Desorption 1000 hPa	→ GMP		
Desorption 15000 hPa	→ MMP, FMP		
Trocknung, Wägung	→ LD, FP		
Wasserpyknometer	→ GPV		

Figur 5: Untersuchungsablauf und untersuchte bodenphysikalische Parameter bei Klein- und Grosszylinderproben

Die eingesetzten Labormethoden zur Bestimmung von Gefügeparametern an ungestörten Zylinderproben sind Referenzmethoden der Eidg. landw. Forschungsanstalten (FAL et al., 1998) bzw. Forschungsmethoden der Agroscope FAL Reckenholz. Folgende **Labormethoden** wurden eingesetzt:

- Lagerungsdichte - **LD**: PVZYL-D, Referenzmethode der Eidg. landw. Forschungsanstalten.
- Gesamtporenvolumen - **GPV**: PV-DR, Referenzmethode der Eidg. landw. Forschungsanstalten.
- Grob-, Mittel- und Feinporenvolumen - **GGP 30, GGP 60, GGP 100; GMP, MMP + FMP, FP**: PYZYL-P, Referenzmethode der Eidg. landw. Forschungsanstalten. Die verwendeten Bezeichnungen für die Porengrössenklassen sowie die entsprechenden Saugspannungspunkte und Äquivalent-Porendurchmesser sind in Tabelle 5 zusammengestellt.
- Luftpermeabilität - **LPERM30, LPERM60; pLP30, pLP60**: Luftdurchlässigkeit der Bodenproben gemäss Forschungsmethode der Agroscope FAL Reckenholz, die auf einem Methodenvorschlag der Firma EIJELKAMP basiert. Durch die luftgefüllten Poren einer auf eine bestimmte Saugspannung konditionierten Bodenprobe wird mit geringem Überdruck (2 hPa) ein laminarer Luftstrom geführt und das pro Zeiteinheit durchströmende Luftvolumen bestimmt. Berechnet wird die intrinsische Luftpermeabilität der Matrix (LPERM); der Parameterwert kann auch als dekadischer Logarithmus angegeben werden (pLP).

- Vorbelastung - VB_{Casa} , VB_{min} : Bestimmen der mechanischen Stabilität einer Bodenprobe im Drucksetzungsversuch gemäss einer Forschungsmethode der Agroscope FAL Reckenholz. Möglichst ungestörte Bodenproben werden auf eine bestimmte Saugspannung konditioniert und anschliessend im Oedometer in 15 Druckstufen sukzessive stärker bis maximal 1000 kPa belastet. Dabei wird laufend die Setzung der Proben gemessen. Aus den resultierenden halblogarithmischen Drucksetzungskurven werden der Kennwert „Vorbelastung nach Casagrande“ (VB_{Casa}) bestimmt bzw. die „minimale Vorbelastung“ (VB_{min}) berechnet.

Tabelle 5: Bezeichnungen der Porengrössenklassen, zugehörige Saugspannungspunkte und entsprechende Äquivalentdurchmesser der kleinsten gerade noch entwässerten Poren

Porengrössenklasse	Saugspannungspunkt [hPa]	Äquivalentdurchmesser [μ m]
Grobe Grobporen 30 hPa (GGP30)	< 30	> 100
Mittlere Grobporen 60 hPa (GGP60)	30 – 60	100 - 50
Feine Grobporen 100 hPa (GGP100)	60 – 100	50 - 30
Grobe Mittelporen (GMP)	100 - 1'000	30 - 3
Mittlere und feine Mittelporen (MMP+FMP)	1'000 - 15'000	3 - 0.2
Feinporen (FP)	> 15'000	< 0.2

Für die Untersuchungen im LAZBO-Pilotprojekt wurden folgende Porengrössenklassen zusammengefasst (Tabelle 6):

Tabelle 6: Verwendete Porengrössenklassen im LAZBO-Pilotprojekt - Zusammenfassung der Porenklassen

Zylinderart	Porengrössenklasse LAZBO	Saugspannung [hPa]	Porengrössen
Kleinzylinder	Grobporen 30 (GP 30)	0 – 30	Grobe Grobporen (GGP 30)
Grosszylinder Kleinzylinder	Grobporen 60 (GP 60)	0 – 60	Grobe Grobporen (GGP 30) Mittlere Grobporen (GGP 60)
Kleinzylinder	Grobporen 100 (GP 100)	0 – 100	Grobe Grobporen (GGP 30) Mittlere Grobporen (GGP 60) Grobe Grobporen (GGP 100)
Kleinzylinder	Mittelporen (MP)	100 – 15'000	Grobe Mittelporen (GMP) Mittlere und feine Mittelporen (MMP+FMP)
Kleinzylinder	Feinporen (FP)	> 15'000	Feinporen (FP)

Die Bestimmung der Referenzstabilität des Desorptions-Messsystems erfolgte mit Hilfe von Referenzmatrizen aus versinterten Messingkügelchen mit definierten Durchmessern. Aufgrund ihrer Herstellung weisen diese Referenzmatrizen in Zylinderprobengrösse eine stabile Anordnung ihrer Hohlräume auf und ermöglichen dadurch wiederholte reproduzierbare Messungen. Die Qualitätssicherung der Messsysteme für Lagerungsdichte, Porengrössen- und Vorbelastungsbestimmung basiert auf regelmässigen Eichungen der Längen-, Gewichts- und Druckmess-Einrichtungen.

Bestimmung von bodenphysikalischen Parametern mit Feldmethoden:

- Messung des **dynamischen Eindringwiderstandes (Edw)** mittels Penetrometer (Pandasonde). Die Methode ist in Fachberichten der Fachstelle Bodenschutz des Kantons Zürich (FaBo ZH, 1997; FaBo ZH, 1998; FaBo ZH, 1999) beschrieben.

Mit einem normierten Hammer wird die Sondenspitze in den Boden getrieben; dabei wird der dynamische Eindringwiderstand q_d laufend von einem Datenlogger aufgezeichnet. Zur Erreichung einer guten Auflösung in tieferen Bodenschichten wurde eine Eindringtiefe von ca. 2 cm pro Hammerschlag angestrebt. Die Messungen erfolgten im punktuellen Modus.

Der dynamische Eindringwiderstand q_d der Sondenspitze [Pa] wird gemäss (1) für jede Eindringtiefe e vom Datenlogger berechnet, wobei, m_H die Hammermasse [kg], v die gemessene Schlaggeschwindigkeit [ms^{-1}], A die Konusoberfläche der 4 cm^2 -Sondenspitze [m^2], e die Eindringtiefe pro Hammerschlag [m] und $m_{G,S}$ die Masse des Gestänges und der Sondenspitze ist:

$$q_d = \frac{m_H v^2}{2 A e} \frac{m_H}{m_H + m_{G,S}} \quad (1)$$

Sämtliche Messdaten für Eindringwiderstand q_d mit der Einheit Megapascal [MPa] und Messtiefen h [m] wurden vom Datenlogger auf den Rechner übertragen und weiterverarbeitet.

Aus den ca. 30 Messdaten einer Messung von 0-60 cm wurden für die Tiefenbereiche 10-15 cm und 35-40 cm die nach Eindringtiefe e gewichteten mittleren Eindringwiderstände pro Tiefenbereich berechnet.

- Mit der Methode der visuellen Gefügebeurteilung (Nievergelt et al., 2002) wurden die Parameter „mittlerer gewichtete Aggregatdurchmesser“ **mDm** [mm], und die „gewichtete pflanzenphysiologische Gefügebewertung“ mit Korrekturfaktor für den Zusammenhalt des Gefüges **BewmK** und ohne Korrekturfaktor **BewoK** bestimmt. Die visuelle Gefügeansprache wurde wie folgt durchgeführt:
 - a) Die Horizontproben wurden aus einem Meter Höhe abgeworfen, anschliessend erfolgte die Beurteilung des Gefügezusammenhaltes [Klassen 1-5],
 - b) Das Abwurfmaterial wurde mit einem Siebsatz in die 7 Grössenfraktionen 0,2-2mm, 2-5mm, 5-10mm, 10-20mm, 20-50mm, 50-100mm und >100m aufgeteilt, gewogen und die Gewichtsanteile [%] für jede der 7 Fraktionsklassen (m_1, m_2, \dots, m_7) bestimmt,
 - c) Mit Bildtafeln wurde für jede Fraktionsklasse der Aggregattyp [12 Typen] und schliesslich
 - d) die Festigkeit der Aggregate [Klassen 1-5] bestimmt.

Aus den Gewichtsanteilen der 7 Fraktionsklassen wurde der mittlere gewichtete Aggregatdurchmesser mDm [mm] berechnet, und aus den Einzelbewertungen der Fraktionen [Klassen -1 bis 14] nach Aggregattyp und -grösse die gewichtete pflanzenphysiologische Bewertung der gesamten Horizontprobe (BewmK, BewoK) bestimmt (Nievergelt et al., 2002). Die pflanzenbauliche Qualität wird dabei für die Klassen wie folgt beurteilt: sehr hoch ≥ 8 , hoch 6-7, mittel 3-5, gering ≤ 2 (Nievergelt et al., 2002).

2.5 Richt- und Prüfwerte

Massgebend für den physikalischen Bodenschutz in der Schweiz sind das Umweltschutzgesetz von 1983 (USG 83) sowie die Verordnung über Belastungen des Bodens von 1998 (VBBo 98). Als physikalische Belastungen des Bodens werden in der VBBo 98 künstliche Veränderungen der Struktur, des Aufbaues oder der Mächtigkeit des Bodens bezeichnet. Im Zusammenhang mit der landwirtschaftlichen Nutzung des Bodens wird explizit vorgeschrieben, dass Verdichtungen und andere Strukturveränderungen vermieden werden müssen, die zu einer langfristigen Gefährdung der Bodenfruchtbarkeit führen. Konkrete Richtwerte für die Beurteilung physikalischer Bodenbelastungen sind im Anhang der VBBo 98 nur hinsichtlich der Erosion auf Ackerflächen zu finden. Für die im Rahmen des LAZBO-Pilotprojektes untersuchten bodenphysikalischen Parameter gibt es dementsprechend keine rechtsverbindlichen Richtwert-Vorgaben, so dass die Frage, nach welchem System Parameter ausgewählt und bewertet werden sollen, nicht aufgrund konkreter gesetzlicher Vorgaben beantwortet werden kann. Weder sind für einzelne bodenphysikalische Kennwerte Richt- oder Sanierungswerte vorgegeben, noch existieren Interpretationsschemata, die Bodenbelastungen aufgrund von Richtwertüberschreitungen einzelner oder mehrerer Kennwerte definieren würden.

Die Arbeitsgruppe „Richtwerte“ der Bodenkundlichen Gesellschaft der Schweiz (Plattform Bodenschutz/BGS) haben Vorschläge möglicher Richt- und Prüfwerte für die Parameter „effektive Lagerungsdichte“, „Groporenvolumen“ sowie „dynamischer Eindringwiderstand“ erarbeitet {BGS, 2004 #301}. Diese werden als Bezugsgrösse für die Interpretation der Ergebnisse aus den bodenphysikalischen Untersuchungen herangezogen. Aus dem Richtwert-Vorschlag für die effektive Lagerungsdichte wurde zudem ein Richtwert für das Gesamtporenvolumen abgeleitet.

Tabelle 7: Vorschläge für Richt- und Prüfwerte bodenphysikalischer Parameter {BGS, 2004 #301}

Parameter	Richtwert	Prüfwert
Effektive Lagerungsdichte (g cm^{-3})	1.70	1.85
Groporenvolumen (Vol.% bei 60 hPa)	7.0	5.0
Dynamischer Eindringwiderstand (MPa)	2.0	3.5

2.6 Statistische Auswertung

Die Statistische Auswertung erfolgte nach den in Teil 1 Kapitel 3 beschriebenen Methoden. Nachfolgend einige Erläuterungen zu den verwendeten Methoden:

Die Grunddaten aller Parameter einer Beobachtung wurden zuerst einem **Ausreissertest** nach Dixon (Rey & Kreuter, 1986) unterzogen; auf dem 5%-Signifikanzniveau als Ausreisser bestimmte Werte sind anschliessend eliminiert und für die weiteren Auswertungen nicht mehr berücksichtigt worden.

Um die **Grösse von Streuungskomponenten** zu beschreiben und die **statistische Signifikanz von Faktoreffekten** zu prüfen, sind für alle bestimmten Parameterwerte mit Hilfe eines hierarchischen Modells Varianzanalysen durchgeführt worden. Dabei wurden die Faktoren teilweise als fix vorgegeben (Standorte, Bodentiefen, Lagerungsdauer), teilweise als zufällig gewählt betrachtet (Jahre, Feldwiederholungen, wiederholte Beprobungen bzw. Messungen); entsprechend sind die Prüfgrö-

der für die Testgrößen-Berechnung (F-Test) gewählt worden. Die Berechnungen wurden gemäss dem Modell des „nested design“ mit dem Modul „General Linear Models“ der Software STATISTICA, Version 6.1, durchgeführt. Zur Varianzanalyse gehörte auch die Überprüfung ihrer Gültigkeitsvoraussetzungen „Homogenität der Varianzen“, „Normalität der Stichproben mit QQ-Plot“ und „Unabhängigkeit von Mittelwerten und Varianzen“.

Parallel dazu wurde die Robustheit dieser auf der Normalverteilungsannahme beruhenden Varianzanalysen und Mittelwertgruppierungen geprüft, indem alle Verfahrensvergleiche auch noch mit einem verteilungsfreien Mehrfachvergleich unabhängiger Gruppen beurteilt wurden, der auf dem Kruskal-Wallis Rangtest und dem Median-Test basiert; für diese Auswertungen wurde das Modul „Nonparametric Statistics“ der Software STATISTICA, Version 6.1, verwendet.

Aufgrund der Streuungskomponenten aus den Varianzanalysen wurden für die Auswertung Kapitel 3.3.2 (Robustheit Probenplan) Mittelwertvergleiche nach der Gruppierungsmethode von Tukey (1949) durchgeführt.

Für die Beurteilung der **Präzision** der Bestimmungen (Variation der Bestimmungen innerhalb der Beobachtungen), der Präzision der Erhebungen (Variation der Beobachtungen) wurde die statistische Grösse „Variationskoeffizient“ (Relation zwischen der Standardabweichung und dem Mittelwert) verwendet. Zur grafischen **Darstellung von Mittelwertvergleichen** wurde das „95%-Vertrauensintervall des Mittelwertes“ (entsprechend dem 95% Wahrscheinlichkeitsband, das den wahren Mittelwert μ enthält) verwendet. Als Signifikanzgrenzen von Erhebungsdifferenzen wurde das zweiseitige Vertrauensintervall von Mittelwertsdifferenzen (zVI) aus den Varianzkomponenten Bestimmungen und Beobachtungen berechnet (vgl. Teil1, Kapitel 3.3).

Die **Methodensensitivität bzw. –relevanz** wurde aufgrund einer Gegenüberstellung zwischen der Breite des 95%-Vertrauensintervalles von Mittelwertsdifferenzen (zVI) und dem Referenzwert (Richtwertvorschlag) für den entsprechenden Parameter beurteilt. Weitere Hinweise auf die Methodensensitivität wurden aus dem notwendigen Stichprobenumfang zur Sicherstellung einer gewünschten Trennschärfe (bezüglich eines absoluten Referenzwertes bzw. zur Unterscheidung zweier aufeinander folgender Stichproben) bei gegebener Streuung abgeleitet.

3 Ergebnisse

3.1 Statistische Kenngrößen

3.1.1 Verteilung

Mit den Daten des Erhebungsjahres 2001 wurde eine Verteilungsprüfung für die Stichproben innerhalb einer Erhebung durchgeführt (siehe Teil 1, Kapitel 3.1). Die Analyse zeigte, dass für die bodenphysikalischen Parameter innerhalb einer Beobachtung eine Normalverteilung (bzw. für den Parameter Luftpermeabilität eine Log-Normalverteilung) angenommen werden kann.

3.1.2 Prüfung auf Ausreisser

Bei den bodenphysikalischen Parametern wurden, wie die Zusammenstellung in Tabelle 8 zeigt, zwischen 1% und maximal 5% der Bestimmungswerte als Ausreisser entfernt. Es fällt auf, dass bei den Parametern der visuellen Gefügebewertung, trotz strengerer Kriterien ($n_p=4$), ein über doppelt so hoher Anteil als Ausreisser detektiert wurde.

3.1.3 Deskriptive Statistik - Bereinigte Datensätze

In Tabelle 9 sind für die einzelnen Parameter pro Standort die folgenden statistischen Kenngrößen der Erhebungen 2001 (I), 2002(1) und 2003 aufgeführt: mittlerer Erhebungswert über drei Jahre („mittlerer Standortwert“), Anzahl Stichproben (n), Variationskoeffizienten (VK%) sowie Minimal- (Min) und Maximalwerte (Max) aller Stichproben auf den einzelnen Hierarchiestufen (Erhebung, Beobachtung, Bestimmung).

Die Zusammenstellung zeigt eine generell grosse relative Streuung (VK) der Parameterwerte; diese sind für die Grobporen-Parameter (GP 30, GP 60 und GP 100) am grössten. Dagegen weisen Lagerungsdichte (LD) und Gesamtporenvolumen (GPV) Variationskoeffizienten unter 9% auf. Die Streuungen und die Spanne der Minimal- und Maximalwerte sind zum Teil je nach Standort und Tiefe sehr unterschiedlich.

Tabelle 8: Anzahl Ausreisser

	Anzahl Beobachtungen n_B	Anzahl Werte N	Ausreisser			Anzahl werte N = Anzahl Bestimmungen n_p pro Beobachtung
			Anzahl Ausreisser	Ausreisser pro Beobachtung (absolut)	Ausreisser pro Beobachtung (in %)	
Pandasonde						
Dynamischer Eindringwiderstand	1328	13527	248	0.19	1.9	(1307x n=10, 20x n=9, 1x n=8)
Kleinzylinder						
GPV	62	496	10	0.16	2.0	(62x n=8)
LD	62	496	10	0.16	2.0	(62x n=8)
Lperm30	62	447	12	0.19	2.7	(45x n=8, 1x n=7, 16x n=5)
pLP 30(*)	62	447	5	0.08	1.2	(45x n=8, 1x n=7, 16x n=5)
Lperm60	62	448	14	0.23	3.1	(46x n=8, 16x n=5)
pLP 60(*)	62	448	7	0.11	1.6	(46x n=8, 16x n=5)
GP 30 (0-30hPa)	62	496	9	0.15	1.8	(62x n=8)
FP	62	496	5	0.08	1.0	(62x n=8)
GGP 60 (30-60hPa)	62	496	10	0.16	2.0	(62x n=8)
GGP 100 (60-100hPa)	62	496	7	0.11	1.4	(62x n=8)
GMP (100-1000hPa)	62	496	7	0.11	1.4	(62x n=8)
MMP+FMP (1000-15000hPa)	62	496	13	0.21	2.6	(62x n=8)
GP 60 (0-60hPa)	62	496	8	0.13	1.6	(62x n=8)
Grosszylinder						
GP 60	62	614	4	0.06	0.65	(56x n=10, 6x n=9)
GPV	62	619	12	0.19	1.9	(61x n=10, 1x n=9)
LD	62	619	13	0.21	2.1	(61x n=10, 1x n=9)
pLP	62	611	7	0.11	1.1	(53x n=10, 9x n=9)
Lperm	62	611	10	0.16	1.6	(53x n=10, 9x n=9)
VBcasa	62	585	10	0.16	1.7	(45x n=10, 8x n=9, 1x n=8, 7x n=7, 1x n=6)
VBmin	62	476	8	0.13	1.7	(24x n=10, 5x n=9, 3x n=8, 12x n=7, 4x n=6, 7x n=5, 3x n=4, 4x n=3)
Gefügeproben (Spatenproben)						
BewmK	144	576	24	0.17	4.2	(144x n=4)
BewoK	144	576	25	0.17	4.3	(144x n=4)
mDm	144	576	29	0.20	5.0	(144x n=4)

(*): Für die Luftpermeabilität wurde die Ausreisserprüfung irrtümlicherweise mit den nicht logarithmierten Werten durchgeführt, d.h. es wurden zu viele Werte eliminiert!

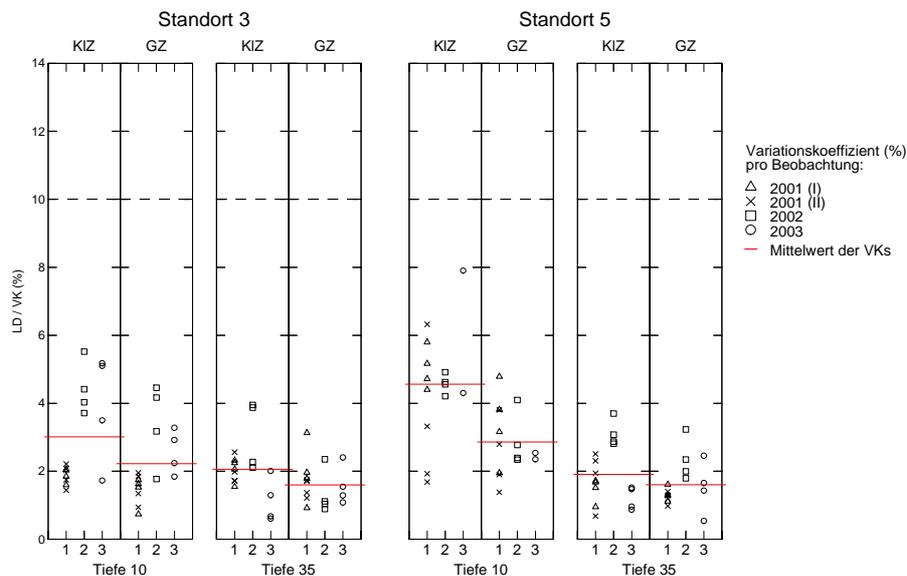
Tabelle 9: Deskriptive statistische Kenngrößen für die bodenphysikalischen Parameterwerte, basierend auf den 3 Erhebungen 2001 (I), 2002 (I) und 2003; Mittelwert aller Erhebungen pro Standort („mittlerer Standortwert“), Anzahl Stichproben (n), Variationskoeffizienten (VK%), Minimal- und Maximalwerte (Min, Max) auf den Stufen Erhebung, Beobachtung und Bestimmung. Standort 3 Kleindelfingen ZH, Standort 5 Reckenholz ZH.

Parameter [Einheit]	Zylinder- Typ	Standort Nr.	Tiefe cm	Standort				Erhebung				Beobachtung				Bestimmung			
				Mw	n	VK%	Min	Max	n	VK%	Min	Max	n	VK%	Min	Max			
LD [g/cm ₃]	KIZ	3	10-15	1.47	3	4.8	1.42	1.55	12	5.4	1.34	1.59	95	6.2	1.24	1.62			
		3	35-40	1.49	3	2.6	1.46	1.54	12	2.6	1.45	1.57	94	3.3	1.38	1.62			
		5	10-15	1.23	3	7.4	1.17	1.33	10	7.2	1.14	1.39	80	8.4	1.01	1.52			
		5	35-40	1.48	3	1.0	1.46	1.49	12	1.3	1.44	1.51	93	2.4	1.36	1.54			
	GZ	3	10-15	1.53	3	3.2	1.49	1.58	12	3.6	1.44	1.61	117	4.3	1.35	1.66			
		3	35-40	1.53	3	2.2	1.49	1.55	12	2.6	1.43	1.57	117	3.0	1.40	1.65			
		5	10-15	1.29	3	3.3	1.25	1.34	10	3.6	1.23	1.37	97	4.6	1.18	1.45			
		5	35-40	1.54	3	0.6	1.53	1.54	12	1.3	1.49	1.57	118	2.2	1.39	1.61			
GPV [%]	KIZ	3	10-15	44.3	3	5.9	41.4	46.5	12	6.8	39.9	49.3	95	7.8	38.6	52.9			
		3	35-40	43.9	3	3.1	42.4	44.7	12	3.2	40.9	45.7	95	4.2	39.2	48.0			
		5	10-15	53.8	3	6.1	50.0	55.8	10	6.0	47.9	57.2	80	7.1	42.7	62.0			
		5	35-40	45.2	3	0.8	44.9	45.6	12	1.4	44.3	46.2	92	2.8	42.7	49.7			
	GZ	3	10-15	41.5	3	3.8	39.8	42.9	12	4.7	38.6	45.0	117	5.8	36.6	48.3			
		3	35-40	42.1	3	3.4	41.2	43.7	12	3.8	40.1	45.9	119	4.4	37.3	47.2			
		5	10-15	50.7	3	2.7	49.2	52.0	10	3.3	48.0	53.6	97	4.3	44.9	55.4			
		5	35-40	42.3	3	0.7	42.0	42.6	12	1.8	40.6	43.3	118	3.0	39.2	47.4			
GP_30 0-30hPa [%]	KIZ	3	10-15	9.6	3	36.4	6.0	12.9	12	40.6	3.4	16.7	92	44.6	1.8	18.5			
		3	35-40	10.7	3	14.8	9.1	12.3	12	18.7	7.3	13.3	95	23.1	5.8	16.7			
		5	10-15	12.4	3	45.1	6.0	16.1	10	45.4	4.2	18.3	78	49.2	1.7	21.6			
		5	35-40	6.2	3	8.8	5.6	6.6	12	17.4	4.7	8.0	94	28.6	2.8	10.7			
GP_60 0-60hPa [%]	KIZ	3	10-15	12.0	3	34.0	7.6	15.7	12	37.7	5.9	20.6	92	40.6	4.3	23.2			
		3	35-40	16.5	3	17.1	13.3	18.4	12	17.2	12.3	19.8	96	19.7	10.1	23.1			
		5	10-15	14.3	3	41.3	7.5	18.5	10	40.7	6.1	20.7	77	43.3	2.9	23.8			
		5	35-40	7.3	3	8.5	6.6	7.9	12	14.7	6.0	9.2	95	24.7	3.9	11.7			
	GZ	3	10-15	8.6	3	29.8	5.7	10.4	12	38.2	4.3	14.8	117	49.4	0.1	22.2			
		3	35-40	14.1	3	19.4	11.9	17.1	12	18.6	10.6	18.5	115	23.3	7.5	24.4			
		5	10-15	11.0	3	38.0	6.9	15.2	10	34.8	5.2	16.6	100	42.1	1.0	20.7			
		5	35-40	4.8	3	25.9	3.8	6.2	12	25.9	3.0	7.0	120	39.6	0.0	9.3			
GP_100 0-100hPa [%]	KIZ	3	10-15	13.2	3	30.4	8.9	16.9	12	34.2	7.1	22.1	92	37.0	5.5	24.5			
		3	35-40	19.0	3	11.7	16.4	20.3	12	12.8	15.3	22.3	95	15.8	12.4	25.2			
		5	10-15	15.9	3	37.5	9.1	20.0	10	37.0	7.0	22.3	78	39.9	4.4	25.6			
		5	35-40	8.4	3	6.2	7.8	8.9	12	11.1	7.3	10.1	95	20.9	5.2	13.2			
MP 100hPa-15MPa [%]	KIZ	3	10-15	14.3	3	6.0	13.5	15.2	12	9.0	12.2	16.2	96	11.7	9.8	17.4			
		3	35-40	12.7	3	1.2	12.5	12.8	12	6.3	10.9	13.9	96	7.7	9.4	14.5			
		5	10-15	10.8	3	13.2	9.1	11.8	10	9.8	8.7	12.0	79	13.5	7.4	13.5			
		5	35-40	9.2	3	11.7	8.0	9.9	12	10.5	7.7	10.4	95	14.7	5.8	12.8			
FP >15MPa [%]	KIZ	3	10-15	16.7	3	8.3	15.7	18.3	12	9.8	14.8	20.5	96	11.6	12.9	21.8			
		3	35-40	12.3	3	7.3	11.5	13.3	12	13.3	11.1	16.8	94	14.2	10.1	19.2			
		5	10-15	27.1	3	7.7	25.7	29.5	10	7.9	24.5	30.5	80	9.6	21.8	33.7			
		5	35-40	27.7	3	2.1	27.3	28.4	12	3.2	26.3	29.6	95	5.0	24.7	30.8			
pLp_30 bei 30hPa [Log ₁₀ 10 ⁻¹⁰ cm ²]	KIZ	3	10-15	2.87	3	22.7	2.25	3.55	12	22.1	1.49	3.80	80	25.7	1.47	4.38			
		3	35-40	2.77	3	18.2	2.42	3.35	12	20.2	1.78	3.53	82	24.2	1.25	4.24			
		5	10-15	2.93	3	31.0	1.99	3.80	10	30.2	1.74	3.90	66	31.9	1.50	4.23			
		5	35-40	2.61	3	13.8	2.35	3.03	12	17.2	1.85	3.19	84	25.8	1.24	3.89			
pLp_60 bei 60hPa [Log ₁₀ 10 ⁻¹⁰ cm ²]	KIZ	3	10-15	3.35	3	17.9	2.69	3.86	12	17.8	2.18	3.99	81	21.7	1.31	4.21			
		3	35-40	3.39	3	9.7	3.13	3.76	12	10.1	2.91	4.05	82	12.7	2.27	4.34			
		5	10-15	3.54	3	24.1	2.60	4.26	10	23.7	2.23	4.35	67	26.3	1.59	4.49			
		5	35-40	2.98	3	8.6	2.76	3.26	12	12.2	2.44	3.61	81	17.5	1.73	4.13			
	GZ	3	10-15	2.82	3	12.3	2.42	3.04	12	17.8	1.72	3.29	114	22.4	1.16	3.67			
		3	35-40	3.23	3	6.4	3.07	3.46	12	6.8	2.90	3.53	118	10.3	2.09	3.98			
		5	10-15	3.29	3	11.4	2.86	3.52	10	10.7	2.70	3.59	98	12.2	2.35	3.90			
		5	35-40	3.03	3	4.8	2.87	3.16	12	4.4	2.83	3.25	116	11.4	2.04	3.72			
VB_Casa [kPa]	KIZ	3	10-15	42.8	3	21.1	33.5	51.6	12	21.8	27.2	57.0	101	27.9	19.8	72.3			
		3	35-40	60.5	3	5.1	58.7	64.1	12	11.2	50.7	72.5	106	23.0	28.6	98.7			
		5	10-15	28.8	3	34.6	18.9	38.8	10	33.4	17.4	41.5	96	37.0	13.1	61.5			
		5	35-40	76.7	3	32.5	59.5	105.2	12	28.6	54.5	116.8	119	32.8	22.4	148.6			
VB_min [kPa]	KIZ	3	10-15	35.9	3	19.0	28.1	41.0	12	21.1	20.3	47.4	74	27.1	15.3	61.5			
		3	35-40	51.8	3	1.0	51.4	52.4	12	13.1	41.1	64.3	80	22.4	28.6	79.4			
		5	10-15	22.3	3	35.3	15.2	30.8	10	34.1	14.4	34.0	86	37.6	11.9	40.8			
		5	35-40	62.5	3	33.8	46.6	86.5	12	29.7	43.0	93.5	73	30.6	20.7	108.6			
EdW [MPa]	KIZ	3	10-15	1.00	3	24.0	0.83	1.27	12	27.3	0.52	1.47	117	33.0	0.21	1.73			
		3	35-40	1.35	3	5.7	1.26	1.39	12	19.1	0.98	1.88	118	21.5	0.72	2.23			
		5	10-15	0.92	3	45.2	0.53	1.36	12	45.7	0.48	1.84	119	49.5	0.19	2.57			
		5	35-40	1.57	3	8.3	1.49	1.72	12	10.3	1.31	1.84	119	17.0	0.61	2.30			
mDm [mm]	KIZ	3	10-15	28.5	3	43.7	20.9	42.8	12	41.1	18.4	53.8	35	35.9	9.6	53.8			
		3	35-40	23.5	3	41.9	15.6	34.5	12	47.0	12.8	49.2	34	42.9	11.0	49.2			
		5	10-15	76.5	3	15.3	68.8	90.0	12	39.9	40.7	135.5	35	45.9	29.5	147.2			
		5	35-40	135.9	3	2.9	131.5	138.8	12	10.6	99.4	150.0	34	10.6	99.4	150.0			
BewmK [Kl.]	KIZ	3	10-15	8.8	3	16.6	7.1	9.7	12	14.8	6.2	9.9	35	9.7	6.2	10.5			
		3	35-40	7.9	3	39.2	4.3	9.8	12	33.9	3.8	10.1	35	20.2	3.8	10.6			
		5	10-15	4.5	3	8.5	4.2	4.9	12	22.6	3.2	6.0	35	32.1	1.5	7.4			
		5	35-40	2.1	3	16.7	1.7	2.3	12	21.7	1.3	2.9	36	37.5	1.0	3.8			
BewoK [Kl.]	KIZ	3	10-15	8.8	3	15.7	7.2	9.7	12	14.3	6.2	9.9	35	9.4	6.2	10.5			
		3	35-40	8.2	3	30.6	5.3	9.8	12	26.6	4.8	10.1	35	16.7	4.8	10.6			
		5	10-15	5.3	3	1.4	5.2	5.4	12	14.2	4.1	6.3	34	20.7	3.1	7.4			
		5	35-40	3.3	3	3.1	3.2	3.4	12	8.5	3.0	3.9	34	10.2	3.0	4.3			

3.2 Genauigkeit der Bestimmung

3.2.1 Präzision der Bestimmungen = Variation der Parameterwerte innerhalb einer Beobachtung

Die Präzision der Bestimmungen wird durch die Variabilität der einzelnen Messungen innerhalb einer Beobachtung ausgedrückt. Als Vergleichsgrösse dient der Variationskoeffizient der Bestimmungswerte innerhalb einer Beobachtung. Die Variationskoeffizienten der Lagerungsdichte sind beispielhaft in Figur 6 dargestellt, jene aller weiteren Parameter in Grafiken im Anhang B. Figur 7 zeigt die für alle Jahre, Standorte und Tiefen zusammengefassten Variationskoeffizienten als Box-Whisker-Plot.

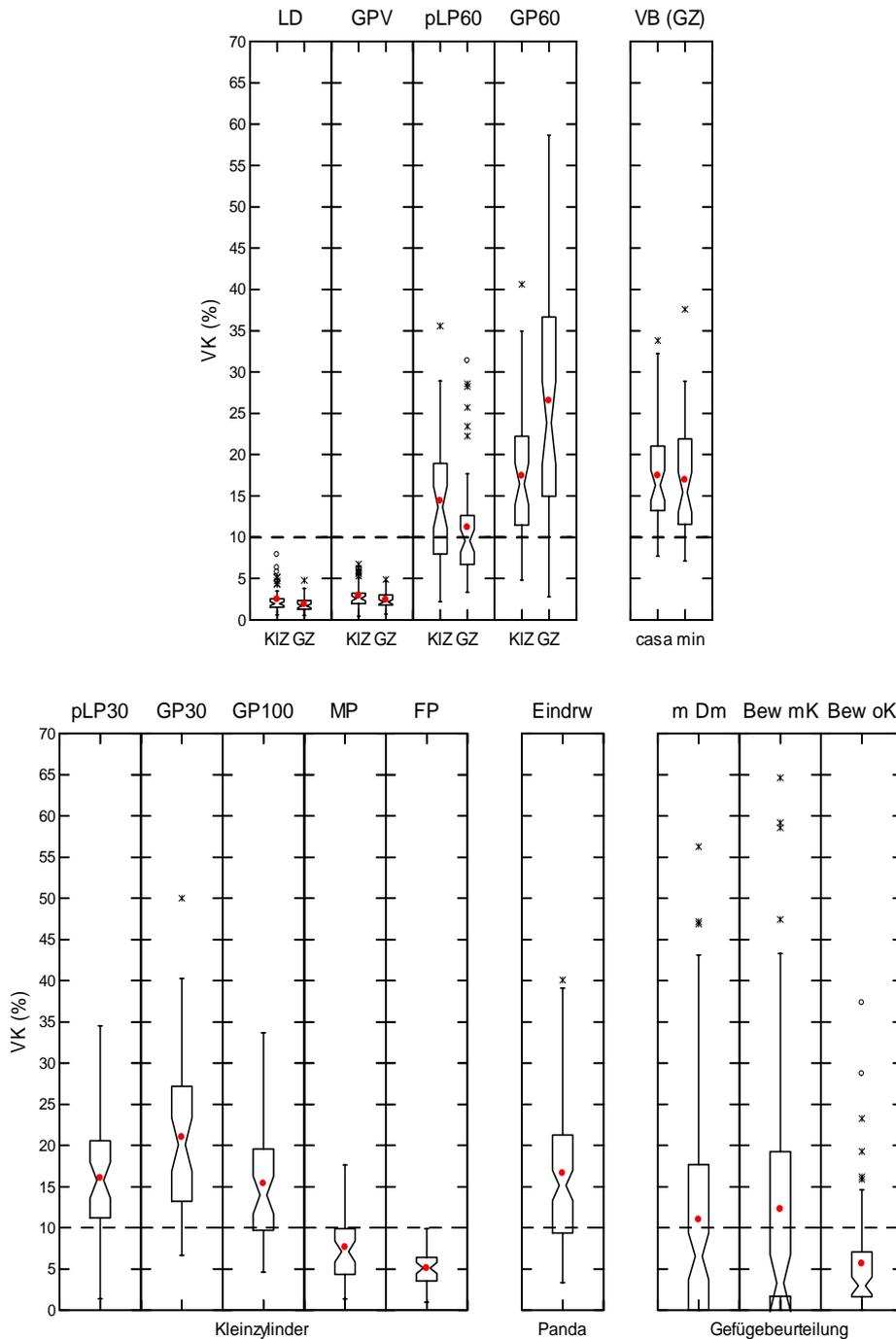


Figur 6: Präzision der Bestimmungen für den bodenphysikalischen Parameter Lagerungsdichte (LD), ausgedrückt als Variationskoeffizient (VK, in %) der Bestimmungswerte innerhalb der einzelnen Beobachtungen; Gruppierung nach Standort, Tiefe, Untersuchungssystem und Erhebungsjahr. Anzahl Werte pro Datenpunkt: KIZ $n_p=8$, GZ $n_p=10$; horizontale durchgehende Linie: Mittelwert, horizontale gestrichelte Linie: vorgegebene Richtgrösse 10 %.

Die Ergebnisse zeigen:

- Sofern sich Standortunterschiede erkennen lassen, variieren die Beobachtungen am Standort 5 Reckenholz ZH meist stärker als am Standort 3 Kleinandelfingen ZH (ausser z.B. beim Feinporenvolumen). Tiefeneffekte machen sich teilweise bemerkbar, indem die Variationskoeffizienten in der Referenztiefe 10-15 cm grösser sind als in 35-40 cm Tiefe; vielfach bestehen jedoch Wechselwirkungen mit Jahres- und Standorteffekten. Auch beim Eindringwiderstand und den visuellen Gefügebeurteilungen sind die VK's am Standort 5 Reckenholz ZH jeweils signifikant grösser als am Standort 3 Kleinandelfingen ZH, während der Tiefeneffekt anhand grösserer Variationen in 10 cm Tiefe erkennbar wird.
- Die mittleren Variationskoeffizienten auf Stufe „Beobachtung“ sind nur bei den Parametern Lagerungsdichte und Gesamtporenvolumen unter 5 % (Figur 7). Alle übrigen Parameter streuen innerhalb einer Beobachtung stärker, wobei die Variabilität mit zunehmendem Po-

rendurchmesser von Fein-/Mittel- zu Grobporen und innerhalb der Grobporen von GP_100 über GP_60 zu GP_30 ansteigt. Die Vorbelastungen, der Eindringwiderstand sowie die Parameter der visuellen Gefügebeurteilung weisen innerhalb der einzelnen Beobachtungen teilweise deutlich erhöhte Variabilitäten auf, wobei diese v. a. bei den Gefügebeurteilungen stark standortabhängig sein können (Vergleiche Anhang A).



Figur 7: Präzision der Bestimmungen ausgedrückt als Variationskoeffizienten (VK %) der Parameterwerte innerhalb der Beobachtungen, zusammengefasst über alle Erhebungen, Standorte und Tiefen. Anzahl Werte pro Datenpunkt: KIZ* und GZ* $n_B=48$, Panda $n_B=112$, Gefügebeurteilung $n_B=160$; *Klein- und Grosszylinder ohne Werte aus 2002; horizontale gestrichelte Linie: vorgegebene Richtgröße 10 %.

Die Richtgrösse 10 % wird als Vergleichsgrösse zum Variabilitätskriterium der Bestimmungswerte von anorganischen Schadstoffen aus 4 Mischproben verwendet (analog zum NABO). Der Vergleich zeigt, dass die physikalischen Parameter innerhalb einer Beobachtung meist deutlich stärker streuen.

3.2.2 Vergleich der Parameterwerte aus verschiedenen Untersuchungssystemen: Klein- vs. Grosszylinder

Die Parameter Lagerungsdichte (LD), Gesamtporenvolumen (GPV), Grobporen 0-60hPa (GP_60) sowie die logarithmierte Luftpermeabilität bei 60hPa (pLp_60) wurden parallel an Kleinzylindern (KIZ) und Grosszylindern (GZ) bestimmt. Aus der Tabelle 10 wird ersichtlich, dass die Bestimmungen mit den verschiedenen Untersuchungssystemen eine generell andere Lageschätzung (mittlerer Standortwert) ergibt. Mit dem Kleinzylindersystem wird für die Lagerungsdichte je nach Standort und Tiefe ein zwischen 2.4-4.9% und im Mittel ca. 4% tieferer Wert bestimmt. Beim Gesamtporenvolumen werden zwischen 4.5-6.8% und im Mittel 6% höhere Werte gemessen. Bei den Grobporen 0-60 hPa und der logarithmierten Luftpermeabilität sind je nach Standort und Tiefe die Messdifferenzen unterschiedlich; mit dem Kleinzylindersystem wird im Mittel ein um ca. 35% bzw. 8% höherer Wert bestimmt.

Tabelle 10: Prozentuelle Abweichung der Parameterwerte bei der Bestimmung aus Kleinzylinderproben (KIZ) im Vergleich zu Grosszylinderproben (GZ) am Beispiel der mittleren Standortwerte sowie der Mittel aus allen Standorten und Tiefen für einzelne bodenphysikalische Parameter.

Parameter [Einheit]	Stao	Tiefe cm	Zylinder- Typ	mittlerer Standortwert	%Abweichung KIZ von GZ	
					nach Standort und Tiefe	im Mittel
LD Lagerungsdichte [g/cm ³]	3	10-15	KIZ	1.47	-3.9%	-3.8%
			GZ	1.53		
	3	35-40	KIZ	1.49	-2.4%	
			GZ	1.53		
	5	10-15	KIZ	1.23	-4.9%	
			GZ	1.29		
	5	35-40	KIZ	1.48	-4.0%	
			GZ	1.54		
GPV Gesamtporen- volumen [%]	3	10-15	KIZ	44.3	6.7%	6.0%
			GZ	41.5		
	3	35-40	KIZ	43.9	4.5%	
			GZ	42.1		
	5	10-15	KIZ	53.8	6.1%	
			GZ	50.7		
	5	35-40	KIZ	45.2	6.8%	
			GZ	42.3		
GP_60 Grobporen 0-60hPa [%]	3	10-15	KIZ	12.0	39.4%	34.6%
			GZ	8.6		
	3	35-40	KIZ	16.5	17.4%	
			GZ	14.1		
	5	10-15	KIZ	14.3	30.2%	
			GZ	11.0		
	5	35-40	KIZ	7.3	51.3%	
			GZ	4.8		
pLp_60 Log Luftpermeabili- tät bei 60hPa [Log ₁₀ 10 ⁻¹⁰ cm ²]	3	10-15	KIZ	3.35	18.9%	7.5%
			GZ	2.82		
	3	35-40	KIZ	3.39	5.0%	
			GZ	3.23		
	5	10-15	KIZ	3.54	7.7%	
			GZ	3.29		
	5	35-40	KIZ	2.98	-1.6%	
			GZ	3.03		

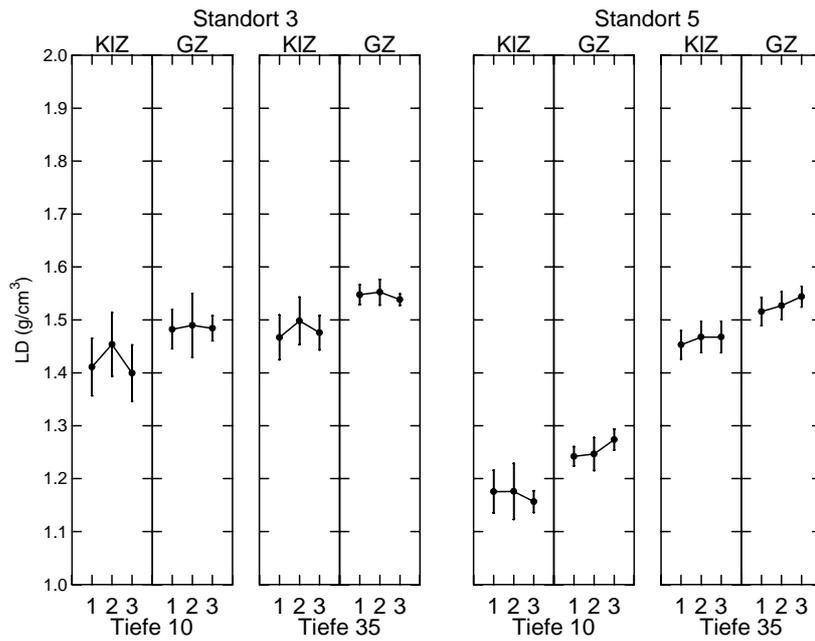
3.2.3 Stabilität der Bestimmungen

Referenzstabilität:

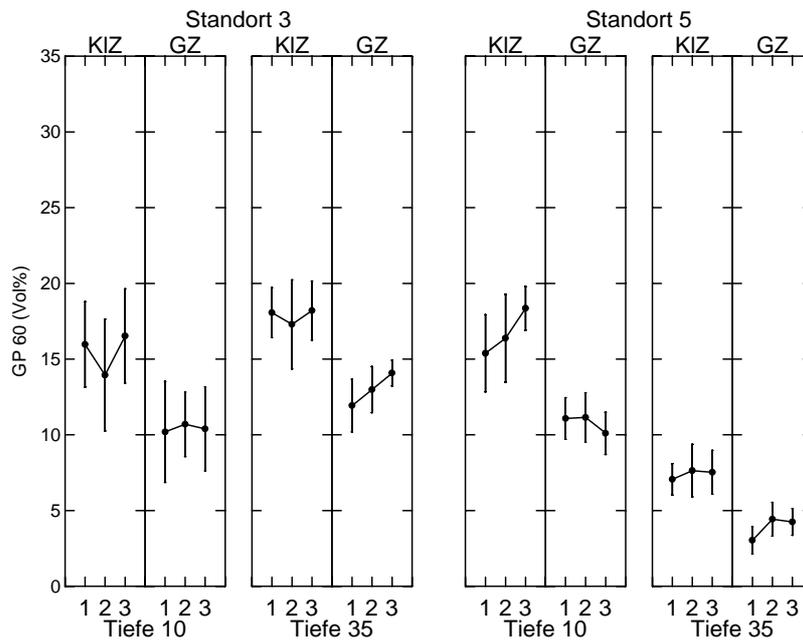
Zur Quantifizierung der Referenzstabilität für die Bestimmungen aus den Klein- und Grosszylindersystemen werden die Mittelwerte der Bestimmungen nach den drei Probenlagerungsdauern 4-7 Wochen, 19-22 Wochen und 31-34 Wochen an den drei Messterminen 1-3 bestimmt. Die Figur 8 und Figur 9 zeigen beispielhaft die Vergleichbarkeit der Bestimmungswerte für die Lagerungsdichte und das Grobporenvolumen (0-60 hPa) nach der unterschiedlichen Lagerdauer. Im Anhang C befinden sich die Figuren der übrigen Parameter.

Zusammenfassend ergaben sich folgende Resultate:

- Beim Grosszylindersystem zeigten einzig bei der Vorbelastung, dem Grobporenvolumen und der Luftpermeabilität im Unterboden von Standort 5 Reckenholz ZH eine merkliche Heterogenität zwischen den drei Lagerungsdauern – in allen anderen Fällen und bei allen anderen Parametern waren keine signifikanten Unterschiede zwischen den 3 Lagerungsdauern zu erkennen, d.h. die Grosszylinderproben sind hinsichtlich möglicher Lagerungseffekte im untersuchten Zeitraum von 34 Wochen als stabil zu betrachten.
- Auch beim Kleinzylindersystem liessen sich keine generellen signifikanten Effekte einer unterschiedlichen Lagerungsdauer erkennen. Abhängig vom Standort zeigten sich jedoch zwei verschiedene Effekte: Einerseits traten am Standort 3 Kleinandelfingen ZH beim Mittelporenvolumen sowohl im Unter- als auch im Oberboden signifikante Unterschiede zwischen den unterschiedlich lange gelagerten Probenreihen auf – allerdings mit teilweise sehr geringen Differenzen. Andererseits machten sich bei den Oberbodenproben des Standortes 5 Reckenholz ZH bei mehreren Parametern signifikante Einflüsse der Lagerungsdauer deutlich: Anscheinend nahm während der Lagerungsdauer das Grobporenvolumen und die Luftpermeabilität zu, das Feinporenvolumen dagegen ab.



Figur 8: Vergleich der mittleren Lagerungsdichte von Proben der Erhebung 2002 nach unterschiedlichen Probenlagerungsdauern von 1) 4-7 Wochen, 2) 19-22 Wochen, -3) 31-34 Wochen, mit Angabe des 95%-Vertrauensintervalls der Mittelwerte pro Lagerungsdauer. Anzahl Werte n_p pro Datenpunkt: KIZ $n_p=12$ bzw. GZ $n_p=16$.



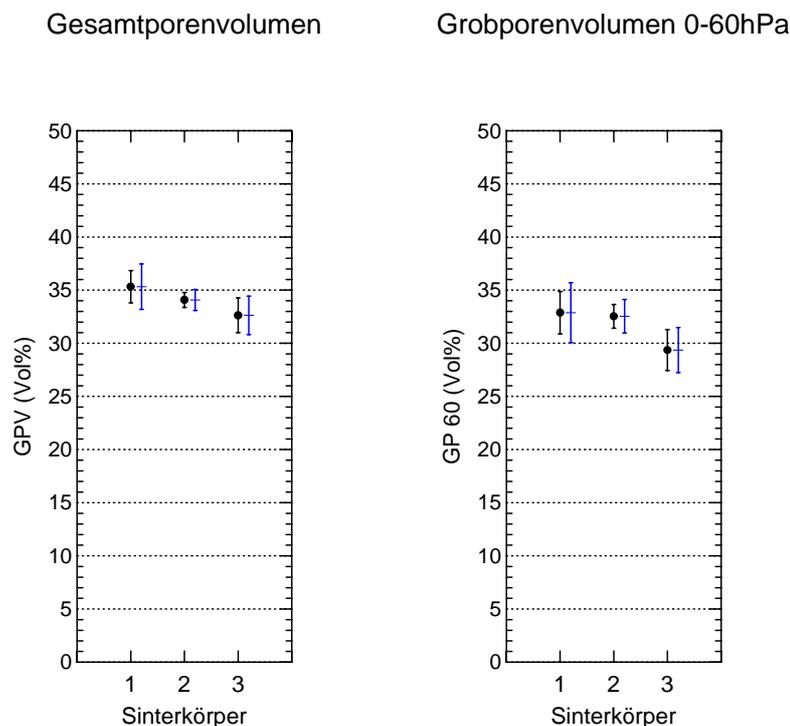
Figur 9: Vergleich des mittleren Grobporenvolumens (0-60 hPa) von Proben der Erhebung 2002 nach unterschiedlichen Probenlagerungsdauern von 1) 4-7 Wochen, 2) 19-22 Wochen, 3) 31-34 Wochen, mit Angabe des 95%-Vertrauensintervalls der Mittelwerte pro Lagerungsdauer. Anzahl Werte n_p pro Datenpunkt: KIZ $n_p=12$ bzw. GZ $n_p=16$.

Stabilität des Messsystems:

Zur Qualitätssicherung des Messsystems ist anhand von Referenzproben die Stabilität von nicht zeitgleichen Messungen nachzuweisen. Dies kann

- zur Kontrolle der absoluten Vergleichbarkeit von Einzelmessungen gegenüber einer Referenz, oder
- zur Sicherstellung der absoluten Vergleichbarkeit von wiederholten Messungen im Rahmen von Zeitreihen-Untersuchungen verwendet werden.

Zur Quantifizierung der Messpräzision – z.B. in Form von Vertrauensgrenzen der Messwertabweichungen - wurden an drei Sinterkörpern die Parameter „Gesamtporenvolumen“ und „Groporenvolumen 0-60 hPa“ gemessen und jeweils die statistischen Kenngrößen „Mittelwert“, „95%-Vertrauensintervall des Mittelwertes“ sowie „zweiseitiges 95%-Vertrauensintervall für signifikante Mittelwertsdifferenzen zVI“ bestimmt (Figur 10).



Figur 10: Gesamt- und Groporenvolumen (0-60 hPa) von 3 Sinterkörpern. Mittelwert mit 95% Vertrauensintervall sowie berechnetes zweiseitiges 95%-Vertrauensintervall für Mittelwertsdifferenzen (zVI) bei 5 Messwiederholungen (Whisker rechts). Anzahl Werte n pro Datenpunkt: Sinterkörper 1+2 $n_p=5$, Sinterkörper 3 $n_p=4$.

Die Ergebnisse zeigen:

- dass bereits bei 5 Messwiederholungen kleine Abweichungen der Grobporenvolumen-Bestimmung von 1.6 bis 2.6 % als statistisch gesichert nachgewiesen werden können (Figur 10).
- dass die verwendeten Sinterkörper einen hohen Anteil von 30 Vol% Grobporen aufweisen und das Gesamtporenvolumen nur unwesentlich grösser ist. Dies bedeutet, dass die restlichen Poren (>60 hPa) einen verschwindend kleinen Anteil der Sinterkörper ausmachen.
- Dass sich durch eine Erhöhung des Stichprobenumfanges die zweiseitigen Vertrauensintervalle für signifikante Differenzen (zVI) entsprechend verkleinern lassen (Tabelle 11).

Tabelle 11: Zweiseitiges 95%-Vertrauensintervall für Mittelwertsdifferenzen (zVI), bezogen auf Messreihen für Grobporen- und Gesamtporenvolumen; Daten von Messungen an den Sinterkörpern 1-3 mit Angaben zum Einfluss des Umfanges von Messreihen auf das zVI.

		Grobporenvolumen 0-60 hPa																	
Sinterkörper		1						2						3					
Umfänge (von n1 + n2)		5	10	20	30	40	50	5	10	20	30	40	50	5	10	20	30	40	50
zVI (Vol%)		2.81	1.62	1.06	0.85	0.72	0.64	1.58	0.91	0.60	0.48	0.40	0.36	2.12	1.22	0.80	0.64	0.54	0.48

		Gesamtporenvolumen																	
Sinterkörper		1						2						3					
Umfänge (von n1 + n2)		5	10	20	30	40	50	5	10	20	30	40	50	5	10	20	30	40	50
zVI (Vol%)		2.14	1.24	0.81	0.64	0.55	0.49	1.00	0.57	0.38	0.30	0.25	0.23	1.81	1.04	0.68	0.54	0.46	0.41

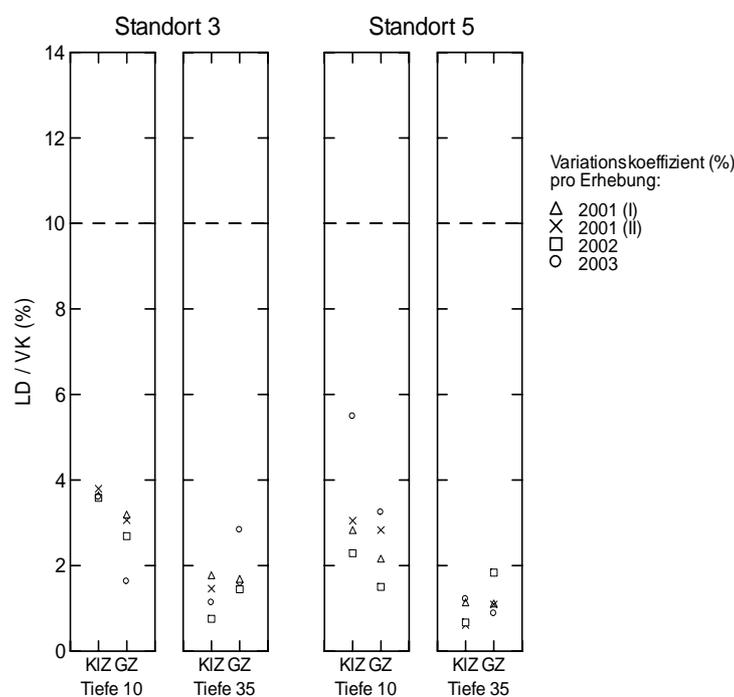
3.3 Genauigkeit der Erhebungen

3.3.1 Variation der Beobachtungen innerhalb einer Erhebung

Die Präzision einer Erhebung wird durch die Varianz innerhalb und zwischen Beobachtungen bestimmt. Im Folgenden wird nur die Variation zwischen den Beobachtungen innerhalb einer Erhebung anhand der Variationskoeffizienten dargestellt. Die Variation am Beispiel der Lagerungsdichte zeigt Figur 11. Die Figuren zu den Variationen der Beobachtungswerte der übrigen bodenphysikalischen Parameter sind im Anhang D zu finden. In Figur 12 sind für alle bodenphysikalischen Parameter die Variationskoeffizienten der Beobachtungen innerhalb der Erhebungen zusammenfassend für alle Erhebungen, Standorte und Tiefen als Box-Whisker-Plot dargestellt.

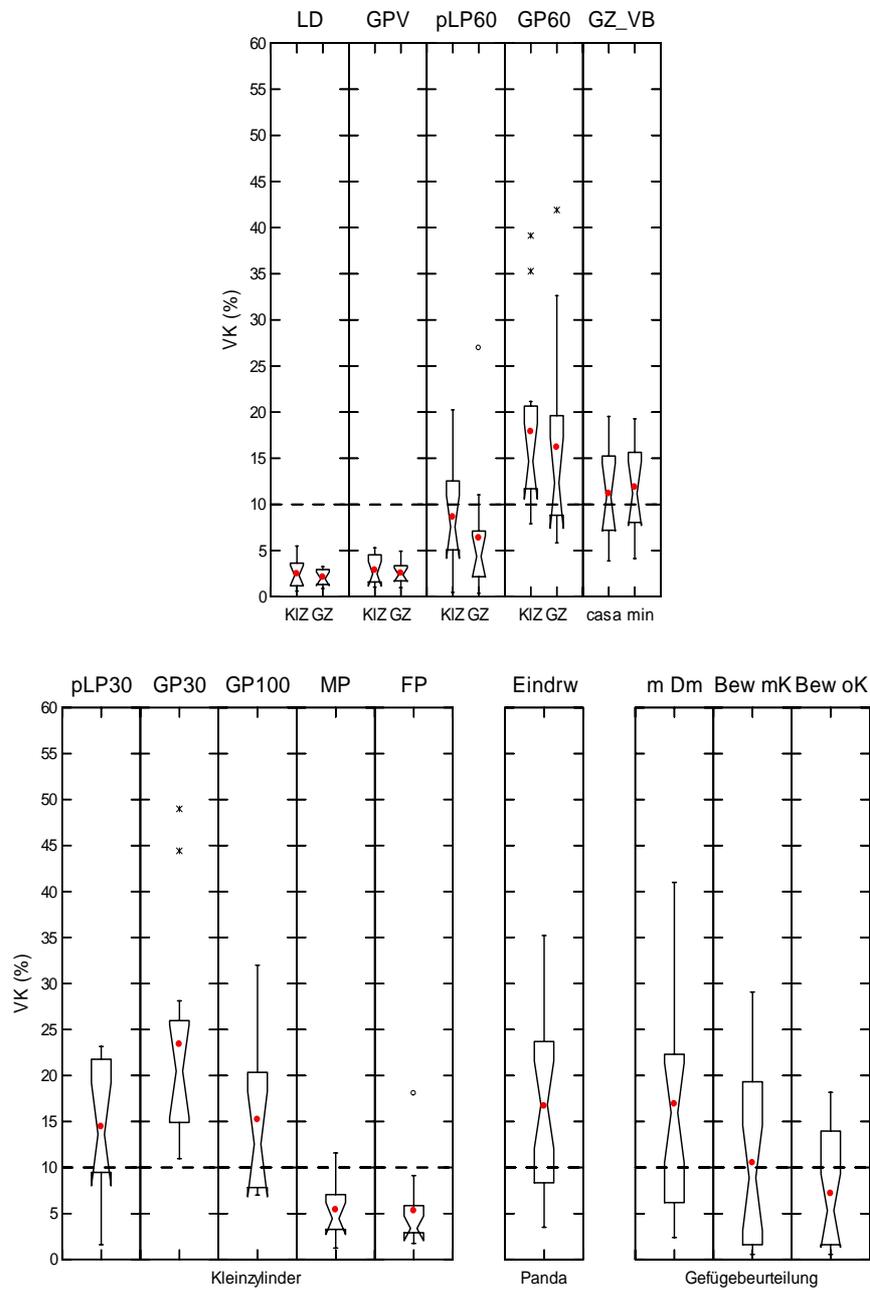
Zusammenfassend ergeben sich folgende Feststellungen:

- Die Variation zwischen den Beobachtungen einer Erhebung ist im Oberboden meist etwas grösser als im Unterboden. Die deutlicheren Unterschiede zeigen sich dabei am Standort 3 Kleinandelfingen ZH.
- Die beiden Erhebungen aus dem Jahr 2001 streuen tendenziell stärker als die späteren Erhebungen 2002 und 2003.
- Der als Richtgrösse gesetzte Wert des Variationskoeffizienten von 10 % wird nur bei der Lagerungsdichte, dem Gesamtporenvolumen sowie dem Mittel- und Feinporenanteil unterschritten. Verglichen mit der Variation innerhalb der Beobachtungen war die Variation zwischen den Beobachtungen einer Erhebung tendenziell kleiner.



Figur 11: Variation der Lagerungsdichte (LD) zwischen den jeweils vier Beobachtungen der Erhebungen 2001(I), 2001(II), 2002 und 2003 bei Untersuchungen mit dem Klein- bzw. dem Grosszylindersystem, ausgedrückt als Variationskoeffizient (VK%). Anzahl Werte n_b pro Datenpunkt: $n_b=4$; horizontale gestrichelte Linie: vorgegebene Richtgrösse 10 %.

- Je grösser die Äquivalentdurchmesser der Porengrössenklasse, desto grösser war der Variationskoeffizient der entsprechenden Beobachtungen innerhalb einer Erhebung.



Figur 12: Variation der Beobachtungswerte innerhalb einer Erhebung bei den einzelnen bodenphysikalischen Parametern, ausgedrückt als Variationskoeffizienten über alle Erhebungen, Standorte und Tiefen. Anzahl Werte n_E (Erhebungen x Standort x Tiefe) pro Datenpunkt: KIZ und GZ $n_E=16$, Pandasonde $n_E=28$, visuelle Gefügebeurteilungen $n_E=56$; horizontale gestrichelte Linie: vorgegebene Richtgrösse 10 %.

3.3.2 Robustheit des Probenplanes

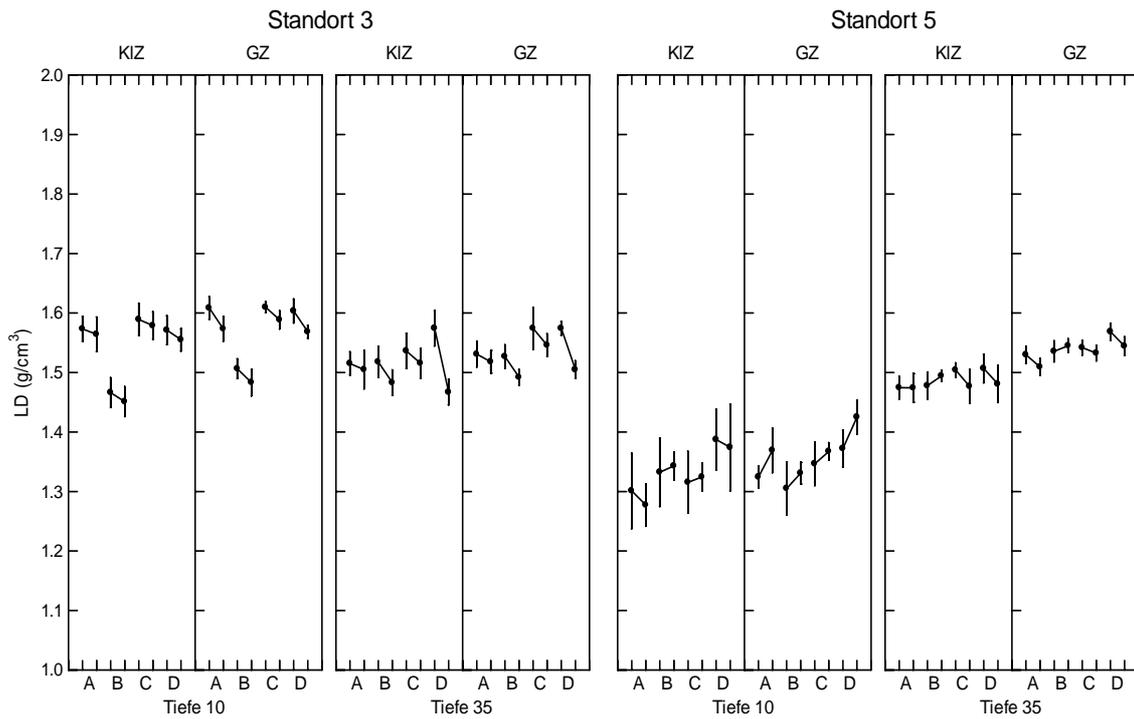
Vergleich zweier zum gleichen Zeitpunkt beprobten, aber räumlich verschobenen Beobachtungen:

Zur Beurteilung der Vergleichbarkeit von Beobachtungen, die zum selben Zeitpunkt, aber räumlich verschoben stattgefunden haben, werden die Mittelwerte der entsprechenden Beobachtungen einander gegenübergestellt (vgl. Figur 13, Figur 14 und Figuren im Anhang E). Eine Zusammenfassung der relativen Abweichungen zwischen den Beobachtungen ist in Figur 15 dargestellt.

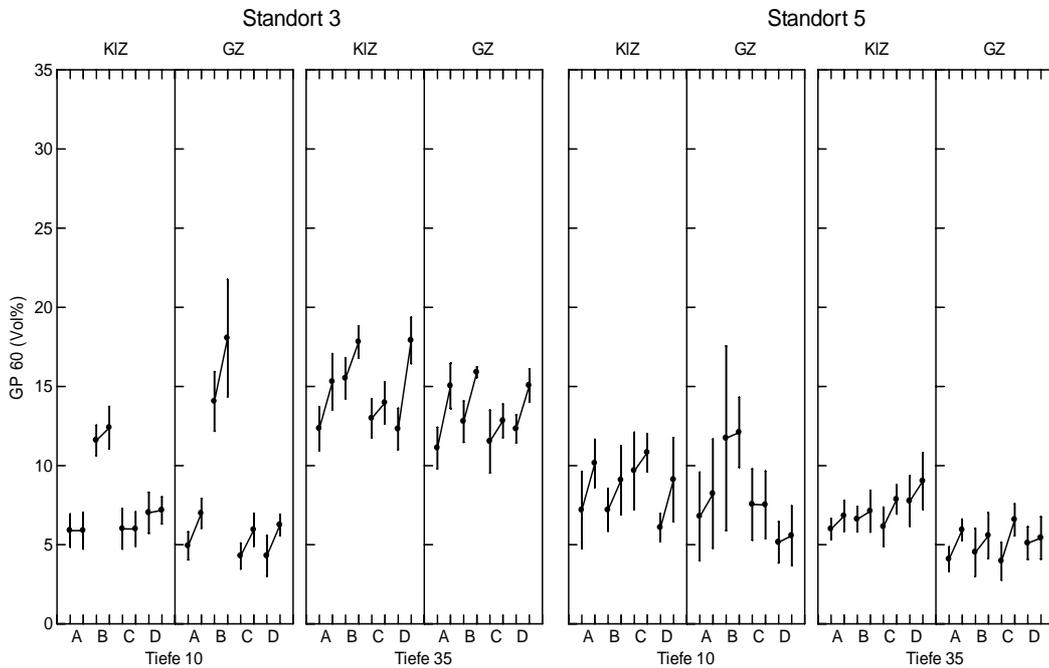
Zusammenfassend zeigen sich folgende Ergebnisse:

- In den beiden räumlich verschobenen Erhebungen am Standort 5 Reckenholz ZH ergaben sich beim Kleinzylindersystem praktisch keine Unterschiede zwischen den gleichzeitig beprobten Beobachtungen. Auch beim Grosszylindersystem liessen sich nur bei einzelnen Parametern (v. a. Vorbelastungen) und einzelnen Beobachtungstreifen unsystematische Unterschiede zwischen den räumlich verschobenen Beobachtungen erkennen.
- Am Standort 3 Kleinandelfingen ZH zeigten sich beim Kleinzylindersystem im Oberboden keine statistisch signifikanten Abweichungen zwischen den räumlich verschobenen Beobachtungen. Dagegen ergaben sich im Unterboden bei nahezu allen bodenphysikalischen Parametern der Kleinzylinderuntersuchungen (ausser den Luftdurchlässigkeiten) in jeweils mindestens einem Beobachtungstreifen (meist D, teilweise auch A) statistisch signifikante Unterschiede zwischen den räumlich verschobenen Beobachtungen der beiden Erhebungen. Bei den Grosszylinderuntersuchungen am Standort 3 Kleinandelfingen ZH wichen die beiden räumlich verschobenen Erhebungen bei allen untersuchten Parametern (ausser den Vorbelastungen) jeweils in beiden Bodentiefen in mindestens einem Beobachtungstreifen (meist D, oft auch A) signifikant voneinander ab.
- Lagerungsdichte, Gesamtporenvolumen und Feinporenanteil zeigten insgesamt die geringsten absoluten Abweichungen zwischen den räumlich verschobenen Beobachtungen. Wie bei der Genauigkeit der Bestimmungsmethode gilt auch hier (abhängig von der bei den einzelnen bodenphysikalischen Parametern aufgetretenen Variabilität), dass die erkennbaren statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den räumlich verschobenen Beobachtungen umso grösser sein mussten, je grösser die Äquivalentdurchmesser der Porengrössenklassen waren.

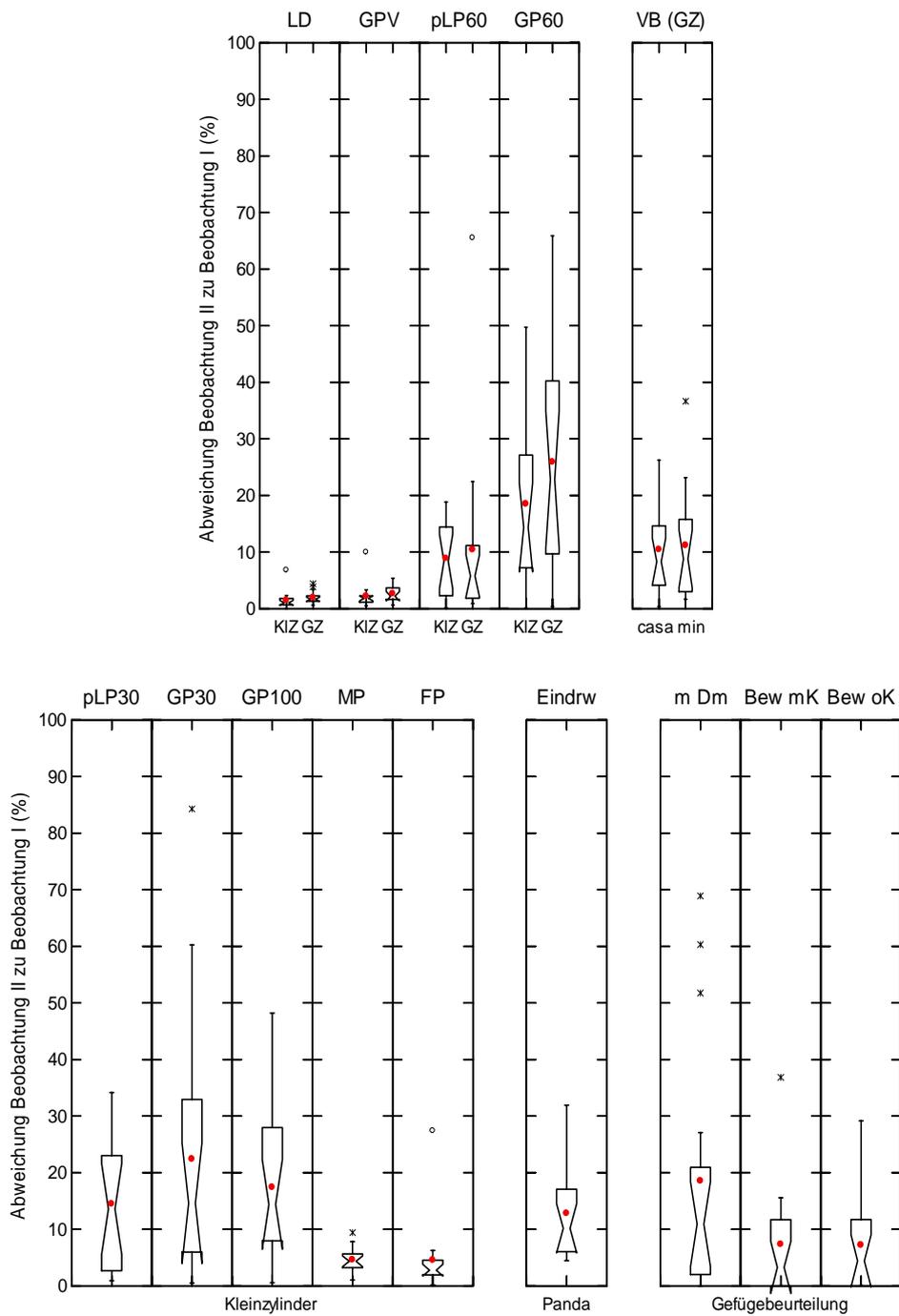
Bei den visuellen Gefügeeigenschaften lässt sich wegen der im Jahr 2001 nur einfachen Bestimmung pro Beobachtung keine Aussage zum Effekt von räumlich verschobenen Beobachtungen machen.



Figur 13: Vergleich der mittleren Lagerungsdichte (LD) mit 95% Vertrauensintervall (VI) der Beobachtungen A-D in der Erhebung 2001(I) (links) mit den entsprechenden Werten der Beobachtungen in der räumlich verschobenen Erhebung 2001(II) (rechts). Anzahl Werte n_p pro Beobachtung: KIZ=8, GZ=10.



Figur 14: Vergleich der mittleren Grobporenvolumen 0-60 hPa (GP 60) mit 95% Vertrauensintervall (VI) der Beobachtungen A-D in der Erhebung 2001(I) (links) mit den entsprechenden Werten der Beobachtungen in der räumlich verschobenen Erhebung 2001(II) (rechts). Anzahl Werte n_p pro Beobachtung: KIZ=8, GZ=10.

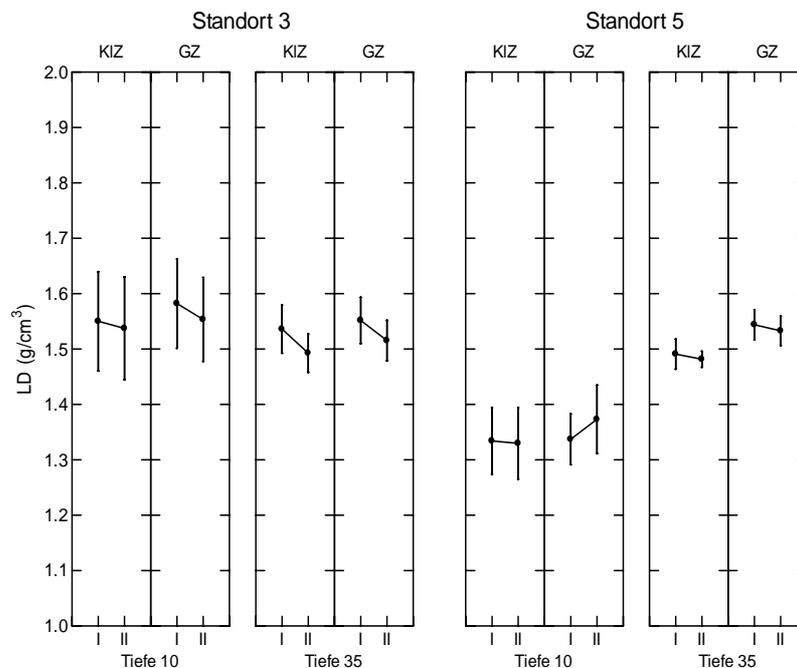


Figur 15: Relative Abweichungen (%) der bodenphysikalischen Parameterwerte aus den Beobachtungen der Erhebung 2001(I) von den entsprechenden Werten der Beobachtungen in der räumlich verschobenen Erhebung 2001(II), zusammengefasst über beide Standorte und Tiefen. (Anzahl Vergleiche: n=16)

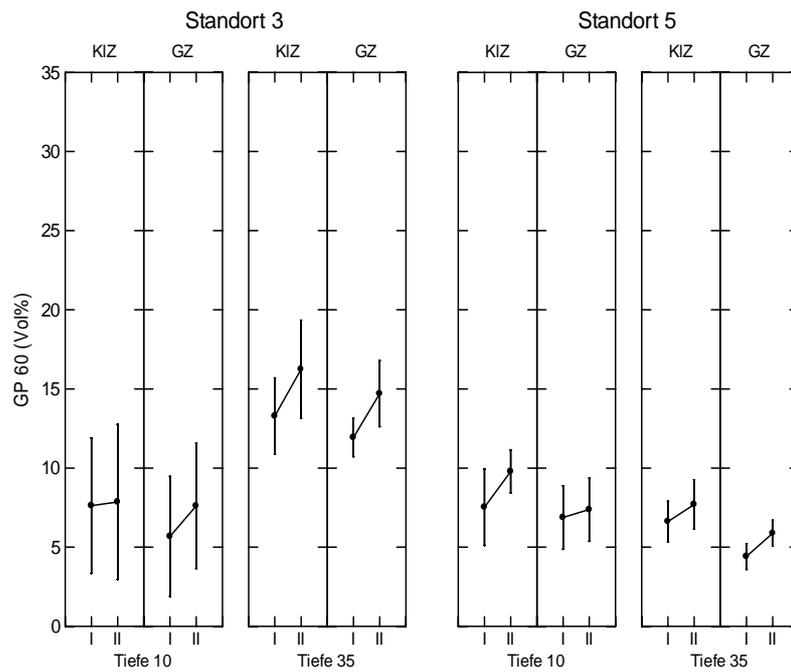
Vergleich zweier zum gleichen Zeitpunkt beprobten, aber räumlich verschobenen Erhebungen:

Der Vergleich der beiden räumlich verschobenen Erhebungen im Jahr 2001 lieferte folgendes Ergebnis (vgl. Figur 16, Figur 17, und Anhang E):

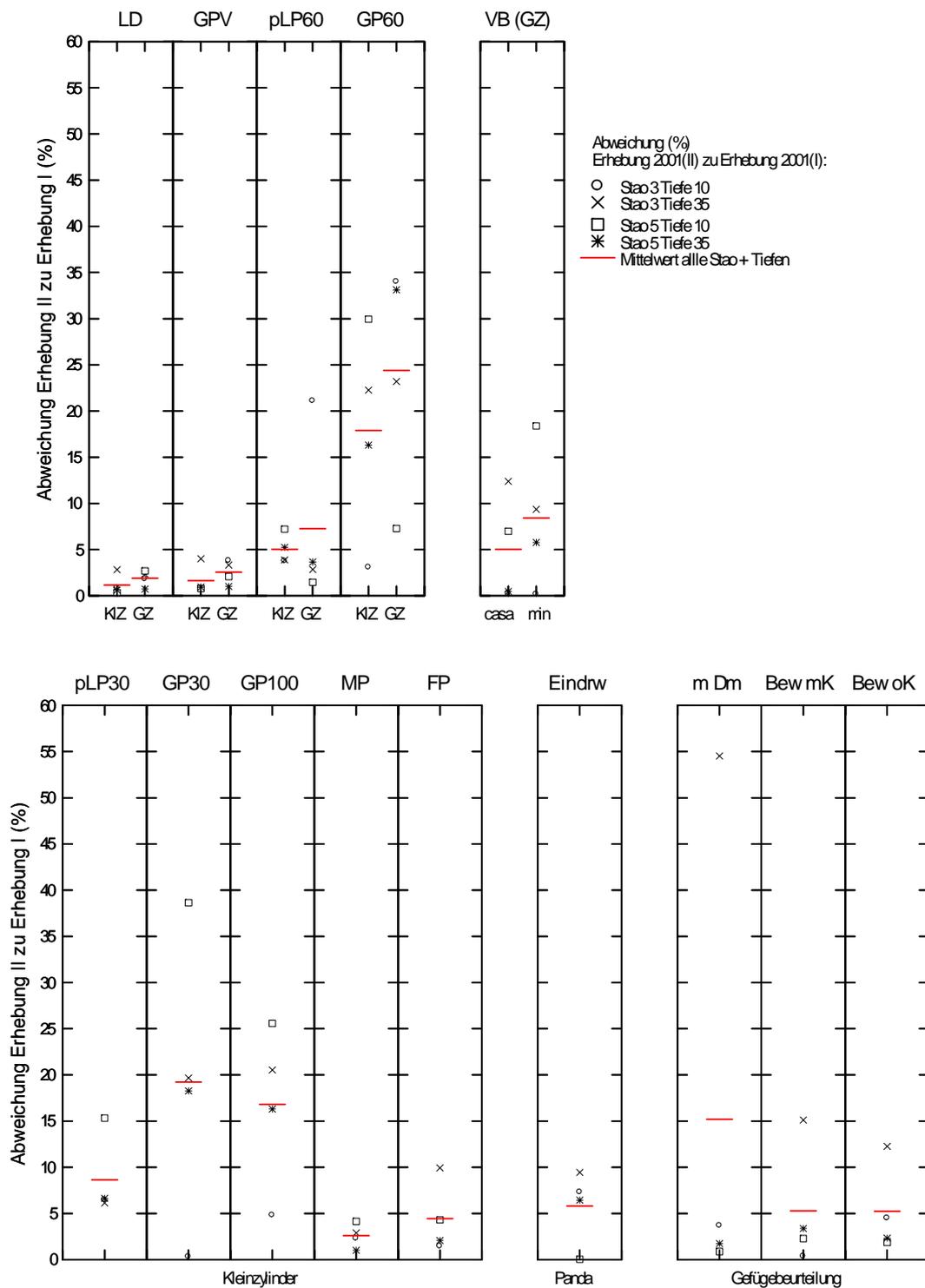
- Zwischen den räumlich verschobenen Erhebungen zeigten sich im Unterboden beider Standorte bei den Klein- und Grosszylinderuntersuchungen jeweils signifikante Unterschiede bei Grobporenvolumen, Gesamtporenvolumen und Lagerungsdichte. Unterschiede bei den Parametern der visuellen Gefügebeurteilung zeigten sich im Unterboden des Standortes 3 Kleinandelfingen ZH. Während die Grosszylinderuntersuchungen in den Oberböden beider Standorte keine Unterschiede anzeigten, resultierten aus den Kleinzylinderuntersuchungen am Standort 5 Reckenholz ZH statistisch signifikante Unterschiede bei den Grob- und Mittelporen-Volumina.
- Insgesamt zeigten die meisten Parameterwerte relative Abweichungen zwischen den örtlich verschobenen Erhebungen von weniger als 20 %. Die Abweichung bei Lagerungsdichte, Gesamt- und Mittelporenvolumen war im Mittel unter 5%, beim Eindringwiderstand unter 10%. Das Grobporenvolumen (GP 30, GP 60, GP 100) zeigte mit rund 20% die grösste Abweichung zwischen den beiden räumlich verschobenen Erhebungen (Figur 18).
- Beim Standort 3 Kleinandelfingen ZH wichen im Unterboden die Parameter der visuellen Gefügebeurteilung auffällig stark ab. Die relative Abweichung des mittleren Aggregatdurchmessers war zehnfach, die Bewertungsklassen dreimal grösser als bei den übrigen Erhebungsvergleichen (Figur 18).



Figur 16: Vergleich der mittleren Lagerungsdichte der Erhebung 2001(I) mit jener der räumlich verschobenen Erhebung 2001(II), dargestellt mit Erhebungswert und 95%-Vertrauensintervall (VI). Anzahl Werte n pro Datenpunkt: KIZ n=32, GZ n=40.



Figur 17: Vergleich des mittleren Grobporenvolumens 0-60hPa der Erhebung 2001(I) mit jener der räumlich verschobenen Erhebung 2001(II), dargestellt mit Erhebungswert und 95%-Vertrauensintervall (VI). Anzahl Werte n pro Datenpunkt: KIZ n=32, GZ n=40.



Figur 18: Relative Abweichung in % der bodenphysikalischen Parameterwerte zwischen der Erhebung 2001(II) und der räumlich verschobenen Erhebung 2001(I), dargestellt pro Standort und Tiefe und im Mittel.

Einfluss unterschiedlicher Probenahmepläne auf die Variabilität der bodenphysikalischen Parameterwerte von Erhebungen:

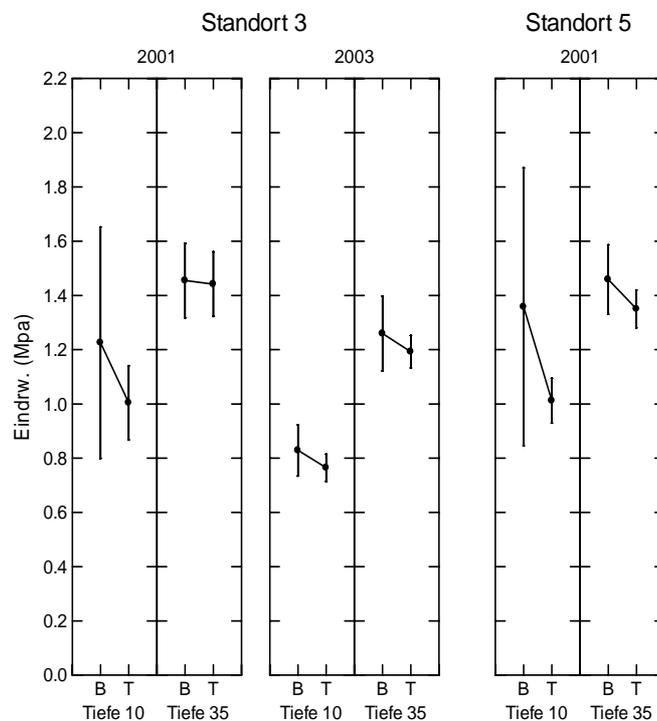
Basierend auf den Beprobungen für die Erhebungen 2001/I und 2001/II wurde für die Parameter LD, GPV, GP60 und LP60 untersucht, inwieweit sich unterschiedliche Probenahmepläne auf die Variabilität der bodenphysikalischen Parameterwerte von Erhebungen auswirken können. Weil bei Zylinderbeprobungen die genaue Position jedes Probenzylinders bekannt ist, konnten diese Abklärungen mit den vorhandenen Daten der beiden genannten Erhebungen durchgeführt werden, indem die Einzelwerte verschiedenen Probenahmeplänen zugeordnet („virtuelle Beprobungen“, vgl. Figur 3) und anschliessend die sich daraus ergebenden Lage- und Verteilungsgrössen auf Stufe Erhebung berechnet wurden.

Von den unterschiedlichen Probenahmeplänen setzte sich nicht keiner durch eine systematisch geringere Variabilität der Parameterwerte von den anderen ab. Im Oberboden waren oft mit einem diagonalen oder einem blockartigen, über grössere Flächen aufgespannten Beprobungsmuster geringere Variabilitätswerte zu erzielen, während die Variabilitätsunterschiede zwischen den Beprobungsmustern im Unterboden insgesamt eher etwas kleiner und wenig systematisch waren. Deutlich wurde v. a. bei den Oberbodenuntersuchungen beider Standorte, dass Probenahmepläne, die nur wenige kleine Teilflächen, aber diese intensiv beproben, eine grössere Variabilität des Erhebungsmittelwertes zur Folge haben als Probenahmepläne, die auf der Grundlage vieler wenig intensiv beprobter Teilflächen eine grössere Gesamtfläche erfassen.

3.3.3 Repräsentativität der Beobachtungen einer Erhebung

Zur Beurteilung der Repräsentativität der 4 Beobachtungen einer Erhebung wurden die 4 Beobachtungen des Eindringwiderstandes mit 16-27 Beobachtungen einer Transekte verglichen. Das Ergebnis veranschaulicht Figur 19:

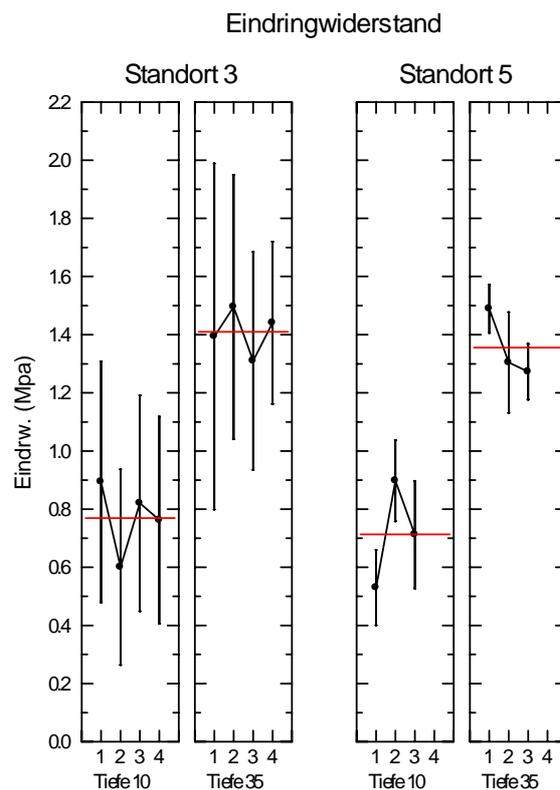
- Im Jahr 2001 sind die Erhebungswerte aus 4 Beobachtungen bei beiden Standorten im Oberboden grösser als jene aus den Bestimmungswerten der Transekte. Beim Standort 3 Kleinandelfingen ZH sind die Schätzwerte einer Erhebung um ca. 20%, beim Standort 5 Reckenholz ZH um ca. 35% grösser. Im Unterboden unterscheiden sich die Erhebungswerte aus 4 Beobachtungen wenig von jenen der Beobachtungen aus der Transekte.
- Im Jahr 2003 sind die Erhebungswerte aus 4 Beobachtungen und aus der Transekte beim untersuchten Standort 3 Kleinandelfingen ZH vergleichbar.
- 2001 waren im Oberboden (10 cm Tiefe) der beiden Standorte die Vertrauensintervalle der Eindringwiderstandsmittelwerte für die Erhebung sehr gross. Die Ursachen sind einerseits die grossen gemessenen Streuungen zwischen den Beobachtungswerte 2001 (Beobachtungen mit bzw. ohne Fahrspuren!) und andererseits die im Vergleich zu den Transektuntersuchungen generell geringe Anzahl von Beobachtungen (entsprechend wenigen Freiheitsgraden).



Figur 19: Vergleich der Eindringwiderstands-Mittelwerte für die Beobachtungen A-D mit den entsprechenden Mittelwerten aus den Transekten-Untersuchungen, dargestellt mit Erhebungsmittelwert und 95%-Vertrauensintervall (VI). Anzahl Werte n_B pro Datenpunkt: Beobachtungen $n_B=4$, Transekten $n_B=16-27$.

3.3.4 Vergleich von Erhebungen bei unterschiedlichem Bodenzustand

2002 wurden für die beiden Feldbestimmungsmethoden „Eindringwiderstandsmessung mit Panda-sonde“ und „visuelle Gefügebeurteilung“ an 2 bzw. 4 Zeitpunkten Erhebungen bei möglichst unterschiedlicher Bodenfeuchte durchgeführt. Damit sollte untersucht werden, wie stark der Bodenzustand zum Zeitpunkt der Messung bzw. Probenahme (zum Beispiel durch unterschiedliche Bodenfeuchte) - neben der räumlichen Verschiebung einer Beprobung - den absoluten Erhebungswert beeinflussen kann (Figur 20). Die Ergebnisse der visuellen Gefügebeurteilung sind im Anhang G zu finden.



Figur 20: Eindringwiderstandswerte 2002 bei unterschiedlicher Bodenfeuchte zu den vier Zeitpunkten 1= Ersterhebungstermin, 2= ca. ein Monat nach Termin 1, 3= nach der Ernte (Sommer bzw. Herbst), 4= ca. ein Monat nach Termin 3, dargestellt mit Erhebungsmittelwert und 95%-Vertrauensintervall (VI). Anzahl Werte n_B pro Datenpunkt: $n_B=4$ die horizontale Linie stellt den Mittelwert der 4 bzw. 3 Erhebungen dar.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Eindringwiderstandswerte am Standort 5 Reckenholz ZH zwischen dem ersten und zweiten Erhebungstermin signifikant unterschieden. Die Differenz im Oberboden betrug über 0.35 MPa, das sind ca. 50% des mittleren Standortwertes für das Jahr 2002 bzw. 38% des mittleren Standortwertes der drei Erhebungen 2001(I), 2002(1) und 2003.

Bei den Parametern der visuellen Gefügebeurteilung wiesen die Erhebungswerte lediglich im Oberboden des Standortes 3 Kleinandelfingen ZH zwischen dem ersten und zweiten Erhebungszeitpunkt (im Frühjahr) eine signifikante Differenz auf. Die Differenz betrug aber weniger als 0.4 Einheiten einer Beurteilungsklasse. Bei den Parametern der visuellen Gefügebeurteilung fallen vor allem die unterschiedlich grossen Vertrauensintervalle (verursacht durch unterschiedliche Streuungen der Beobachtungswerte) auf.

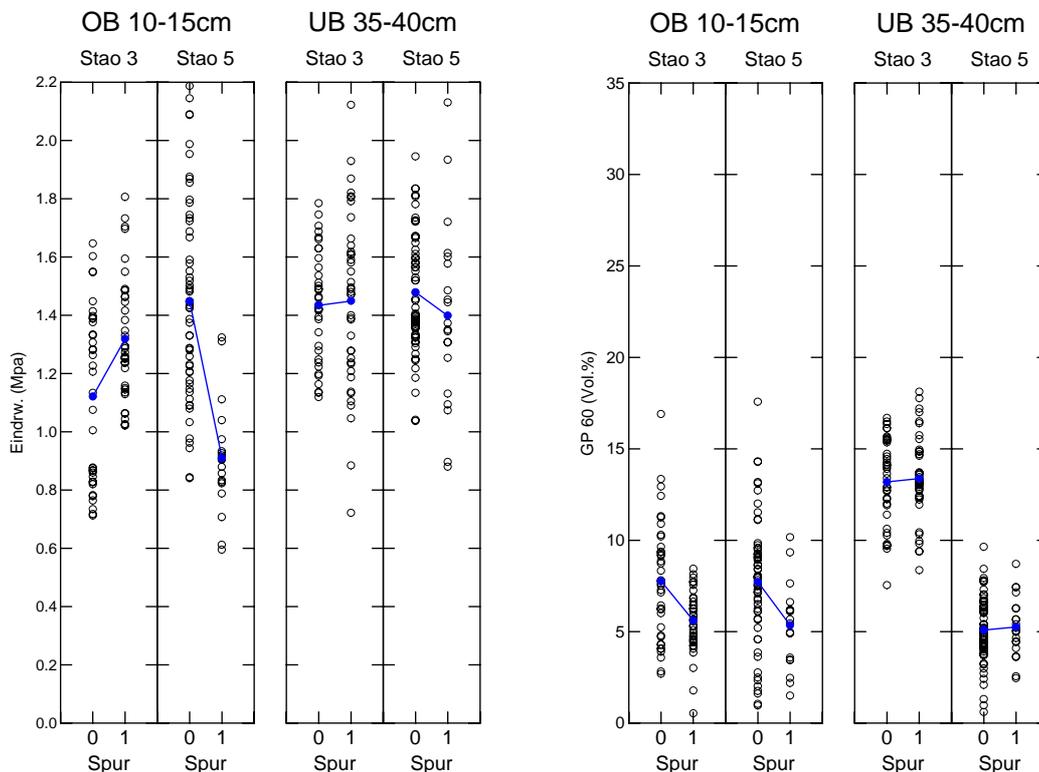
3.3.5 Zusammenhang zwischen sichtbaren Fahrspuren und Parameterwerten

Die Beobachtungen der Erhebungen 2001(I) und 2001(II) lagen zum Teil unter einer aktuellen Fahrspur (vgl. Tabelle 4). Der Zusammenhang zwischen der Ausprägung der bodenphysikalischen Parameterwerte und dem Vorhandensein (1) oder dem Fehlen (0) einer aktuellen Fahrspur zeigt den Zusammenhang („Effekt“).

Die Ergebnisse in Figur 21 zeigen:

- Im Oberboden beider Standorte besteht bei Eindringwiderstand und Grobporenvolumen ein Zusammenhang zwischen sichtbarer Fahrspur und (ungünstiger) Veränderung der Parameterwerte, nicht dagegen im Unterboden.
- Am Standort 5 Reckenholz ZH ist der Eindringwiderstand im Oberboden unter der Spur interessanterweise geringer als neben der Spur, was auf eine geringere Stabilität des Gefüges unter der Fahrspur hindeutet.

Die Ergebnisse weiterer bodenphysikalischer Parameter sind im Anhang H zu finden und zeigen, dass die Befahrungseffekte auch bei der Lagerungsdichte, dem Gesamtporenvolumen und der Vorbelastung im Oberboden beider Standorte sichtbar werden. Beim Mittel- und Feinporenvolumen konnten keine Befahrungseffekte nachgewiesen werden. Die Luftpermeabilität im Oberboden wurde nur beim Standort 3 Kleinandelfingen ZH durch Fahrspuren beeinflusst.



Figur 21: Zusammenhang zwischen sichtbaren Fahrspuren und den bodenphysikalischen Parameterwerten für Eindringwiderstand (links) und Grobporenvolumen 0-60hPa GZ (rechts). Der Vergleich der Mittelwerte „mit Fahrspur“ und „ohne Fahrspur“ (blaue Linie) zeigt den mittleren Befahrungseffekt. 0 = keine Fahrspur, 1 = sichtbare Fahrspur; Zylinderproben aus 10-15 cm Tiefe (OB) und 35-40 cm Tiefe (UB); Stao 3 = Kleinandelfingen ZH, Stao 5 = Reckenholz ZH.

3.4 Langzeitbeobachtung: Beurteilen der langfristigen Veränderung von Bodeneigenschaften vor dem Hintergrund räumlicher Heterogenität und kurzzeitiger Schwankungen

3.4.1 Analyse der Variabilitätsursachen von bodenphysikalischen Parameterwerten

Aus der hierarchischen Varianzanalyse der Datensätze 2001 Erhebung I, 2002 und 2003 wurden pro Standort die Varianzkomponenten für die Stufen „Bestimmung“ (innerhalb einer Beobachtung), „Beobachtung“ (innerhalb einer Erhebung) und „Erhebung“ (innerhalb eines Standortes) berechnet (Tabelle 12). Die Ergebnisse zeigen, dass die Varianzkomponenten in der Tiefe 10-15 cm bei allen Stufen grösser sind als in der Tiefe 35-40cm und die Varianzkomponenten je nach Parameter, Standort und Tiefe unterschiedliche Gewichte aufweisen.

Tabelle 12: Varianzkomponenten aus der hierarchischen Varianzanalyse für die Stufen Bestimmung, Beobachtung und Erhebung; Datengrundlage: Erhebungen 2001(I), 2002 und 2003.

Parameter [Einheit]	Zylinder- Art	Stao	Tiefe cm	Varianzkomponente		
				Bestimmung	Beobachtung	Erhebung
LD Lagerungsdichte [g/cm ³]	KIZ	3	10-15	0.002	0.003	0.003
		3	35-40	0.001	0.001	0.002
		5	10-15	0.005	0.001	0.009
		5	35-40	0.000	0.000	0.000
	GZ	3	10-15	0.002	0.001	0.002
		3	35-40	0.001	0.001	0.001
		5	10-15	0.002	0.001	0.002
		5	35-40	0.001	0.000	0.000
GPV Gesamtporen- volumen [%]	KIZ	3	10-15	2.59	4.62	3.11
		3	35-40	0.85	1.38	1.43
		5	10-15	6.68	1.16	12.13
		5	35-40	0.71	0.41	0.00
	GZ	3	10-15	2.47	2.27	1.88
		3	35-40	1.21	1.17	1.69
		5	10-15	2.41	1.21	1.94
		5	35-40	1.14	0.53	0.00
GP_30 Grobporen 0-30hPa [%]	KIZ	3	10-15	3.19	7.57	4.22
		3	35-40	1.26	3.67	0.39
		5	10-15	8.16	2.35	41.30
		5	35-40	1.93	1.03	0.11
GP_60 Grobporen 0-60hPa [%]	KIZ	3	10-15	3.31	9.66	8.33
		3	35-40	1.77	2.92	8.01
		5	10-15	8.48	2.20	46.73
		5	35-40	1.93	1.03	0.30
	GZ	3	10-15	9.09	6.51	4.80
		3	35-40	4.77	1.30	6.92
		5	10-15	7.56	1.48	14.28
		5	35-40	2.43	0.27	1.42
GP_100 Grobporen 0-100hPa [%]	KIZ	3	10-15	3.40	9.99	7.07
		3	35-40	1.98	2.72	4.07
		5	10-15	8.88	2.85	45.84
		5	35-40	1.83	0.86	0.11

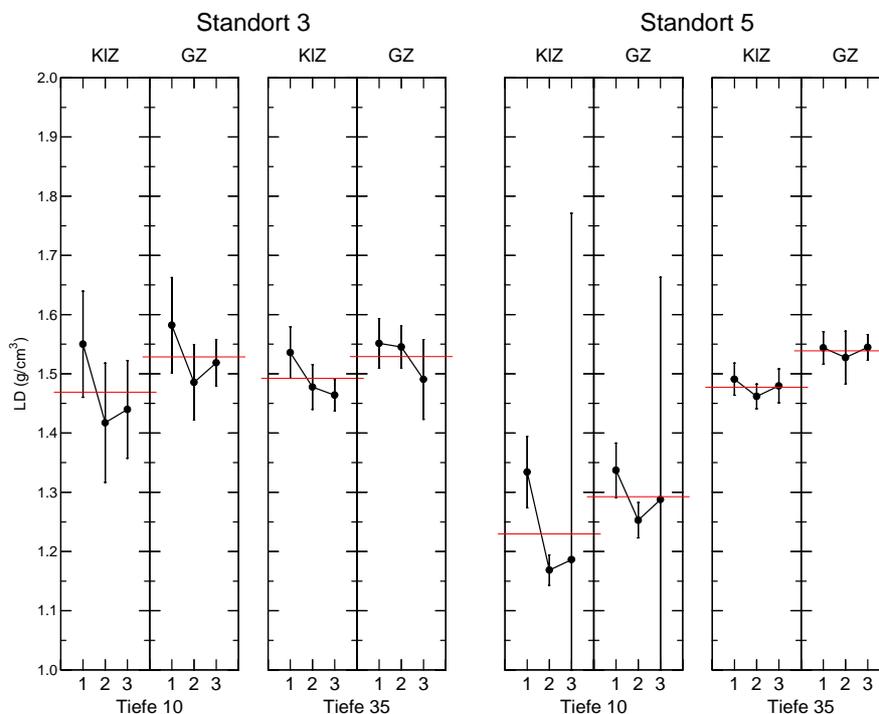
Fortsetzung Tabelle 12

Parameter [Einheit]	Zylinder- Art	Stao	Tiefe cm	Varianzkomponente		
				Bestimmung	Beobachtung	Erhebung
MP Mittelporen 100hPa-15MPa [%]	KIZ	3	10-15	1.04	1.30	0.09
		3	35-40	0.25	1.09	0.00
		5	10-15	1.48	0.00	2.36
		5	35-40	0.65	0.00	1.38
FP Feinporen >15MPa [%]	KIZ	3	10-15	1.04	1.59	2.18
		3	35-40	0.41	2.64	0.32
		5	10-15	2.73	0.88	4.61
		5	35-40	0.97	0.45	0.38
pLp_30 Log Luftpermeabili- tät bei 30hPa [Log10 10 ⁻¹⁰ cm ²]	KIZ	3	10-15	0.21	0.11	0.23
		3	35-40	0.15	0.18	0.03
		5	10-15	0.12	0.07	0.72
		5	35-40	0.23	0.18	0.01
pLp_60 Log Luftpermeabili- tät bei 60hPa [Log10 10 ⁻¹⁰ cm ²]	KIZ	3	10-15	0.23	0.14	0.25
		3	35-40	0.10	0.02	0.06
		5	10-15	0.26	0.05	0.75
		5	35-40	0.16	0.09	0.01
	GZ	3	10-15	0.19	0.18	0.07
		3	35-40	0.07	0.01	0.04
		5	10-15	0.05	0.01	0.15
		5	35-40	0.11	0.00	0.02
VB Casa Vorbelastung nach Casagrande [kPa]	GZ	3	10-15	67.2	23.1	83.8
		3	35-40	165.8	33.1	0.0
		5	10-15	33.7	2.0	120.7
		5	35-40	204.4	16.7	613.5
VB min Vorbelastung Methode "minimal" [kPa]	GZ	3	10-15	54.5	16.0	39.8
		3	35-40	105.2	38.4	0.0
		5	10-15	18.5	3.7	85.2
		5	35-40	98.4	8.8	350.2
EdW Eindringwiderstand [MPa]		3	10-15	0.043	0.035	0.047
		3	35-40	0.025	0.074	0.000
		5	10-15	0.051	0.058	0.157
		5	35-40	0.052	0.012	0.013
mDm mittl. Aggregat- durchmesser [mm]		3	10-15	20.6	7.4	75.9
		3	35-40	15.7	32.9	46.5
		5	10-15	996.8	381.1	0.0
		5	35-40	162.5	50.3	0.0
BewmK Gefügebewertung mit Korrekturfakt. [Kl.]		3	10-15	0.124	0.040	1.091
		3	35-40	0.268	0.132	4.834
		5	10-15	1.454	0.799	0.000
		5	35-40	0.548	0.000	0.120
BewoK Gefügebewertung ohne Korrekturfakt. [Kl.]		3	10-15	0.124	0.059	0.981
		3	35-40	0.268	0.132	3.178
		5	10-15	0.932	0.393	0.000
		5	35-40	0.112	0.012	0.000

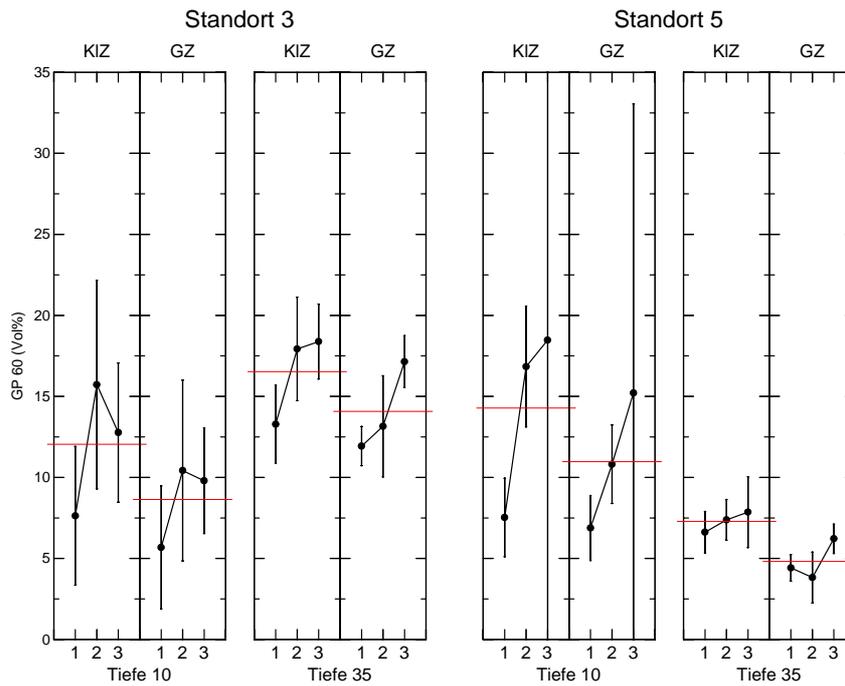
3.4.2 Zeitliche Entwicklung der bodenphysikalischen Parameterwerte zwischen den Erhebungen 2001-2003

Zur Beurteilung der zeitlichen Veränderung der physikalischen Bodeneigenschaften wurden die Mittelwerte der drei jährlichen Erhebungen 2001(I), 2002 und 2003 miteinander verglichen. Das Ergebnis veranschaulichen Figur 23 bis Figur 22 sowie der Anhang I:

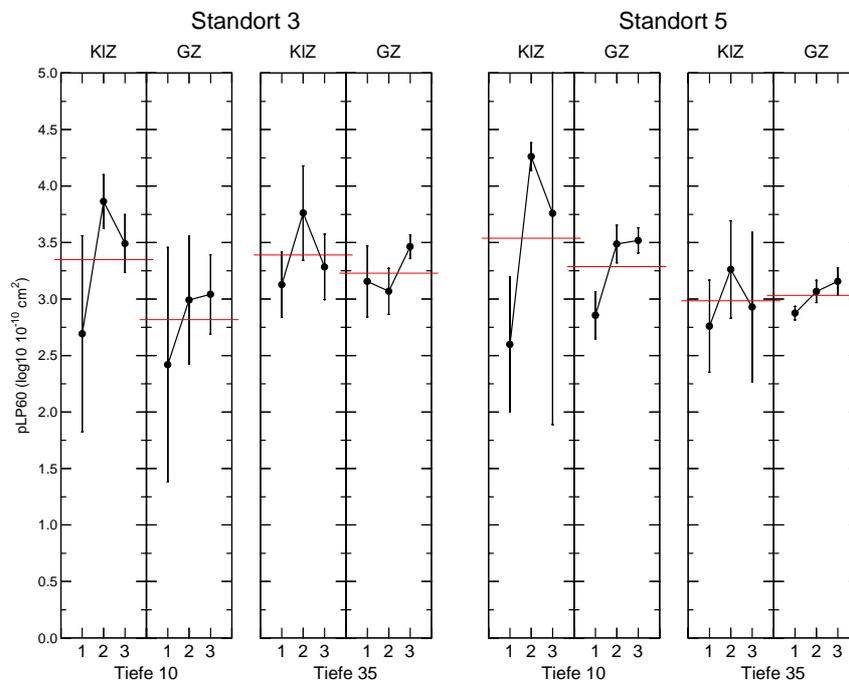
- Jeder bodenphysikalische Parameter weist mindestens an einem der beiden Standorte und in einer Tiefe deutliche Unterschiede zwischen den jährlichen Erhebungen auf. Zumeist handelt es sich dabei um Unterschiede zwischen den Jahren 2001 und 2002. Die Unterschiede zwischen 2001 und 2003 bzw. 2002 und 2003 sind in den meisten Fällen geringer.
- Grundsätzlich schwanken die bodenphysikalischen Parameterwerte des Kleinzylindersystems im Verlauf der 3 Untersuchungsjahre stärker als jene des Grosszylindersystems.
- Die Verläufe der Parameterwerte über die 3 Untersuchungsjahre zeigen zwischen dem Klein- und dem Grosszylindersystem vor allem im Oberboden (10-15 cm) eine relativ gute Parallelität. Im Unterboden ist die Parallelität zum Teil weniger ausgeprägt (z.B. Figur 24).
- Das zum Teil extrem grosse 95%-Vertrauensintervall der Erhebungsmittelwerte 2003 beim Standort 5 Reckenholz ZH in der Tiefe 10-15 cm ist aufgrund einer verminderten Anzahl realisierter Beobachtungen ($n_B=2$) und der entsprechend geringen Anzahl Freiheitsgrade zurückzuführen (zu hohe Bodenfeuchtigkeit).
- An beiden Standorten zeigen sich im Verlauf der 3 Untersuchungsjahre grössere Veränderungen der bodenphysikalischen Parameterwerte im Oberboden als im Unterboden.



Figur 22: Lagerungsdichte (LD) aus den Bestimmungen mit dem Kleinzylinder- (KIZ) und dem Grosszylindersystem (GZ) in den Jahren 1 = 2001(I), 2 = 2002 und 3 = 2003; mittlere Erhebungswerte mit 95% Vertrauensintervall (VI). Anzahl Beobachtungen n pro Datenpunkt: $n_B=4$; Standort 5 Reckenholz ZH, Tiefe 10-15 cm, Jahr 2003 $n_B=2$; horizontale Linie: mittlerer Standortwert über 3 Jahre.



Figur 23: Grobporenvolumen 0-60 hPa (GP 60) aus den Bestimmung mit dem Kleinzylinder- (KIZ) und dem Grosszylindersystem (GZ) in den Jahren 1 = 2001(I), 2 = 2002 und 3 = 2003; mittlere Erhebungswerte mit 95% Vertrauensintervall (VI). Anzahl Beobachtungen n pro Datenpunkt: n=4; Standort 5 Reckenholz ZH, Tiefe 10-15 cm, Jahr 2003 n=2; horizontale Linie: mittlerer Standortwert über 3 Jahre.



Figur 24: Log Luftpermeabilität bei 60 hPa (pLP60) aus den Bestimmungen mit dem Kleinzylinder- (KIZ) und dem Grosszylindersystem (GZ) in den Jahren 1 = 2001(I), 2 = 2002 und 3 = 2003; mittlere Erhebungswerte mit 95% Vertrauensintervall (VI). Anzahl Beobachtungen n pro Datenpunkt: n=4; Standort 5 Reckenholz ZH, Tiefe 10-15 cm, Jahr 2003 n=2; horizontale Linie: mittlerer Standortwert über 3 Jahre.

3.4.3 Beurteilung der zeitlichen Veränderungen aufgrund von statistischen Signifikanzschwellen

Um die statistische Relevanz von Veränderungen der Parameterwerte zwischen den Erhebungen zu beurteilen, wurden diese mit den berechneten 95%-Signifikanzschwellen für Mittelwertsdifferenzen (zVI) verglichen. Diese wurden aus den Varianzkomponenten (Tabelle 12) der Stufen „Bestimmung“ und „Beobachtung“ gemäss dem hierarchischen Modell (Teil 1, Kapitel 3.3.3.) berechnet. In Tabelle 13 sind die berechneten zVI für die Erhebungsdifferenzen aller bodenphysikalischen Parameter für beide Standorte und Bodentiefen aufgeführt.

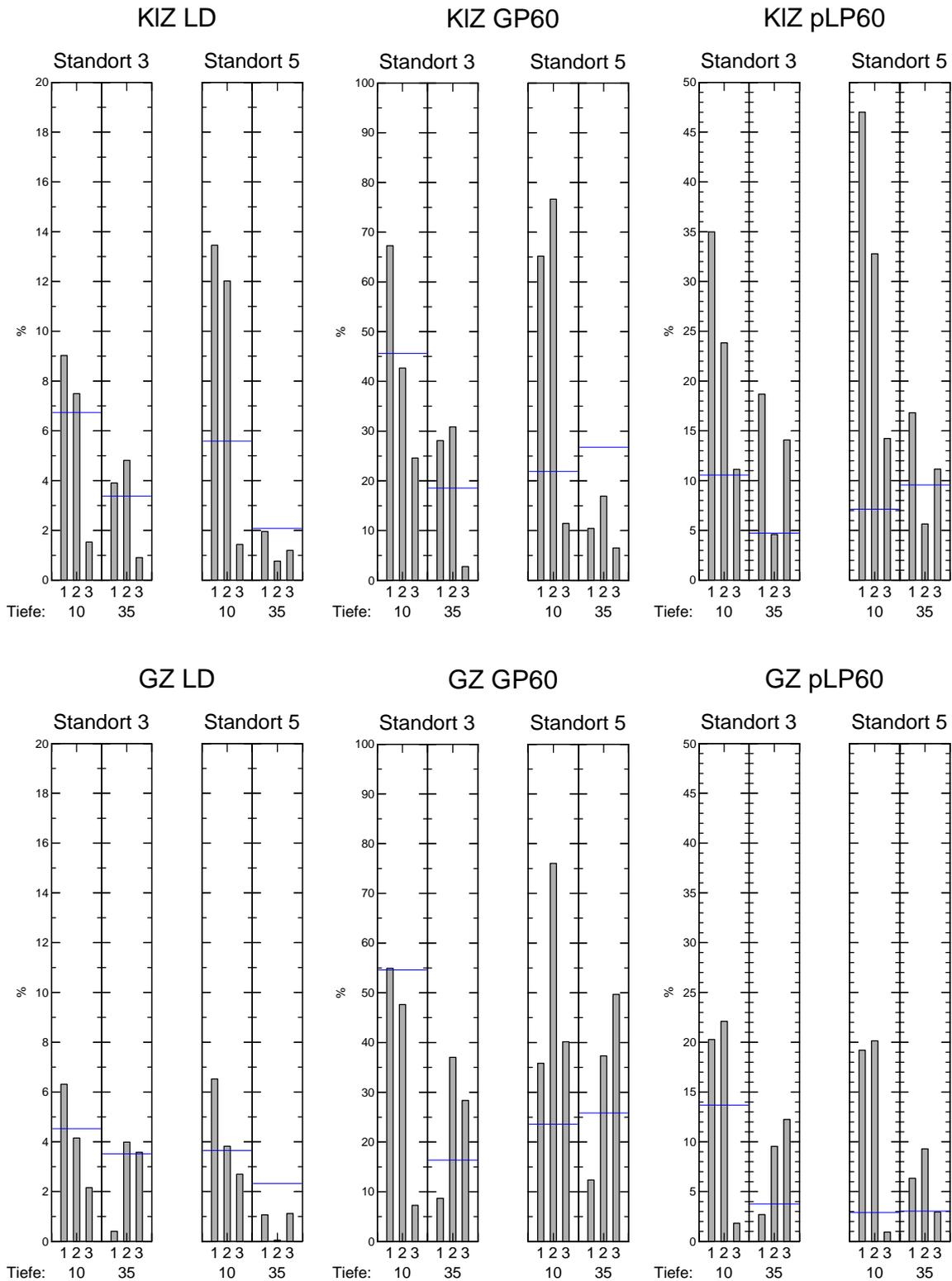
Tabelle 13: Zweiseitiges Vertrauensintervall von Erhebungsdifferenzen (zVI) für die bodenphysikalischen Parameter für die einzelnen Standorte und Bodentiefen des LAZBO-Pilotprojektes.

Parameter [Einheit]	Zylinder- Art	Tiefe cm	zVI	
			Standort 3	Standort 5
LD Lagerungsdichte [g/cm ³]	KIZ	10-15	0.10	0.07
		35-40	0.05	0.03
	GZ	10-15	0.07	0.05
		35-40	0.05	0.04
GPV Gesamtporenvolumen [%]	KIZ	10-15	3.8	2.4
		35-40	2.1	1.2
	GZ	10-15	2.7	2.1
		35-40	2.0	1.4
GP_30 Grobporen 0-30hPa [%]	KIZ	10-15	4.9	3.2
		35-40	3.4	2.0
GP_60 Grobporen 0-60hPa [%]	KIZ	10-15	5.5	3.1
		35-40	3.1	2.0
	GZ	10-15	4.7	2.6
		35-40	2.3	1.2
GP_100 Grobporen 0-100hPa [%]	KIZ	10-15	5.6	3.4
		35-40	3.0	1.8
MP Mittelporen 100hPa-15MPa [%]	KIZ	10-15	2.1	0.7
		35-40	1.8	0.5
FP Feinporen >15MPa [%]	KIZ	10-15	2.3	1.9
		35-40	2.8	1.3
pLp_30 Log Luftpermeabilität bei 30hPa [Log ₁₀ 10-10 cm ²]	KIZ	10-15	0.63	0.50
		35-40	0.77	0.78
pLp_60 Log Luftpermeabilität bei 60hPa [Log ₁₀ 10-10 cm ²]	KIZ	10-15	0.71	0.51
		35-40	0.32	0.57
	GZ	10-15	0.77	0.19
		35-40	0.24	0.18
VB Casa Vorbelastung nach Casagrande [kPa]	GZ	10-15	9.5	4.0
		35-40	12.2	10.5
VB min Vorbelastung Methode "minimal" [kPa]	GZ	10-15	8.0	4.1
		35-40	12.1	7.5
EdW Eindringwiderstand [MPa]		10-15	0.34	0.44
		35-40	0.48	0.23
mDm mittl. Aggregatdurchmesser [mm]		10-15	6.1	43.4
		35-40	10.5	16.5
BewmK Gefügebewertung mit Korrekturfakt. [Kl.]		10-15	0.5	1.9
		35-40	0.8	0.6
BewoK Gefügebewertung ohne Korrekturfakt. [Kl.]		10-15	0.5	1.4
		35-40	0.8	0.3

In Figur 25 sind für die Parameter Lagerungsdichte (LD), Grobporenvolumen 0-60 hPa (GP60) und logarithmierte Luftpermeabilität bei 60 hPa (pLp60) bestimmt mit dem Kleinzylinder- (KLZ) bzw. dem Grosszylindersystem (GZ) die Mittelwertsdifferenzen (Balken) und die berechneten 95%-Signifikanzschwellen für Erhebungsdifferenzen (Linie) beispielhaft dargestellt. Die relativen Differenzen zwischen den Erhebungen und die relativen 95%-Signifikanzschwellen sind in Prozent des mittleren Standortwertes angeben. Die Mittelwertsdifferenzen zwischen den jeweiligen Erhebungen sind: **1** = Differenz zwischen 2001 und 2002, **2**= zwischen 2001 und 2003, **3**= zwischen 2002 und 2003. Die Grafiken für die anderen Parameter sind im Anhang J zu finden. Alle Veränderungen grösser als das zVI sind mit 95% Wahrscheinlichkeit als statistisch signifikant zu betrachten.

Die Ergebnisse zeigen:

- Die relativen Erhebungsdifferenzen bezogen auf den mittleren Standortwert der 3 Untersuchungsjahre sind bei der Lagerungsdichte (LD), dem Gesamtporenvolumen (GPV) und dem Feinporenvolumen (FP) am tiefsten und unter 15%. Bei den Parametern Grobporenvolumen (GP_30, GP_60, GP_100), Vorbelastung (VBcasa, VBmin), dynamischer Eindringwiderstand (Edw), mittlerer Gefügedurchmesser (mDm) und Gefügebewertung ohne Korrekturfaktor (BewmK) wurden dagegen Veränderungen von 70-90% des jeweiligen Standortwertes gemessen (siehe Figur 25 und Figuren im Anhang J).
- Die Zusammenstellung in Tabelle 14 zeigt die unterschiedliche Anzahl signifikanter Differenzen bei den einzelnen bodenphysikalischen Parametern für die beiden Standorte und Tiefen sowie über alle Standorte und Tiefen insgesamt. Beim Parameter logarithmierte Luftpermeabilität bei 60hPa (pLp_60) bestimmt mit dem Kleinzylindersystem sind mit total 10 signifikanten Differenzen (entsprechend 80% aller möglichen Differenzen) am meisten Veränderungen statistisch erheblich. Die Jahresunterschiede beim Parameter visuelle Gefügebewertung (mDm, BewmK und BewoK) waren am seltensten statistisch signifikant; am Standort 5 Reckenholz ZH waren sogar alle Veränderungen unterhalb der Signifikanzschwelle.



Figur 25: Relative Veränderungen bodenphysikalischer Parameterwerte zwischen den Erhebungsjahren (Balken) im Vergleich zu den berechneten relativen 95%-Signifikanzschwellen für Mittelwertsdifferenzen (zVI). (blaue Linie) für die bodenphysikalischen Parameter: Lagerungsdichte (LD), Grobporenvolumen 0-60 hPa (GP60) und logarithmierte Luftpermeabilität bei 60 hPa (pLP60); oben: Bestimmungen mit dem Kleinzylindersystem (KIZ), unten: Bestimmungen mit dem Grosszylindersystem (GZ); relative Angaben in % des jeweiligen mittleren Standortwertes; Differenzen zwischen Erhebungsjahren: 1 = zwischen 2001 und 2002, 2 = zwischen 2001 und 2003, 3 = zwischen 2002 und 2003.

Tabelle 14: Anzahl signifikanter Differenzen zwischen Erhebungswerten der untersuchten bodenphysikalischen Parameter an den zwei untersuchten Standorten und Tiefen; Anzahl und Prozentanteil signifikanter Differenzen total.

Parameter [Einheit]	Zylinder- Art	Anzahl signifikante Differenzen					
		Standort 3		Standort 5		Total	
		10-15 cm	35-40 cm	10-15 cm	35-40 cm	Anzahl	in %
LD Lagerungsdichte [g/cm ³]	KIZ	2	2	2	0	6	50
	GZ	1	2	2	0	5	42
GPV Gesamtporenvolumen [%]	KIZ	1	2	2	0	5	42
	GZ	1	2	1	0	4	33
GP_30 Grobporen 0-30hPa [%]	KIZ	1	0	2	0	3	25
GP_60 Grobporen 0-60hPa [%]	KIZ	1	2	2	0	5	42
	GZ	1	1	2	2	6	50
GP_100 Grobporen 0-100hPa [%]	KIZ	1	2	2	0	5	42
MP Mittelporen 100hPa-15MPa [%]	KIZ	2	0	3	2	7	58
FP Feinporen >15MPa [%]	KIZ	2	2	2	2	8	67
pLp_30 Log Luftpermeabilität bei 30hPa [Log ₁₀ 10-10 cm ²]	KIZ	2	2	3	0	7	58
pLp_60 Log Luftpermeabilität bei 60hPa [Log ₁₀ 10-10 cm ²]	KIZ	3	2	3	2	10	83
	GZ	2	2	2	2	8	67
VB Casa Vorbelastung nach Casagrande [kPa]	GZ	2	0	3	2	7	58
VB min Vorbelastung Methode "minimal" [kPa]	GZ	2	0	3	3	8	67
EdW Eindringwiderstand [MPa]		2	0	2	1	5	42
mDm mittl. Aggregatdurchmesser [mm]		2	2	0	0	4	33
BewmK Gefügebewertung mit Korrekturfakt. [KI.]		2	2	0	0	4	33
BewoK Gefügebewertung ohne Korrekturfakt. [KI.]		2	2	0	0	4	33

3.4.4 Funktionelle Relevanz

Für die Parameter Lagerungsdichte, Grobporenvolumen und Eindringwiderstand können die Erhebungswerte und die zeitlichen Veränderungen in Bezug zu den Richtwertvorschlägen der Plattform Bodenschutz BGS (BGS, 2004) gestellt werden. Dazu wurde der Richtwertvorschlag für die effektive Lagerungsdichte (Tabelle 7) aufgrund des schicht- und standortspezifischen Tongehaltes in den Parameter Lagerungsdichte umgerechnet.

Die Ergebnisse in Tabelle 15 zeigen, dass für den Parameter LD beim Standort 3 Kleinandelfingen ZH die Werte um den vorgeschlagenen Richtwert streuen und beim Standort 5 Reckenholz ZH in 35-40 cm Tiefe bei allen Erhebungen knapp über dem RW liegen. Die Beurteilungen aus den Bestimmungen mit dem Kleinzylinder- (KIZ) und dem Grosszylindersystem (GZ) sind vergleichbar.

Die Werte für das Grobporenvolumen (GP_60) liegen bei der Bestimmung mit dem Grosszylindersystem am Standort 5 Reckenholz ZH in 35-40 cm Tiefe in allen drei Jahren unter dem vorgeschlagenen Richtwert und somit im kritischen Bereich. Bei der Bestimmung mit dem Kleinzylindersystem wurden die kritischen Werte am Standort 5 Reckenholz ZH in 35-40 cm Tiefe nur 2001 unterschritten. An beiden Standorten wurde der vorgeschlagene Richtwert im Oberboden nur 2001 bei der Bestimmung mit dem Grosszylindersystem unterschritten. Die Ergebnisse zeigen, dass je nach

verwendetem Bestimmungssystem (GZ, KIZ) eine unterschiedliche Relevanzbeurteilung relativ zum Richtwert resultiert.

Die Erhebungswerte für den dynamischen Eindringwiderstand (EdW) liegen bei allen Erhebungen unter dem Richtwertvorschlag von 2 MPa. Beim Standort 5 Reckenholz ZH in 35-40cm Tiefe sind sie mit 75-84% des Richtwertes am höchsten.

Ein Drittel der Veränderungen der Lagerungsdichte zwischen den drei Erhebungsjahren sind bei Bestimmungen mit dem Kleinzylindersystem grösser als 5% des vorgeschlagenen Richtwertes. Bei Bestimmungen mit dem Grosszylindersystem ist es nur ein Sechstel. Die Veränderung des Grobporenvolumens zwischen den Erhebungsjahren ist relativ zum Richtwertvorschlag sehr hoch und schwankt bei der Bestimmung mit dem Kleinzylindersystem zwischen 7 und 156% des vorgeschlagenen Richtwertes, beim Grosszylindersystem zwischen 9 und 119%. Die Veränderungen des Eindringwiderstandes liegen im Bereich 0.2-41% des Richtwertvorschlages, wobei insgesamt drei Viertel der Veränderungen grösser als 5% des Richtwertvorschlages sind.

Tabelle 15: Erhebungswerte und deren Veränderungen in Prozent des Richtwertvorschlages für die bodenphysikalischen Parameter Lagerungsdichte (LD), Grobporenvolumen (GP_60) und dynamischer Eindringwiderstand (EdW). Richtwertüberschreitungen bei der LD, Richtwertunterschreitungen beim GP_60 sowie Veränderungen des dynamischen Eindringwiderstandes grösser als 5% des Richtwertvorschlages sind fett hervorgehoben.

Parameter [Einheit]	Zylinder- Art	Stao	Tiefe cm	Richtwert	Erhebungswerte			Erhebungswerte in % des Richtwertes			Veränderungen in % des Richtwertes		
					2001 (I)	2002	2003	2001 (I)	2002	2003	01 vs 02	01 vs 03	02 vs 03
LD * [g/cm ³]	KIZ	3	10-15	1.54	1.55	1.42	1.44	100.8	92.2	93.7	-8.6	-7.2	1.5
		3	35-40	1.53	1.54	1.48	1.46	100.1	96.3	95.4	-3.8	-4.7	-0.9
		5	10-15	1.47	1.33	1.17	1.19	91.0	79.7	80.9	-11.3	-10.1	1.2
		5	35-40	1.43	1.49	1.46	1.48	104.3	102.3	103.5	-2.0	-0.8	1.2
	GZ	3	10-15	1.54	1.58	1.49	1.52	102.9	96.6	98.8	-6.3	-4.1	2.1
		3	35-40	1.53	1.55	1.55	1.49	101.1	100.7	97.1	-0.4	-4.0	-3.6
		5	10-15	1.47	1.34	1.25	1.29	91.2	85.5	87.8	-5.8	-3.4	2.4
		5	35-40	1.43	1.54	1.53	1.54	108.0	106.9	108.1	-1.2	0.1	1.2
GP_60** 0-60hPa [%]	KIZ	3	10-15	7.0	7.6	15.7	12.8	108.9	224.7	182.4	115.7	73.4	-42.3
		3	35-40	7.0	13.3	17.9	18.4	189.8	256.1	262.6	66.3	72.8	6.5
		5	10-15	7.0	7.5	16.8	18.5	107.6	240.6	263.9	133.0	156.3	23.3
		5	35-40	7.0	6.6	7.4	7.9	94.6	105.5	112.2	10.9	17.6	6.8
	GZ	3	10-15	7.0	5.7	10.4	9.8	81.2	148.9	139.9	67.8	58.8	-9.0
		3	35-40	7.0	11.9	13.2	17.1	170.5	187.9	244.9	17.5	74.5	57.0
		5	10-15	7.0	6.9	10.8	15.2	98.2	154.4	217.4	56.2	119.1	62.9
		5	35-40	7.0	4.4	3.8	6.2	63.1	54.6	88.8	-8.5	25.7	34.2
EdW [MPa]		3	10-15	2.0	1.27	0.89	0.83	63.6	44.7	41.4	-18.9	-22.2	-3.2
		3	35-40	2.0	1.39	1.39	1.26	69.5	69.7	63.0	0.2	-6.5	-6.7
		5	10-15	2.0	1.36	0.53	0.88	67.9	26.5	43.8	-41.4	-24.1	17.3
		5	35-40	2.0	1.51	1.49	1.72	75.4	74.5	86.2	-0.9	10.8	11.7

LD * : Richtwert LD berechnet aus RW "effektive LD" - (0.009 * Tongehalt%)

GP_60** : Richtwert "Grobporenvolumen 60hPa" ist als Untergrenze vorgeschlagen, d.h. GP_60-Werte grösser als Richtwertvorschlag entsprechen dem Normalbereich

Die Tatsache, dass bodenphysikalische Parameter die räumliche Heterogenität gut erfassen können (Teil 2, Kapitel 3.2. und 3.3.), lässt sich auch für die Beurteilung von Veränderungen nutzen. Weil die Parameterwerte aufgrund der räumlichen Heterogenität üblicherweise einen grösseren Wertebereich

reich überstreichen, deutet eine erhebliche Verringerung der Variabilität auf eine Homogenisierung der Gefügeeigenschaften hin. Wenn sich Parameter-Mittelwerte in die ungünstige Richtung entwickeln und gleichzeitig die Variabilität der Werte abnimmt, ist dies ein deutlicher Hinweis auf Gefügeschäden durch Verdichtung.

4 Diskussion

4.1 Genauigkeit der Bestimmungen und Auswirkungen auf die Lagebestimmung und Interpretation von Veränderungen

Zur Genauigkeit eines bodenphysikalischen Parameterwertes tragen gemäss Teil 1 Figur 2 die Schritte „Aufbereitung“, „Lagerung“ und „Bestimmungsmethode“ bei, d.h. die Genauigkeit der Bestimmungsmethode macht nur einen Teil der Gesamtgenauigkeit eines Parameterwertes aus.

4.1.1 Genauigkeit der Bestimmungsmethode

Mit den verfügbaren Versuchskonstellationen und –ressourcen liess sich die Genauigkeit der Bestimmungsmethoden im bodenphysikalischen Teil des LAZBO-Pilotprojektes auf folgenden Ebenen beurteilen:

- Präzision der Bestimmungsmethode: Variabilität wiederholter Messungen an stabilen Referenzmatrizen bzw. -körpern („Sinterkörper“, „Eichkörper“ ...).
- Präzision der Bestimmung („Reproduzierbarkeit“): Variabilität der bodenphysikalischen Parameterwerte von Probenrepetitionen innerhalb der einzelnen Beobachtungen. Weil bodenphysikalische Parameterwerte an Zylinderproben nicht wiederholt bestimmt werden können, ohne dadurch die Proben und damit deren Parameterwert selbst zu verändern, sind wiederholte Bestimmungen an derselben Probe nicht möglich (vgl. Kapitel 4.1.2).
- Richtigkeit der Bestimmungsmethode: Die Stabilität von Gewichts-, Längen- und Druckmessungen wurde aufgrund regelmässiger Eichungen als gegeben betrachtet.

Präzision der Bestimmungsmethode

Die versuchsshalber durchgeführten Präzisionsbestimmungen an Sinterkörpern zeigten für die Parameter Gesamt- und Grobporenvolumen, dass mit der verwendeten Desorptionsmethodik und –technik bei 5fach wiederholter Messung ein 95%-Vertrauensintervall von 1.3 bzw. 1.7 Vol.% nicht unterschritten werden konnte. Dies entspricht Variationskoeffizienten von unter 3 bzw. knapp 4 %, die sich rein aus der Variabilität des Messsystems ergeben würden; diese Werte liegen für das Gesamtporenvolumen im Bereich der Variationskoeffizienten innerhalb der Beobachtungen, für das Grobporenvolumen dagegen liegen sie weit darunter. Daraus folgt, dass beim Gesamtporenvolumen der kleinräumliche Variationsanteil sehr klein sein dürfte, beim Grobporenvolumen dagegen wesentlich grösser.

Richtigkeit der Bestimmungsmethode

Die absolute Richtigkeit von Bestimmungsmethoden können Messungen an Referenzmaterial mit bekannten Eigenschaften belegen. Eine Möglichkeit, die Stabilität des Messsystems „Desorption“ über die Zeit zu verfolgen und zu dokumentieren besteht in der Verwendung von Referenzproben, die aus getrocknetem Standard-Probenmaterial immer wieder neu geschüttet werden. Nachteilig daran ist u. a., dass einerseits eine beträchtliche Menge von Referenzbodenmaterial bereitgestellt werden muss, und andererseits der Aufbau der stets neu geschütteten Proben eine zusätzliche Variabilität ins Referenzsystem bringt. Mit den zur Präzisionsbestimmung der Desorptionsmessungen

versuchshalber verwendeten Sinterkörpern könnte ein absolut stabiles Kontrollsystem aufgebaut werden, das sogar absolute Gesamtporenvolumen-Referenzwerte liefern könnte, sofern Lagerungsdichte und reelle Dichte der Sinterkörper bekannt sind. Voraussetzung wäre allerdings, dass die Porositätseigenschaften im Bereich häufig gemessener Wertebereiche von Bodenproben liegen. Bei den verwendeten Sinterkörpern war dies noch nicht der Fall, weil sie aus zu grossen bzw. zu wenig dicht gepackten Messingkügelchen aufgebaut waren.

Hinweise auf die Richtigkeit einer Bestimmungsmethode ergeben sich auch aus Vergleichen mit unabhängigen anderen Messsystemen. Für die Desorptionsmessungen bzw. die bodenphysikalischen Parameter Lagerungsdichte, Gesamtporenvolumen, Grobporenvolumen 0-60 hPa und Luftpermeabilität bei 60 hPa ist dies anhand eines Messwerte-Vergleiches zwischen den Kleinzylinder- und den Grosszylinderuntersuchungen möglich. Eine weitere Möglichkeit zum unabhängigen Vergleich von Porositätsbestimmungen besteht beispielsweise beim Gesamtporenvolumen mit der Luftpyknometrie und bei der Desorption im Grobporenbereich mit der Labormethode der Bodenschutzfachstelle des Kantons Zürich (FaBo ZH, 2001); letztere befindet sich momentan in einem Vergleichsversuch.

Am Beispiel des Untersuchungsjahres 2001 zeigte sich, dass die qualitativen Unterschiede zwischen den beiden Untersuchungssystemen Kleinzylinder und Grosszylinder in der Beurteilung von Faktoreffekten auf den Stufen Beobachtung und Erhebung nur gering sind, d.h. beide Untersuchungssysteme ergaben praktisch dieselben Schlussfolgerungen bezüglich Reihenfolge und Unterschieden zwischen Faktorstufen. Hinsichtlich absoluter quantitativer Werte liessen sich jedoch Unterschiede zwischen den Untersuchungssystemen erkennen, die sich allerdings praktisch ausschliesslich auf Bodenproben aus 10 bis 15 cm Tiefe beschränkten. Dabei traten beim Kleinzylindersystem jeweils etwas geringere Lagerungsdichten und entsprechend etwas grössere Gesamtporenvolumen sowie merklich grössere Absolutwerte für das Grobporenvolumen und die Luftpermeabilität auf. Verschiedene Gründe können Ursache für diese Effekte sein. Nahe liegend wäre beispielsweise die Schlussfolgerung, dass diese Unterschiede als Verdichtungseffekt gedeutet und auf unterschiedliche Deformationen der Bodenproben bei der Probenahme zurückgeführt würden – aufgrund der Wechselwirkung mit der Bodentiefe spezifisch für lockerere Oberböden. Die Überprüfung der Probenstauchungen bei den Probenahmen bestätigte allerdings diese Hypothese nicht - im Gegenteil traten bei den Kleinzylindern üblicherweise grössere Stauchungswerte auf. Dies führte zur Vermutung, dass die wahrscheinlich wichtigsten Gründe für diese Unterschiede teilweise in unterschiedlichen Lagerungseffekten, via. aber in einem scheinbar nebensächlichen analytischen Detail zu suchen sind: Der Bestimmung der Probenhöhe (und damit des Probenvolumens). Während diese Referenzgrösse beim Kleinzylindersystem mechanisch gemessen wird, indem mit der Spitze einer Stahlnadel die Höhe eines auf die Probenoberfläche gelegten kleinen starren Folienstückes punktuell bestimmt wird, erfolgt die Messung beim Grosszylindersystem mit Hilfe eines Lasers, der die gesamte Probenoberfläche spiralförmig abtastet. Dies führt dazu, dass die Probenhöhe beim Kleinzylindersystem tendenziell zu hoch bestimmt wird, weil das Folienplättchen auf den höchsten Spitzen der Probenoberfläche aufliegt, während der Laser die „Landschaft“ der Probenoberfläche mit allen Bergen und Tälern abtastet und einen gewichteten Mittelwert liefert. Weil aufgrund der Probenhöhe das Probenvolumen berechnet wird, was mehrere andere Parameter– u. a. Lagerungsdichte, Gesamtporenvolumen und erste (grösste) Klasse des Grobporenvolumens – beeinflusst, hat die-

ser Parameter nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ eine zentrale Bedeutung bei der Fehlerrechnung.

4.1.2 Genauigkeit der Bestimmungen

Präzision der Beobachtung (Variabilität innerhalb der Beobachtung):

Innerhalb der Beobachtungen ergaben sich je nach bodenphysikalischem Parameter, Jahr, Standort und Tiefe unterschiedliche Variabilitäten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich hier nicht um die Wiederholbarkeit von Bestimmungen im strengen Sinne handelt, sondern um die auch kleinst-räumlich standortbeeinflusste Gesamtvariabilität auf Stufe Beobachtung, d.h. um die Präzision der Bestimmung von mehreren Proben aus einer Beobachtung.

Bei den bodenphysikalischen Parametern nahm die Variabilität in folgender Reihenfolge zu: Lagerungsdichte und Gesamtporenvolumen < Feinporenvolumen < Mittelporenvolumen < visuelle Gefügebeurteilung < Grobporenvolumen und Eindringwiderstand < Luftdurchlässigkeit, d.h. die von sekundärer Gefügebildung beeinflussten Parameter weisen eine besonders grosse Variabilität auf. Ausgedrückt als Variationskoeffizient überstreicht diese Reihe einen Wertebereich von knapp 2 bis über 35 %!

Bei den bodenphysikalischen Parameterwerten aus den Zylinderuntersuchungen des Jahres 2002 ist zu berücksichtigen, dass sie als zusätzliche Streuungsursache den Einfluss der Lagerungsdauer-Verfahren enthalten. Entsprechend traten teilweise erheblich grössere Variabilitäten auf; insbesondere war dies bei den Kleinzylinderuntersuchungen der Fall, wo sich bei einigen Parametern ein Lagerungsdauer-Effekt bemerkbar machte.

Sofern es erkennbar systematische Variabilitätsunterschiede zwischen den Standorten gab, waren die Variabilitäten am Standort 5 Reckenholz ZH meist grösser als am Standort 3 Kleinandelfingen ZH. Allerdings handelt es sich bei den „Standort“-Vergleichen nicht nur um rein bodenkundliche Vergleiche: Neben den naturräumlichen Unterschieden bestanden auch bezüglich Bewirtschaftungsgeschichte und aktueller Bewirtschaftung teilweise erhebliche Unterschiede (siehe Tabelle 2). Dies äusserte sich nicht nur in unterschiedlichen Kulturen, sondern auch in einem unterschiedlichen Gefügestand des Bodens (unbearbeitet vs. bearbeitet). Die zwischen den beiden untersuchten Standorten festgestellten Variabilitätsunterschiede lassen sich deshalb nicht ausschliesslich bodenkundlich interpretieren, sondern sind Folgen von Wechselwirkungen zwischen Bodeneigenschaften und Bewirtschaftungssituation. Variabilitätsunterschiede zwischen den beiden untersuchten Bodentiefen waren nicht generell und systematisch erkennbar; die Proben aus den jeweils mit dem Pflug bearbeiteten Oberböden (10 bis 15 cm Tiefe) wiesen gegenüber den Proben aus dem Unterboden (35 bis 40 cm Tiefe) bei einigen Parametern systematisch grössere Variabilitäten auf. Aufgrund des oben Gesagten spielten die Einflüsse des Bewirtschaftungsstandes jedoch eine erhebliche Rolle, was sich jeweils auf die Versuchsfaktoren „Erhebung“ und „Standort“ auswirkte und entsprechend vielfach zu Wechselwirkungen zweiten Grades zwischen diesen Versuchsfaktoren und den reinen Tiefeneffekten führte. Die Ergebnisse widerspiegeln deshalb besondere Konstellationen und lassen sich nicht immer verallgemeinernd interpretieren.

Variabilitätsvergleich zwischen Untersuchungssystemen:

Der Variabilitätsvergleich zwischen den beiden Untersuchungssystemen Klein- und Grosszylinder zeigt meist grössere Werte beim Kleinzylindersystem; einzig beim Parameter Grobporenvolumen sind die Variationskoeffizienten beim Grosszylindersystem grösser. Diese Methodeneffekte treten allerdings nur in der Bodentiefe 10-15 cm ausgeprägt auf. Aufgrund der streifenförmigen abwechselnden Anordnung der Probenahme für die beiden Untersuchungssysteme innerhalb einer Beobachtung (vgl. Figur 4) würde man eigentlich erwarten, dass die Variabilität zwischen den Systemen nur zufällig abweicht. Ursachen für systematische Abweichungen zwischen den beiden Untersuchungssystemen könnten an verschiedenen Orten zu finden sein, u. a.

- a) bei der Probenahme: unterschiedliche Anfälligkeit der Untersuchungssysteme auf Deformationen wegen des unterschiedlichen Verhältnisses zwischen Reibungsfläche Bodenprobe-Zylinderwand und Bodenprobenvolumen;
- b) bei der Probenvorbereitung: unterschiedliche Effekte der Probenoberflächen-Präparation durch unterschiedliche Arbeitsweise bzw. -qualität verschiedener Personen in verschiedenen Labors bzw. unterschiedliche Verhältnisse zwischen präparierter Probenoberfläche und Bodenprobenvolumen;
- c) bei der Probenlagerung: unterschiedliche Effekte der Probenaustrocknung durch unterschiedliche Handhabung der Proben während der Lagerung im Kühlraum;
- d) bei der Analyse: unterschiedliche Einstellung der Desorptionsapparatur (Saugspannung) bzw. unterschiedliche Handhabung der Desorptions-Gleichgewichtsbedingung.

Von diesen möglichen Ursachen wurde nur die Lagerungsdauer explizit getestet (vgl. Ausführungen im nachfolgenden Kapitel); andere Einflussfaktoren konnten dagegen - weil systembedingt - nicht systematisch erfasst werden.

Zu a): Beim Grosszylindersystem mit seiner geringeren Probenhöhe ist die Wahrscheinlichkeit prinzipiell grösser, Grobporen als kontinuierliche (luftleitende) Hohlräume zu bestimmen; ausserdem wird ein grösseres Volumen beprobt als beim Kleinzylindersystem, d.h. die Beprobung ist potentiell repräsentativer.

Zu b): Die Relation zwischen präparierter Bodenoberfläche und Probenvolumen ist bei den Grosszylindern ungünstiger als bei den Kleinzylindern, d.h. hier könnte sich ein homogenisierender Effekt der Oberflächenpräparation stärker auswirken.

Zu d): Eine Möglichkeit, die Einstellung und Handhabung der Desorptionsapparatur im Untersuchungsverlauf zu überprüfen, wird mit dem Einbezug von Sinterkörpern in die Desorptionsuntersuchungen vorgeschlagen. Die ersten Ergebnisse aus Messreihen mit Sinterkörpern ergaben jedoch keine Hinweise auf markante Unterschiede zwischen den Untersuchungssystemen; ausserdem spricht die Wechselwirkung zwischen Untersuchungssystem und Bodentiefe gegen eine solche Annahme: Bei den Bodenproben aus der Bodentiefe 35 cm unterschieden sich die beiden Untersuchungssysteme hinsichtlich Variabilität nicht mehr wesentlich voneinander. Die Einhaltung der

Gleichgewichtsanforderung am Ende der Desorption lässt sich bei unterschiedlichen Bodenproben im strengen Sinn nur durch wiederholte Wägungen bis zur Gewichtskonstanz gewährleisten.

Referenzstabilität der Bestimmungen

Üblicherweise können Bodenproben nach ihrer Entnahme nicht sofort im Labor untersucht werden, sondern müssen zunächst gelagert werden; zu diesem Zweck werden sie normalerweise in einem Kühlschrank oder in einem Kühlraum aufbewahrt. Für die Gewährleistung der absoluten Vergleichbarkeit von Parameterwerten aus Untersuchungen zu verschiedenen Zeitpunkten muss ausgeschlossen werden können, dass sich die Probeneigenschaften während der Lagerung verändern.

Die Untersuchung des Einflusses der Lagerungsdauer auf die Ergebnisse der bodenphysikalischen Bestimmungen fand 2002 anhand von drei Serien statt: Bei der Lagerungsdauer 1 begann die Analyse 4 bis 7 Wochen, bei der Lagerungsdauer 2 19 bis 22 Wochen und bei der Lagerungsdauer 3 schliesslich 31 bis 34 Wochen nach der Probenahme.

Die varianzanalytische Auswertung der Ergebnisse dieser Untersuchungsreihe machte beim Kleinzylindersystem zwei unterschiedliche standortspezifische Einflüsse der Lagerungsdauer deutlich:

- Am Standort 3 Kleinandelfingen ZH nahm das Mittelporenvolumen sowohl im Ober- als auch im Unterboden von der ersten zur zweiten und dritten Lagerungsdauer signifikant zu, in absoluten Zahlen betrachtet waren die statistisch signifikanten Differenzen allerdings teilweise sehr klein. Dieser Effekt könnte durch Veränderungen der Proben während der Lagerungsdauer hervorgerufen worden sein; denkbar wäre allerdings auch, dass er eine Folge von methodischen Instabilitäten war: Nach einer Neueinrichtung des Labors für die Untersuchung des Kleinzylindersystems musste die neue Hochdruck-Apparatur der Desorptionanlage praktisch im laufenden Betrieb eingefahren werden, was nicht von Beginn weg stabile Bestimmungswerte ergab; wegen fehlender Referenzproben sind diese möglichen Einflüsse der Bestimmungsanlage jedoch nicht dokumentiert.
- Am Standort 5 Reckenholz ZH machten sich nur bei den Oberbodenproben Unterschiede zwischen den drei unterschiedlich lange gelagerten Probenserien bemerkbar. Die beim Grobporenvolumen und der Luftpermeabilität mit zunehmender Lagerungsdauer jeweils zu beobachtende Zunahme sowie die gleichzeitig beim Feinporenvolumen eingetretene Abnahme lassen die Schlussfolgerung zu, dass die auf Schrumpfungseffekte besonders empfindlichen tonreicheren, relativ lockeren Oberböden des Standortes 5 während der Lagerungsdauer ihren Gefügestand nicht absolut beibehalten haben.

Beim Grosszylindersystem traten praktisch keine signifikanten Lagerungseffekte auf, d.h. an beiden Standorten und in beiden Bodentiefen ergaben sich bei allen die Gefügegeometrie beschreibenden Parametern keine statistisch wesentlichen Unterschiede zwischen den Parameterwerten der drei Lagerungsdauern. Einzig im Unterboden von Standort 5 Reckenholz ZH war bei den Stabilitätsparametern eine ungerichtete Heterogenität zwischen den Lagerungsdauern festzustellen. Diese Effekte lassen sich nicht eindeutig auf bestimmte Ursachen zurückzuführen; weil sich keine systemati-

sche und gerichtete Abfolge der Parameterwerte in Abhängigkeit von der Lagerungsdauer ergab, ist ein Einfluss der Lagerung eher unwahrscheinlich.

Diese Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass der Faktor Lagerungsdauer beim Grosszylindersystem und meist auch beim Kleinzylindersystem bis zur maximal gewählten Versuchsdauer von 34 Wochen nicht kritisch für die Untersuchungsergebnisse ist. Die absoluten Werte der Luftpermeabilitätsmessungen beim Kleinzylindersystem, insbesondere bei den Oberboden-Proben vom Standort 5 Reckenholz ZH, deuten allerdings auf zusätzliche methodische Unsicherheiten bei der Bestimmung dieses Parameters in diesem Untersuchungssystem hin.

4.2 Genauigkeit der Erhebungen und Auswirkungen auf die Interpretation von Veränderungen

Die Genauigkeit der Erhebungen kann gemäss dem Unsicherheitsbudget der LAZBO-Untersuchungen (vgl. Teil 1, Kapitel 2.4, Figur 2) bezüglich der Präzision und der Richtigkeit bzw. der Stabilität diskutiert werden. Die Stabilität des Parameterwertes und damit die Vergleichbarkeit von Erhebungen zu verschiedenen Zeitpunkten wird bestimmt durch die Robustheit des Probenahmeplanes mit einer flächentreuen Stichprobenauswahl sowie der Robustheit der Parameterwerte von Feldmethoden bezüglich unterschiedlichem Bodenzustand (Bodenfeuchte) zum Zeitpunkt der Erhebung.

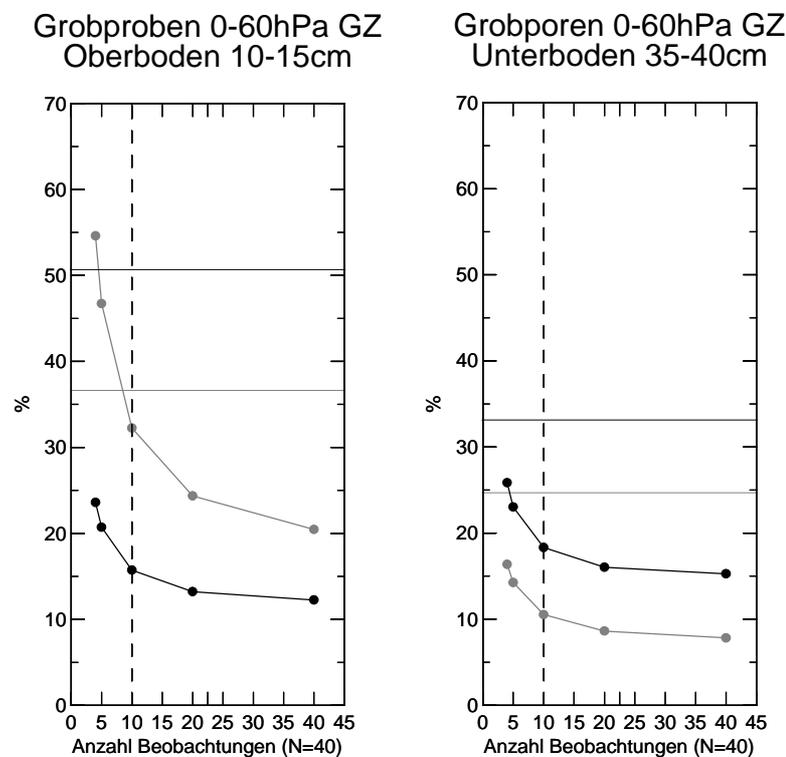
4.2.1 Präzision der Erhebungen

Die Streuung innerhalb einer Erhebung wird durch die Addition der Varianz innerhalb und der Varianz zwischen Beobachtungen bestimmt. Für die Präzision eines Erhebungswertes, d.h. die Varianz des Erhebungswertes, ist gemäss dem hierarchischen Modell (Teil1, Kapitel 3.3.1, Gleichung 3) die Varianz der obersten Hierarchiestufe von entscheidender Bedeutung. Somit sind für die Vertrauensbereiche eines Erhebungswertes (VI) und das zweiseitige Vertrauensintervall von Erhebungsdifferenzen (zVI) vor allem die Variationen der Beobachtungen innerhalb einer Erhebung entscheidend. In den Ergebnissen Kapitel 3.3.1 sind diese als Variationskoeffizient dargestellt. Sie zeigen, dass diese für viele bodenphysikalische Parameter in derselben Grössenordnung liegen wie jene der Bestimmungswerte innerhalb einer Beobachtung.

Um die Präzision eines Erhebungswertes zu erhöhen bzw. die Signifikanzschwellen von Erhebungsdifferenzen (zVI) zu verkleinern, ist es daher notwendig, die Anzahl der Beobachtungen zu erhöhen. Eine **Optimierung der Probenverteilung** mit mehr Beobachtungen wird am folgenden Beispiel erläutert. Verteilt man wie im LAZBO-Pilotprojekt 40 Proben auf 4 Beobachtungen (ergibt 10 Messwiederholungen pro Beobachtung), so erreicht man eine Streuung des Mittelwertes bzw. ein zVI, wie sie in den Pilotuntersuchungen für die Parameter der Grosszylinderuntersuchungen und für den Parameter Eindringwiderstand berechnet wurden. Erhöht man unter der Vorgabe „Beibehaltung der gleichen Probenzahl“ ($N = 40$) die Anzahl der Beobachtungen, wird die Anzahl der Wiederholungen innerhalb einer Beobachtung verkleinert. Die Ergebnisse dieser Modellrechnung zeigt die Figur 26 für den Parameter Grobporenvolumen 0-60hPa, gemessen mit dem Grosszylindersystem (GZ). Das zVI wird durch eine Verteilung der Proben auf mehr Beobachtungen deutlich verkleinert. Somit kann die Sensitivität erhöht werden, d.h. es können mehr Veränderungen als statis-

tisch signifikant detektiert werden. Eine optimale Beobachtungszahl scheint aufgrund unserer Modellrechnungen bei 10 Beobachtungen zu liegen, da in diesem Bereich die Kurve der zVI-Werte abflacht. Auch aus Sicht der Praktikabilität einer Probenahme (Aufwand zur Einmessung des Probenplanes) und einer rationellen Probenahme (mehrere Proben pro Beobachtung) sind 10 Beobachtungen machbar. Bei dieser Probenverteilung könnte das zVI soweit gesenkt werden, dass es bei den meisten bodenphysikalischen Parametern kleiner wäre als die mittleren Veränderungen der Jahre 2001-2003. Die Ergebnisse der Modellrechnung für die übrigen Parameter sind im Anhang K "Optimierung der Probenverteilung" als Grafiken dargestellt.

Diese Modellrechnung einer Optimierung muss mit reellen Daten validiert werden, da die Varianzkomponenten „zwischen Beobachtungen“ in den Pilotuntersuchungen nur aus der Streuung von 4 Beobachtungen in den 3 Erhebungen 2001-2003 bestimmt wurden.



Figur 26: Optimierung des Probenahmeplanes zur Verbesserung der 95%-Signifikanzschwelle von Mittelwertsdifferenzen (zVI) durch Erhöhung der Anzahl Beobachtungen bei gleichem Gesamtumfang der Beprobung (N=40); Beispiel Grobporen bei 60 hPa, Grosszylindersystem.
Bestimmung der optimalen Anzahl von Beobachtungen bei gleich bleibender Probenzahl von total 40 Einzelproben.
Gegenüberstellung der zVI (Kurven) und der mittleren gemessenen Veränderungen 2001-03 (horizontale Linien); Angaben relativ (%) zum mittleren Standortwert.
Grau: Standort 3 Kleinandelfingen ZH; schwarz: Standort 5 Reckenholz ZH.

4.2.2 Robustheit des Probenahmeplanes

Effekt von räumlich verschobenen Beobachtungen:

Trotz einer zu erwartenden bodenphysikalischen Heterogenität der Standorte quer zur Bewirtschaftungsrichtung sollte in Bewirtschaftungsrichtung mit einheitlichen Bodenverhältnissen gerechnet werden können. Die Ergebnisse der Untersuchungen sowohl mit Klein- als auch mit Grosszylindern zeigen aber, dass die räumliche Verschiebung von Erhebungen zu statistisch signifikanten Abweichungen zwischen den entsprechenden Beobachtungen führte. Die beiden Untersuchungssysteme zeigen jeweils nicht alle Unterschiede auf, d.h. hinsichtlich quantitativer Darstellung von Variabilität bzw. Lage der Parameterwerte treten zwischen den Untersuchungssystemen Unterschiede auf, die sich als unterschiedliche Nachweisempfindlichkeit bei unterschiedlicher absoluter Lage der Parametermittelwerte bemerkbar machen. Trotzdem ergeben die beiden Untersuchungssysteme in qualitativer Hinsicht ein konsistentes Bild, indem bei den einzelnen bodenphysikalischen Parametern die Beobachtungen jeweils in derselben Reihenfolge gruppiert werden. Zwischen den beiden räumlich verschobenen Erhebungen bestanden demnach via. am Standort 3 Kleinandelfingen ZH (Beobachtungstreifen D und teilweise A), vereinzelt auch am Standort 5 Reckenholz ZH bei bestimmten bodenphysikalischen Parametern und Beobachtungstreifen Unterschiede. Zu diesen Unterschieden können einerseits standörtliche Heterogenitäten beitragen. Bei den physikalischen Bodenparametern von grösserer Bedeutung dürften dagegen die Bewirtschaftungseffekte in Form von Fahrspuren sein. Wie oben erläutert und in Figur 4 dargestellt, erfolgte die Probenahme in den Beobachtungen jeweils linear in Beobachtungstreifen, die von unterschiedlich breiten Fahrspuren überlagert sein konnten. Wenn diese Fahrspuren im Einzelfall vom einen bis zum anderen Ende der gesamten Versuchsfläche nicht absolut in derselben Flucht lagen wie die eingemessenen Beobachtungstreifen (Figur 1), hatte dies zur Folge, dass der Befahrungseffekt nicht in beiden räumlich verschobenen Beobachtungen gleichartig auftrat und deshalb – unabhängig von der Messgenauigkeit - auch nicht gleichartig detektiert werden konnte. Die Interpretation, dass es via. Bewirtschaftungseinflüsse waren, die zur Differenzierung zwischen den räumlich verschobenen Beobachtungen beigetragen haben, wird gestützt durch die Tatsache, dass Parameter, die in erster Linie durch die Zusammensetzung des Bodens bestimmt werden (Lagerungsdichte, Gesamtporenvolumen, Feinporenvolumen), die geringsten Unterschiede zwischen den Beobachtungen aufwiesen, während Parameter, die sehr sensibel auf mechanische Belastungen reagieren (Groporenvolumen), besonders deutliche Unterschiede zeigten.

Beim Vergleich der Beobachtungen aus derselben Erhebung wurden Unterschiede zwischen den Beobachtungen via. im Oberboden, am deutlichsten im ersten Untersuchungsjahr 2001 und besonders am Standort 3 Kleinandelfingen ZH festgestellt. Die grösseren Differenzen bei den Oberbodenproben sind vermutlich eine Folge der mechanischen Belastungen, die sich besonders stark im Oberbodenbereich auswirken und zu einer zusätzlichen Heterogenität der Gefügeeigenschaften führen („Fahrspuren“). Allerdings ist anzunehmen, dass es in tonigeren unbearbeiteten Unterböden als Ergebnis von Schrumpfrissen oder groben Bioporen ebenfalls zu grösseren Heterogenitäten zwischen Beobachtungen kommen kann. Die deutlicheren Unterschiede im ersten Untersuchungsjahr sind höchstwahrscheinlich eine Folge der Bewirtschaftungssituation, weil die Beobachtungstreifen im Jahr 2001 zum Beprobungszeitpunkt an beiden Standorten teilweise deutlich sichtbare

Fahrspuren aufwiesen, was entsprechende Unterschiede zwischen den Beobachtungen verursachte. Dagegen traten in den Folgejahren 2002 und 2003 zum Beprobungszeitpunkt jeweils keine derart ausgeprägten Fahrspuren in den Beobachtungstreifen auf (vgl. Tabelle 4). Dass Unterschiede zwischen den Beobachtungen am Standort 3 Kleinandelfingen ZH statistisch signifikant auftraten, hängt einerseits mit der teilweise etwas ausgeprägteren bewirtschaftungsbedingten Heterogenität zum Beprobungszeitpunkt zusammen, andererseits aber auch mit der am Standort 3 Kleinandelfingen ZH meist etwas geringeren natürlichen Variabilität, so dass schon kleinere Unterschiede als statistisch signifikant erkennbar waren als am Standort 5 Reckenholz ZH.

Am Standort 5 Reckenholz ZH war die zwischen den Beobachtungen einer Erhebung auftretende Varianz jeweils deutlich kleiner als jene innerhalb der Beobachtungen, d.h. bereits auf kleinstem Raum und innerhalb einer bewirtschaftungsmässig einheitlichen Situation traten grössere Gefügeunterschiede auf. Besonders bei den Oberbodenproben von Standort 3 Kleinandelfingen ZH war die Verteilung der Varianz zwischen und innerhalb der Beobachtungen dagegen aus den geschilderten Gründen ausgeglichener, d.h. hier war der Anteil von Effekten zwischen den Beobachtungen erheblich grösser als durchschnittlich am Standort 5 Reckenholz ZH.

Effekt von räumlich verschobenen Erhebungen:

Genauso wie bei der räumlichen Verschiebung von Beobachtungen im selben Beobachtungstreifen praktisch identische Parameterschätzungen erwartet wurden, ging man auch bei der räumlichen Verschiebung von gleichzeitig beprobten Erhebungen mit jeweils 4 Beobachtungen von der Annahme aus, dass sich die Parameterwerte zwischen den beiden Erhebungen 2001/I und 2001/II nicht wesentlich unterscheiden sollten. Wie oben unter „Effekt von räumlich verschobenen Beobachtungen“ ausgeführt, entsprachen die Ergebnisse der Zylinderuntersuchungen bei räumlich verschobenen Beobachtungen nicht den theoretischen Erwartungen, indem bei gewissen Parametern und Faktorkombinationen „Standort x Tiefe“ Unterschiede zwischen gleichzeitig beprobten Beobachtungen im selben Beobachtungstreifen festzustellen waren. Weil sich die Genauigkeit der Erhebungen in erster Linie aus den realisierten Beobachtungsmittelwerten ergibt, sind deshalb in gewissen Fällen auch zwischen den gleichzeitig beprobten, aber räumlich verschobenen Erhebungen statistisch signifikante Unterschiede bei den Parameterwerten zu beobachten. Dass aus statistischer Sicht Unterschiede besonders häufig bei Proben aus den Unterböden auftraten (insbesondere beim Standort 3 Kleinandelfingen ZH) ist vermutlich eine Folge der verglichen mit Oberbodenproben kleineren Variabilität zwischen den einzelnen Beobachtungen im Unterbodenbereich, so dass die statistische Trennschärfe erhöht und auch kleinere Unterschiede zwischen den Erhebungen als signifikant bewertet wurden. Im Einzelfall resultierte allerdings eine statistische Trennschärfe jenseits der bodenkundlich sinnvollen Interpretationsmöglichkeiten, wie z.B. beim Mittelporenvolumen im Oberboden des Standortes 5 Reckenholz ZH, wo 0.5 Volumenprozent Differenz zwischen den Erhebungen bereits als signifikant ausgewiesen werden konnten.

Ähnlich wie bereits bei den räumlich verschobenen Beobachtungen traten auch auf Stufe Erhebungen die grössten relativen Differenzen bei den Grobporenvolumina auf, d.h. bei Parametern, die besonders deutlich durch Bewirtschaftungseffekte (d.h. in diesem Fall durch Befahrungen) und nicht in erster Linie durch standörtliche Unterschiede beeinflusst werden.

Optimale Probenahmepläne:

Die aufgrund der Erhebungsdaten 2001/I und 2001/II durchgeführten so genannten „virtuellen Beprobungen“ sollten erste Hinweise geben, welche Probenahmepläne insofern als effizient zu bezeichnen sind, als sie die Gesamtvariabilität der Erhebungsmittelwerte von bodenphysikalischen Parametern verringern, was die Vertrauensintervalle der Erhebungsmittelwerte verkleinert und dadurch die mögliche statistische Trennschärfe der Untersuchungen verbessert. Dabei hat sich herausgestellt, dass sich insbesondere bei den Oberboden-Untersuchungen, die an beiden untersuchten Standorten eine grundsätzlich eher grössere Variabilität auswies als die Unterboden-Untersuchungen, je nach Beprobungsmuster merkliche Unterschiede zwischen der Genauigkeit der möglichen Mittelwertbestimmung erkennen liessen. Besonders geringe Variabilitäten waren – bei ansonsten gleicher Probenzahl - mit diagonalen und blockartig aufgeteilten Beprobungsmustern zu erzielen, die eine grössere Erhebungsfläche erfassten. Um die Variabilität des Erhebungsmittelwertes zu verringern und damit einen robusteren Probenplan zu erreichen, sollten auch die Beobachtungen einer Erhebung möglichst über die gesamte Fläche des Untersuchungsstandortes verteilt werden. Durch einen Probenahmeplan mit mindestens 10 Beobachtungen (vgl. Kapitel 4.2.1), die in Form eines lateinischen Quadrates angeordnet werden, könnte die räumliche Variabilität repräsentativer erfasst werden, was systematische Verfälschungen bodenphysikalischer Parameterschätzungen für die Gesamtfläche des Untersuchungsstandortes durch Effekte nicht flächentreuer Beprobungen vermindern würde.

4.2.3 Repräsentativität

Die Ergebnisse zur Abklärung der Repräsentativität von Stichproben aus 4 Beobachtungen zeigten (Kapitel 3.3.3), dass die Repräsentativität des Eindringwiderstandes durch 4 Beobachtungen im Jahr 2001 bei beiden Standorten schlecht war. Im Oberboden wurde ein um mehr als 0.2 MPa (Standort 3 Kleinandelfingen ZH) bzw. 0.35 MPa (Standort 5 Reckenholz ZH) höherer Eindringwiderstand gemessen als in einer repräsentativeren Erhebung mit rund 20 Beobachtungen entlang einer Transekte quer zur Bewirtschaftungsrichtung. Diese Abweichung kann mit den Fahrspuranteilen und -tiefen in den beiden Erhebungsvergleichen erklärt werden (vgl. Tabelle 4). Verglichen mit den in der gesamten Versuchsfläche festgestellten Fahrspuren war der Spuranteil in den 4 Beobachtungen deutlich höher und waren die Spuren durchschnittlich tiefer. Da der Einfluss von aktuellen Spuren den Parameterwert im Oberboden beeinflusst (vgl. Kapitel 3.3.5), können die festgestellten erhöhten Eindringwiderstandswerte als Ergebnis einer nicht repräsentativen Stichprobe interpretiert werden, die gegenüber der Gesamtfläche einen deutlich grösseren Anteil aktueller Fahrspuren aufwies.

Eine Erhöhung der Anzahl Beobachtungen würde, wie im vorangehenden Kapitel 4.2.1 diskutiert, einerseits die Sensitivität erhöhen, andererseits auch die Wahrscheinlichkeit einer verbesserten Repräsentativität bezüglich der Belastungssituation in der Dauerbeobachtungsfläche erhöhen.

4.2.4 Effekt des Erhebungszeitpunktes bzw. des Bodenzustandes

Bei den Labormethoden werden die bodenphysikalischen Parameter unter konditionierten Bedingungen an den Zylinderproben bestimmt. Bei den Feldmethoden muss die Bestimmung bei dem zum Erhebungszeitpunkt herrschenden Bodenzustand erfolgen. Aus den Erhebungswiederholungen

in der Vegetationsperiode 2002 an 2-4 Zeitpunkten sollte der Effekt des Erhebungszeitpunktes bzw. des entsprechenden Bodenzustandes auf den Parameterwert ermittelt werden. Dabei interessierten vor allem die beiden Zeitpunkte 1 (geplanter Zeitpunkt der Erhebung 2002) und 2 (Erhebung ca. einen Monat später).

Der Zeitpunkt einer Erhebung und damit der aktuelle Bodenzustand kann, wie die Ergebnisse in Kapitel 3.3.4 zeigten, den Parameterwert stark beeinflussen. Die Erhebungstermine 1 und 2 bzw. 3 und 4 waren jeweils im gleichen Bodenzustand bezüglich Bewirtschaftungssituation (vgl. Tabelle 2) und die Beobachtungen wiesen die gleichen Fahrspuren auf (vgl. Tabelle 4), aber der Boden hatte einen unterschiedlichen gravimetrischen Wassergehalt („WG“, vgl. Tabelle 3). Letzterer beeinflusste den Eindringwiderstandswert deutlich, was aus der Literatur mehrfach bekannt ist (Kenney et al., 2002), (Sun et al., 2004). Eine Abnahme des Eindringwiderstandswertes korrelierte in den meisten Zeitpunktvergleichen mit der Zunahme des mittleren Wassergehaltes der 4 Beobachtungen. Der Effekt war beim Standort 5 Reckenholz ZH im Ober- und Unterboden signifikant und mit einer Differenz im Oberboden von 0.35 MPa erheblich. Vor allem in tonreichen, bindigen Böden muss daher der Wassergehalt als Kofaktor von Feldmessungen, aber auch von Beprobungen (vgl. reduzierte Anzahl Beprobungen des Oberbodens 2003 am Standort 5 Reckenholz ZH) berücksichtigt werden.

4.3 Relevanz

Die Relevanz der Untersuchungsergebnisse kann auf verschiedenen Ebenen geprüft werden:

- Welche Relation besteht zwischen dem gemessenen Parameterwert und den im Hinblick auf die Erhaltung von Bodenfunktionen festgelegten Richt- oder Grenzwerten für den entsprechenden Parameter?
- Wie gross sind die kurzfristig auftretenden zeitlichen Schwankungen bei wiederholten Parameterbestimmungen („Rauschen“)?

Die bodenphysikalischen Parameterwerte wurden mit den vorgeschlagenen Richtwerten verglichen (Kapitel 2.5).

Bei der Lagerungsdichte wird deutlich, dass sich am Standort 3 Kleinandelfingen ZH sowohl Ober- als auch Unterboden immer im Bereich des Richtwertes bewegen – im einen Jahr darüber, im anderen darunter. Beim Standort 5 Reckenholz ZH befand sich der Oberboden immer im unbedenklichen Bereich, der Unterboden dagegen immer über dem vorgeschlagenen Richtwert. Mit nur einer Ausnahme wurden die Richtwertüberschreitungen von den beiden Zylinder-Untersuchungssystemen gleichartig angezeigt.

Bei den Parameterwerten für das Grobporenvolumen zeigt sich, dass sie am Standort 3 Kleinandelfingen ZH mit Ausnahme der Oberbodenproben im ersten Untersuchungsjahr immer deutlich oberhalb des Richtwertes lagen; insbesondere im Unterboden wurden hohe Werte nachgewiesen. Dasselbe gilt für den Oberboden am Standort 5 Reckenholz ZH: Nach kritischen Werten um den Richtwert im ersten Untersuchungsjahr 2001 haben sich die Grobporenwerte laufend verbessert. Ganz anders präsentierte sich dagegen die Situation im Unterboden des Standortes 5 Reckenholz

ZH: Hier lagen die Parameterwerte immer nahe beim bzw. unterhalb des Richtwertvorschlages. Dabei war auch ein leichter quantitativer Unterschied zwischen den Untersuchungssystemen zu erkennen, indem mit dem Grosszylindersystem meist etwas kleinere Grobporenvolumen bestimmt wurden als mit dem Kleinzylindersystem, so dass entsprechend mehr Richtwertunterschreitungen auftraten.

Beim dynamischen Eindringwiderstand wurden im Unterboden zwar immer höhere Werte gemessen als im Oberboden, aber selbst diese lagen stets deutlich unterhalb des vorgeschlagenen Richtwertes.

4.4 Indikatorwert und Aussagekraft

Der Indikatorwert von Parametern ergibt sich aus dem Zusammenhang zwischen den aufgetretenen mechanischen Bodenbelastungen und dem gemessenen Parameterwert im veränderten Bodengefüge. Je besser die Korrelation zwischen ursächlicher Belastung und dem die Gefügeveränderungen beschreibenden Parameter ist, desto besser ist der Indikatorwert dieses beschreibenden Parameters. Ausgehend von einem guten Indikatorwert hat ein Parameter nur dann eine gute Aussagekraft, wenn sein Wert (bzw. seine Veränderung) eine sinnvolle Aussage über die Folgen der Gefügeveränderungen für Bodenfunktionen ermöglicht.

Für die Beurteilung des grundsätzlichen Zusammenhanges zwischen Bodenbelastung und Parameterwert, d.h. für den Indikatorwert der Parameter, wurden die einzelnen Beobachtungen zunächst visuell einer der beiden Klassen „ohne Fahrspur“ und „mit Fahrspur“ zugeordnet (vgl. Kapitel 3.3.5). Anschliessend interessierte, ob und wie sich die beiden Klassen bezüglich der Parameterwerte voneinander unterscheiden.

Die Zylinderproben aus den Oberböden beider Standorte zeigten sehr deutliche Zusammenhänge, indem alle typischen Verdichtungsanzeichen (erhöhte Lagerungsdichte, verringertes Gesamtporenvolumen, reduziertes Grobporenvolumen und geringere Luftpermeabilität, grösserer Vorbelastungswert) jeweils signifikant auftraten; diese Zusammenhänge wurden von beiden Zylinderuntersuchungssystemen gleichartig aufgezeigt. Das Volumen der Feinporen zeigte nur an einem Standort einen deutlichen Bezug zur Belastung, während das Mittelporenvolumen an beiden Standorten von mechanischen Belastungen unbeeinflusst blieb. Auch der mittlere Teilchendurchmesser sowie der Eindringwiderstand liessen jeweils nur an einem Standort einen Bezug zu Fahrspuren erkennen. Interessanterweise zeigten sich an den beiden Standorten unterschiedliche Zusammenhänge zwischen mechanischer Belastung und Eindringwiderstand: Während am Standort 3 Kleinandelfingen ZH der Eindringwiderstand in Beobachtungen mit Fahrspuren wie erwartet höher war als in unbelasteten Beobachtungen, zeigte sich am Standort 5 Reckenholz ZH eher das Gegenteil. Die Höhe des Eindringwiderstandes kann demnach nicht eindeutig als Mass für Gefügeveränderungen interpretiert werden, weil mechanische Bodenbelastungen je nach Bodenart und –feuchte auf unterschiedliche Art zu unterschiedlichen Gefügedeformationen führen, die sich dann auch hinsichtlich des Eindringwiderstandswertes unterscheiden. Während ein sandiger Lehm (entsprechend Standort 3 Kleinandelfingen ZH) im feuchten Zustand beispielsweise sehr typisch verdichtet werden kann und demzufolge sein Eindringwiderstand zunimmt, besteht bei einem bindigeren Boden im Bereich

Lehm-toniger Lehm-Schlufflehm (entsprechend Standort 5 Reckenholz ZH) in sehr feuchtem Zustand die Möglichkeit, dass er wegen erhöhter horizontal einwirkender Kräfte verknestet wird, was zu einer starken Zerstörung vorhandener Bindungskräfte und entsprechend zu einer Abnahme des Eindringwiderstandes führt.

In den Unterböden beider Standorte traten signifikante Unterschiede zwischen Beobachtungen mit bzw. ohne Fahrspur deutlich seltener auf bzw. waren die Differenzen zwischen diesen beiden Faktorausprägungen deutlich geringer. Insbesondere am Standort 5 Reckenholz ZH waren praktisch keine Differenzierungen zu beobachten. Dies würde bedeuten, dass mit jenen Maschinen, die die sichtbaren Fahrspuren verursacht haben, im Allgemeinen nur das Oberbodengefüge verdichtet wird, nicht aber das Unterbodengefüge.

Funktionelle Interpretierbarkeit von Parameterwerten bzw. –veränderungen:

Die zweite Komponente, die zur Aussagekraft eines Parameters beiträgt, ist die Interpretierbarkeit von Parameterwerten im Hinblick auf Bodeneigenschaften und -prozesse. Ohne in Einzelheiten zu gehen, betrachten wir die Richtwert-Vorschläge für die Parameter „effektive Lagerungsdichte“ (bzw. Lagerungsdichte, und davon abgeleitet implizit für das Gesamtporenvolumen), „Groporenvolumen“ und „Eindringwiderstand“ als ersten Hinweis, dass diese Parameter für das Bodenleben (inkl. Pflanzenwurzeln) relevante Aussagen über den Zustand der Bodenumwelt ermöglichen. Der Transportparameter „gesättigte Wasserleitfähigkeit“, zu dem die BGS ebenfalls einen Richtwertvorschlag erarbeitet hat, wurde im LAZBO-Pilotprojekt aus Aufwandgründen (zusätzliche Probenahmen nötig, Methodenadaptation erforderlich) nicht berücksichtigt. An dessen Stelle wurde die Luftpermeabilität der Zylinderproben bestimmt; mit einer breiteren Erfahrungsbasis könnte auch zu diesem Parameter ein Richtwertvorschlag erarbeitet werden. Zu den Parametern der visuellen Gefügebeurteilung liegen ebenfalls noch zuwenig Daten vor, um eine verlässliche Interpretation belegen zu können; momentan wird sie bei diesen Parametern noch durch Expertenwissen begründet.

Die LAZBO-Untersuchungen selber können allerdings nur Zusammenhänge zwischen Bodenparametern aufzeigen; für die Darstellung funktioneller Bezüge sind gezielte Untersuchungen notwendig, z.B. zum Zusammenhang zwischen physikalischen Parametern der Bodenumwelt und biologischen Bodeneigenschaften wie Aktivität oder Populationsgrösse.

4.5 Langzeitbeobachtung: Beurteilen der langfristigen Veränderung von Bodeneigenschaften vor dem Hintergrund räumlicher Heterogenität und kurzzeitiger Schwankungen

Die kurzzeitigen Veränderungen von Bodeneigenschaften können im Rahmen des LAZBO-Pilotprojektes anhand von zwei Zeitintervallen beurteilt werden:

- Innerhalb einer Vegetationsperiode: wiederholte visuelle Gefügebeurteilungen und Messungen des Eindringwiderstandes;
- Innerhalb einer Fruchtfolgeperiode: drei jährliche Erhebungen, jeweils im Frühjahr.

Während die Ergebnisse der innerhalb einer Vegetationsperiode wiederholten Bestimmungen in den Kapiteln 3.3.4 und 4.2.4 besprochen wurden, sollen die Resultate der drei jährlichen Erhebungen in diesem Kapitel diskutiert werden.

Grundsätzlich bestanden für den Vergleich der jährlichen Erhebungen eher ungünstige Voraussetzungen, indem für die Beprobungen und Feldmessungen weder dieselbe Kultur bzw. Kulturgruppe noch vergleichbare Bewirtschaftungssituationen gewählt wurden. Mit Einschränkungen bei der Bandbreite der berücksichtigten Bodenverhältnisse (z.B. Erhebungen nur im Frühjahr und nur in Wintergetreidebeständen nach einer bestimmten Vorkulturgruppe) könnte mit Sicherheit eine beträchtliche Bandbreite der jährlichen Varianz vermieden werden. So aber ergaben sich bei der weit überwiegenden Mehrzahl der untersuchten bodenphysikalischen Parameter statistisch signifikante Differenzen zwischen den jährlichen Erhebungen. Besonders ausgeprägt war dies im Oberboden der Fall, wo sich an beiden Standorten die Erhebungen im ersten Jahr meist in ungünstigem Sinn von den beiden Erhebungen in den darauf folgenden Jahren unterschieden. Dieser Jahreseffekt ist mit grosser Wahrscheinlichkeit zu einem grossen Teil auf die schlechte flächenbezogene Repräsentativität der Stichproben in der ersten Erhebung zurückzuführen, deren Beobachtungen einen überproportional hohen und daher nicht repräsentativen Anteil an aktuellen Fahrspuren erfassten (vgl. Kapitel 4.2.3). Auch im Unterboden war meist (aber bei weniger bodenphysikalischen Parametern als im Oberboden) eine Jahreserhebung verschieden von den beiden anderen; allerdings war die Differenzierung hier nicht so eindeutig wie im Oberboden, weil sich je nach Standort (am Standort 3 Kleinandelfingen ZH zweite bzw. dritte Erhebung meist günstiger als die erste) und Untersuchungssystem (bei Kleinzylindersystem zweite Erhebung eher günstiger als dritte, beim Grosszylindersystem immer dritte Erhebung am Günstigsten) leicht unterschiedliche Gruppierungen ergaben.

Ein anderer Ansatz zur Beurteilung der statistischen Relevanz der aufgetretenen Unterschiede zwischen den Erhebungen wurde mit der Gegenüberstellung von Erhebungsunterschieden und den Werten für die zweiseitigen 95%-Vertrauensintervalle (zVI) aus der hierarchischen Varianzanalyse verfolgt. Diese beispielhaft in Figur 25 für drei bodenphysikalische Parameter dargestellten Vergleiche bestätigen die Schlussfolgerungen aus der Varianzanalyse auf Stufe „Erhebungen“, ermöglichen aber weitere Vergleiche.

- Sie zeigen, wie gross die Differenzen zwischen den jährlichen Erhebungen relativ zum Gesamtmittelwert der bodenphysikalischen Parameter an den beiden Standorten („mittlerer Standortwert“) waren: Die Grobporenvolumenwerte bei 60 hPa wiesen teilweise sehr grosse relative Differenzen zwischen jährlichen Erhebungen von bis zu 76 % auf, während sie bei den logarithmierten Luftpermeabilitätswerten merklich tiefer (bis zu 47 %) lagen; wesentlich geringer waren die Jahresdifferenzen zwischen den Erhebungen bei Lagerungsdichte oder Gesamtporenvolumen (bis zu 15 %).
- Sie zeigen, wie unterschiedlich das Verhältnis zwischen zeitlichen und räumlichen Effekten auf die Parameterwerte war: Der zVI auf der zeitbezogenen Erhebungsebene ist im Oberboden immer deutlich grösser als der zVI auf der räumlich-methodischen Beobachtungsebene, im Unterboden dagegen ähnlich gross oder meist kleiner, d.h. im Oberboden werden die Parameterwerte durch zeitliche Variabilitätsursachen dominiert, im Unterboden dagegen durch räumliche Variabilitätsursachen.

5 Literaturverzeichnis

- BGS, 2004. Definition und Erfassung von Bodenschadverdichtungen, Positionspapier der BGS-Plattform Bodenschutz. Dokument 13. Bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz, Zollikofen. 56 pp.
- EJPD & EVD, 1977. Klimaeignungskarte für die Landwirtschaft in der Schweiz 1:200.000. Grundlagen für die Raumplanung. EDMZ, Bern.
- FaBo ZH, 1997. Messbarkeit von Bodenverdichtungen im Feld. Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich, Amt für Gewässerschutz und Wasserbau, Direktion der öffentlichen Bauten, Zürich. 59 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.
- FaBo ZH, 1999. Messungen von Bodenverdichtungen im Feld, Teilprojekt Bestandesaufnahme. Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich, Amt für Landschaft und Natur, Direktion der Volkswirtschaft, Zürich. 92 pp.
- FaBo ZH, 2001. Grobporenbestimmung - Verfahrensoptimierung für den Vollzug. Fachstelle Bodenschutz Kanton Zürich, Amt für Gewässerschutz und Wasserbau, Direktion der öffentlichen Bauten, Zürich.
- FAL, FAW & RAC, 1998. Schweizerische Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten. Band 2, Bodenuntersuchung zur Standortcharakterisierung. Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL).
- Kenney, E.A., Hall, J.W. & Wang, C., 2002. Temporal trends in soil properties at a soil quality benchmark site in the Lower Fraser Valley, British Columbia. *Canadian Journal of Soil Science*, 82(4): pp. 499-509.
- 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.
- Sun, Y., Schulze Lammers, P. & Ma, D., 2004. Evaluation of a combined penetrometer for simultaneous measurement of penetration resistance and soil water content. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 2004(167): pp. 745-751.
- USG, 1983. Bundesgesetz über den Umweltschutz vom 7. Oktober 1983 (Stand am 30. Dezember 2003). SR 814.01.
- VBBö, 1998. Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBö) vom 1. Juli 1998. SR 814.12.

Anhang

Anhang A Bodenkennwerte der Untersuchungsstandorte für die Jahre 2001-2003

Anhang A-1: Bodenkennwerte der einzelnen Beobachtungen gemäss Probenahmeplan für die LAZBO-Pilotphase; die Bestimmungen erfolgten im jeweiligen Erhebungsjahr.

Standort 3 Kleinandelfingen:

	Jahr	Beobachtung Block	Oberboden (10-15cm)				Unterboden (35-40cm)			
			A	B	C	D	A	B	C	D
pH (H ₂ O)	2001	1	7.7	7.7	7.8	7.8	7.8	8.0	7.9	8.0
	2002	2	7.2	7.4	7.5	7.5	7.4	7.6	7.7	7.8
	2001	3	7.7	7.8	7.9	7.9	8.1	7.9	8.0	7.9
	2003	4	7.6	7.6	7.7	7.7	8.0	7.9	8.1	8.2
Corg. % (g/g)	2001	1	1.1	1.1	1.1	1.1	0.5	0.5	0.6	0.5
	2002	2	1.1	0.9	1.0	1.0	0.7	0.5	0.5	0.3
	2001	3	1.2	1.2	1.0	1.1	0.6	0.6	0.6	0.6
	2003	4	1.0	1.0	0.9	0.9	0.3	0.3	0.3	0.3
Ton % (g/g)	2001	1	17.7	17.6	18.4	17.4	20.5	19.6	18.5	17.2
	2002	2	18.0	18.3	18.6	17.1	19.8	18.1	17.9	16.9
	2001	3	18.7	18.0	18.0	17.6	18.3	19.1	18.4	19.1
	2003	4	19.2	18.0	18.6	18.6	18.1	18.5	19.1	14.6
Schluff % (g/g)	2001	1	16.6	16.8	15.5	17.2	16.6	17.5	15.3	14.9
	2002	2	18.0	16.9	15.5	16.6	15.7	16.1	16.7	15.3
	2001	3	16.8	16.9	16.3	16.5	16.7	17.0	16.0	15.7
	2003	4	18.8	18.2	18.2	17.8	17.7	16.3	16.7	19.7
Sand % (g/g)	2001	1	63.9	63.7	64.2	63.5	62.1	62.0	65.3	67.1
	2002	2	62.0	63.3	64.2	64.6	63.3	64.9	64.6	67.2
	2001	3	62.4	63.0	63.9	64.0	64.1	63.0	64.5	64.1
	2003	4	60.3	62.1	61.7	62.1	63.6	64.6	63.6	65.2

Standort 5 Reckenholz:

	Jahr	Beobachtung Block	Oberboden (10-15cm)				Unterboden (35-40cm)			
			A	B	C	D	A	B	C	D
pH (H ₂ O)	2001	1	6.2	6.3	6.3	6.3	6.5	6.5	6.7	6.5
	2002	2	6.1	6.3	6.1	6.2	6.5	6.4	6.3	6.3
	2001	3	6.3	6.3	6.2	6.3	6.5	6.5	6.4	6.5
	2003	4	6.5			6.5	6.6	6.6	6.3	6.5
Corg. % (g/g)	2001	1	1.6	1.6	1.4	1.6	0.7	0.5	0.6	0.6
	2002	2	1.5	1.7	1.5	1.6	0.8	0.7	0.8	1.0
	2001	3	1.4	1.5	1.4	1.1	0.5	0.5	0.7	0.5
	2003	4	1.4			1.4	0.5	0.6	0.8	0.5
Ton % (g/g)	2001	1	27.4	26.3	25.8	25.9	31.0	32.2	32.4	30.5
	2002	2	25.9	27.9	25.4	25.6	29.6	29.9	29.7	29.7
	2001	3	25.3	25.9	25.3	25.9	31.3	32.8	29.0	27.9
	2003	4	26.1			25.7	31.9	30.4	25.6	28.0
Schluff % (g/g)	2001	1	44.0	46.4	48.0	48.0	52.2	44.2	48.4	46.5
	2002	2	46.3	48.5	47.5	48.1	46.9	47.3	46.6	45.7
	2001	3	48.5	47.7	48.4	47.3	42.6	48.0	46.9	46.4
	2003	4	49.1			50.3	45.1	48.0	49.1	49.0
Sand % (g/g)	2001	1	25.8	24.6	23.8	23.3	15.6	22.7	18.2	22.0
	2002	2	25.2	20.7	24.6	23.5	22.1	21.6	22.4	22.9
	2001	3	23.8	23.8	23.9	24.9	25.3	18.3	22.9	24.8
	2003	4	22.5			21.6	22.1	20.5	23.9	22.1

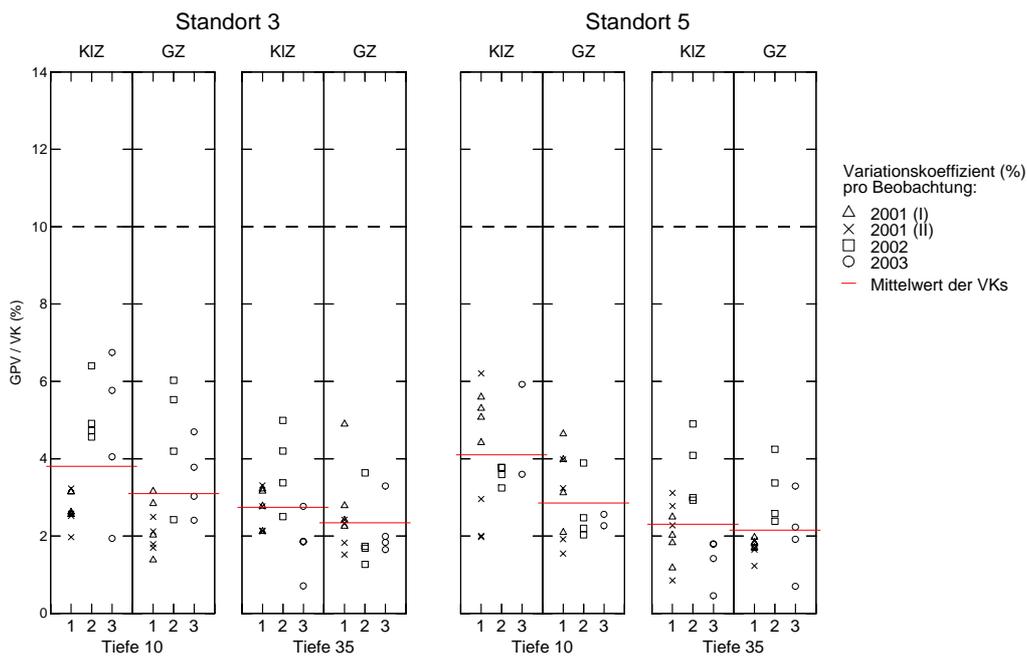
Anhang A-2: Bodenkennwerte für die jährlichen Erhebungen; die Bestimmungen erfolgten im jeweiligen Erhebungsjahr. Mittelwert (Mw) mit 95%Vertrauensintervall (VI), bestimmt aus 4 Beobachtungen (Standort 5 Reckenholz ZH im Jahr 2003 10-15cm nur 2 Beobachtungen).

		Standort 3 Kleinandelfingen				Standort 5 Reckenholz			
		10-15cm		35-40cm		10-15cm		35-40cm	
	Erhebung	Mw	VI	Mw	VI	Mw	VI	Mw	VI
pH (H ₂ O)	2001 I	7.8	0.1	7.9	0.2	6.3	0.1	6.6	0.2
	2001 II	7.8	0.2	8.0	0.2	6.3	0.1	6.5	0.1
	2002	7.4	0.2	7.6	0.3	6.2	0.2	6.4	0.2
	2003	7.7	0.1	8.1	0.2	6.5		6.5	0.2
Corg. % (g/g)	2001 I	1.1	0.0	0.5	0.1	1.6	0.2	0.6	0.1
	2001 II	1.1	0.1	0.6	0.1	1.3	0.2	0.6	0.2
	2002	1.0	0.2	0.5	0.3	1.6	0.2	0.8	0.2
	2003	1.0	0.1	0.3	0.0	1.4		0.6	0.2
Ton % (g/g)	2001 I	17.8	0.7	19.0	2.3	26.4	1.2	31.5	1.5
	2001 II	18.1	0.7	18.7	0.7	25.6	0.6	30.3	3.5
	2002	18.0	1.0	18.2	1.9	26.2	1.8	29.7	0.2
	2003	18.6	0.8	17.6	3.2	25.9		29.0	4.4
Schluff % (g/g)	2001 I	16.5	1.2	16.1	1.9	46.6	3.0	47.8	5.4
	2001 II	16.6	0.4	16.4	1.0	48.0	0.9	46.0	3.7
	2002	16.8	1.6	16.0	1.0	47.6	1.5	46.6	1.1
	2003	18.3	0.7	17.6	2.4	49.7		47.8	3.0
Sand % (g/g)	2001 I	63.8	0.5	64.1	4.0	24.4	1.7	19.6	5.3
	2001 II	63.4	1.2	63.9	1.1	24.1	0.8	22.8	5.0
	2002	63.5	1.8	65.0	2.6	23.5	3.2	22.2	0.8
	2003	61.5	1.4	64.3	1.2	22.0		22.1	2.2

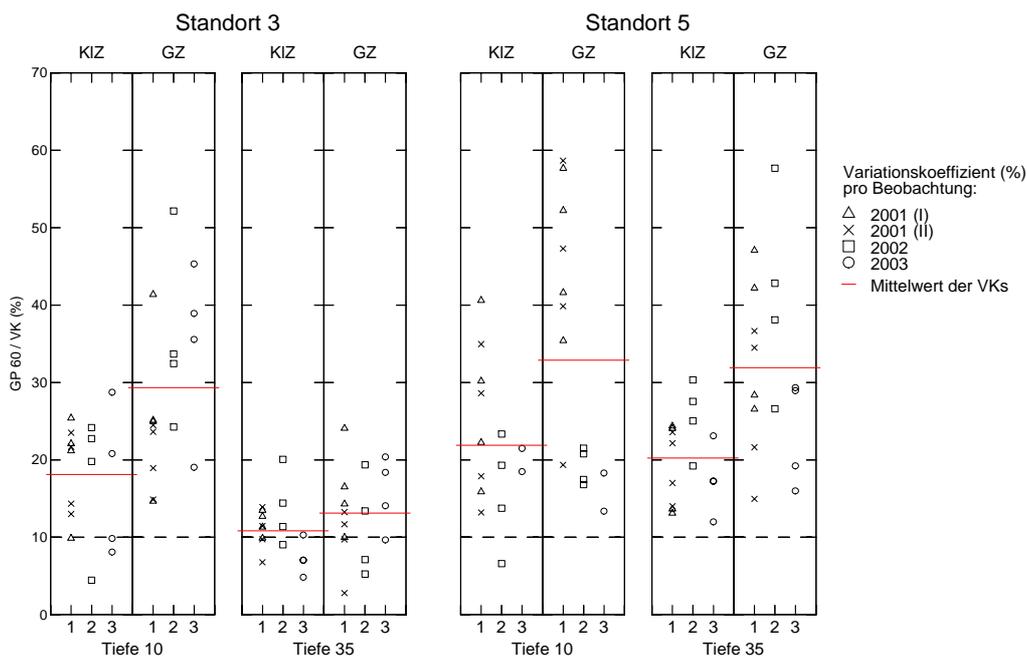
Anhang B Präzision der Bestimmungen - Variation der Parameterwerte innerhalb einer Beobachtung

Werte der Erhebungen 2001(I), 2001(II), 2002(1), 2002 (2002 2-4 Pandasondenmessungen und visuelle Gefügebeurteilung) und 2003; Variationskoeffizienten (VK) der Bestimmungswerte innerhalb der einzelnen Beobachtungen in %; Gruppierung nach Standort, Tiefe, Untersuchungssystem und Erhebungsjahr. Anzahl Werte pro Datenpunkt: KIZ n=8, GZ n=10; horizontale durchgehende Linie: Mittelwert, horizontale gestrichelte Linie: vorgegebene Richtgrösse 10 %.

Gesamporenvolumen, Kleinzyylinder- (KIZ) und Grosszylindersystem (GZ):

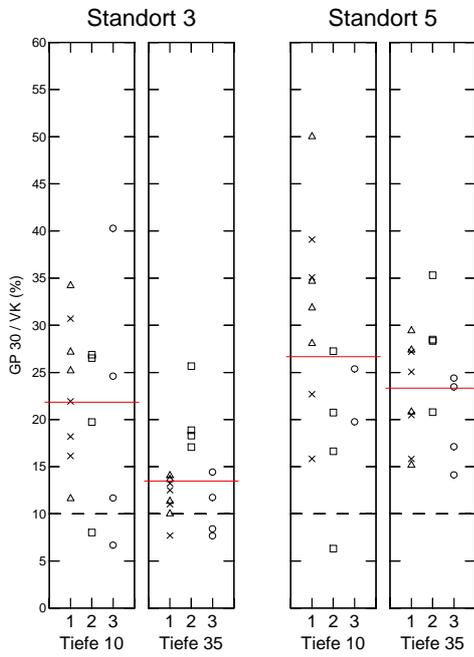


Grobporenvolumen 0-60hPa, Kleinzyylinder- (KIZ) und Grosszylindersystem (GZ):

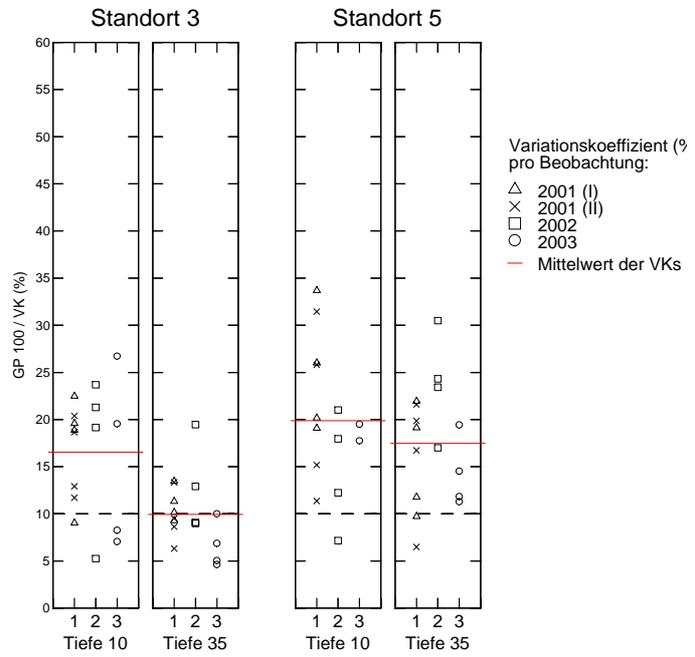


Fortsetzung ...

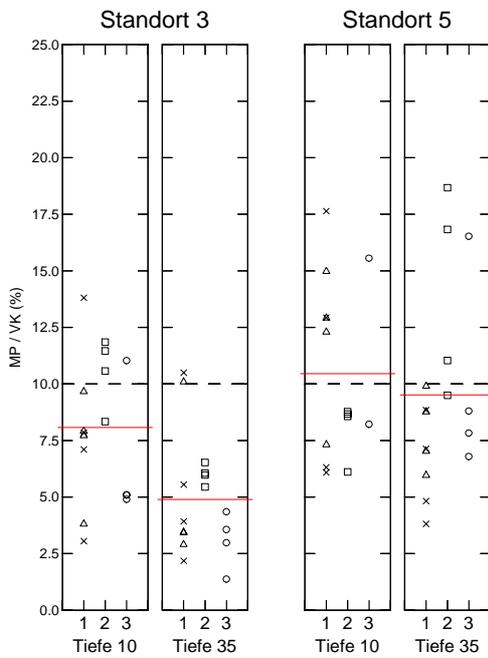
**Grobporenvolumen 0-30hPa,
Kleinzylindersystem:**



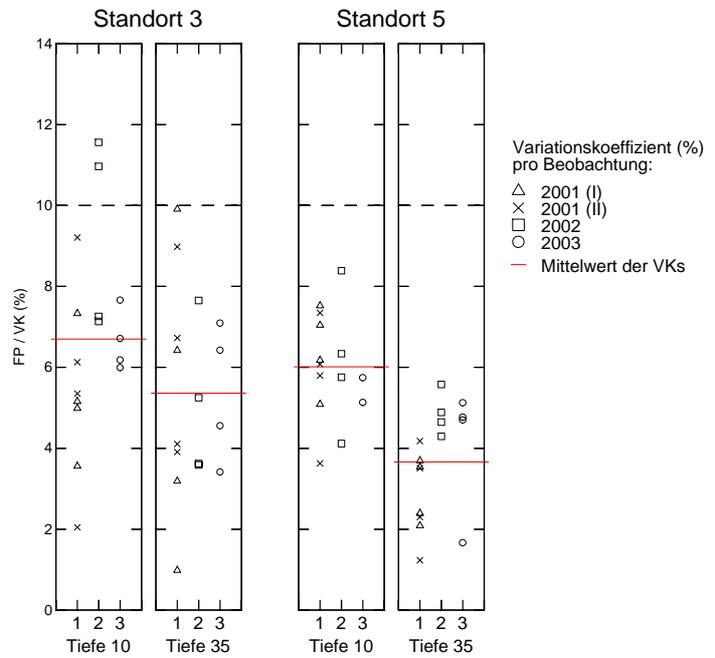
**Grobporenvolumen 0-100hPa,
Kleinzylindersystem:**



**Mittelporenvolumen,
Kleinzylindersystem:**

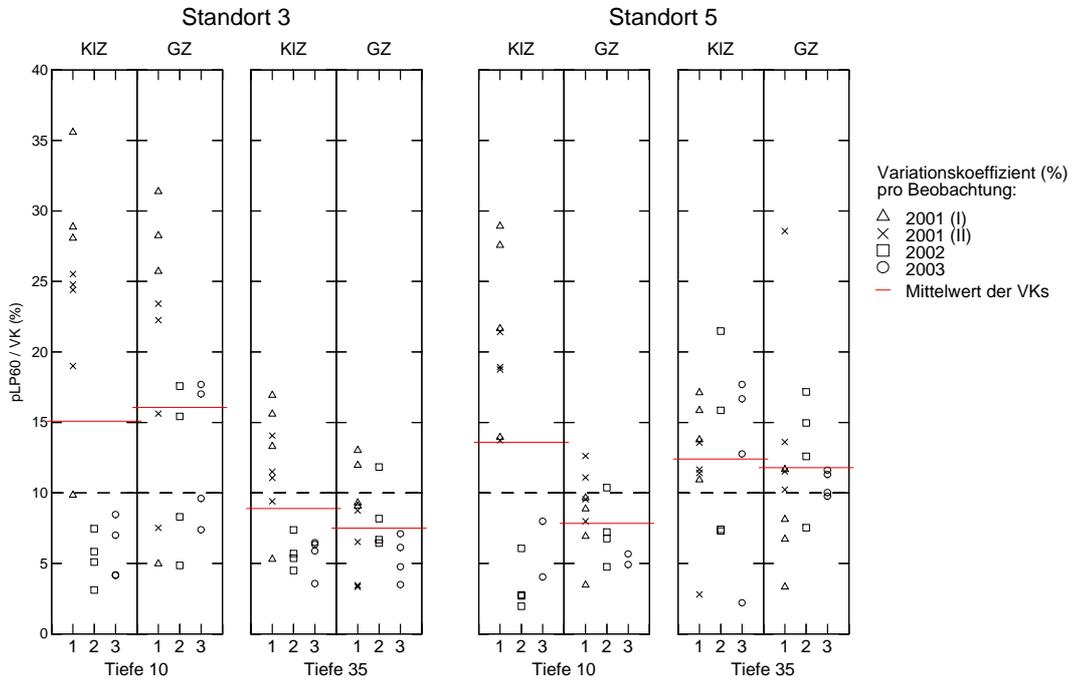


**Feinporenvolumen,
Kleinzylindersystem:**

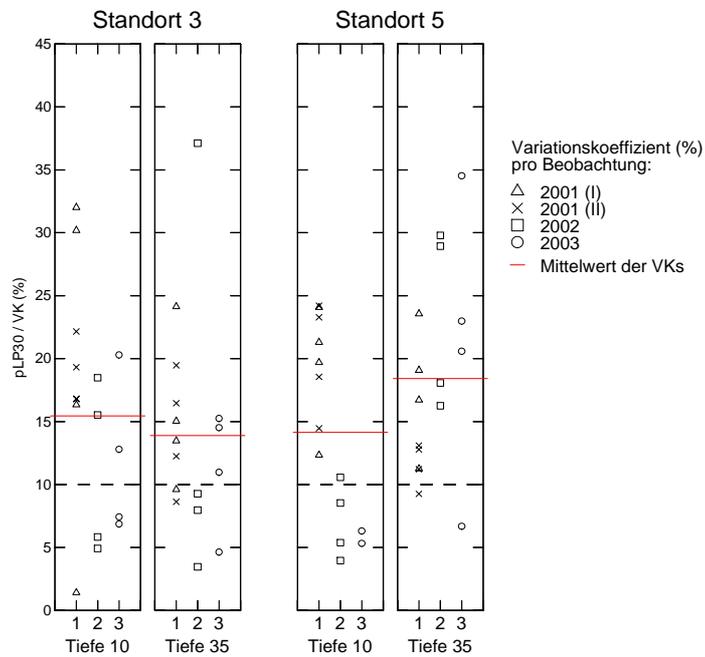


Fortsetzung ...

Log Luftpermeabilität 60hPa, Kleinzylinder- (KIZ) und Grosszylindersystem (GZ):

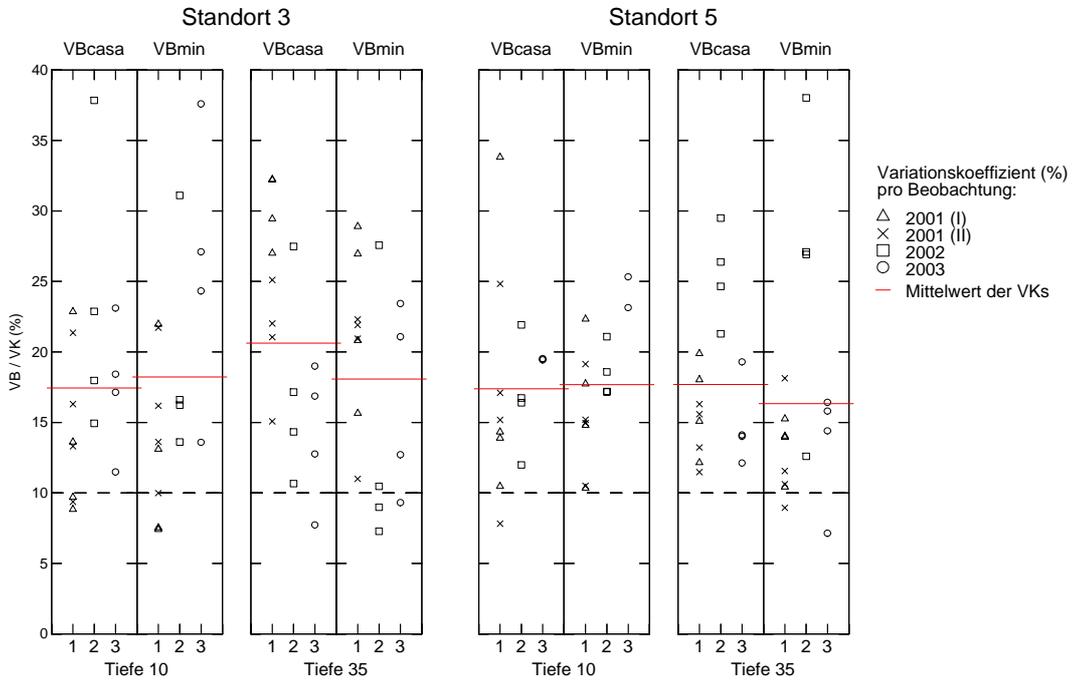


Log Luftpermeabilität 30hPa, Kleinzylindersystem:

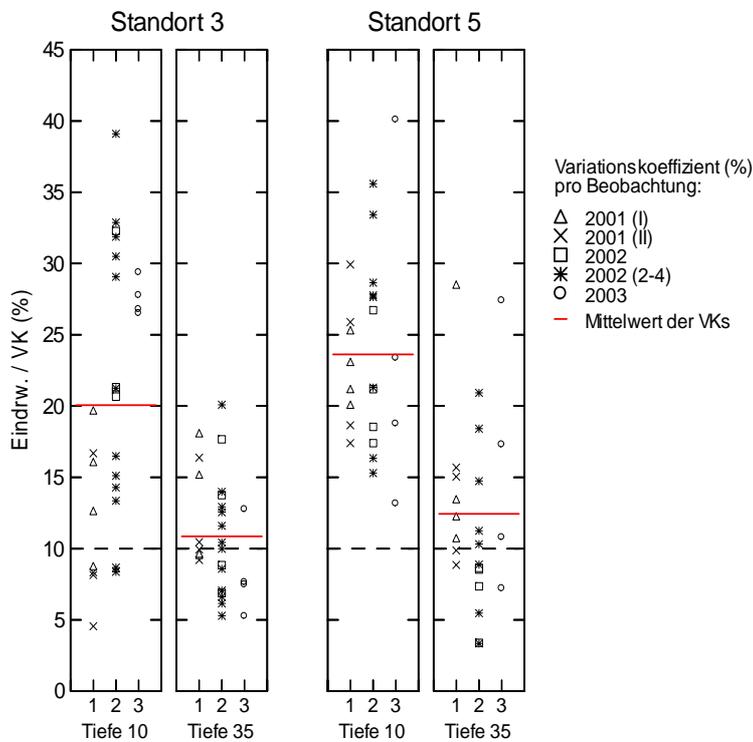


Fortsetzung ...

Vorbelastung nach Casagrande (VBcasa) und minimal (VBmin), Grosszylindersystem:

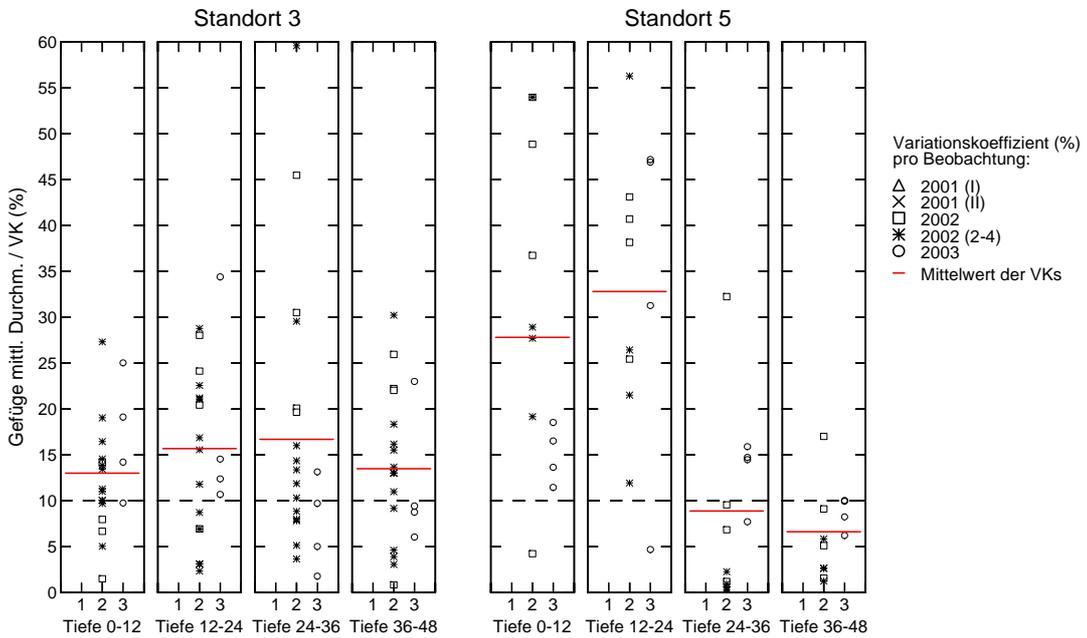


Dynamischer Eindringwiderstand, Pandasonde:

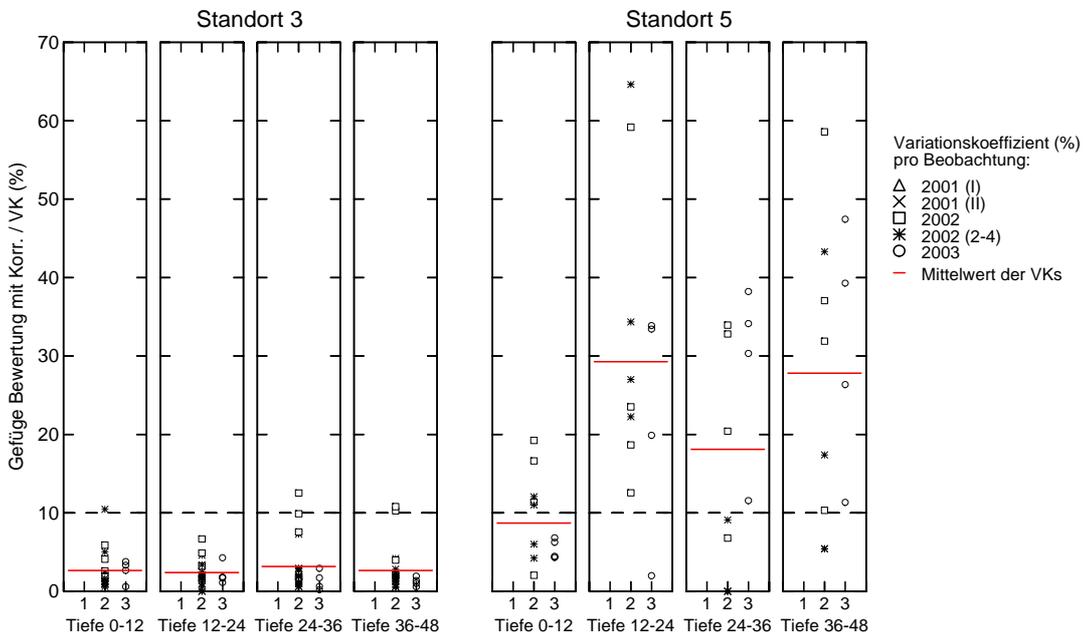


Fortsetzung ...

Mittlerer Gefügedurchmesser, visuelle Gefügebeurteilung:

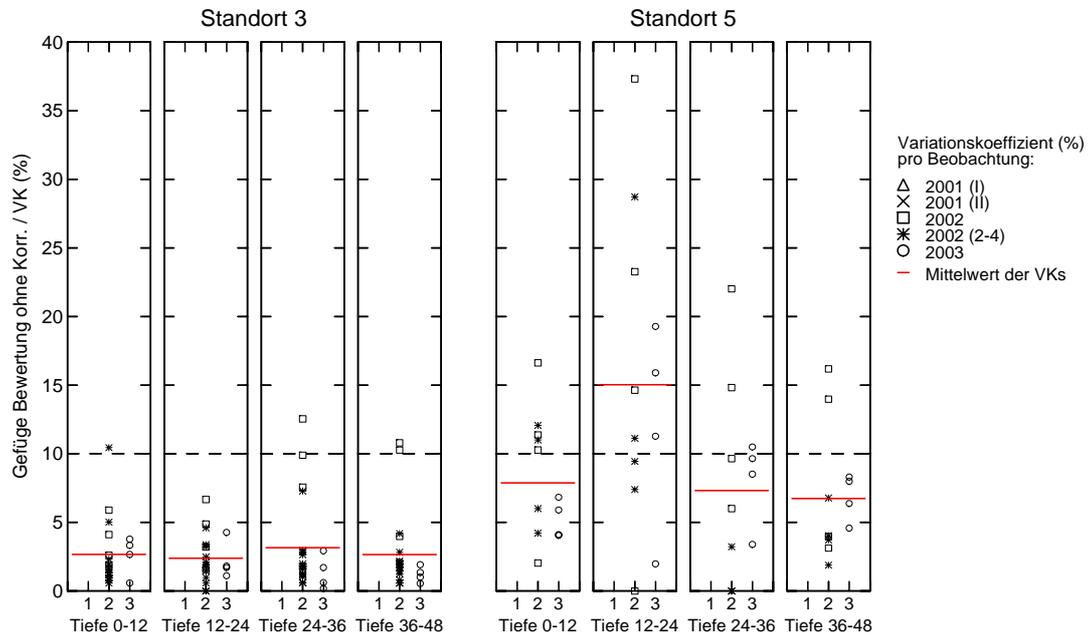


Gefügebewertung mit Korrekturfaktor, visuelle Gefügebeurteilung:



Fortsetzung ...

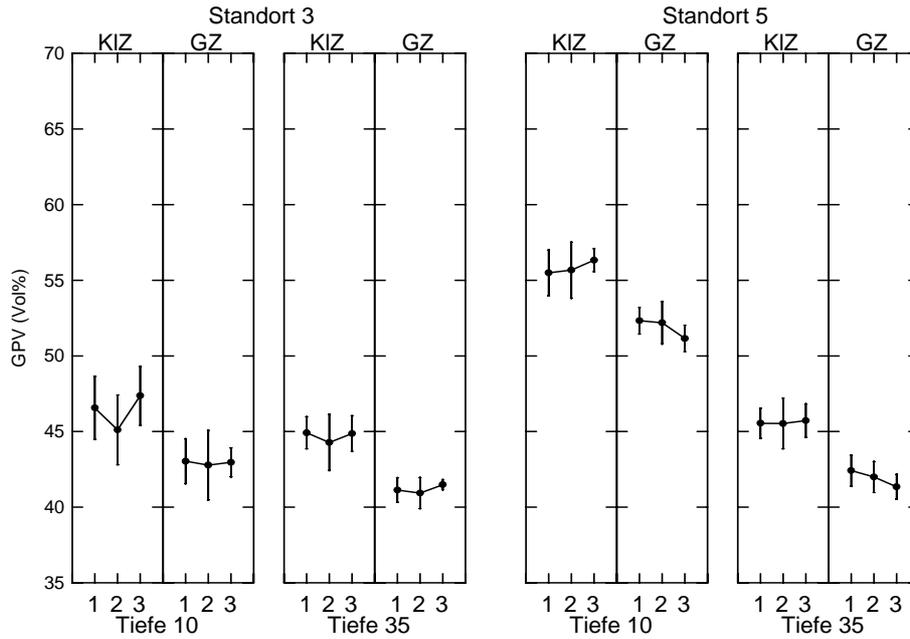
Gefügebewertung ohne Korrekturfaktor, visuelle Gefügebeurteilung:



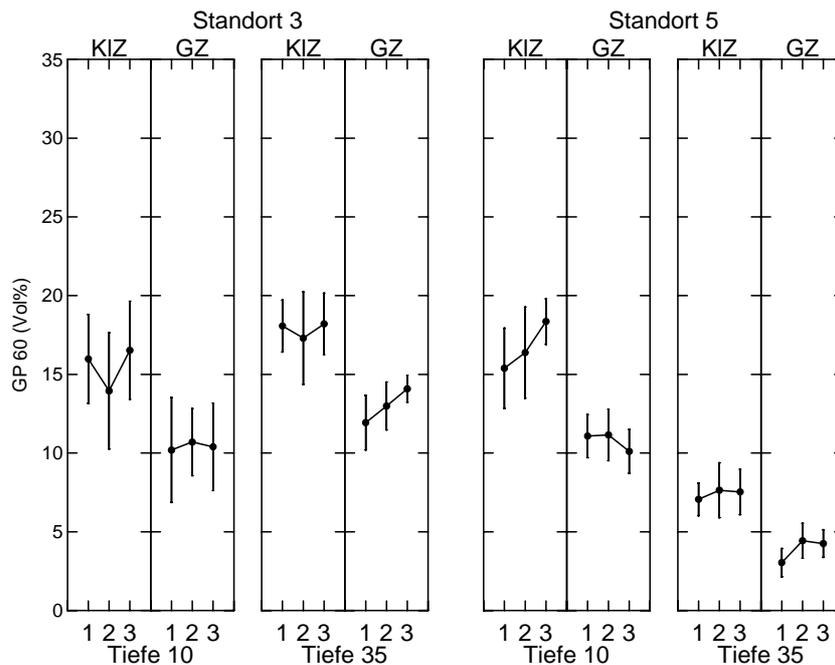
Anhang C Referenzstabilität Werte der Erhebung 2002(1) aus Kleinzylinder- und Grosszylinder- system

Vergleich der Mittelwerte für die drei unterschiedlichen Probenlagerungsdauern von 1) 4-7 Wochen, 2) 19-22 Wochen, 3) 31-34 Wochen, mit Angabe des 95%-Vertrauensintervalls der Mittelwerte pro Lagerungsdauer. Anzahl Werte n_p pro Datenpunkt: KIZ $n_p=12$ bzw. GZ $n_p=16$.

Gesamtporenvolumen, Kleinzylinder- (KIZ) und Grosszylindersystem (GZ):

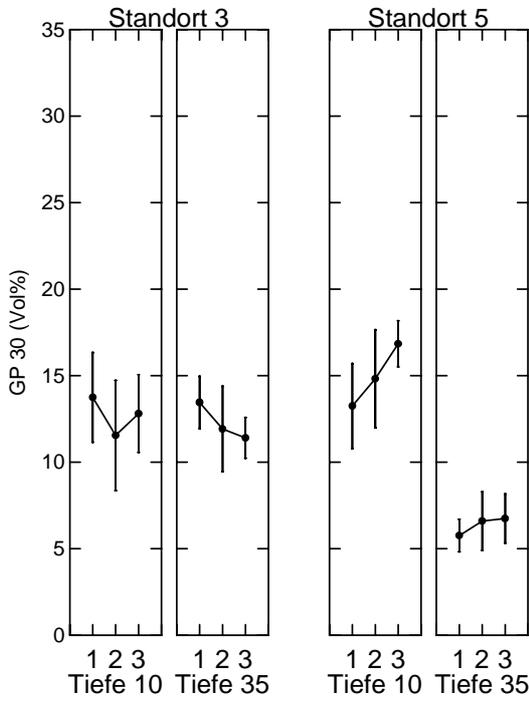


Grobporenvolumen 0-60hPa, Kleinzylinder- (KIZ) und Grosszylindersystem (GZ):

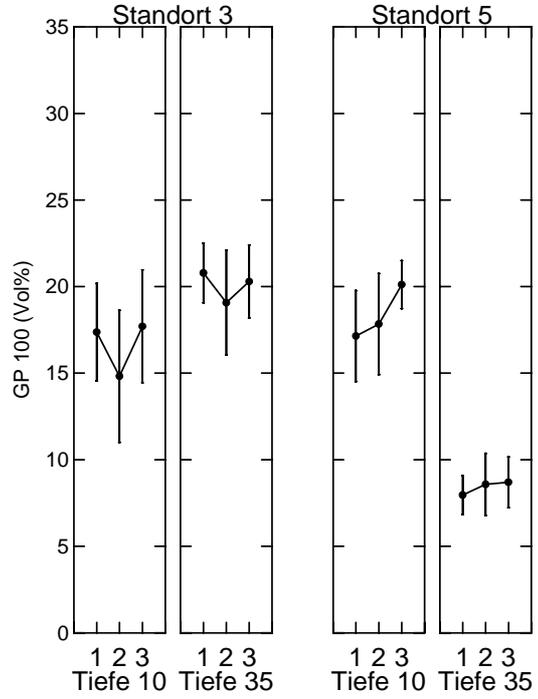


Fortsetzung ...

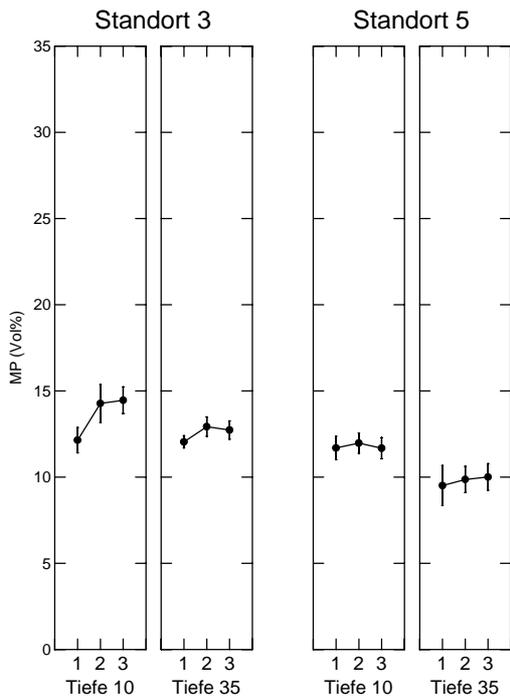
**Grobporenvolumen 0-30hPa
Kleinzylindersystem:**



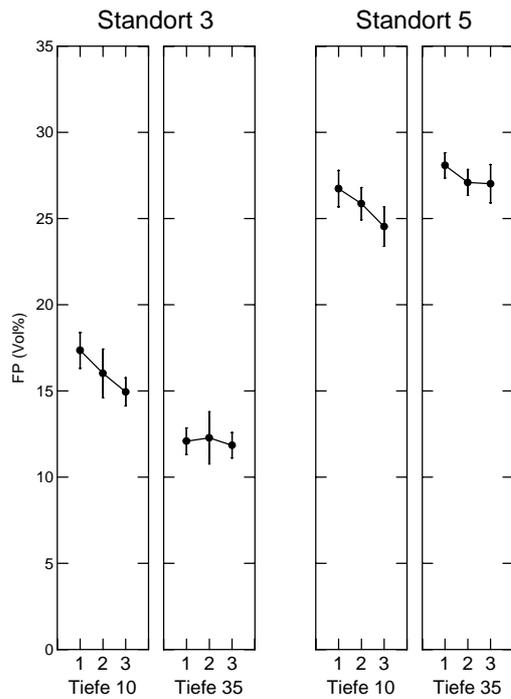
**Grobporenvolumen 0-100hPa,
Kleinzylindersystem:**



**Mittelporenvolumen
Kleinzylindersystem:**

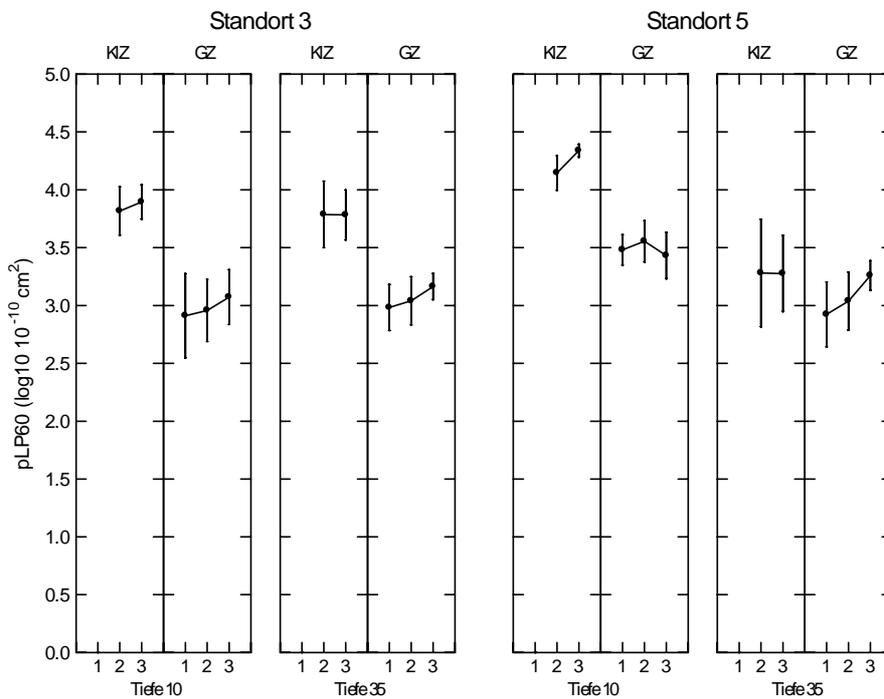


**Feinporenvolumen,
Kleinzylindersystem:**

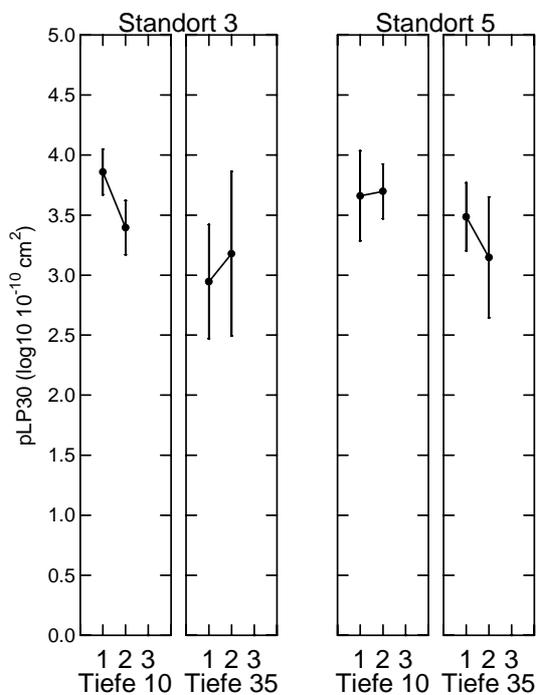


Fortsetzung ...

Log Luftpermeabilität 60hPa, Kleinzylinder- (KIZ) und Grosszylindersystem (GZ):

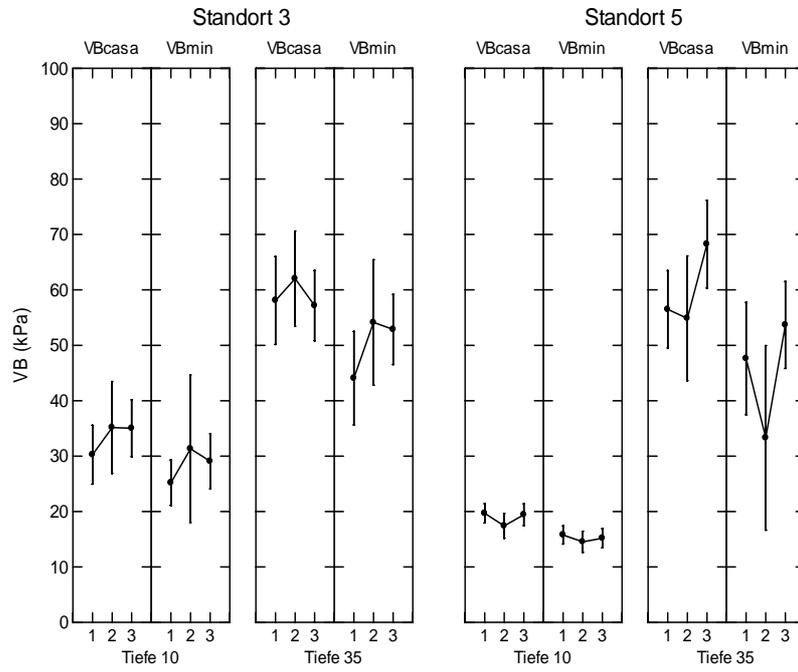


Log Luftpermeabilität 30hPa, Kleinzylindersystem (KIZ):



Fortsetzung ...

Vorbelastung nach Casagrande (VB_{cas}) und minimal (VB_{min}), Grosszylindersystem:

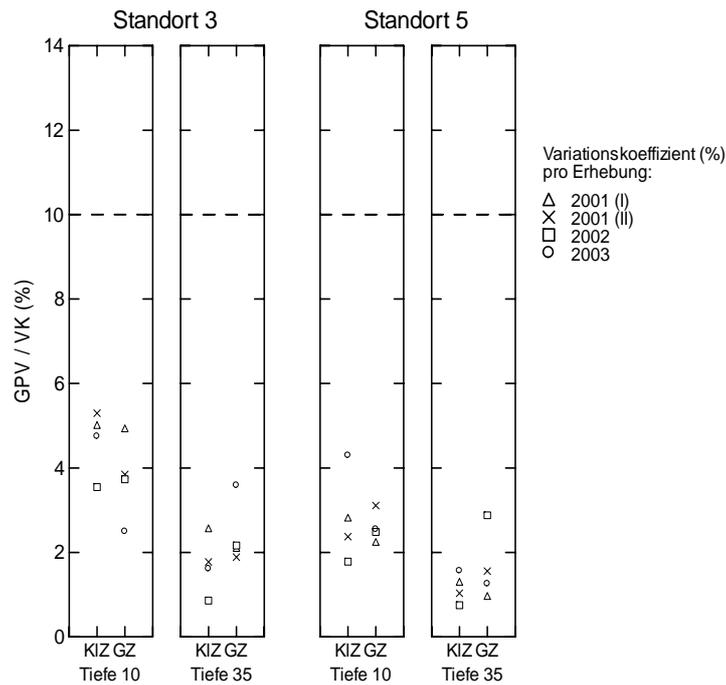


Anhang D Variation der Beobachtungen innerhalb einer Erhebung

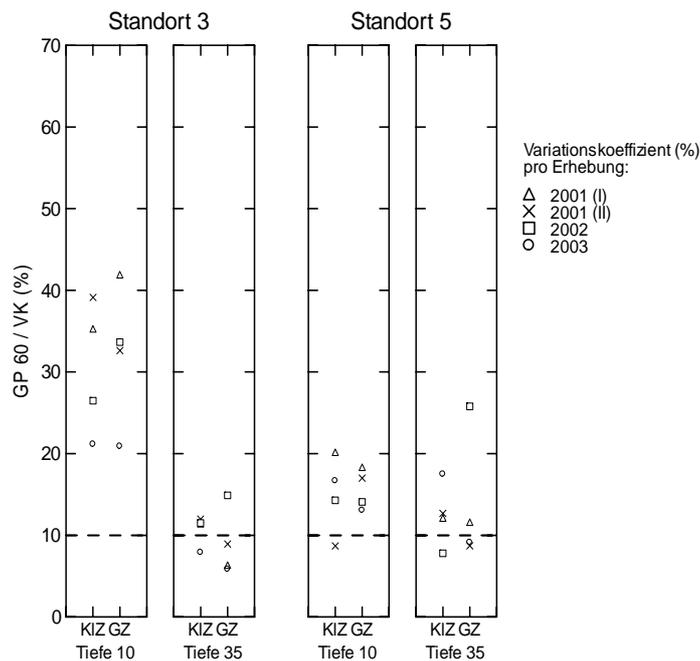
Variationskoeffizienten aus den Erhebungen 2001(I), 2001(II), 2002(1), 2002(2-4 nur Pandamesungen und visuelle Gefügebeurteilungen), 2003

Variation der Parameterwerte zwischen den jeweils vier Beobachtungen der Erhebungen, ausgedrückt als Variationskoeffizient (VK%). Anzahl Werte n_b pro Datenpunkt: $n_b=4$; horizontale gestrichelte Linie: vorgegebene Richtgrösse 10 %.

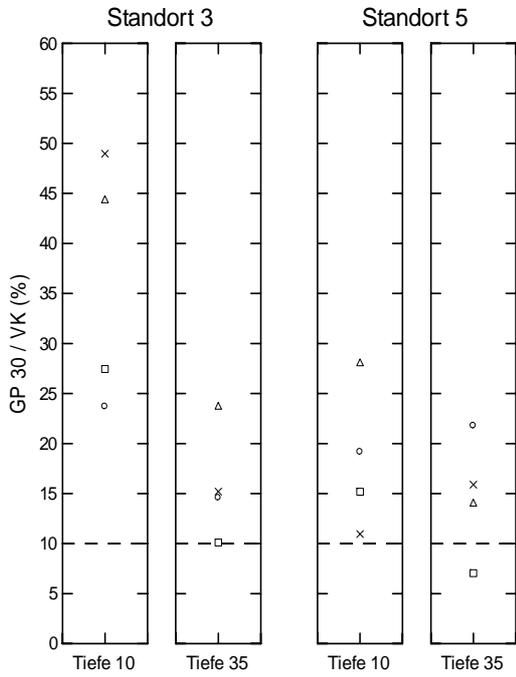
Gesamtporenvolumen, Kleinzylinder- (KIZ) und Grosszylindersystem (GZ):



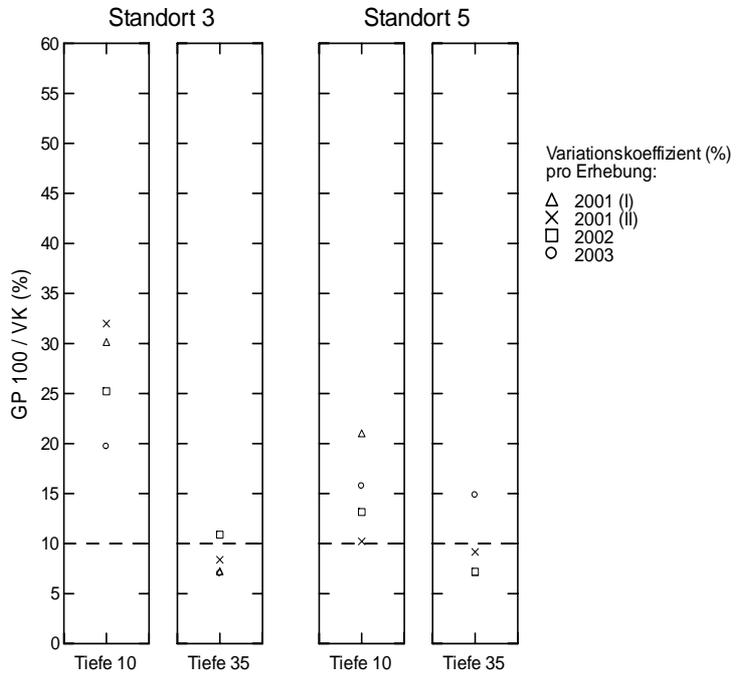
Grobporenvolumen 0-60hPa, Kleinzylinder- (KIZ) und Grosszylindersystem (GZ):



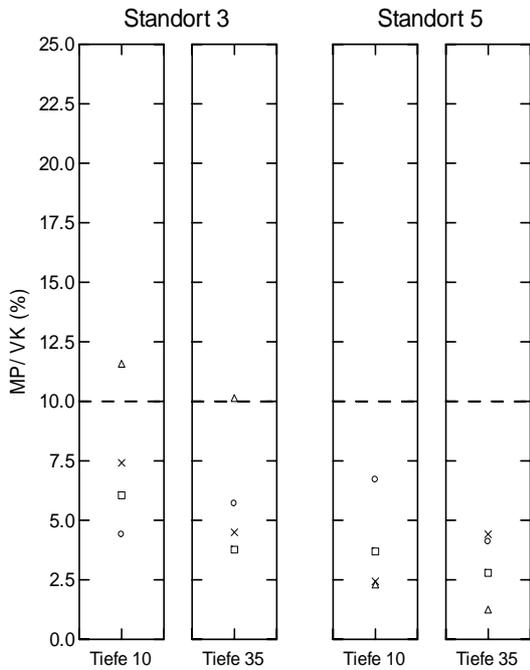
**Grobporenvolumen 0-30hPa,
Kleinzylindersystem:**



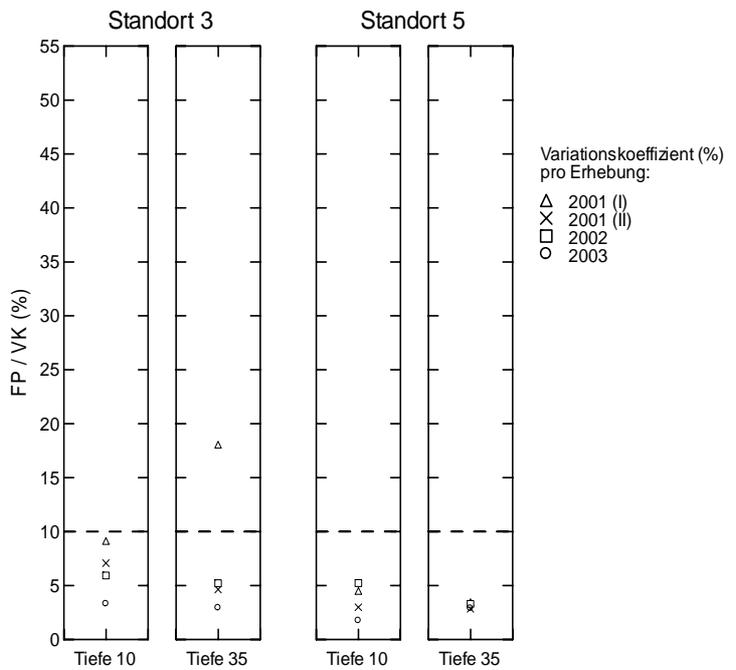
**Grobporenvolumen 0-100hPa,
Kleinzylindersystem:**



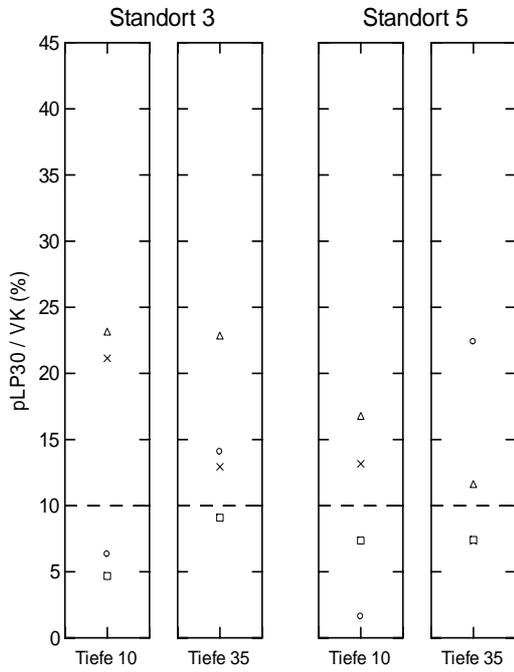
**Mittelporenvolumen,
Kleinzylindersystem:**



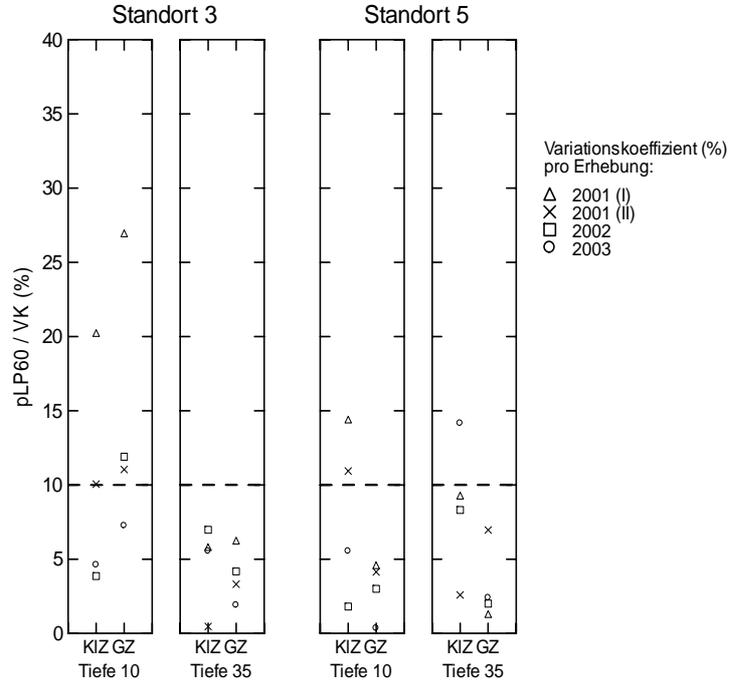
**Feinporenvolumen,
Kleinzylindersystem:**



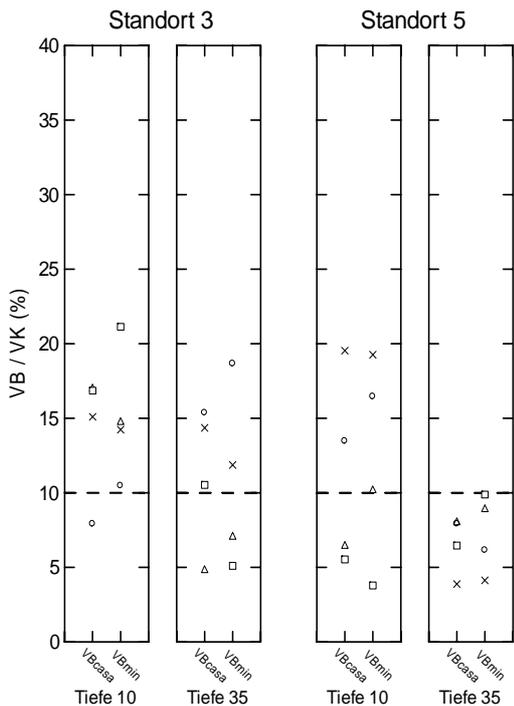
**Log Luftpermeabilität 30hPa,
Kleinzylindersystem:**



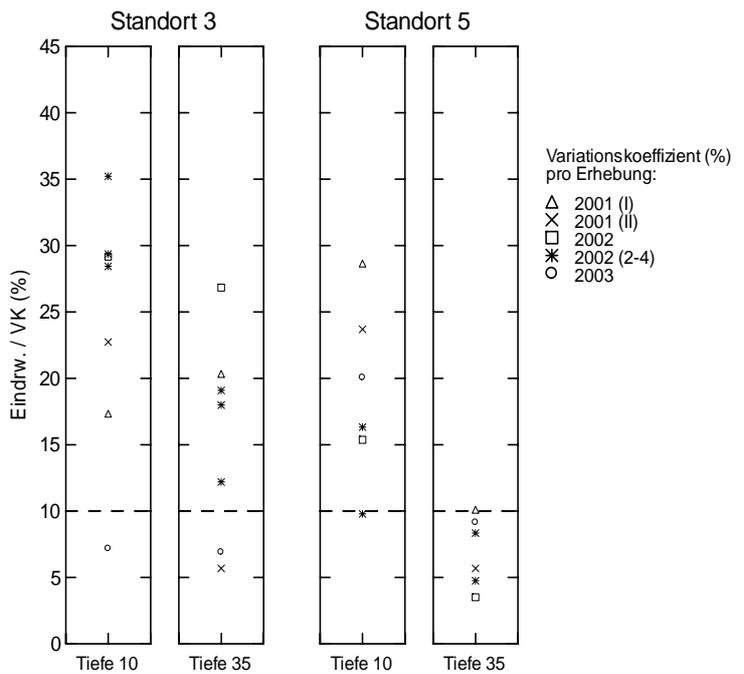
**Log Luftpermeabilität 60hPa,
Kleinzylinder- (KIZ) und Grosszylindersystem
(GZ):**



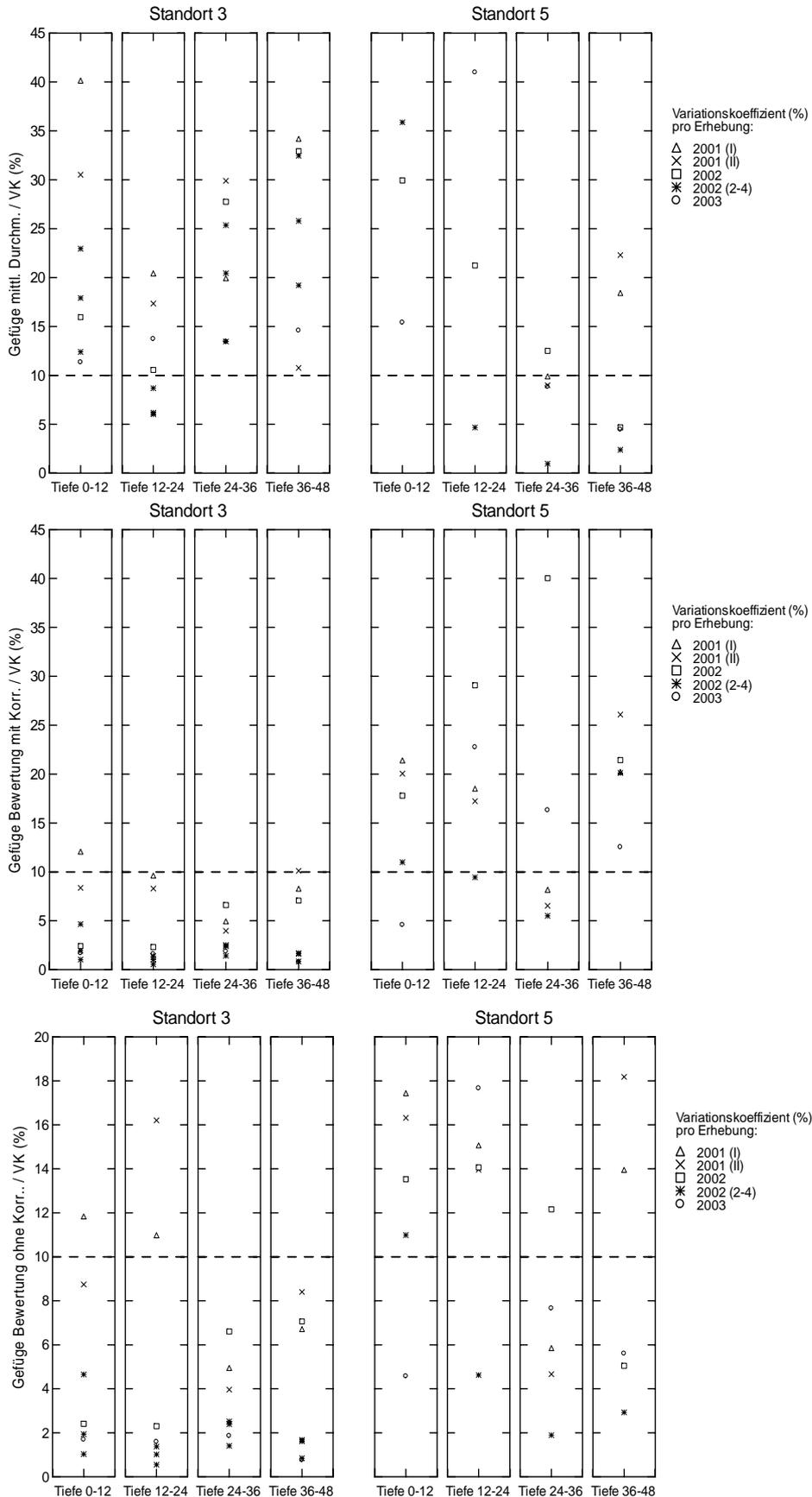
**Vorbelastung nach Casagrande (VBcasa)
und minimal (VBmin), Grosszylindersystem:**



**Dynamischer Eindringwiderstand,
Pandasonde:**



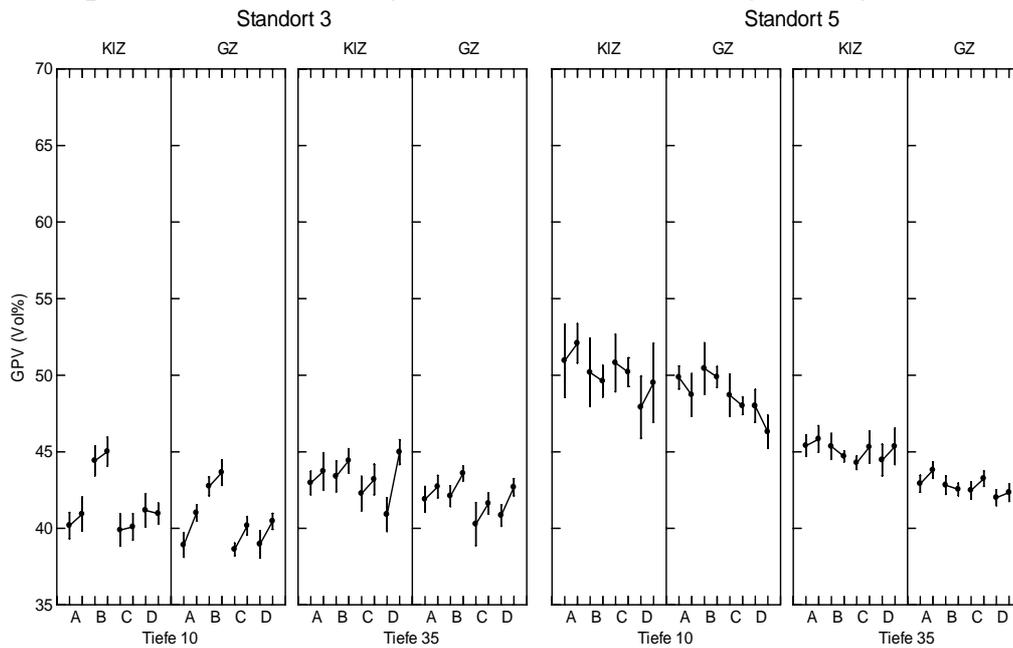
Mittlerer Aggregatdurchmesser, Gefügebewertung mit und ohne Korrekturfaktor, visuelle Gefügebeurteilung:



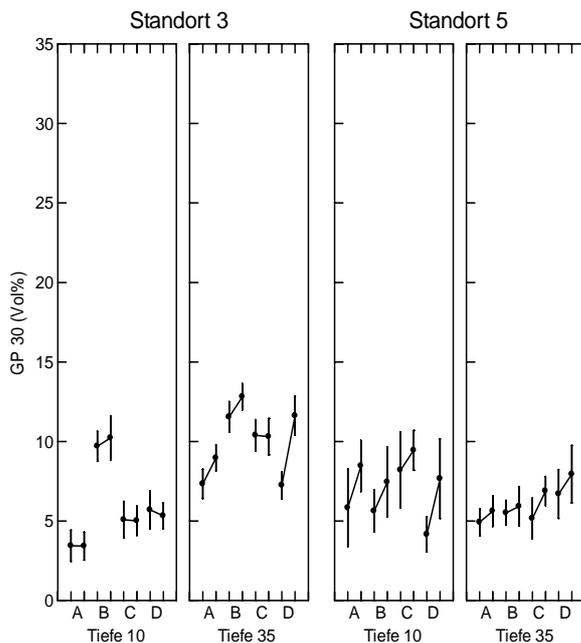
Anhang E Robustheit des Probenplanes – Vergleich zweier zum gleichen Zeitpunkt beprobten, aber räumlich verschobenen Beobachtungen

Vergleich der mittleren Parameterwerte mit Angabe des 95%-Vertrauensintervalls (VI) der Beobachtungen A-D in der Erhebung 2001(I) (links) mit den entsprechenden Werten der Beobachtungen in der räumlich verschobenen Erhebung 2001(II) (rechts). Anzahl Werte n_p pro Beobachtung: Grosszylindersystem GZ und Pandasonde (Parameter „Eindrw.“) $n_p=10$, Kleinzylindersystem (KIZ) $n_p=8$.

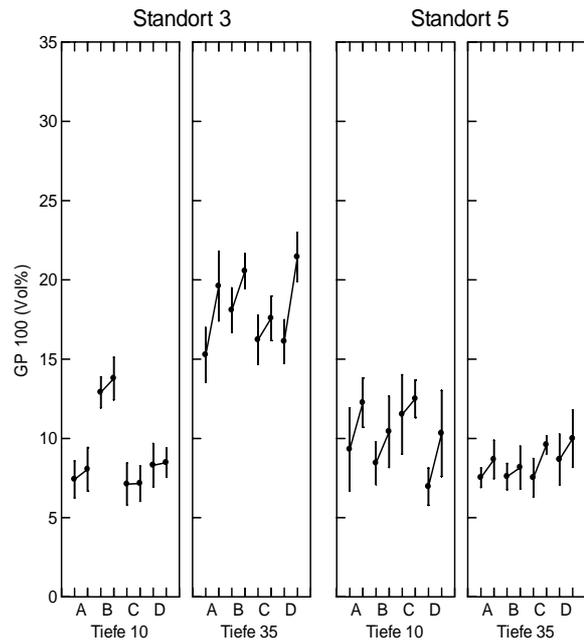
Gesamporenvolumen, Kleinzylinder- (KIZ) und Grosszylindersystem (GZ):



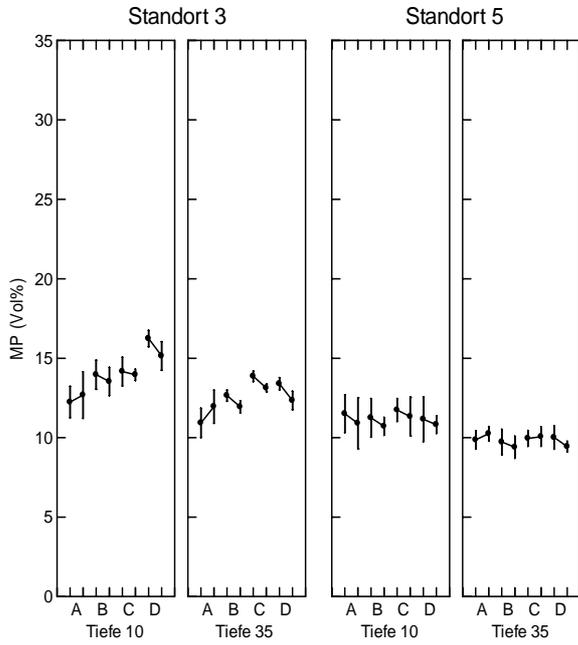
Grobporenvolumen 0-30hPa, Kleinzylindersystem:



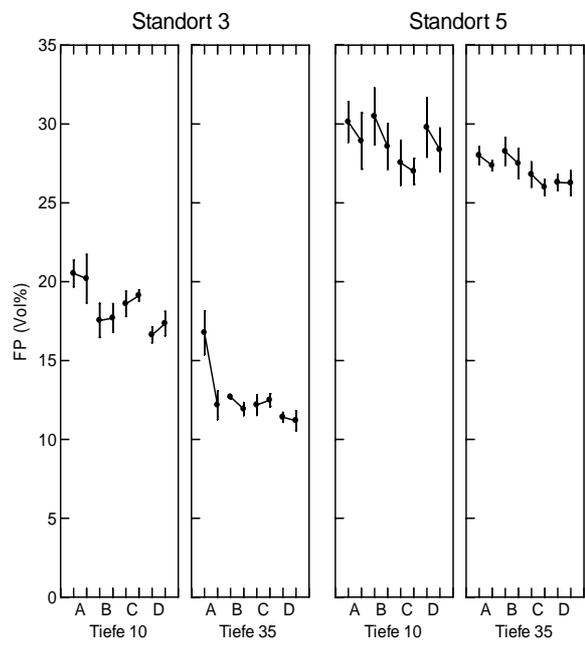
Grobporenvolumen 0-100hPa, Kleinzylindersystem:



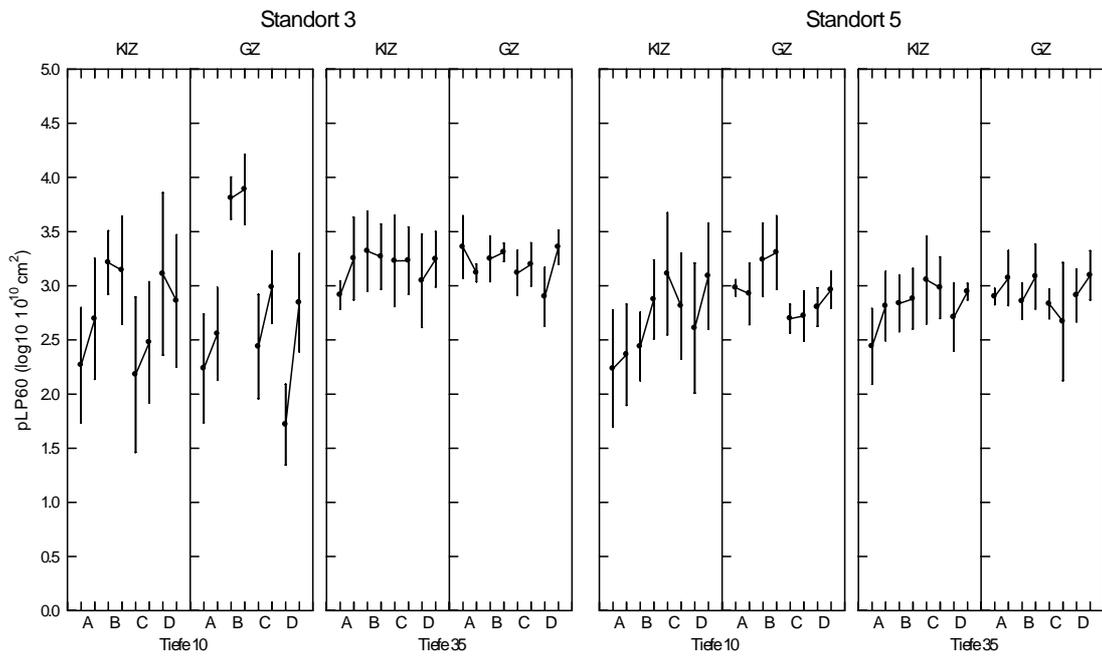
**Mittelporenvolumen,
Kleinzylindersystem:**



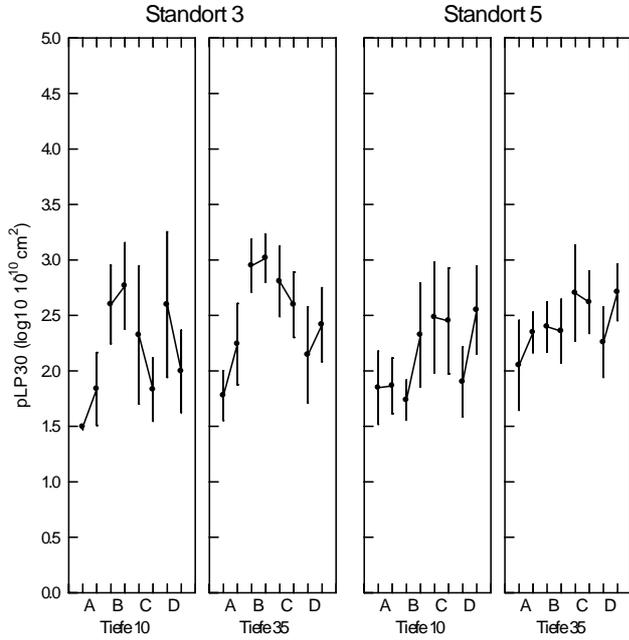
**Feinporenvolumen,
Kleinzylindersystem:**



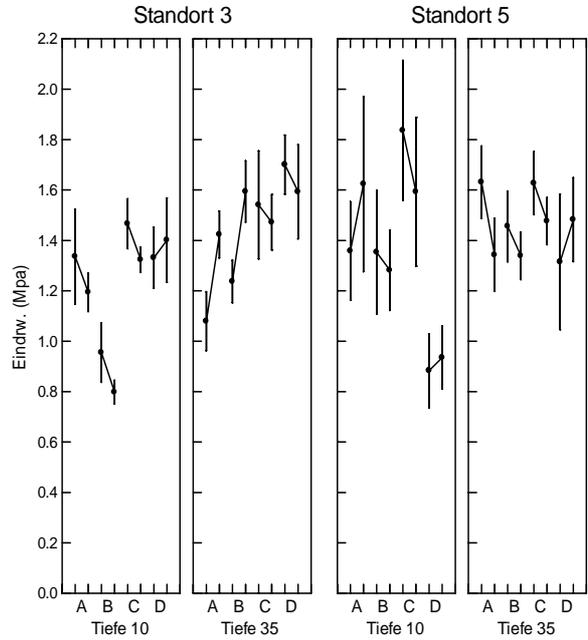
Log Luftpermeabilität 60hPa, Kleinzylinder- (KIZ) und Grosszylindersystem (GZ):



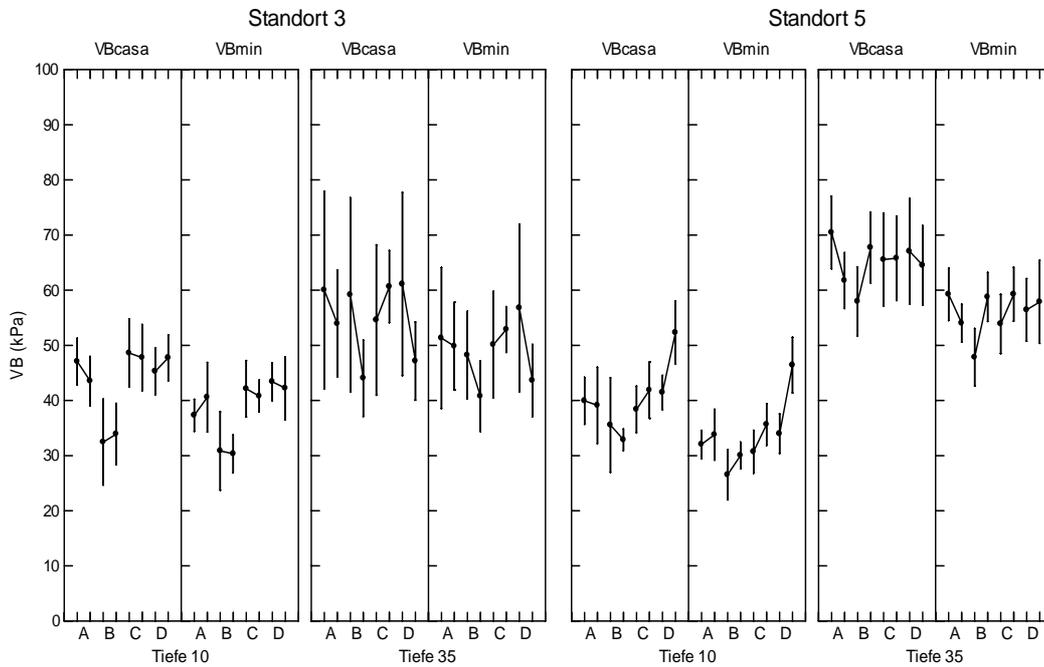
**Log Luftpermeabilität 30hPa,
Kleinzylindersystem:**



**Dynamischer Eindringwiderstand,
Pandasonde:**



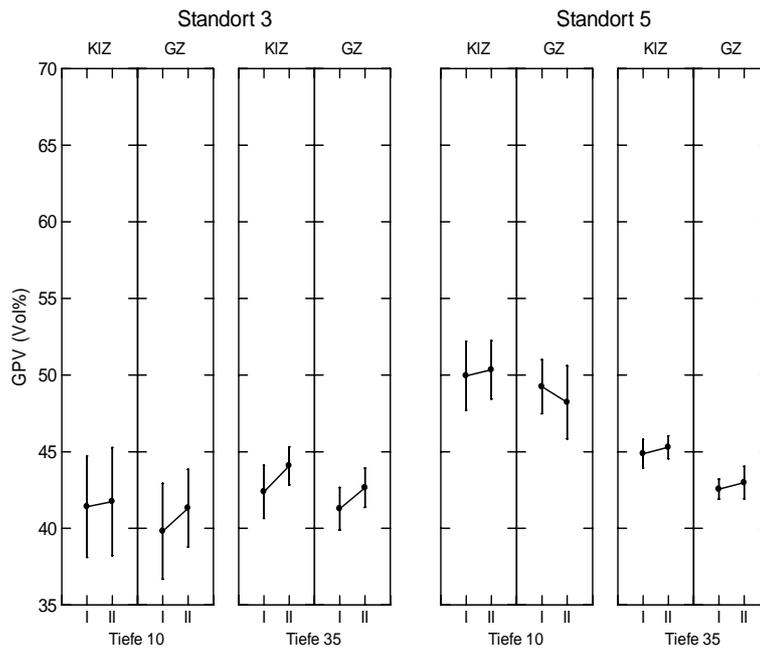
Vorbelastung nach Casagrande (VBcasa) und minimal (VBmin), Grosszylindersystem:



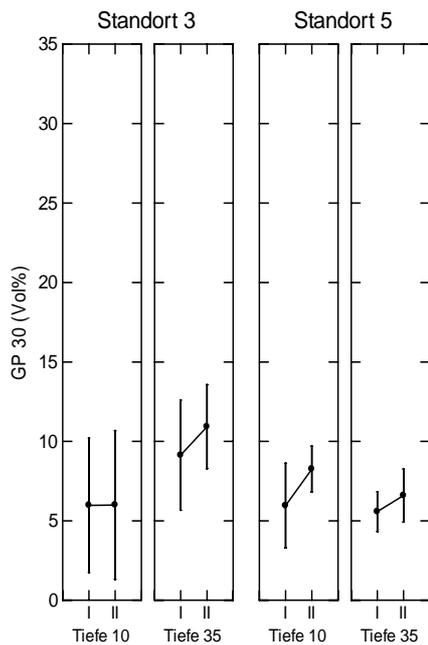
Anhang F Robustheit des Probenplanes– Vergleich zweier zum gleichen Zeitpunkt beprobten, aber räumlich verschobenen Erhebungen:

Vergleich der Erhebung 2001(I) mit der räumlich verschobenen Erhebung 2001(II); mittlere Parameterwerte und 95%-Vertrauensintervall (VI). Anzahl Werte pro Datenpunkt: $n_B=4$ Beobachtungen.

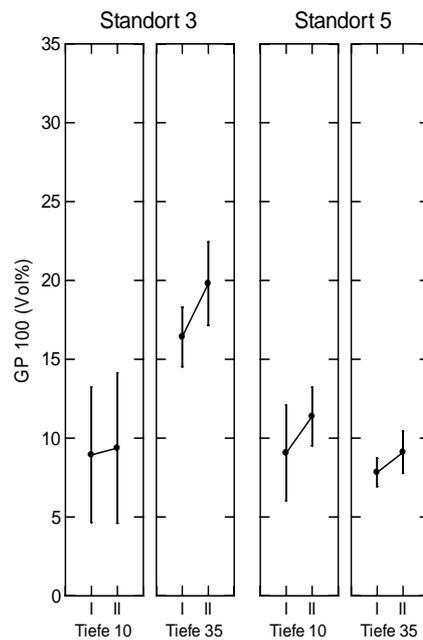
Gesamtporenvolumen, Kleinzyylinder- (KIZ) und Grosszylindersystem (GZ):



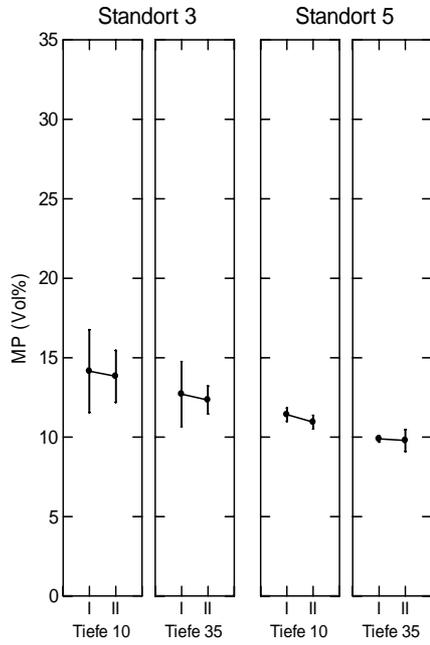
Grobporenvolumen 0-30hPa, Kleinzylindersystem:



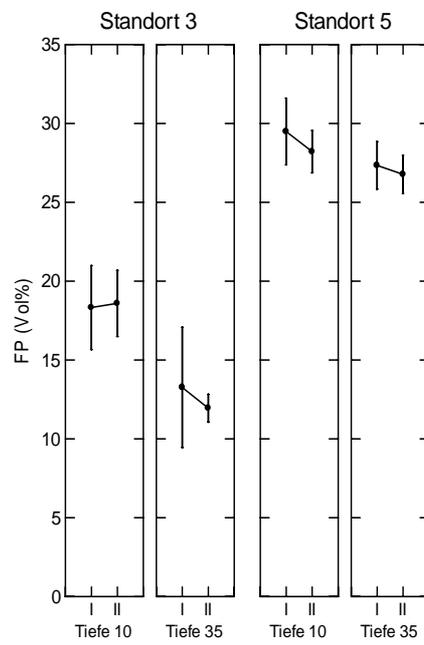
Grobporenvolumen 0-100hPa, Kleinzylindersystem:



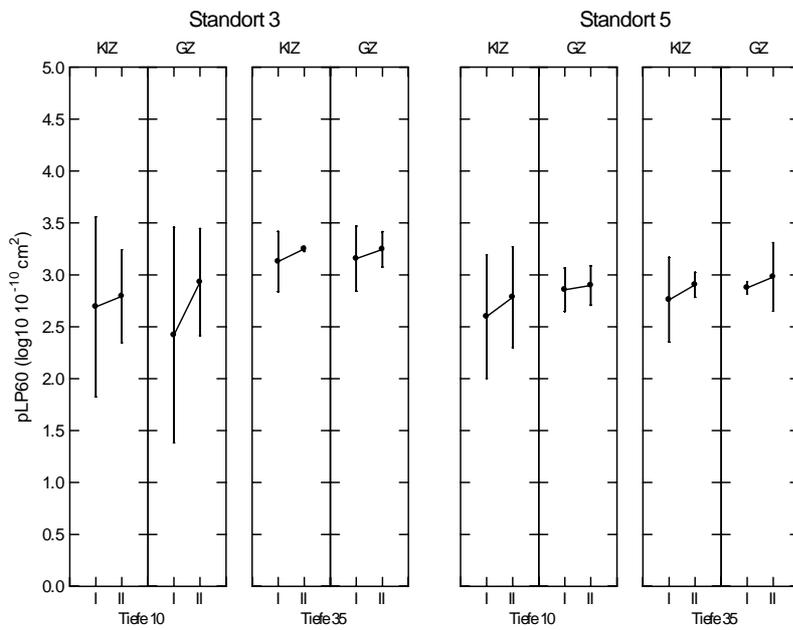
**Mittelporenvolumen,
Kleinzylindersystem:**



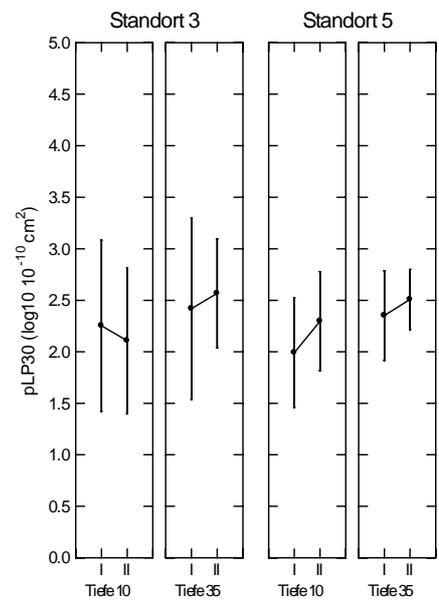
**Feinporenvolumen,
Kleinzylindersystem:**



**Log Luftpermeabilität 60hPa,
Kleinzylinder- (KIZ) und Grosszylindersystem (GZ):**

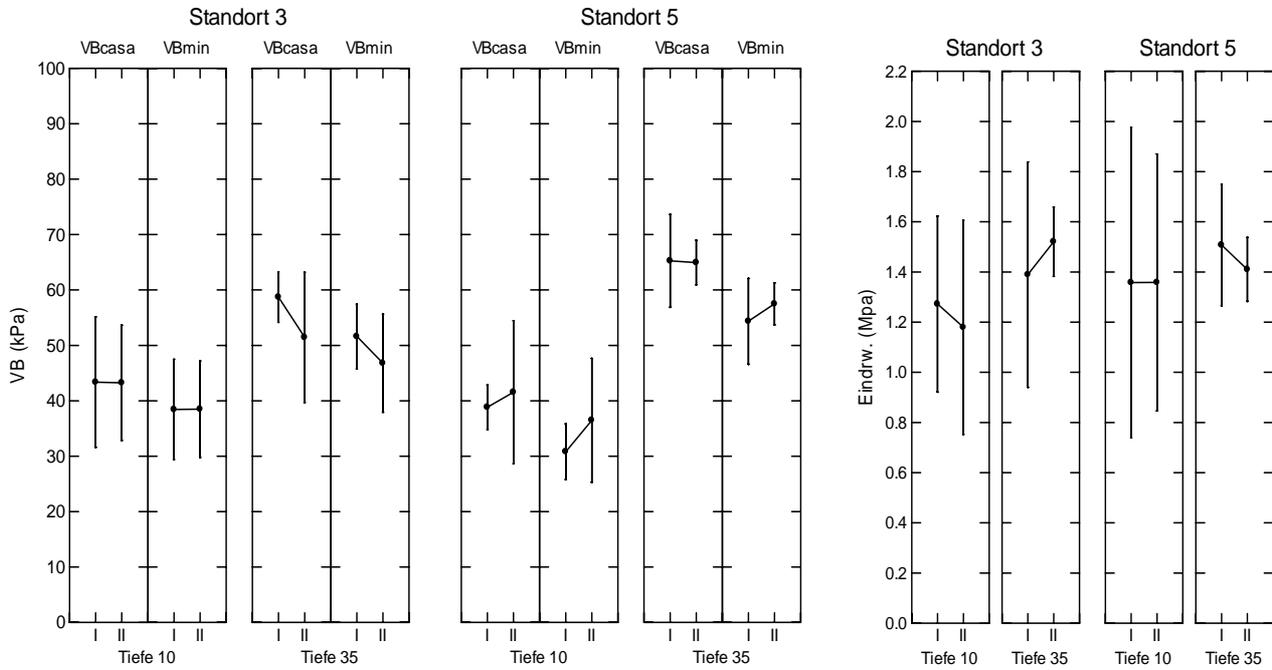


**Log Luftpermeabilität 30hPa
Kleinzylindersystem:**

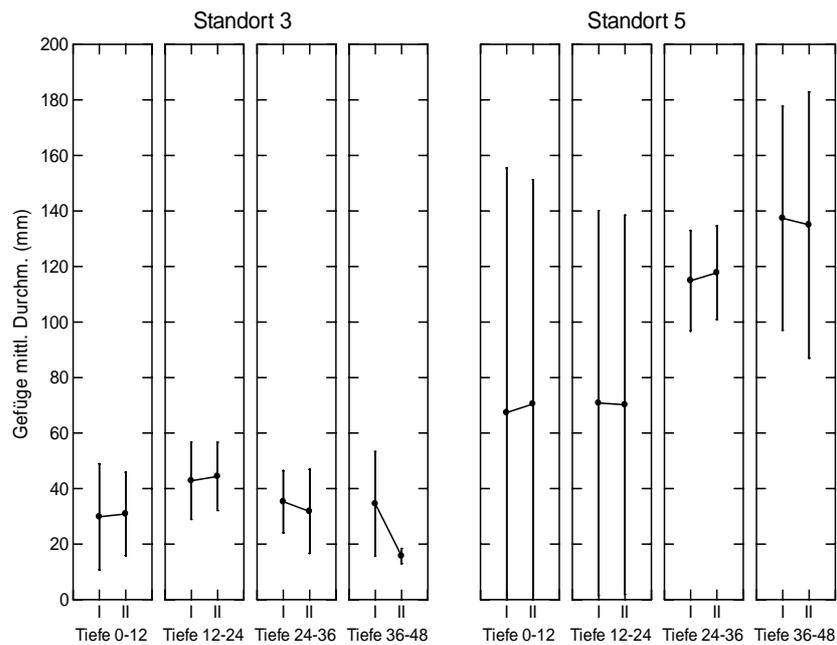


**Vorbelastung nach Casagrande (VB_{cas})
und minimal (VB_{min}): Grosszylindersystem:**

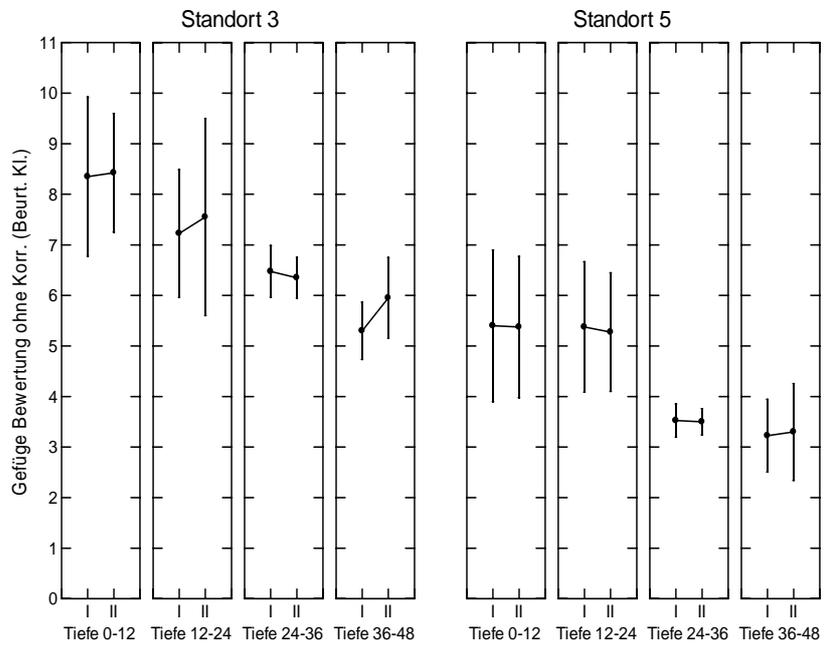
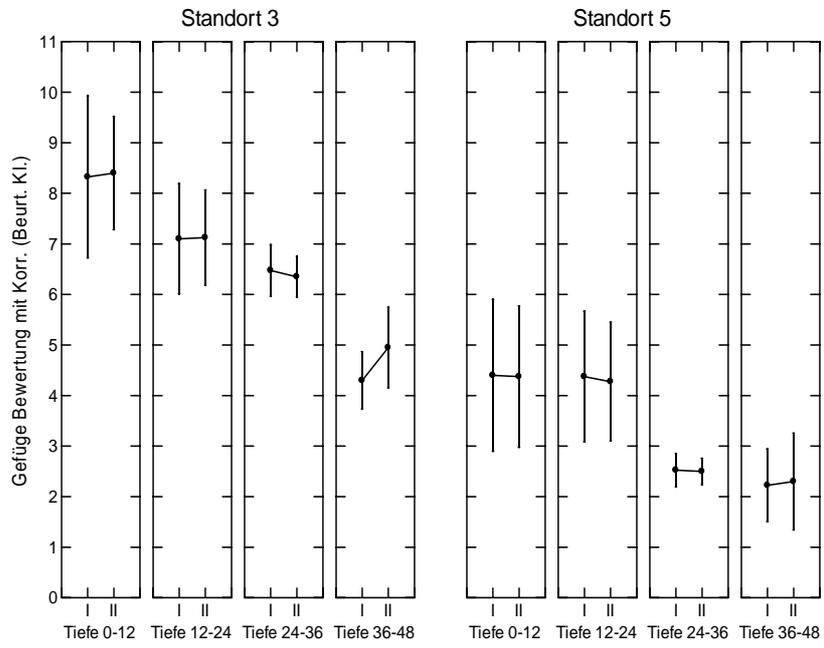
**Dynamischer Eindringwiderstand,
Pandasonde:**



Mittlerer Aggregatdurchmesser, visuelle Gefügebeurteilung:

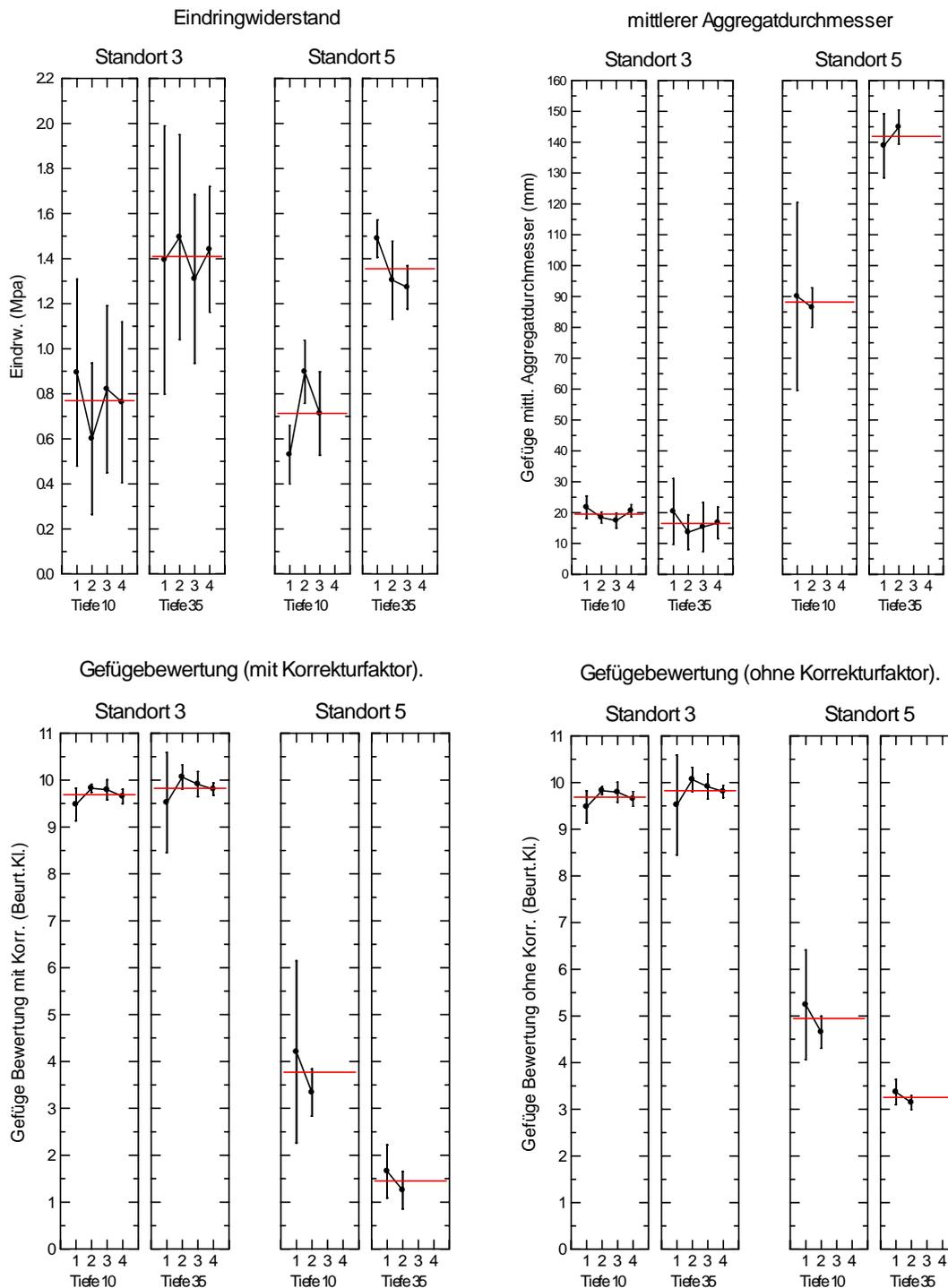


Gefügebewertung mit und ohne Korrekturfaktor, visuelle Gefügebeurteilung:



Anhang G Genauigkeit der Erhebung – Vergleich von Erhebungen bei unterschiedlichem Bodenzustand

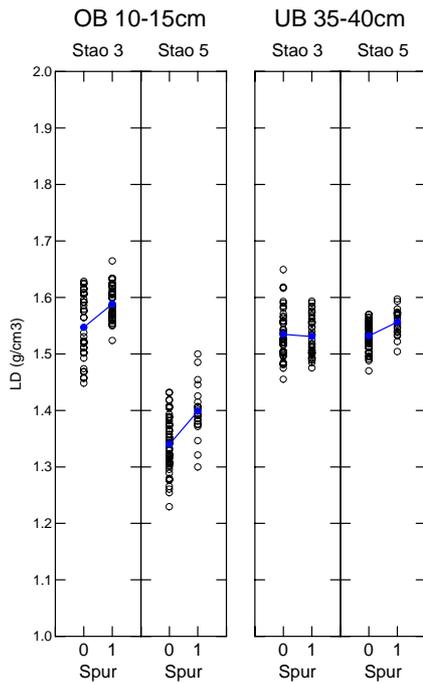
Kurzzeitliche Veränderung von bodenphysikalischen Parameterwerten bei unterschiedlichem Probenahme- bzw. Messzeitpunkt (Effekt Bodenfeuchte). Werte: 2002(1-4) wobei ZP 1+2 im Frühjahr (unterschiedliche Bodenfeuchte) und ZP 3+4 nach der Ernte (unterschiedliche Bodenfeuchte) erhoben wurden. Vergleich der Erhebungsmittelwerte (Zeitpunkt 1-4) und 95%-Vertrauensintervalle (VI). Anzahl Werte n_b pro Datenpunkt: $n_b=4$ die horizontale rote Linie stellt den Mittelwert der 4 bzw. 3 Erhebungen dar.



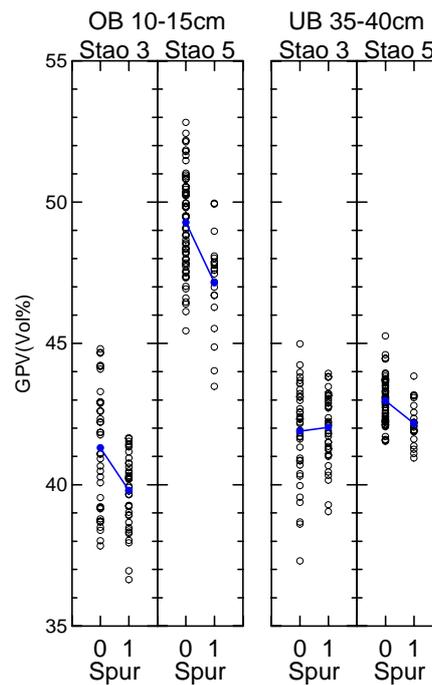
Anhang H Zusammenhang zwischen sichtbaren Fahrspuren und Parameterwerten

Zusammenhang zwischen sichtbaren Fahrspuren und den bodenphysikalischen Parameterwerten. Der Vergleich der Mittelwerte „mit Fahrspur“ und „ohne Fahrspur“ (blaue Linie) zeigt den mittleren Befahrungseffekt. 0 = keine Fahrspur, 1 = sichtbare Fahrspur; Parameterwerte aus 10-15 cm Tiefe (OB) und 35-40 cm Tiefe (UB); Stao 3 = Kleinandelfingen ZH, Stao 5 = Reckenholz ZH.

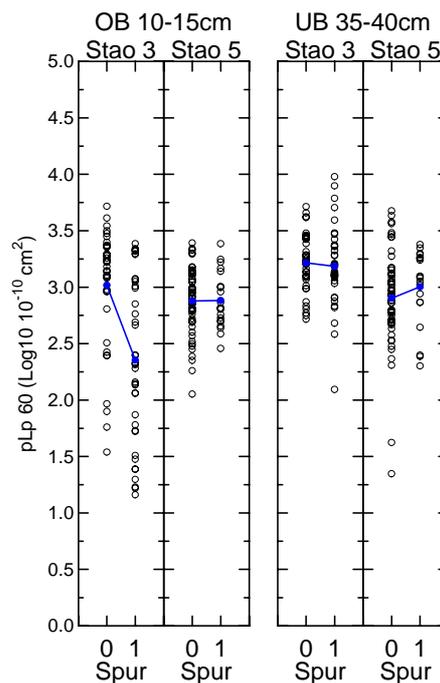
Lagerungsdichte, Grosszylindersystem:



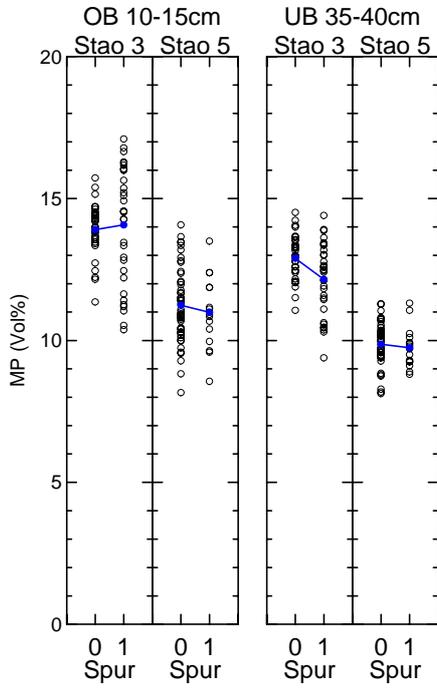
Gesamtporenvolumen, Grosszylindersystem:



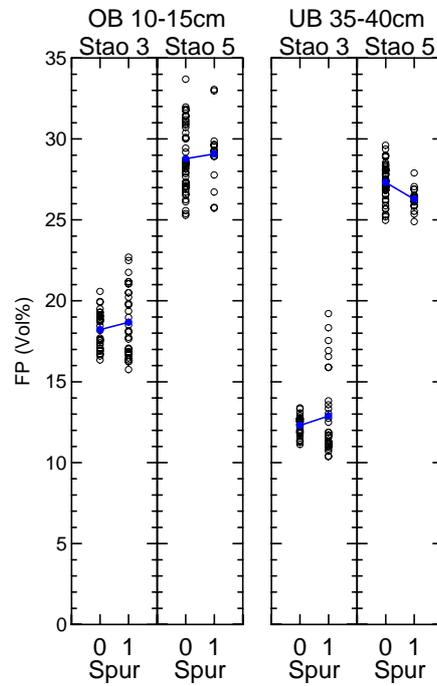
Log Luftpermeabilität 60hPa, Grosszylindersystem:



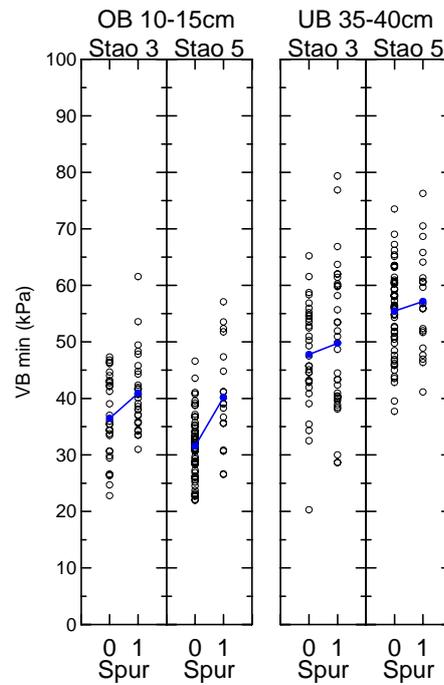
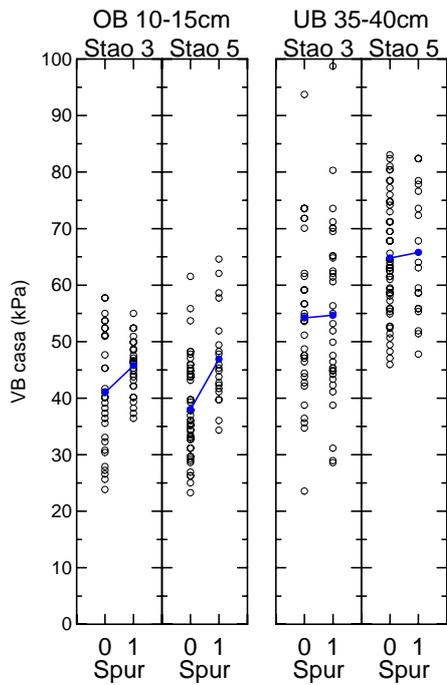
**Mittelporenvolumen,
Kleinzylindersystem:**



**Feinporenvolumen,
Kleinzylindersystem:**



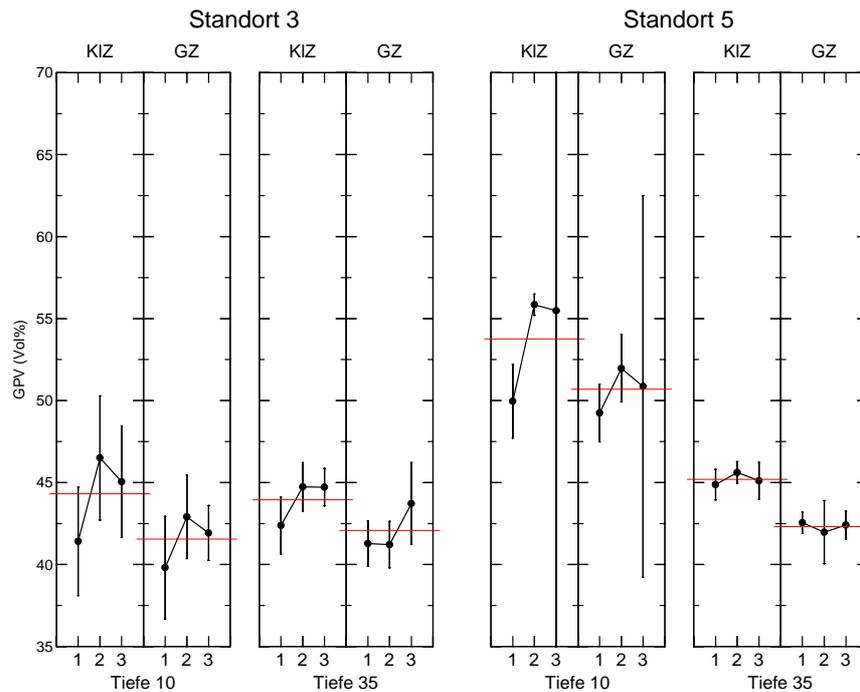
Vorbelastung nach Casagrande (VBcasa) und minimal (VBmin), Grosszylindersystem:



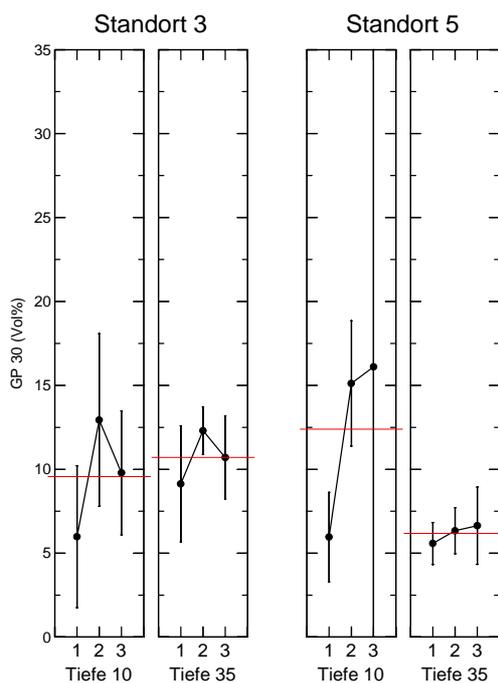
Anhang I Zeitliche Veränderung – Zeitliche Entwicklung der bodenphysikalischen Parameterwerte zwischen den Erhebungen 2001-2003

Vergleich der mittleren Erhebungswerte mit 95% Vertrauensintervall (VI). Anzahl Beobachtungen n pro Datenpunkt: nB=4; Standort 5 Reckenholz ZH, Tiefe 10-15 cm, Jahr 2003 n=2; horizontale Linie: mittlerer Standortwert über 3 Jahre.

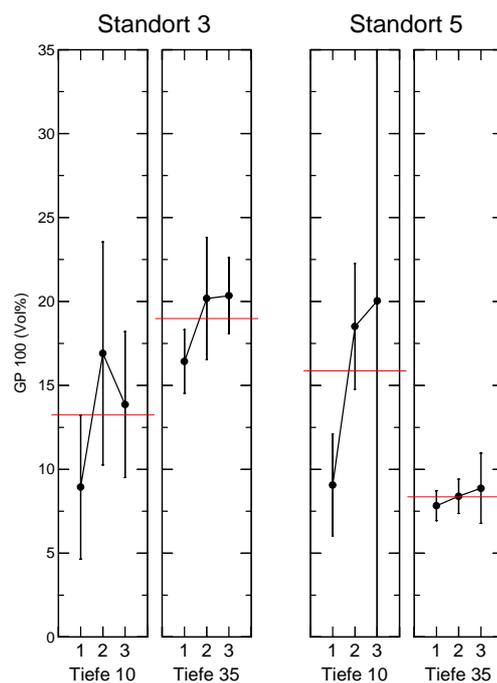
Gesamtporenvolumen, Kleinzyylinder- (KIZ) und Grosszylindersystem (GZ):



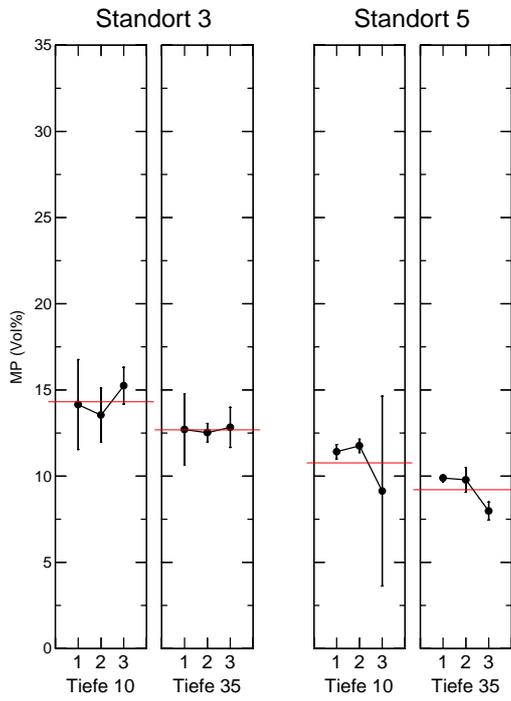
Grobporenvolumen 0-30hPa, Kleinzylindersystem:



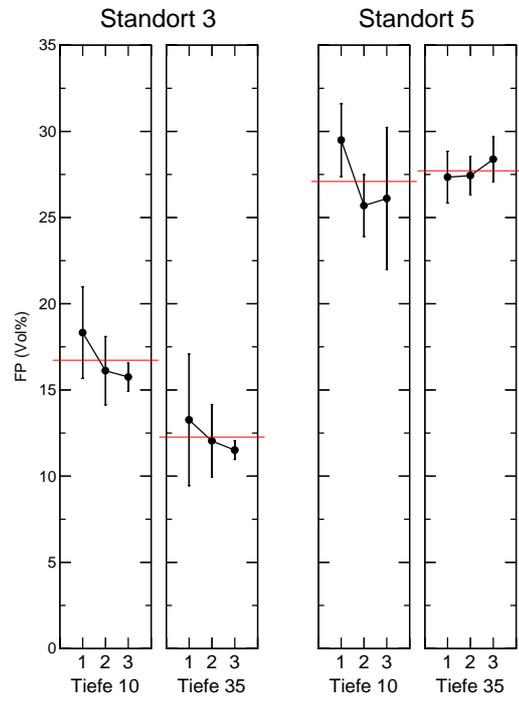
Grobporenvolumen 0-100hPa, Kleinzylindersystem:



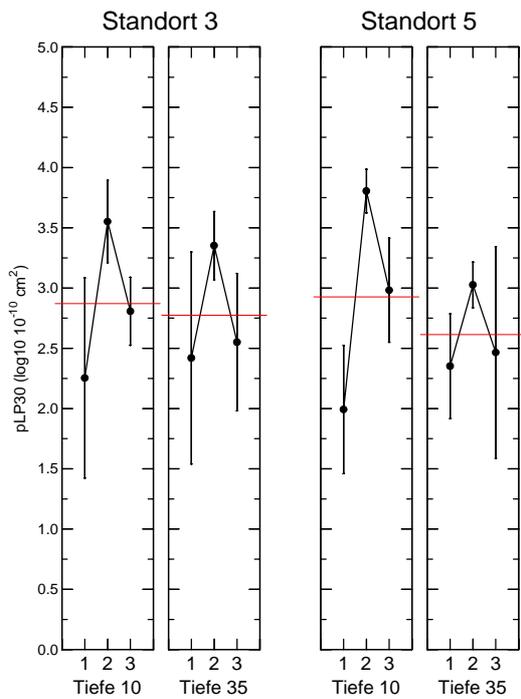
**Mittelporenvolumen, Kleinzyylinder:
Kleinzyindersystem:**



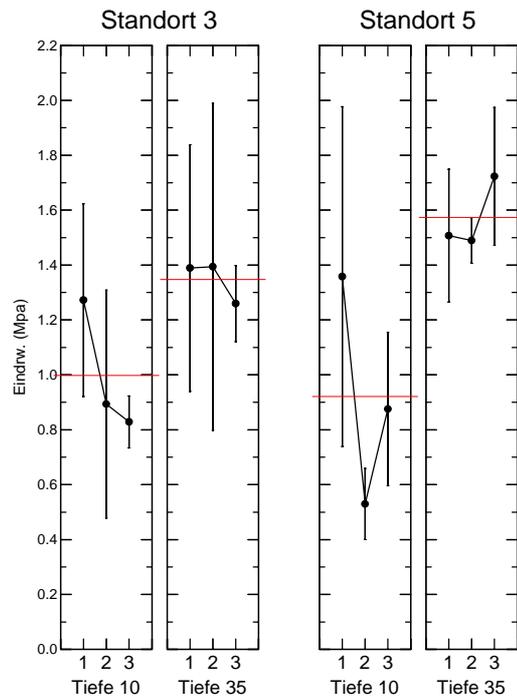
**Feinporenvolumen,
Kleinzyindersystem:**



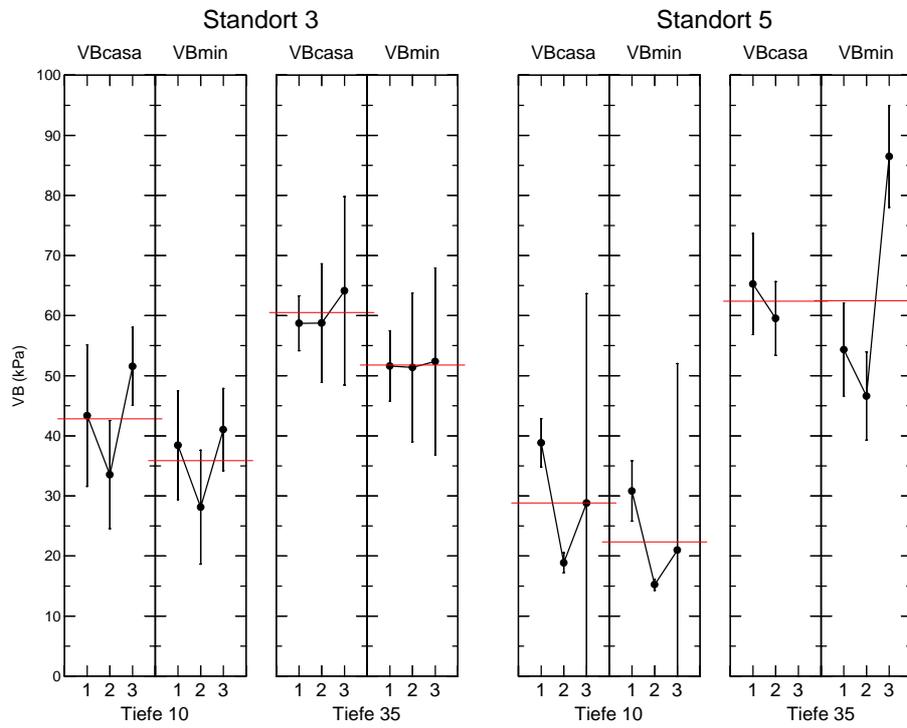
**Log Luftpermeabilität 30hPa,
Kleinzyindersystem:**



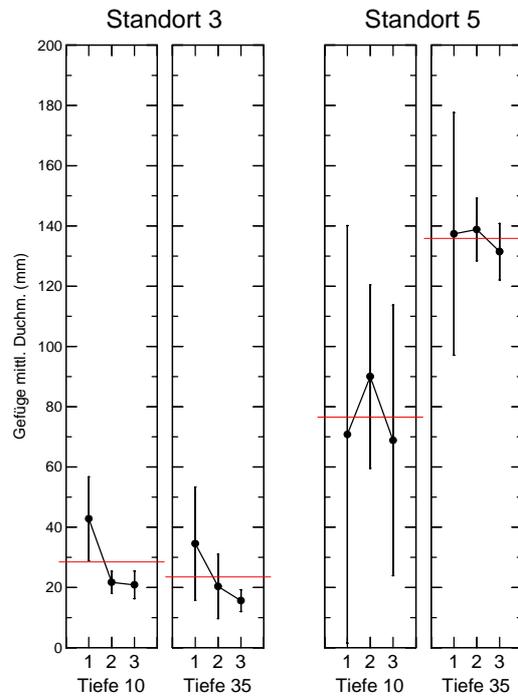
**Dynamischer Eindringwiderstand.
Pandasonde:**



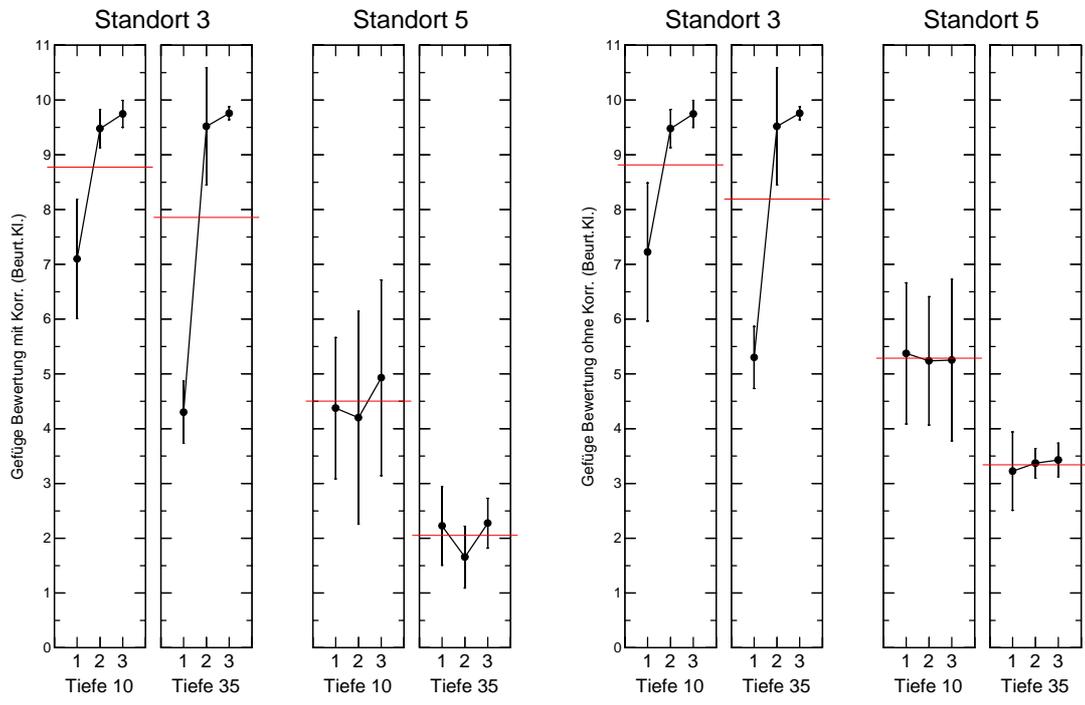
Vorbelastung nach Casagrande (VBcasa) und minimal (VBmin), Grosszylindersystem:



Mittlerer Aggregatdurchmesser, visuelle Gefügebeurteilung:



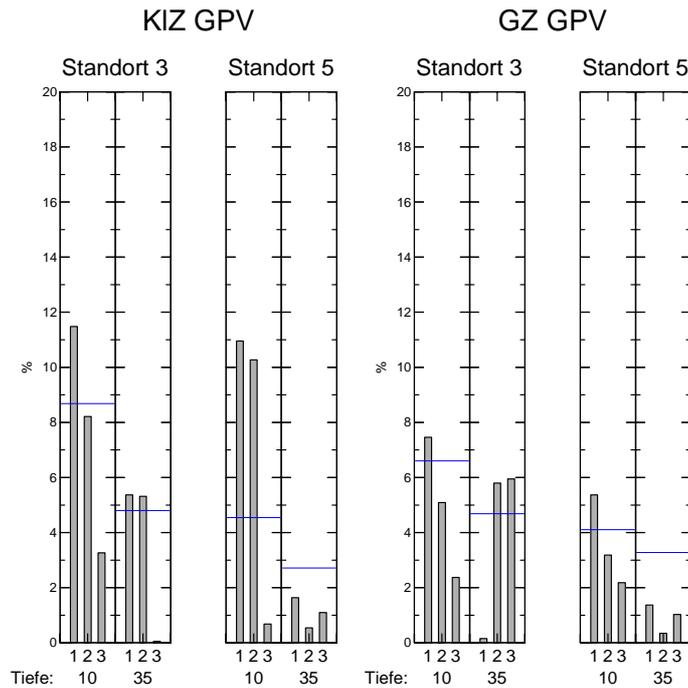
Gefügebewertung mit und ohne Korrekturfaktor, visuelle Gefügebeurteilung:



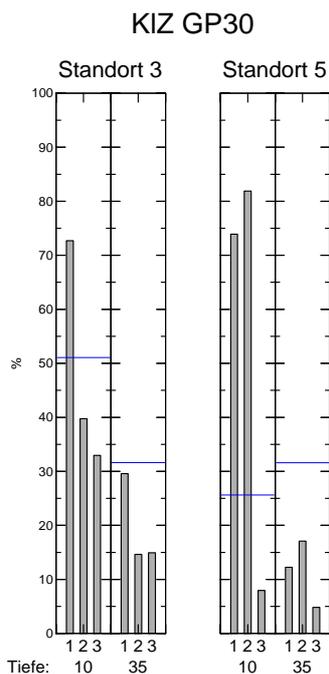
Anhang J Beurteilung der zeitlichen Veränderungen aufgrund von statistischen Signifikanzschwellen

Relative Veränderungen bodenphysikalischer Parameterwerte zwischen den Erhebungsjahren (Balken) im Vergleich zu den berechneten relativen 95%-Signifikanzschwellen für Mittelwertsdifferenzen (zVI). (blaue Linie); relative Angaben in % des jeweiligen mittleren Standortwertes. Differenzen zwischen Erhebungsjahren: 1 = zwischen 2001 und 2002, 2 = zwischen 2001 und 2003, 3 = zwischen 2002 und 2003.

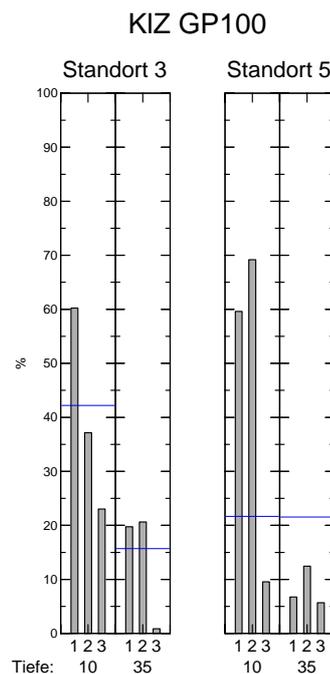
Gesamtporenvolumen, Kleinzylinder- (KIZ) und Grosszylindersystem (GZ):



Grobporenvolumen 0-30hPa, Kleinzylindersystem:



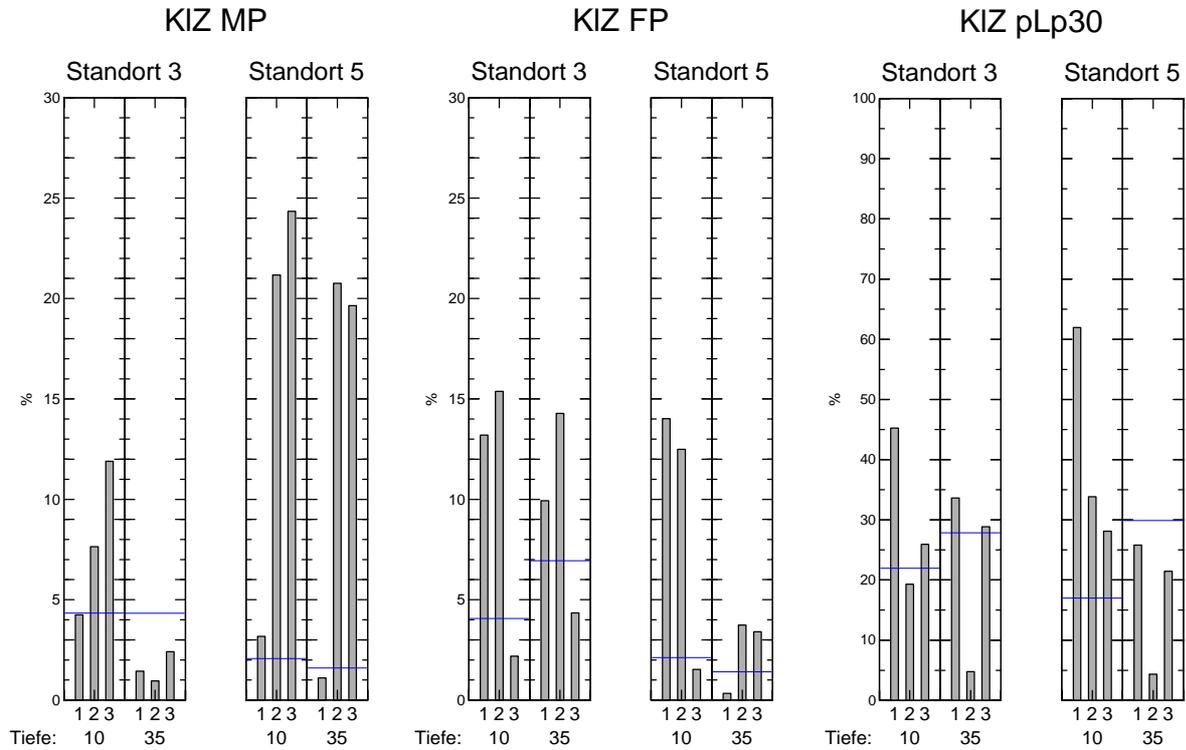
Grobporenvolumen 0-100hPa, Kleinzylindersystem:



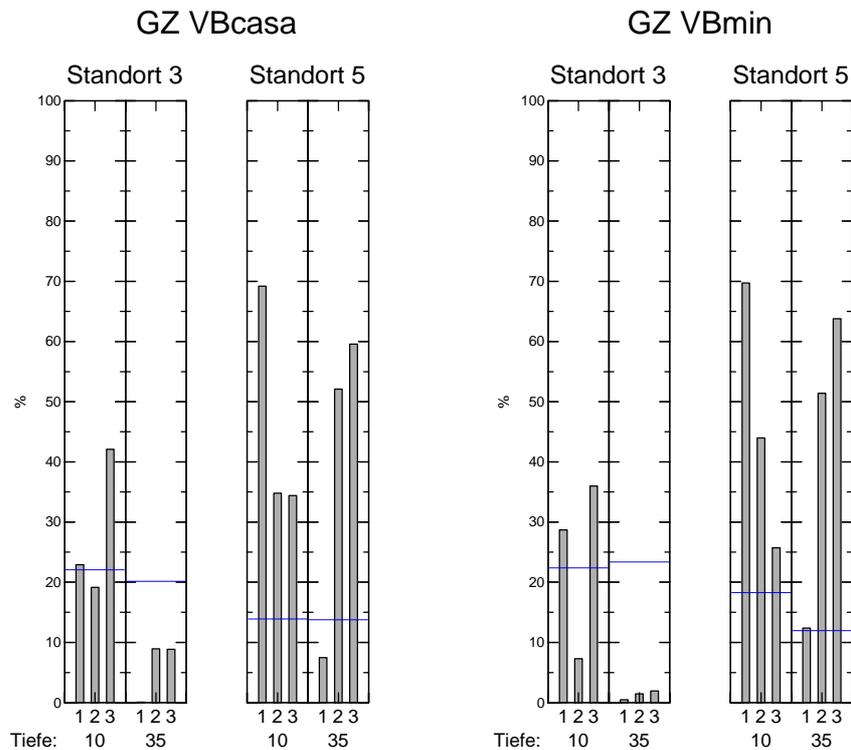
**Mittelporenvolumen,
Kleinzylindersystem:**

**Feinporenvolumen,
Kleinzylindersystem:**

**Log Luftpermeabilität 30hPa,
Kleinzylindersystem:**

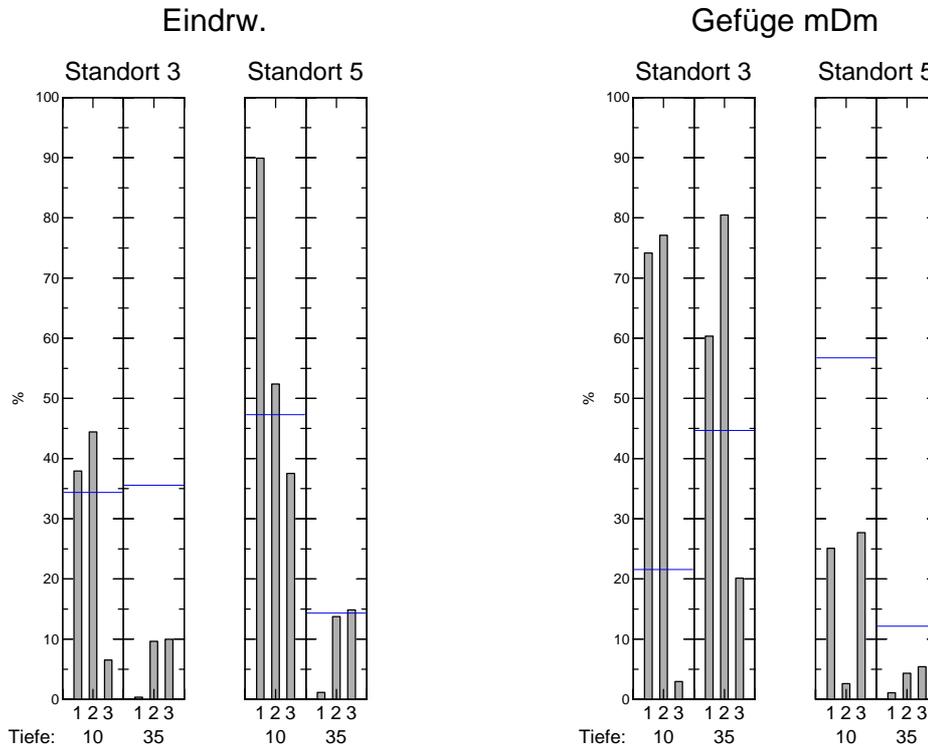


Vorbelastung nach Casagrande (VBcasa) und minimal (VBmin), Grosszylindersystem:

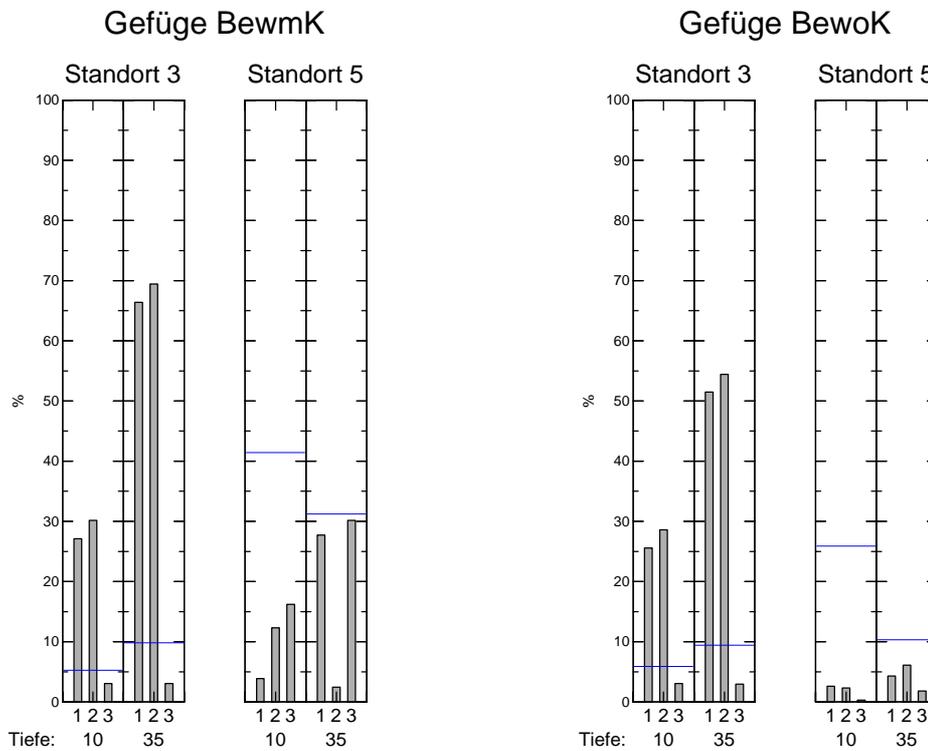


**Dynamischer Eindringwiderstand,
Pandasonde:**

**Mittlerer Aggregatdurchmesser,
visuelle Gefügebeurteilung:**



Gefügebewertung mit und ohne Korrekturfaktor, visuelle Gefügebeurteilung:

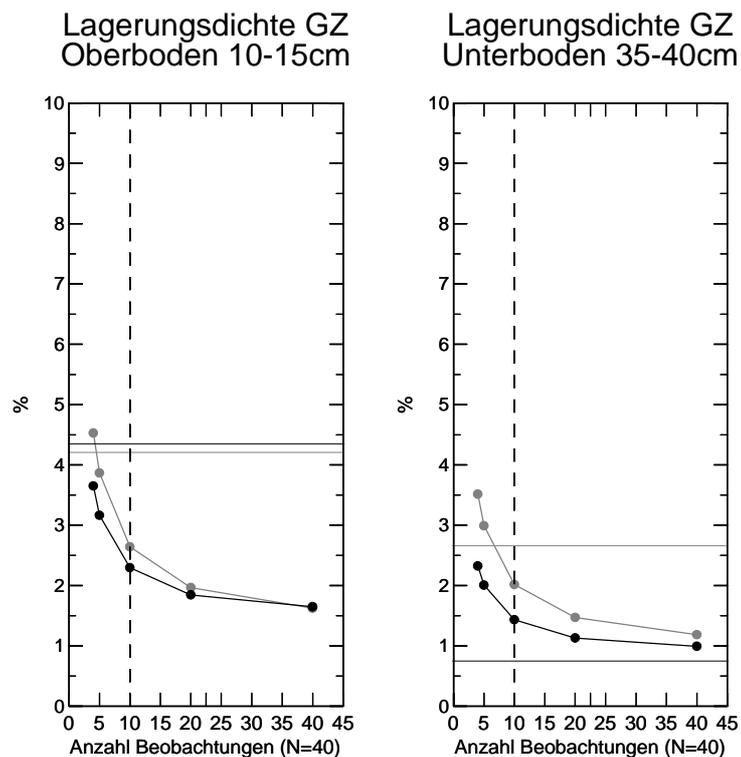


Anhang K Optimierung der Probenverteilung

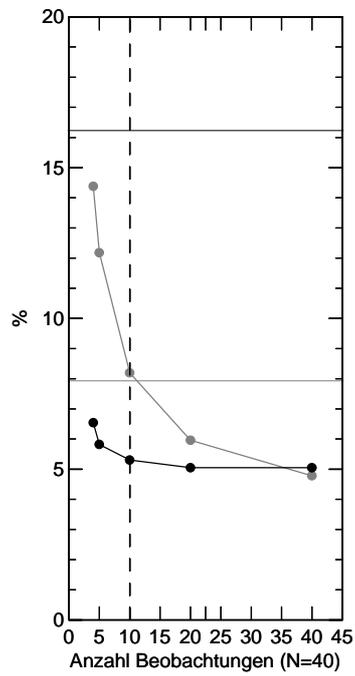
Bestimmung der optimalen Anzahl von Beobachtungen bei gleich bleibender Probenzahl von total 40 Einzelproben.

Gegenüberstellung der zVI (Kurven) und der mittleren gemessenen Veränderungen 2001-03 (horizontale Linien); Angaben relativ (%) zum mittleren Standortwert

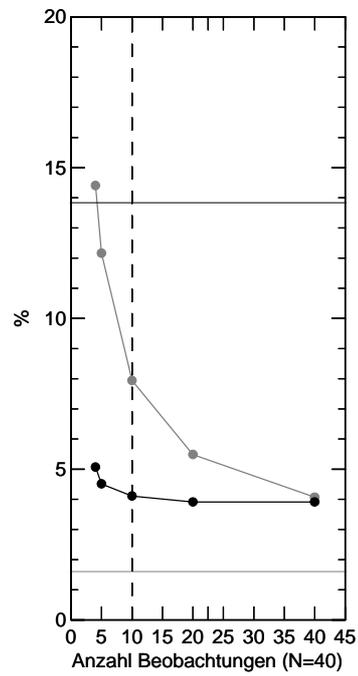
Grau: Standort Kleinandelfingen ZH; schwarz: Standort Reckenholz ZH



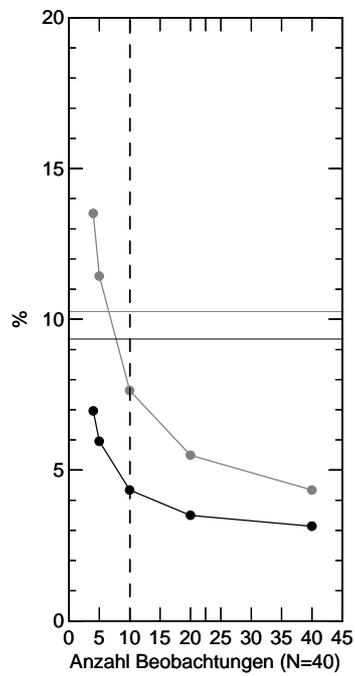
Mittelporen KIZ
Oberboden 10-15cm



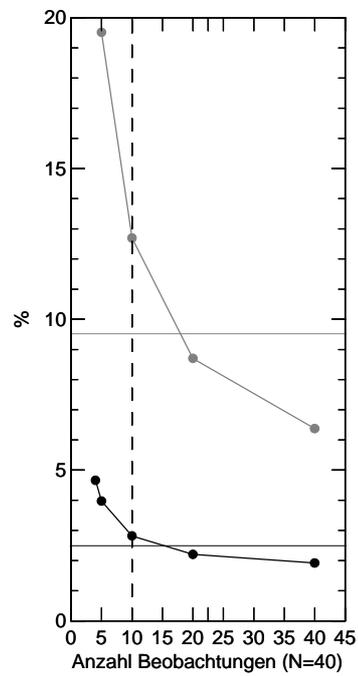
Mittelporen KIZ
Unterboden 35-40cm



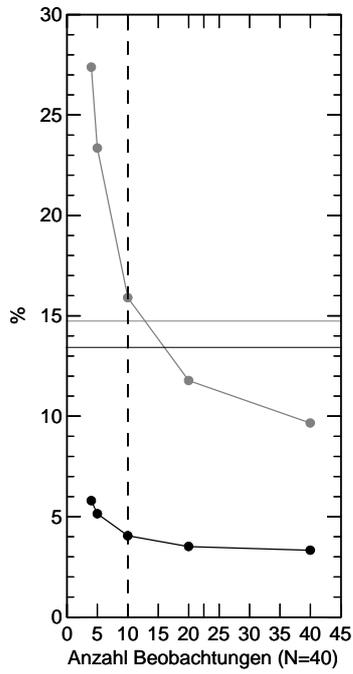
Feinporen KIZ
Oberboden 10-15cm



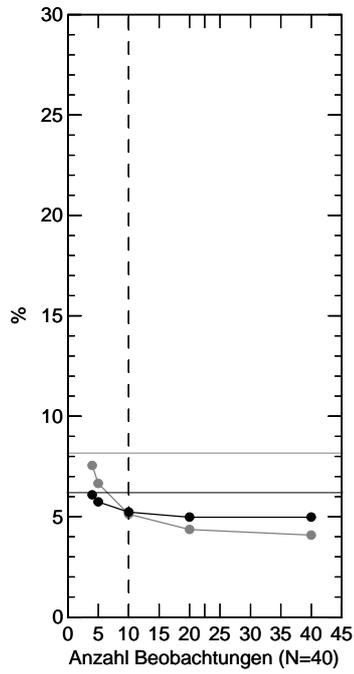
Feinporen KIZ
Unterboden 35-40cm



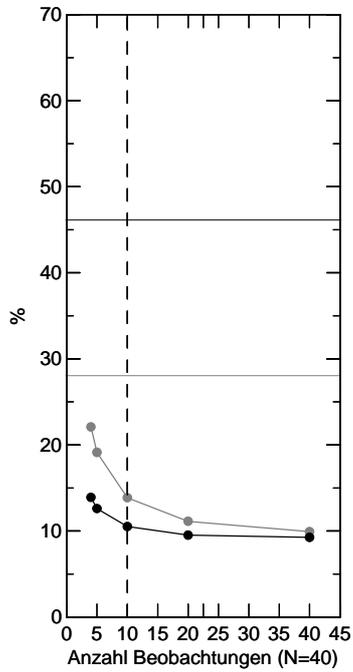
Luftpermeabilität 60hPa GZ
Oberboden 10-15cm



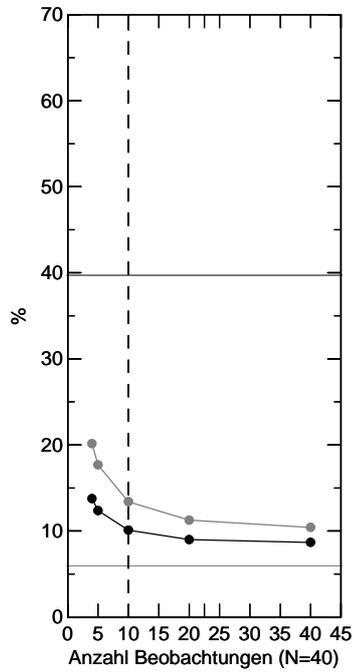
Luftpermeabilität 60hPa GZ
Unterboden 35-40cm



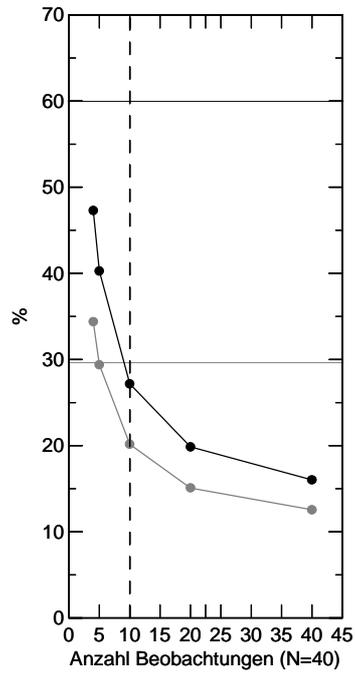
Vorbelastung Casa. GZ
Oberboden 10-15cm



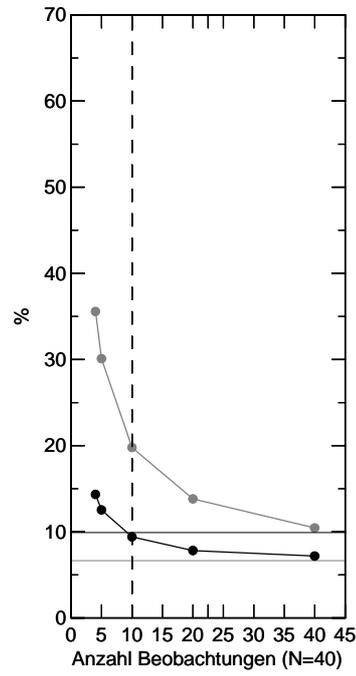
Vorbelastung Casa. GZ
Unterboden 35-40cm



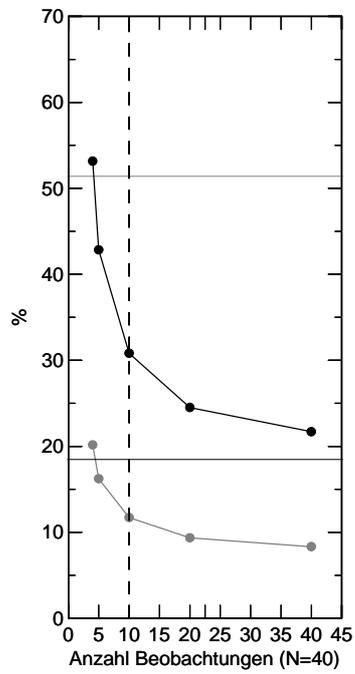
Eindringwiderstand
Oberboden 10-15cm



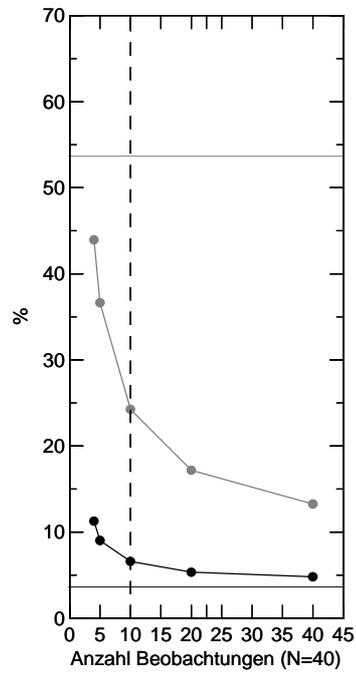
Eindringwiderstand
Unterboden 35-40cm



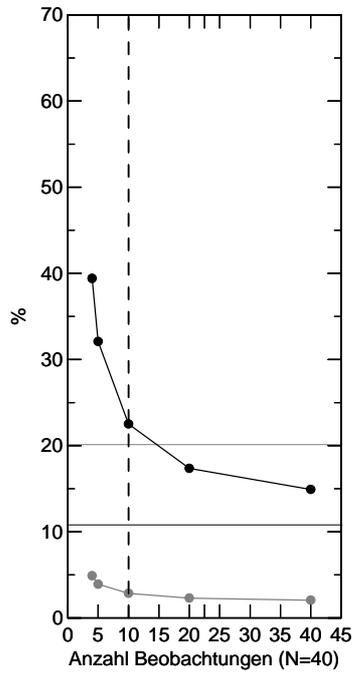
mittl. Gefügedurchmesser
Oberboden 10-15cm



mittl. Gefügedurchmesser
Unterboden 35-40cm



Bewertung Gefüge (m. K.f)
Oberboden 10-15cm



Bewertung Gefüge (m. K.f)
Unterboden 35-40cm

