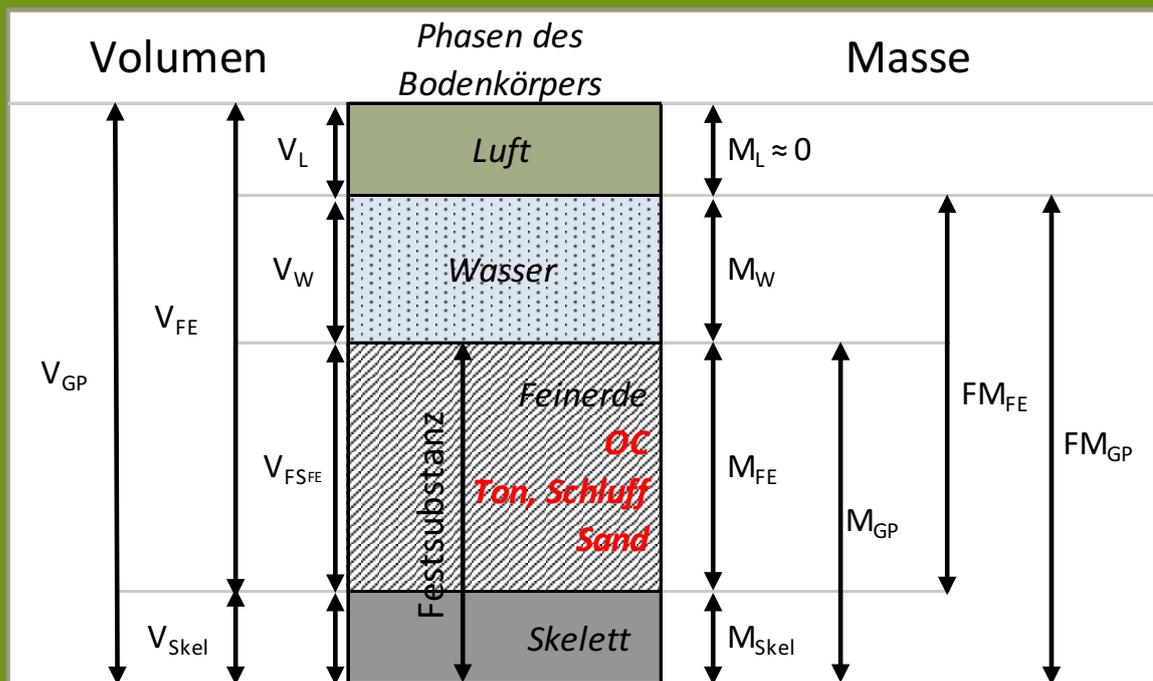


Herleitung von Schätzwerten für Lagerungsdichte und Raumgewicht Feinerde

Pedotransferfunktionen für landwirtschaftlich genutzte Böden der Tiefe 0-20 cm



Impressum

Herausgeber	Nationale Bodenbeobachtung (NABO), Agroscope, Zürich-Reckenholz
Autoren	Peter Schwab, Andreas Gubler
Auskunft	<p>Peter Schwab, Nationale Bodenbeobachtung (NABO), Agroscope Email peter.schwab@agroscope.admin.ch Telefon +41 58 468 74 57</p> <p>Andreas Gubler, Nationale Bodenbeobachtung (NABO), Agroscope Email andreas.gubler@agroscope.admin.ch Telefon +41 58 468 76 66</p> <p>Web www.nabo.ch</p>
Bezug	<p>Dieses Dokument ist ausschliesslich als PDF-Download verfügbar unter www.nabo.ch</p> <p><i>(Korrigierte Version vom Oktober 2020; Parameter e in Formel 5 korrigiert)</i></p>

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Zusammenfassung	4
1. Einleitung	5
2. Methoden	7
2.1 Daten	7
2.2 Datenanalyse	9
3. Ergebnisse und Diskussion	10
3.1 Schätzung der Lagerungsdichte LD_{FE}	10
3.2 Schätzung des Raumgewichtes RG_{FE}	14
3.3 Vereinfachte Schätzung der LD_{FE} ohne Wassergehalt	15
3.4 Vereinfachte Schätzung des RG_{FE} ohne Wassergehalt	18
4. Schlussfolgerungen und Ausblick	19
4.1 Aussagesicherheit der Pedotransferfunktionen	19
4.2 Weitere Verbesserungen der Schätzungen	20
5. Literatur	21
6. Anhang	22
6.1 Reduktion Datensatz	22
6.2 Ergebnisse der explorativen Datenanalyse	23
6.3 Geschätzte Werte gemäss Formeln 5 und 6 für alle Standorte in Datensatz 1	25

Zusammenfassung

Für viele Fragestellungen sind neben den Stoffkonzentrationen auch die im Boden vorhandenen Stoffmengen bzw. Vorräte relevant. Damit letztere berechnet werden können, müssen neben den Konzentrationen auch physikalische Parameter wie die Menge Feinerde pro Bodenvolumen (das so genannte Raumgewicht Feinerde, RG_{FE}) bekannt sein. Das RG_{FE} hängt von der Lagerungsdichte der Feinerde (LD_{FE}) und dem Skelettgehalt ab. Für Untersuchungen, wo diese physikalischen Begleitparameter nicht bestimmt wurden, müssen diese mithilfe von Pedotransferfunktionen aus den gemessenen Bodeneigenschaften geschätzt werden.

Die Nationale Bodenbeobachtung NABO bestimmt seit 2003 bei jeder Probenahme das RG_{FE} anhand von Volumenproben (Humax-Schlagsonde mit 4.8 cm Durchmesser, 0-20 cm Tiefe). Einerseits, um den Bodenwasserstatus zum Zeitpunkt der Probenahme zu kennen. Andererseits, um Mengen bzw. Vorräte abzuschätzen. In dieser Studie leiteten wir aufgrund dieser (an Bodenproben gemessenen) Werte Pedotransferfunktionen her, um LD_{FE} und RG_{FE} mithilfe anderer Bodenparameter zu schätzen. Für landwirtschaftlich genutzte Böden lässt sich LD_{FE} aufgrund des organischen Kohlenstoffgehalts (OC), Tongehalts und des Wassergehalts der Feinerde (WG_{FE}) schätzen, für das RG_{FE} muss zusätzlich der Skelettgehalt (Vol.-%) bekannt sein (vgl. Formeln 5 und 6 im Bericht). Für beide beträgt der RMSE (root mean squared error) rund 0.07 g/cm^3 , was einem relativen Fehler von rund 7 % entspricht. Da der WG_{FE} häufig ebenfalls unbekannt ist, wurde zudem ein vereinfachtes Modell auf der Basis von OC, Ton- und Sandgehalt hergeleitet (vgl. Formeln 7 und 8 im Bericht). Durch die Schätzung ohne WG_{FE} erhöht sich der relative Fehler um 1.5 %. Für die Schätzung von RG_{FE} und somit von Stoffmengen bzw. Vorräten ist die Bestimmung/Schätzung des Skelettgehaltes ein wichtiger Unsicherheitsfaktor.

Die hier präsentierten Pedotransferfunktionen erlauben die Schätzung von LD_{FE} und RG_{FE} für den Oberboden (0-20 cm) von landwirtschaftlich genutzten Böden mit einem relativen Fehler $<10 \%$. Hierbei muss nicht zwischen Böden mit und ohne Bodenbearbeitung unterschieden werden, es können für beide dieselben Funktionen verwendet werden. Für Waldböden sollten sie jedoch nicht verwendet werden, diese haben generell tiefere LD_{FE} und RG_{FE} bei gleichem OC-Gehalt und vergleichbarer Körnung. Daher müssen separate Modelle hergeleitet werden. Zudem könnten die Schätzung bei unbekanntem Wassergehalt mithilfe von Klimadaten verbessert werden.

1. Einleitung

Bei vielen Bodenuntersuchungen wurden/werden nur Stoffkonzentrationen bestimmt. Zur Berechnung von Stoffvorräten in Böden benötigt man neben den Konzentrationen (die sich in der Regel auf das Trockengewicht des analysierten Materials beziehen) auch die Information, wie viel Erde im betrachteten Bodenvolumen vorhanden ist (beispielsweise in den obersten 20 cm eines Quadratmeters). Darum bestimmt die Nationale Bodenbeobachtung (NABO) seit 2003 so genannte physikalische Begleitparameter, wie das Raumgewicht Feinerde¹ (RG_{FE}) und die Lagerungsdichte der Feinerde (LD_{FE}). Um für Untersuchungen ohne diese Informationen Aussagen zu den Stoffvorräten zu machen, müssen die physikalischen Begleitparameter aus bekannten Bodenkenngrossen abgeschätzt werden. Das Ziel dieses Berichtes ist, aufgrund der vorhandenen Messungen der NABO Pedotransferfunktionen für RG_{FE} und LD_{FE} herzuleiten. Dabei soll auch der Einfluss der Bodennutzung und insbesondere der Bodenbearbeitung untersucht werden.

Im Monitoring der NABO werden seit 2003 bei jeder Probenahme neben den Flächenmischproben 0-20 cm zusätzlich mit der Humax-Schlagsonde vier Volumenproben 0-20 cm entnommen (sog. Humaxproben mit 4.8 cm Durchmesser). Aus letzteren werden die Masse Bodenwasser (M_W ; vgl. Abbildung 1) und Trockenmasse Feinerde (M_{FE}) sowie Masse und Volumen des Skeletts (M_{Skel} , V_{Skel}) bestimmt und in Relation zum Gesamtvolumen der Probe (V_{GP}) gesetzt. Aus diesen Messgrössen werden die physikalischen Begleitparameter RG_{FE} , LD_{FE} und der Wassergehalt der Feinerde (WG_{FE}) berechnet. Im Bericht „Methoden zur Bestimmung physikalischer Begleitparameter an Bodenproben“ (Schwab & Gubler, 2016) sind die Methoden beschrieben sowie die Ergebnisse und Schlussfolgerungen zu den methodischen Abklärungen aufgeführt.

RG_{FE} beschreibt die Menge Feinerde pro Bodenvolumen und ist definiert als M_{FE} / V_{GP} . Das RG_{FE} wird von V_{Skel} und LD_{FE} beeinflusst, wobei gilt

$$RG_{FE} = \left(1 - \frac{V_{Skel}}{V_{GP}}\right) * LD_{FE} = \left(1 - \frac{Skelett}{100}\right) * LD_{FE} \quad (1)$$

mit Skelett = Skelettanteil in Vol.-%. Die $LD_{FE} = M_{FE} / V_{FE}$ wird durch die Bodenart (Humus-, Ton-, Schluff- und Sandgehalt), als auch den WG_{FE} beeinflusst. Veränderungen des Wassergehaltes beeinflussen durch Prozesse des Quellens und Schrumpfens das Volumen der Feinerde und somit die LD_{FE} . Diese Prozesse sind je nach Gehalt und Zusammensetzung von Humus und Ton unterschiedlich stark ausgeprägt. Im Weiteren hängt die LD_{FE} auch vom Gefügestand ab, der wiederum von der Bewirtschaftung (Befahrung, Bodenbearbeitung) beeinflusst wird.

Der Einfluss von Wassergehalt und organischem Kohlenstoffgehalt (OC) des Bodens auf das RG_{FE} der Standorte im NABO-Messnetz wurde im Bericht von Gubler et al. (2016) aufgezeigt. Dabei wurde interpretiert, dass die zeitliche Variabilität in erster Linie vom WG bei der Probenahme und damit vom unterschiedlichem Quellungs- bzw. Schrumpfungszustand des Bodens abhängt. Unterschiedliche Ton- und OC-Gehalte der Standorte erklären die unterschiedlich starke Ausprägung dieses Verhaltens.

Zur Berechnung von Stoffmengen bzw. Vorräten ist das RG_{FE} geeigneter als LD_{FE} , da die Berechnung direkt und ohne Kenntnis des Skelettgehalts (V_{Skel}/V_{GP} in %) erfolgt. Für eine bestimmte Bodentiefe h

¹ Feinerde: Bodenpartikel < 2 mm

(in cm) berechnet sich die Menge des Stoffes x (M_x in g m^{-2}) aus der entsprechenden Konzentration c_x (g kg^{-1}) wie folgt:

$$M_x = 10 \cdot c_x \cdot RG_{FE} \cdot h = 10 \cdot c_x \cdot LD_{FE} \cdot h \cdot \left(1 - \frac{\text{Skelett}}{100}\right) \quad (2)$$

Zudem zeigten die Analysen von Schwab & Gubler (2016), dass das RG_{FE} relativ zuverlässig aus Humaxproben mit 5 cm Durchmesser bestimmt werden kann, nicht jedoch die LD_{FE} und der Skelettgehalt. Die in diesem Bericht untersuchten Schrumpfungs- und Quellprozesse wirken sich hingegen in erster Linie auf die LD_{FE} aus.

Pedotransferfunktionen zur Schätzung der LD_{FE} sind unter anderem für schwedisches Agrarland (Kätterer et al., 2006), brasilianische Böden (Benites et al., 2007) und Agrar-, Wald- und Wüstenböden in Indien (Kaur et al., 2002) beschrieben worden. Diese benötigen dazu unterschiedliche Prädiktoren wie Textur, organischer Kohlenstoffgehalt, pH, und die Summe der basischen Kationen.

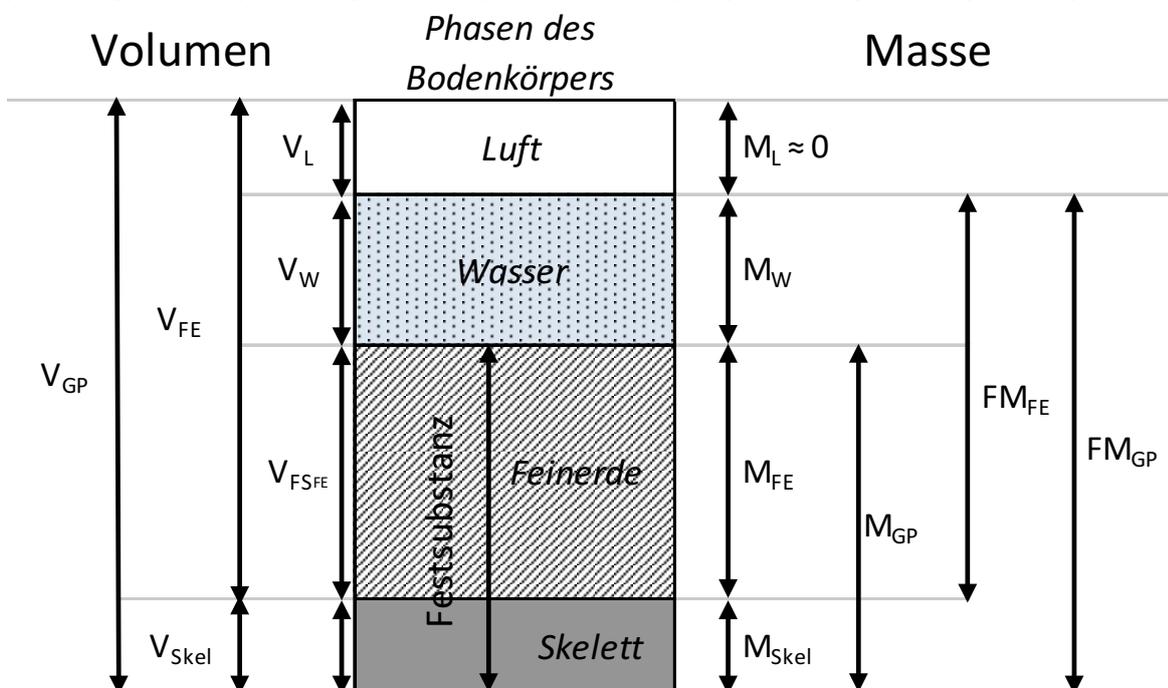


Abbildung 1: Definition der Massen und Volumina der Bodenphasen bzw. -proben (überarbeitet aus Hillel 2003).

2. Methoden

2.1 Daten

Von 2003 bis 2015 wurden an 102 Standorten des NABO-Referenzmessnetzes in insgesamt 406 Erhebungen 1'925 Humaxproben (Volumenproben 0-20 cm) entnommen und die physikalischen Begleitparameter bestimmt.

Die methodischen Abklärungen von Schwab & Gubler (2016) zeigten, dass aus den Humax-Proben generell zu tiefe Skelettgehalte und somit fehlerhafte LD_{FE} resultieren. Im Mittel wurden rund 50 % des Skelettes erfasst. Daher wurde jeweils ein standortspezifischer Skelettgehalt 0-20 cm festgelegt (und als konstant über die Zeit betrachtet). Für 29 Standorte lagen aus der Studie von Schwab & Gubler (2016) verlässliche Skelettgehalte bestimmt an grossen Volumenproben (ca. 8-10 l) vor. Für die übrigen Standorte wurden die Skelettgehalte aus den Humaxproben verwendet und um die erwartete Unterschätzung korrigiert.

LD_{FE} wurde aus dem RG_{FE} (gemessen an der jeweiligen Humaxprobe) und dem standortspezifischen Skelettgehalt berechnet unter Verwendung der Formel 1.

Die weiteren Bodeneigenschaften wurden nicht direkt an den Humaxproben, sondern an Flächenmischproben aus derselben Tiefe bestimmt (Gubler et al. 2015). Für den pH ($CaCl_2$) und den Gehalt an organischem Kohlenstoff (OC) lagen Mittelwerte pro Erhebung und Standort vor (bestimmt aus jeweils vier Replikaten). Die Bestimmung von OC erfolgte mittels Elementaranalyse (CN-Analyser) und, wo nötig, Subtraktion von anorganischem Kohlenstoff (vgl. Gubler et al. 2018). Die Körnung lag in der Regel nur aus der ersten Erhebung vor und wurde deshalb als konstante Standorteigenschaft (über den analysierten Zeitraum) betrachtet.

Weiter war die Nutzung der beprobten Standorte bekannt, ebenso ob Bodenbearbeitung (Pflügen, etc.) stattfand. Des Weiteren war dokumentiert, bei welchen Probenahmen der Bodenzustand gestört war aufgrund einer kürzlich erfolgten Bodenbearbeitung. In solchen Fällen ist der Boden meistens sehr locker und die gemessenen physikalischen Parameter haben wenig Aussagekraft.

Für die Datenanalyse wurden aus dem Gesamtdatensatz folgende Beobachtungen ausgeschlossen (siehe Anhang 6.1., Tabelle 6):

- Unvollständige Beobachtungen (fehlende OC-Gehalte)
- Beobachtungen mit unplausiblen Körnungswerten
- Organische Böden/Moore
- Proben mit gestörtem Bodenzustand (frisch bearbeitet)

Daraus resultierte ein erster Datensatz (DS1) mit vollständigen und plausiblen Beobachtungen. Für die hier gezeigten Auswertungen wurden zusätzlich Beobachtungen von Waldstandorten entfernt. Erste Analysen zeigten, dass sich diese bezüglich der physikalischen Parameter deutlich von den übrigen Landnutzungen unterscheiden und separat ausgewertet werden müssen. Des Weiteren wurde während der Datenanalyse 14 auffällige Werte (Ausreisser) entfernt (Ausreisser wurden visuell aufgrund von Residuenplots identifiziert). Dieser Datensatz zur Berechnung der finalen Modelle enthielt 100 Erhebungen mit Bodenbearbeitung und 123 ohne (vgl. Tabelle 2). Tabelle 4 enthält die statistischen Kenngrößen für diesen finalen Bodendatensatz.

Tabelle 1: Datensatz 1 und Reduktion des Datensatzes für die Modellbildung

Nutzung	Standorte	Erhebungen
Datensatz 1, alle Nutzungen (DS 1)	92	322
DS 1 ohne Waldstandorte	70	237
DS 1 für finales Modell (ohne Ausreisser)	69	223

Tabelle 2: Einteilung nach Bodenbearbeitung und Nutzung im Datensatz für die Modellierung. Angabe der Anzahl (n) Standorte (Stao) und Erhebungen (Erheb).

Bodenbearbeitung			Nutzung		
	n Stao	n Erheb		n Stao	n Erheb
mit	34	100	Ackerbau	31	92
			Gemüsebau	3	8
ohne	35	123	Grasland, intensiv	6	32
			Grasland, wenig intensiv	9	41
			Grasland, extensiv	10	25
			Obstbau	3	7
			Rebbau	3	7
			Schutzstandort	2	6
			Stadtpark	2	5
Total	69	223	Total	69	223

2.2 Datenanalyse

Mit dem Programm STATISTICA 13.1 wurde mit multiplen linearen Regressionen ein passendes Modell zur Schätzung von LD_{FE} und RG_{FE} gesucht durch schrittweise Vorwärts- und Rückwärtsselektion aus den möglichen erklärenden Variablen. Im Weiteren wurden Modelle gesamthaft oder getrennt nach dem Kriterium mit vs. ohne Bodenbearbeitung bzw. nach Nutzung (Acker, Grasland, Spezialkulturen) berechnet und verglichen.

Die potentiellen erklärenden Variablen gemäss Tabelle 3 wurden zunächst einer explorativen Analyse unterzogen. Hierbei wurden mögliche Datentransformationen getestet. Die Korrelation zwischen den originalen bzw. transformierten Daten und der Zielgrösse wurde sowohl grafisch als auch rechnerisch untersucht (vgl. Anhang 6.2). Die verwendeten Transformationen sind in Tabelle 3 beschrieben.

Tabelle 3: Potentielle erklärende Variablen und gewählte Transformationen.

Parameter	Erklärende Variable	Transformation bzw. Begründung
Organischer Kohlenstoffgehalt (OC)	$\log_{10}OC$	rechtsschiefe Verteilung
pH (CaCl ₂)	pH	keine Transformation, logarithmische Grösse
Textur (Ton-, Schluff- und Sandgehalt, bezogen auf die mineralische Feinerde)	$Ton^{0.5}$	Quadratwurzel, empfohlen bei %-Zahlen
	$Schluff^{0.5}$	
	$Sand^{0.5}$	
Gravimetrischer Wassergehalt (WG_{FE}), bezogen auf Trockensubstanz Feinerde	$WG_{FE}^{0.5}$	
Interaktionen WG_{FE} mit OC bzw. WG_{FE} mit Ton	$WG_{FE}^{0.5} * \log_{10}OC$	Faktoren für Quellen und Schrumpfen
	$WG_{FE}^{0.5} * Ton^{0.5}$	
Nutzungsklassen Ackerbau, Grasland (Dauerwiesen), Spezialkulturen, andere	Nutzung	faktorielle Grösse
Nutzung mit vs. ohne Bodenbearbeitung	Bodenbearbeitung	faktorielle Grösse

Für Beurteilung und Vergleich der Modelle wurde das Bestimmtheitsmass „ R^2_{adj} “ (R^2 angepasst) verwendet. Dieses ermöglicht eine bessere Vergleichbarkeit bei einer unterschiedlichen Anzahl erklärender Variablen, indem eine höhere Anzahl erklärende Variable bestraft wird.

$$R^2_{adj} = 1 - (1 - R^2) \frac{n-1}{n-p-1} \quad (3)$$

Dabei ist p die Gesamtzahl der erklärenden Variablen im Modell und n die Stichprobengrösse.

Von den Residuen wurde zusätzlich der RMSE (root-mean-squared error, Wurzel des durchschnittlichen quadrierten Fehlers) gemäss Formel 4 berechnet. Dieser Wert gibt an, wie viel die Schätzung im Durchschnitt von der Messung abweicht. Dabei ist y_i der gemessene Wert der i -ten Beobachtung und \hat{y}_i dessen Schätzung mit dem Modell (und deshalb $\hat{y}_i - y_i$ das entsprechende Residuum).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (4)$$

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1 Verteilung der erklärenden und abhängigen Variablen

Die Verteilung der erklärenden und abhängigen Variablen des Datensatzes, der den anschliessend aufgeführten Modellen zu Grunde liegt, ist in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Deskriptive Statistik der Bodenparameter (erklärende und abhängige Variablen) des Datensatzes DS 1 für Modell (n=223 Erhebungen von 69 Standorten)

erklärende Variablen	Verteilung					Mittelwert und Streuung	
	Min	Q25	Med	Q75	Max	Mw	Stdw
Ton (% g/g)	5.5	16.0	22.0	28.0	59.0	23.3	10.5
Schluff (% g/g)	14.0	32.5	36.8	44.6	73.1	37.7	10.5
Sand (% g/g)	7.8	31.0	40.0	48.0	80.0	39.0	15.5
pH	3.9	5.2	5.7	6.5	7.5	5.8	0.9
OC (% g/g)	1.12	2.05	3.07	4.30	16.08	3.34	1.69
WG_{FE} (% g/g)	14.4	30.0	37.4	46.9	91.5	40.2	13.8
Skel (% cm ³ /cm ³)	0.0	0.8	5.0	10.0	25.5	5.4	5.1

abhängige Variablen	Verteilung					Mittelwert und Streuung	
	Min	Q25	Med	Q75	Max	Mw	Stdw
RG_{FE} Probe (g/cm ³)	0.55	0.89	1.04	1.17	1.44	1.03	0.19
LD_{FE}* (g/cm ³)	0.61	0.95	1.10	1.21	1.47	1.09	0.18

* berechnet aus RG_{FE}-Probe und Skel gemäss Formel 1

Die gemessenen Werte für LD und RG der Standorte mit Bodenbearbeitung sind deutlich höher im Vergleich zu jenen ohne Bodenbearbeitung (Abbildung 2). Dies entspricht unseren Erwartungen, da sich die Standortgruppen neben einer unterschiedlichen physikalischen Beanspruchung meist auch bezüglich ihrer Bodeneigenschaften deutlich unterscheiden.

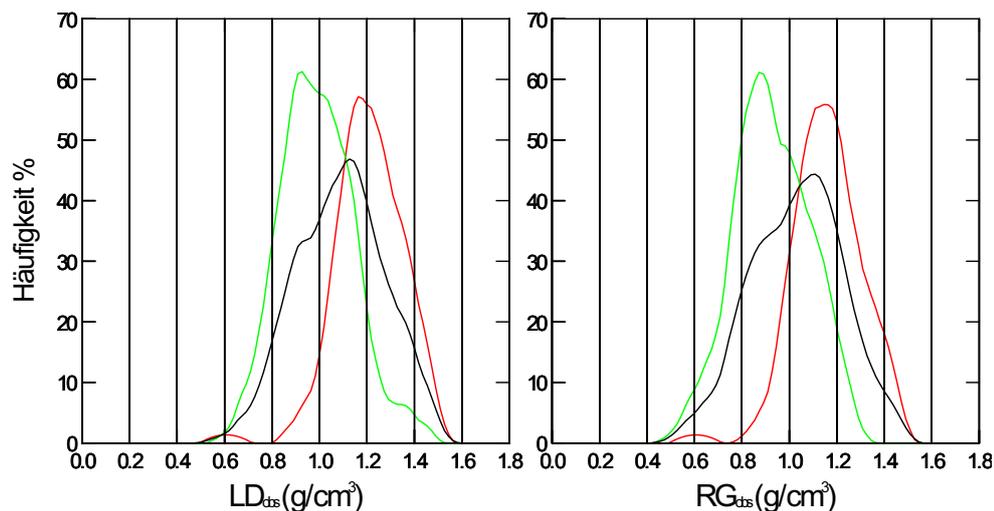


Abbildung 2: Dichtefunktion der beobachteten Werte für Lagerdichtede LD_{obs} und Raumgewicht RG_{obs} für alle Daten (schwarz), für Standorte mit Bodenbearbeitung (rot) und Standorte ohne Bodenbearbeitung (grün).

Bezüglich der Gehalte von OC und WG_{FE} sowie den pH-Werten beobachtet man deutliche Unterschiede zwischen Standorten mit bzw. ohne Bodenbearbeitung (Abbildung 3). Tiefe pH-Werte findet man hauptsächlich an Standorten ohne Bodenbearbeitung. Diese Standorte haben auch tendenziell höhere OC-Gehalte und WG_{FE} , ebenso leichte höhere Tongehalte. Diese Befunde widerspiegeln wohl vor allem den Zusammenhang zwischen Standort-/Bodeneigenschaften und Landnutzung. Graslandstandorte (welche keine Bodenbearbeitung erfahren) findet man häufig an Orten, die für intensivere Nutzungen ungeeignet sind, wie beispielsweise auf schweren oder vernässten Böden, an höheren Lagen oder auf skelettreichen Böden.

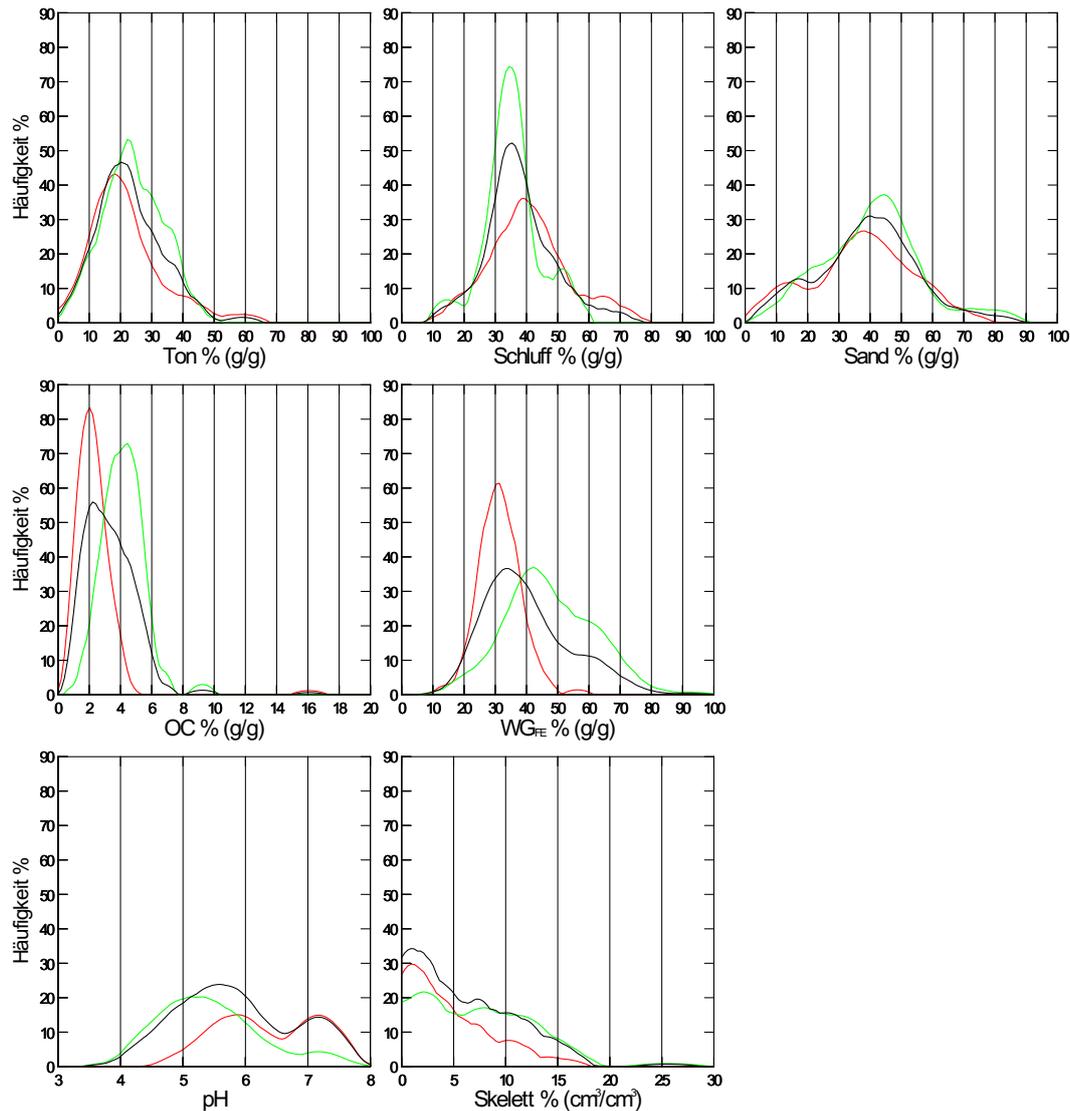


Abbildung 3: Dichtefunktion der beobachteten Werte der erklärenden Variablen für alle Daten (schwarz), für Standorte mit Bodenbearbeitung (rot) und Standorte ohne Bodenbearbeitung (grün).

3.2 Schätzung der Lagerungsdichte LD_{FE}

Für die Schätzung der Lagerungsdichte LD_{mod} erwies sich das Model gemäss Formel 5 am geeignetsten. Es stützt sich auf die Gehalte an OC und Ton sowie deren Interaktionen mit WG_{FE} .

$$LD_{mod} = a + b \log_{10} OC + c \sqrt{Ton} + d \sqrt{WG_{FE}} \log_{10} OC + e \sqrt{WG_{FE} Ton} \quad (5)$$

$$a = 1.207; b = -0.997; c = 0.173; d = 0.0735; e = -0.0231$$

$$R_{adj}^2 = 0.846; RMSE = 0.0707$$

In Abbildung 4 werden die mit Formel 5 geschätzten Werte den an Bodenproben bestimmten Werten gegenübergestellt. Hierbei sind Standorte **ohne** und **mit** Bodenbearbeitung unterschiedlich eingefärbt. Dabei ist ersichtlich:

- Die LD ist an Standorten mit Bodenbearbeitung mehrheitlich höher und liegt generell über 0.9 g/cm^3 (abgesehen von einer Ausnahme).
- Alle Punkte, sowohl Standorte mit als auch ohne Bodenbearbeitung, liegen entlang der 1:1 Geraden. Daraus kann geschlossen werden, dass Formel 5 für Standorte mit und ohne Bodenbearbeitung gemeinsam angewendet werden kann. Eine kategorielle Variable Bodenbearbeitung (mit vs. ohne Bodenbearbeitung) bringt keine signifikante Verbesserung des Modells.

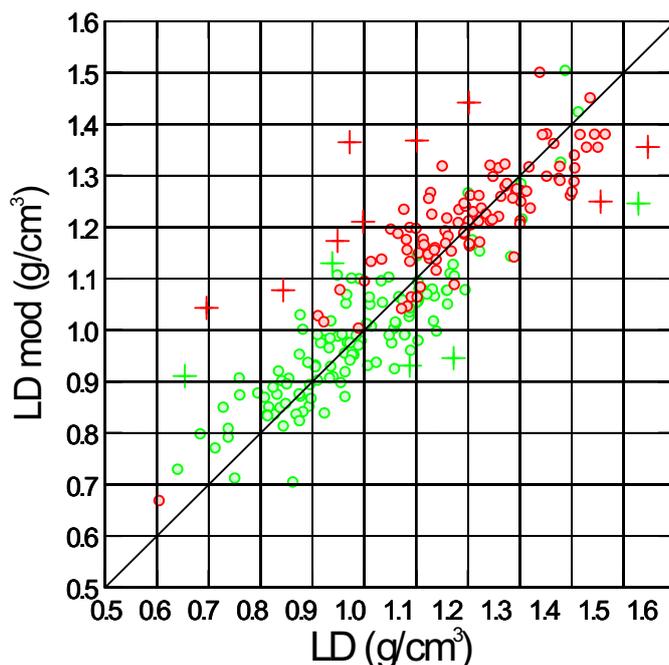


Abbildung 4: Lagerungsdichte geschätzt gemäss Formel 5 (LD_{mod}) versus bestimmte Lagerungsdichte (LD) der Standorte mit Bodenbearbeitung (rot) und ohne Bodenbearbeitung (grün). Symbole: Daten, die für die Modellbildung verwendet worden sind, sind als Kreis, Ausreisser als Kreuz dargestellt.

Die Plots in Abbildung 5 zeigen, dass die Residuen weder abhängig von der Höhe der LD sind, noch von der Klassierung des Standortes nach dem Kriterium mit vs. ohne Bodenbearbeitung. Die Verteilung der Residuen ist bei Standorten mit und ohne Bodenbearbeitung vergleichbar.

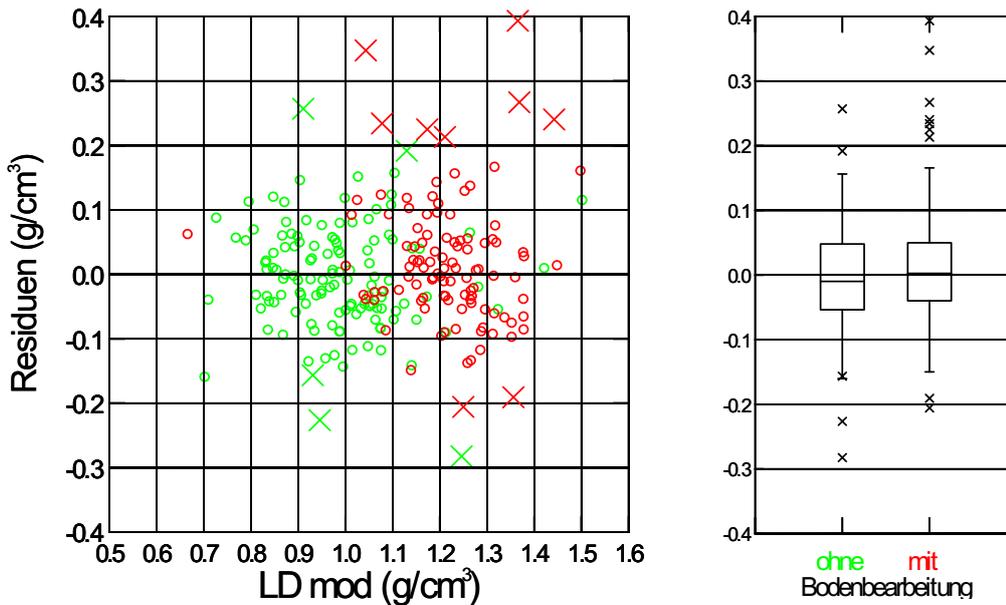


Abbildung 5: Residuen des Modelles gemäss Formel 5. Links: Residuen vs. geschätzte Lagerungsdichte (LD mod). Rechts: Boxplot der Residuen vs. Faktor mit/ohne Bodenbearbeitung. Kreise stellen die Beobachtungen des Kalibrationsdatensatzes dar, Ausreisser (welche nicht zur Modellbildung verwendet wurden) sind als Kreuz dargestellt. Standorte mit Bodenbearbeitung sind rot, solche ohne Bodenbearbeitung grün dargestellt.

In Abbildung 6 sind die Residuen nach Standorten dargestellt. Diese Darstellung zeigt, dass die Residuen innerhalb des gleichen Standortes z. T. sehr stark streuen. Eine Prüfung der Gründe für die grössten Abweichungen ergab, dass bei den Ausreissern das gemessene RG_{FE} bzw. das daraus abgeleitete LD_{FE} stark von den übrigen Werten des Standortes abweichen. Diese auffälligen Abweichungen kommen bei Standorten mit Bodenbearbeitung viel häufiger vor. Die Ursachen können in bewirtschaftungsbedingten Einflüssen (Verdichtung, Lockerung durch Bodenbearbeitung) oder in der Beeinflussung des Bodenzustandes der Ackerkrume durch vorangegangene Witterung (Trockenheit, Bodenfeuchte, Frostgare) vermutet werden. Oder mit anderen Worten: wegen äusserer Faktoren entspricht der Bodenzustand nicht dem „natürlichen“ Zustand, der aufgrund der übrigen Bodenparameter erwartet würde.

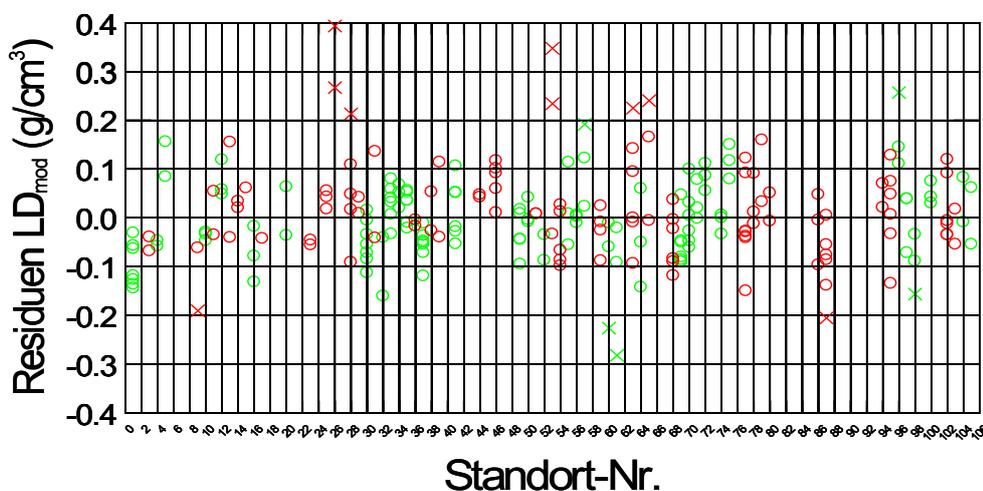


Abbildung 6: Residuen des Modelles LD mod nach Standort, Standorte mit Bodenbearbeitung (rot) und ohne Bodenbearbeitung (grün), Symbol für Ausreisser = Kreuz.

3.3 Schätzung des Raumgewichtes RG_{FE}

Die Parameter RG_{FE} und LD_{FE} hängen gemäss Formel 1 voneinander ab. Bei bekanntem (oder geschätztem) Skelettgehalt lässt sich daher die Schätzung des Raumgewichtes $RG_{FE, mod}$ mit Formel 6 aus LD_{mod} berechnen.

$$RG_{FE\ mod} = \left(1 - \frac{Skelett}{100}\right) * LD\ mod \quad (6)$$

$$RMSE = 0.0662$$

Das Modell hat für den Kalibrationsdatensatz einen RMSE von $0.0662\ g/cm^3$. Werden auch die Werte der 14 Ausreisser berücksichtigt, erhöht sich der RMSE auf $0.0846\ g/cm^3$. Der tiefere RMSE für $RG_{FE, mod}$ im Vergleich zu LD_{mod} resultiert, weil RG_{FE} im Durchschnitt tiefer ist als LD_{FE} . (Aufgrund seiner Definition gilt in jedem Fall $RG_{FE} \leq LD_{FE}$, vgl. auch Formel 1.) Die Streuung in Abbildung 7 ist vergleichbar mit jener des Modelles für LD (Abbildung 4).

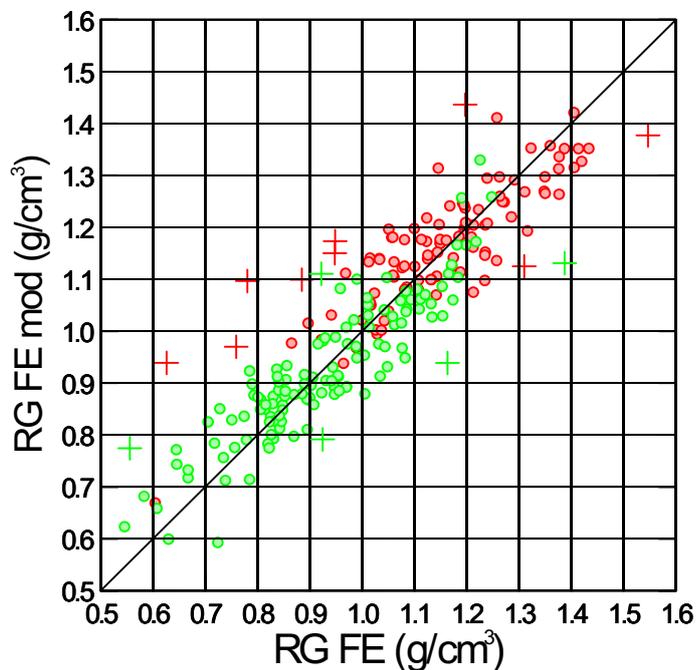


Abbildung 7: Raumgewicht geschätzt gemäss Formeln 5 und 6 versus gemessenes Raumgewicht (RG_{FE}) der Standorte mit Bodenbearbeitung (rot) und ohne Bodenbearbeitung (grün). Symbole: Daten, die für die Modellbildung verwendet worden sind als Kreis, jene der Ausreisser als Kreuz dargestellt.

3.4 Vereinfachte Schätzung der LD_{FE} ohne Wassergehalt

Da der WG_{FE} in der Praxis häufig nicht bekannt ist, wurde zusätzlich nach einem Modell gesucht, das ohne diesen Parameter auskommt. Für die Schätzung der Lagerungsdichte LD_{mod} bei unbekanntem WG_{FE} erwies sich das Modell gemäss Formel 7 am geeignetsten. Es stützt sich, wie die obigen Modelle, auf die Gehalte an OC und Ton sowie zusätzlich auf den Sandgehalt.

Wie zu erwarten weichen die mit Formel 7 geschätzten Werte stärker von den an Bodenproben bestimmten LD_{FE} ab als jene aus Formel 5. Dies zeigt sich einerseits in Abbildung 8, wo die Beobachtungen stärker von der 1:1-Geraden abweichen als in Abbildung 4. Andererseits ist der RMSE um 0.015 g/cm^3 grösser und beträgt 0.086 g/cm^3 .

$$LD_{mod} = a + b \log_{10} OC + c \sqrt{\text{Ton}} + d \sqrt{\text{Sand}} \quad (7)$$

$$a = 1.134; b = -0.852; c = 0.0454; d = 0.0216$$

$$R_{adj}^2 = 0.776; RMSE = 0.0862$$

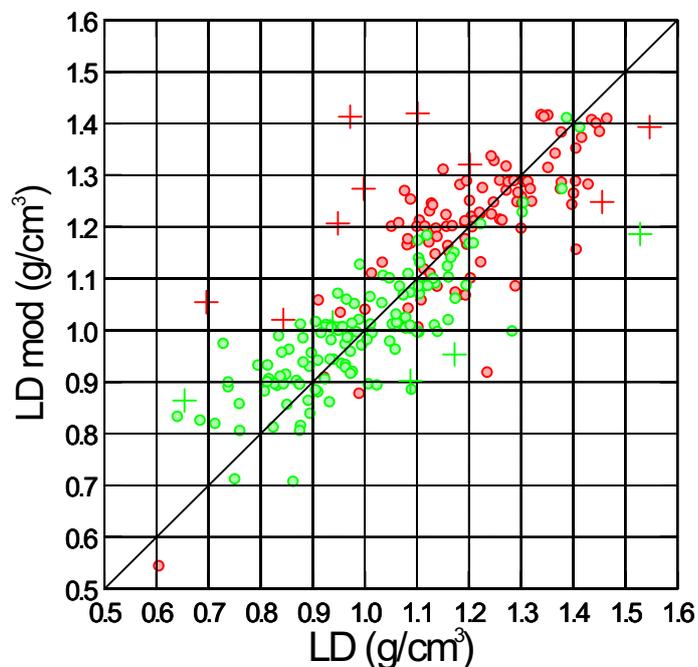


Abbildung 8: Lagerungsdichte geschätzt gemäss Formel 7 (LD_{mod}) versus an Bodenproben bestimmte Lagerungsdichte (LD) der Standorte mit Bodenbearbeitung (rot) und ohne Bodenbearbeitung (grün). Symbole: Daten, die für die Modellbildung verwendet worden sind als Kreis, jene der Ausreisser als Kreuz dargestellt.

Mit der fehlenden Variable WG_{FE} kann dieses Modell den Prozess des Quellens und Schrumpfens als Folge von WG -Änderungen und deren Auswirkungen auf die LD_{FE} nicht berücksichtigen. Dass Änderungen des WG_{FE} tatsächlich einen grossen Einfluss auf die LD_{FE} haben zeigt sich deutlich anhand der wiederholten Beprobungen der einzelnen Standorte. In Abbildung 9 wird der Zusammenhang zwischen WG_{FE} und der LD_{FE} am Beispiel sechs zufällig ausgewählter NABObio-Standorte deutlich. Währendem der deutliche lineare Zusammen zwischen den Standorten auch durch weitere Parameter erklärt werden kann (wie OC, der sowohl LD als auch WG beeinflusst), dürften die Unterschiede zwischen den Erhebungen der einzelnen Standorte hauptsächlich durch Veränderungen des WG_{FE} entstehen.

In Abbildung 10 sind die Residuen der Schätzungen mit Formel 7 in Abhängigkeit des WG_{FE} dargestellt. Betrachtet man die Residuen aller Standorte (Abbildung links), so lässt sich ein leichter Trend erkennen, wobei das Modell die LD_{FE} bei hohem WG_{FE} eher überschätzt und umgekehrt eher unterschätzt bei tiefem WG_{FE} . Wenn der Zusammenhang bei einzelnen Standorten betrachtet wird (siehe Grafik rechts), kann bei den drei Graslandstandorten eine leichte Abhängigkeit der Residuen mit dem WG_{FE} erkannt werden. Im Gegensatz dazu ist für die drei ausgewählten Ackerstandorte ein Zusammenhang meist nicht erkennbar.

Es gilt zu beachten, dass andere Modellvariablen ebenfalls vom WG_{FE} abhängen. Insbesondere der Gehalt an OC reagiert auf Schwankungen von WG_{FE} . Dies liegt vor allem an der fixen Beprobungstiefe - der entsprechende Mechanismus wurde im Bericht von Gubler et al. (2016) erläutert. Dadurch fließen Informationen zum Bodenwasserstatus indirekt in das Modell ein, ohne dass WG_{FE} explizit verwendet wird. Weiter dürfte sich der Fehler auch in Grenzen halten, da die Probenahmen üblicherweise innerhalb eines beschränkten WG_{FE} -Bereiches stattfinden. Zu trockene oder zu feuchte Bodenbedingungen werden vermieden.

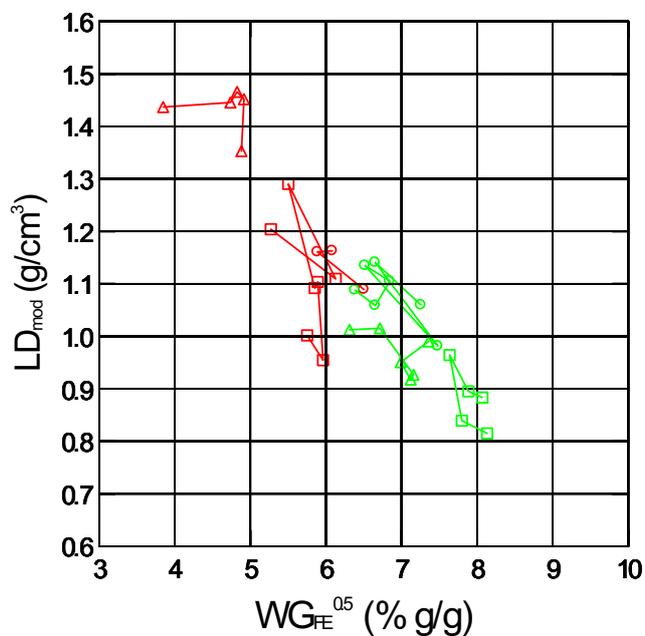


Abbildung 9: Lagerungsdichte bestimmt an Bodenproben (LD_{obs}) in Abhängigkeit (der Wurzel) des gravimetrischen Wassergehaltes ($WG_{FE}^{0.5}$, % g/g) für sechs ausgewählte NABObio-Standorte, wiederholte Beprobungen desselben Standortes sind durch Linien verbunden.

Ackerstandorte (rot): 25 SM (Kreis), 54 ZUZ (Dreieck), 77 PAS (Viereck);
Graslandstandorte (grün): 1 TAE (Kreis), 35 CP (Dreieck), 49 US (Viereck).

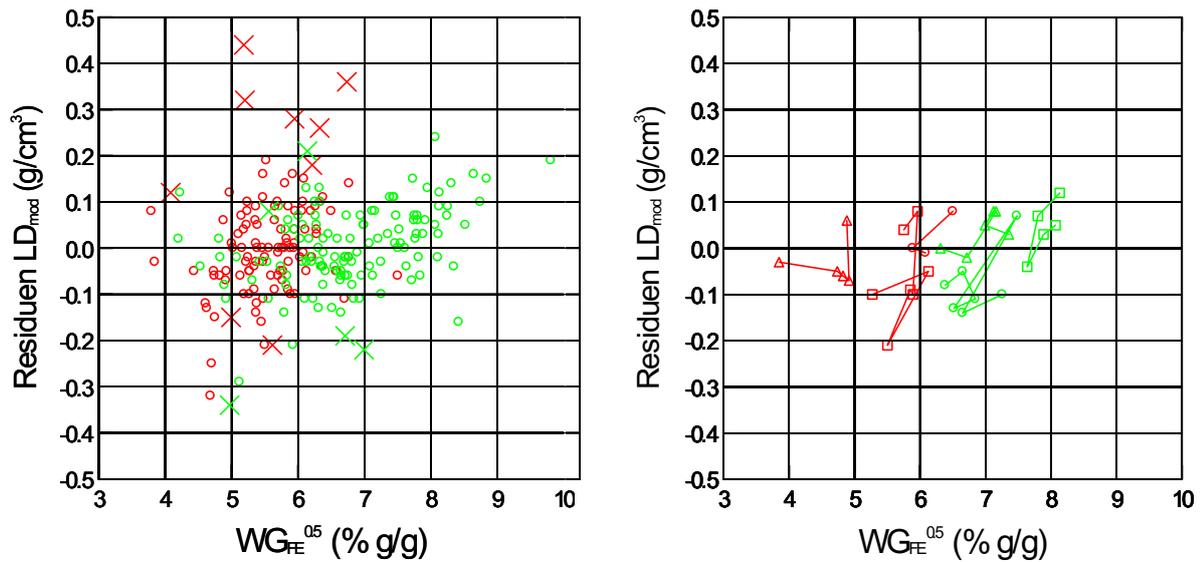


Abbildung 10: Residuen der Schätzungen mit Modell nach Formel 7 ohne Wassergehalt (LD_{mod}) in Abhängigkeit (der Quadratwurzel) des Wassergehaltes ($WG_{FE}^{0.5}$, gemessen an Bodenproben).

Links: Alle Beobachtungen für Standorte mit Bodenbearbeitung (rot) und ohne Bodenbearbeitung (grün). Symbole: Daten, die für die Modellbildung verwendet worden sind als Kreis, jene der Ausreisser als Kreuz dargestellt.

Rechts: Analoge Darstellung für sechs ausgewählte NABObio-Standorte, wiederholte Beprobungen desselben Standortes sind durch Linien verbunden.

Ackerstandorte (rot): 25 SM (Kreis), 54 ZUZ (Dreieck), 77 PAS (Viereck)

Graslandstandorte (grün): 1 TAE (Kreis), 35 CP (Dreieck), 49 US (Viereck)

3.5 Vereinfachte Schätzung des RG_{FE} ohne Wassergehalt

Auch mit dem Modell gemäss Formel 7 lässt sich RG_{FE} schätzen, indem man LD_{mod} mithilfe des Skelettgehalts und Formel 6 umrechnet. Wie schon für die Schätzung in Kapitel 3.3, ist auch für das Modell ohne WG_{FE} die Streuung für RG_{FE} und LD_{FE} vergleichbar. Der RMSE beträgt 0.081. Die Genauigkeit der Schätzung $RG_{FE, mod}$ hängt stark von der Genauigkeit der Bestimmung bzw. Schätzung des Skelettgehaltes ab.

$$RG_{FE\ mod} = \left(1 - \frac{Skelett}{100}\right) * LD\ mod \quad (6)$$

$$RMSE = 0.0813$$

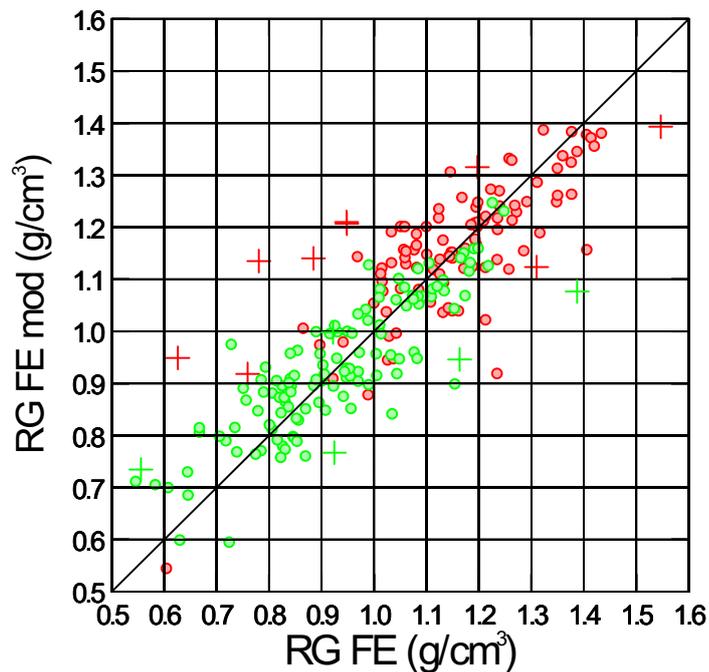


Abbildung 11: Raumgewicht geschätzt gemäss Formeln 7 und 6 ($RG_{FE\ mod}$) versus an Bodenproben bestimmtes Raumgewicht (RG_{FE}) der Standorte mit Bodenbearbeitung (rot) und ohne Bodenbearbeitung (grün), Symbole: Daten, die für die Modellbildung verwendet worden sind als Kreis, jene der Ausreisser als Kreuz dargestellt.

4. Schlussfolgerungen und Ausblick

4.1 Aussagesicherheit der Pedotransferfunktionen

Im vorhergehenden Kapitel wurden Modelle berechnet für RG_{FE} und LD_{FE} , in 0-20 cm Tiefe sowohl mit als auch ohne Kenntnis von WG_{FE} . Diese Modelle können als Pedotransferfunktionen (PTF) für landwirtschaftlich genutzte Standorte verwendet werden. Die hier gezeigten Modelle können für Böden mit und ohne Bodenbearbeitung gemeinsam verwendet werden. Für Waldböden ist ein angepasstes Modell nötig (vgl. Anhang 6.3). Die Unsicherheiten für die Schätzungen sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Schätzung bei bekanntem Wassergehalt (Formeln 5 und 6):

LD_{FE} und RG_{FE} können mit dem vorgeschlagenen Modell mit einem mittleren Fehler von rund 0.07 g/cm^3 geschätzt werden. Bei einer mittleren Dichte von 1.0 g/cm^3 entspricht dies einer mittleren relativen Abweichung von 7 %. Grössere Abweichungen erwarten wir für Böden, welche durch äussere Einflüsse beeinträchtigt wurden, beispielsweise wenn sie durch flächendeckende Befahrung bzw. Bodenbearbeitung verdichtet oder gelockert wurden. Wir gehen davon aus, dass sich die beobachteten Ausreisser (und der dadurch verursachte höhere RMSE) damit erklären lassen.

Schätzung bei unbekanntem Wassergehalt (Formeln 7 und 8):

Ist der WG_{FE} nicht bekannt, verschlechtert sich die Aussagesicherheit für LD_{FE} und RG_{FE} um ca. 1.5 %. Dieses Modell kann den Quellungs- bzw. Schrumpfungszustand des Bodens nicht direkt berücksichtigen. Explorative Analysen zeigten, dass der WG_{FE} wohl der wichtigste Faktor ist, um Schwankungen von LD_{FE} und RG_{FE} an den einzelnen Standorten zu erklären. Deshalb erstaunt es, dass sich die Schätzungen ohne WG_{FE} nur relativ wenig verschlechtern im Vergleich zum ersten Modell. Dies dürfte daran liegen, dass Informationen zum WG_{FE} indirekt einfließen über den OC-Gehalt, welcher mit dem WG_{FE} korreliert.

Tabelle 5: Unsicherheit (root mean squared error; RMSE) für die Schätzungen der Lagerungsdichte (LD_{FE}) und des Raumgewichtes (RG_{FE}) bei bekanntem bzw. unbekanntem Wassergehalt.

	Wassergehalt	LD_{FE}		RG_{FE}	
		bekannt	unbekannt	bekannt	unbekannt
RMSE (g/cm^3)	ohne Ausreisser (n = 223)	0.071	0.086	0.066	0.081
	mit Ausreisser n = 237	0.092	0.104	0.085	0.097

4.2 Weitere Verbesserungen der Schätzungen

Unsicherheit Skelettgehalt:

Gemäss den Erfahrungen der NABO ist der Skelettgehalt ein grosser Unsicherheitsfaktor für die Schätzung des RG_{FE} mit den obigen PTF. Der Skelettgehalt wird selten gemessen und bei Schätzwerten können die Fehler oft erheblich sein. Um zuverlässigere Aussagen zum RG_{FE} und somit den Vorräten eines Stoffes im Boden zu haben, sollte der Skelettgehalt bestimmt werden. Für eine zuverlässige Skelettbestimmung sind jedoch grosse Bodenproben (ca. 8-10 l) notwendig, was folglich aufwändig ist (vgl. Schwab & Gubler 2016).

Schätzungen mithilfe von Klimadaten:

Wie oben erläutert (vgl. Tabelle 5) sind die Schätzungen ungenauer, wenn der WG_{FE} für den Zeitpunkt der Probenahme nicht bekannt ist. Daher soll geprüft werden, ob mithilfe von Klimadaten die Schätzungen für diese Fälle verbessert werden kann. Im Gegensatz zu WG_{FE} sind Klimadaten für die letzten Jahrzehnte bekannt. So existieren von Meteo Schweiz beispielsweise gegitterte Klimadaten mit einer räumlichen Auflösung von 2 km x 2 km mit den täglichen Niederschlagsmengen und Durchschnittstemperaturen. Sind Ort und Datum der Probenahme bekannt, so kann auch das Wetter in den Tagen und Wochen davor eruiert werden. Da der Bodenzustand vom Wetter abhängt, erhoffen wir uns aufgrund der Klimadaten zuverlässigere Schätzungen.

Schätzungen für Waldböden:

Die hergeleiteten PTF gelten nicht für Waldstandorte. Dies zeigen die Darstellungen in [Abbildung 13](#) in Anhang 6.3 deutlich. Für Waldböden sollen separate Modelle hergeleitet werden. Dabei ist zu prüfen, ob bei obigen Modellen lediglich die Koeffizienten angepasst werden müssen, oder ob besser andere Parameter einfließen sollen.

5. Literatur

- Benittes M., Machado P., Fidalgo E., Coelho M., Madari B. (2007): Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brasil. *Geoderma* 139 (207) 90-97
- Gubler A., Schwab P., Wächter D., Meuli R., Keller A. (2015): Ergebnisse der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) 1985-2009. Zustand und Veränderungen der anorganischen Schadstoffe und Bodenbegleitparameter. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1507: 81 S. www.bafu.admin.ch/uz-1507-d
- Gubler A., Schwab P., Wächter D., Meuli R., Keller A. (2016): Influence of soil water status on collected soil samples. *Agroscience*, 34, 2016 1-16. www.agroscope.ch/science
- Gubler A., Wächter D., Schwab P. (2018): Homogenisierung von Bodenkohlenstoff-Daten: Harmonisierung der Resultate aus Nassoxydation (FAL-Methode) und Trockenveraschung. *Agroscience*, 62, 2018 1-9. www.agroscope.ch/science
- Hillel D (2003) *Introduction to Environmental Soil Physics*. Academic Press, Burlington.
- Kaur R., Kumar S., Gurung H.P. (2002): A pedo-transfer function (PTF) for estimating soil bulk density from basic soil data and its comparison with existing PTFs. *Australian Journal of Soil Research*, 2002, Vol. 40. 847-857
- Kätterer T., Andrén O., Jansson P-E. (2006): Pedotransfer functions for estimating plant available water and bulk density in Swedish agricultural soils. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B -Soil and Plant Science*, 2006: 263-276; Link <http://dx.doi.org/10.1080/09064710500310170>
- Schwab P. und Gubler A. (2016): Methoden zur Bestimmung physikalischer Begleitparameter an Bodenproben. *Agroscience*, 40, 2016, 1-34. www.agroscope.ch/science

6. Anhang

6.1 Reduktion Datensatz

Tabelle 6: Datensatz 1 und Reduktion des Datensatzes für die Modellbildung

Datensatz	Erläuterung	Standorte	Erhebungen	Erläuterung zur Datenreduktion:
Datensatz 3 RG&OC-Datensatz	Zusätzlich Daten mit OC-Gehalten und Körnung	102	368	Wegfall von 92 Erhebungen ohne OC-Bestimmung
Datensatz 2	Nur „ungestörte“ Proben (ohne frisch bearbeitete Böden)	101	354	Ausschluss von Stao 67 (organischer Boden) und *Wegfall von 14 Erhebungen deren Proben in gestörtem Bodenzustand (frisch bearbeitet) genommen worden sind.
Datensatz 1	Nur Daten mit plausiblen Körnungswerten **	92	322	**Wegfall von 9 Standorte ohne plausible Körnungswerte (Stao 2, 6, 7, 22, 48, 88, 90, 92, 106) => 32 Erhebungen weniger
Datensatz für Analyse	DS 1 ohne Waldstandorte	70	237	Waldstandorte ausgeschlossen
Datensatz für Modell	DS 1 ohne Waldstandorte und Ausreisser	69	223	Ausreisser bereinigter Datensatz. Standorte mit und ohne Bodenbearbeitung

6.2 Ergebnisse der explorativen Datenanalyse

Tabelle 7: Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen den potentiellen erklärenden Variablen und der gemessenen Lagerungsdichte (LD_{obs}) in Datensatz 1 ohne Waldstandorte – rote Korrelationskoeffizienten sind signifikant. Die grau hinterlegtem Variablen mit fetter Schrift wurden im Modell gemäss Formel 6 berücksichtigt.

	Variable	Correlations (N=237)
		LD*
Organischer Kohlenstoffgehalt OC und deren Transformation	OC	-0,771
	Wurzel(OC)	-0,814
	Log_OC	-0,819
Textur (Ton, Schluff, Sand) und deren Transformation	Ton	-0,268
	Wurzel(Ton)	-0,246
	Schluff	0,139
	Wurzel(Schluff)	0,134
	Sand	0,083
	Wurzel(Sand)	0,105
Transformation von Wassergehalt	Wurzel(WG_FE)	-0,787
	Log_WG_FE	-0,781
Interaktion von WG mit OC und Ton	Wurzel(WG_FE) * Log_OC	-0,846
	Wurzel(WG_FE)*Wurzel (Ton)	-0,579
	Log_WG_Ton	-0,390
	Log_WG_WurzelTon	-0,469
	Log_WG_LogOC	-0,843
	WurzelWG_WuzelOC	-0,839

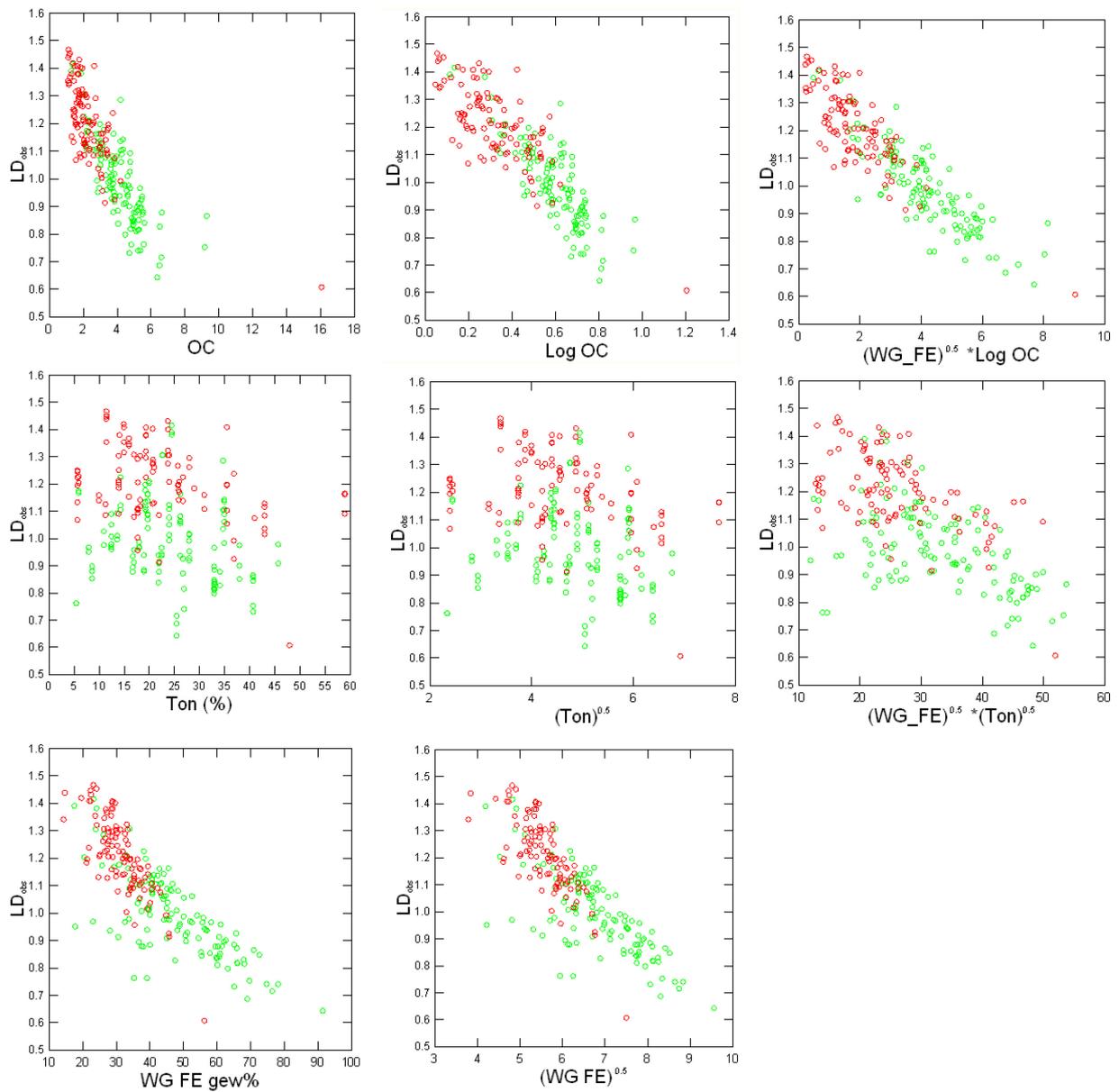


Abbildung 12: Streudiagramme für die gemessene Lagerungsdichte (LD_{obs}) in Abhängigkeit der möglichen erklärenden Variablen Gehalt an organischem Kohlenstoff (OC) bzw. $\log_{10}(OC)$, Tongehalt der Feinerde (Ton), gravimetrischer Wassergehalt der Feinerde (WG_{FE}) sowie ausgewählte Interaktionen.

6.3 Geschätzte Werte gemäss Formeln 5 und 6 für alle Standorte in Datensatz 1

Zusammenhang der vorausgesagten Werte gemäss PTF mit Wassergehalt bei Standorten mit Bodenbearbeitung (rot), ohne Bodenbearbeitung (grün) und bei Waldstandorten (blau) für alle Standorte in Datensatz 1 (DS1). Die Ergebnisse zeigen, dass die Formel 5 nicht zur Herleitung der Werte von Waldböden verwendet werden kann.

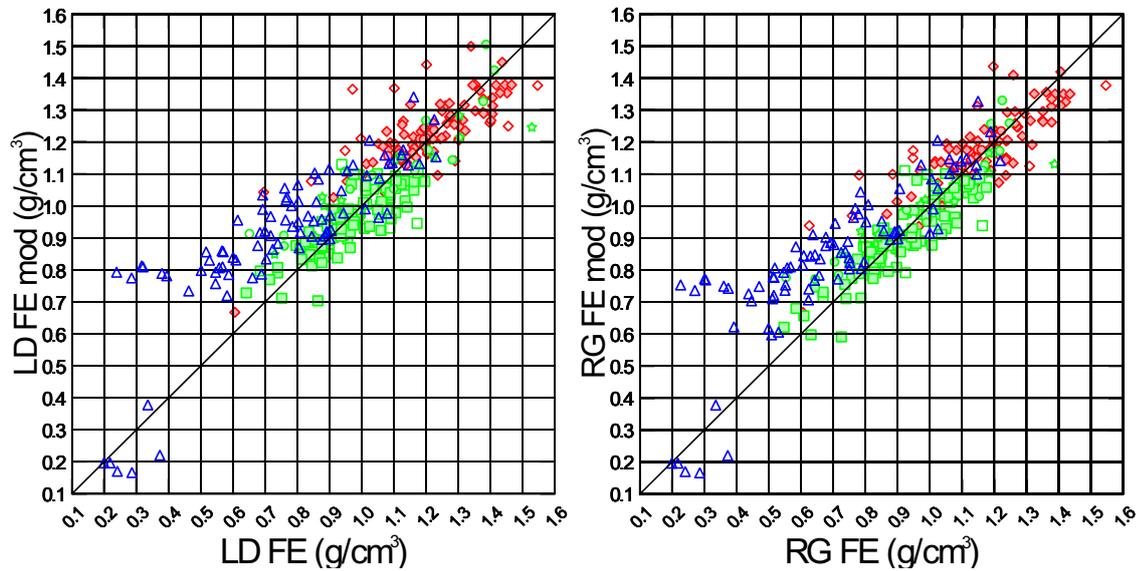


Abbildung 13: Lagerungsdichte und Raumgewicht geschätzt gemäss Formel 5 (LD FE mod) bzw. Formel 6 (RG FE mod) vs. an Bodenproben bestimmte Werte (LD FE bzw. RG FE) für alle Standorte aus Datensatz 1.

Farbgebung und Symbole (Nutzung der Standorte):

- mit Bodenbearbeitung (Acker «Rombus», Gemüsebau «Stern») rot
- ohne Bodenbearbeitung (Wiese «Quadrat», Obst und Reben «Stern» und andere «Kreis») grün
- Wald «Dreieck» blau

Die Daten, die für das Modell berücksichtigt wurden, haben ausgefüllte Symbole