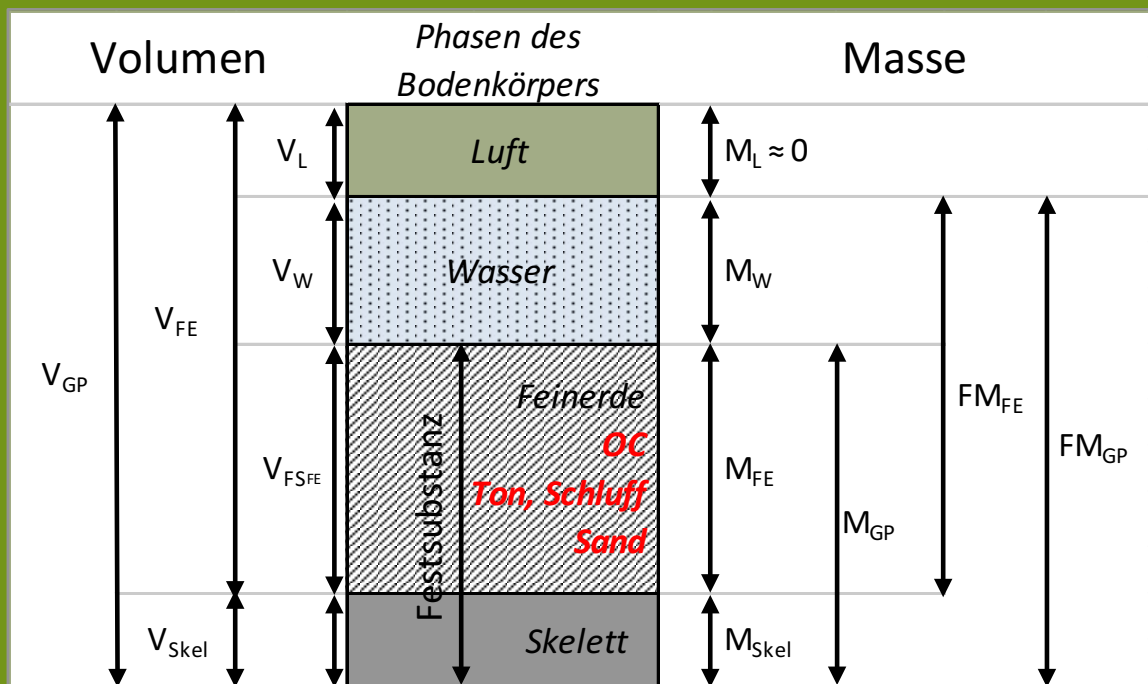


## Herleitung von Schätzwerten für Lagerungsdichte und Raumgewicht Feinerde

*Pedotransferfunktionen für landwirtschaftlich genutzte Böden der Tiefe 0-20 cm*



# Impressum

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

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>3</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>4</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>5</b>
<b>2. Methoden</b> .....	<b>7</b>
2.1 Daten .....	7
2.2 Datenanalyse .....	9
<b>3. Ergebnisse und Diskussion</b> .....	<b>10</b>
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
<b>4. Schlussfolgerungen und Ausblick</b> .....	<b>19</b>
4.1 Aussagesicherheit der Pedotransferfunktionen .....	19
4.2 Weitere Verbesserungen der Schätzungen .....	20
<b>5. Literatur</b> .....	<b>21</b>
<b>6. Anhang</b> .....	<b>22</b>
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  $0.07 \text{ g/cm}^3$ , 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 Feinerde<sup>1</sup> ( $RG_{FE}$ ) 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

---

<sup>1</sup> Feinerde: Bodenpartikel < 2 mm

(in cm) berechnet sich die Menge des Stoffes  $x$  ( $M_x$  in  $\text{g m}^{-2}$ ) aus der entsprechenden Konzentration  $c_x$  ( $\text{g kg}^{-1}$ ) 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.

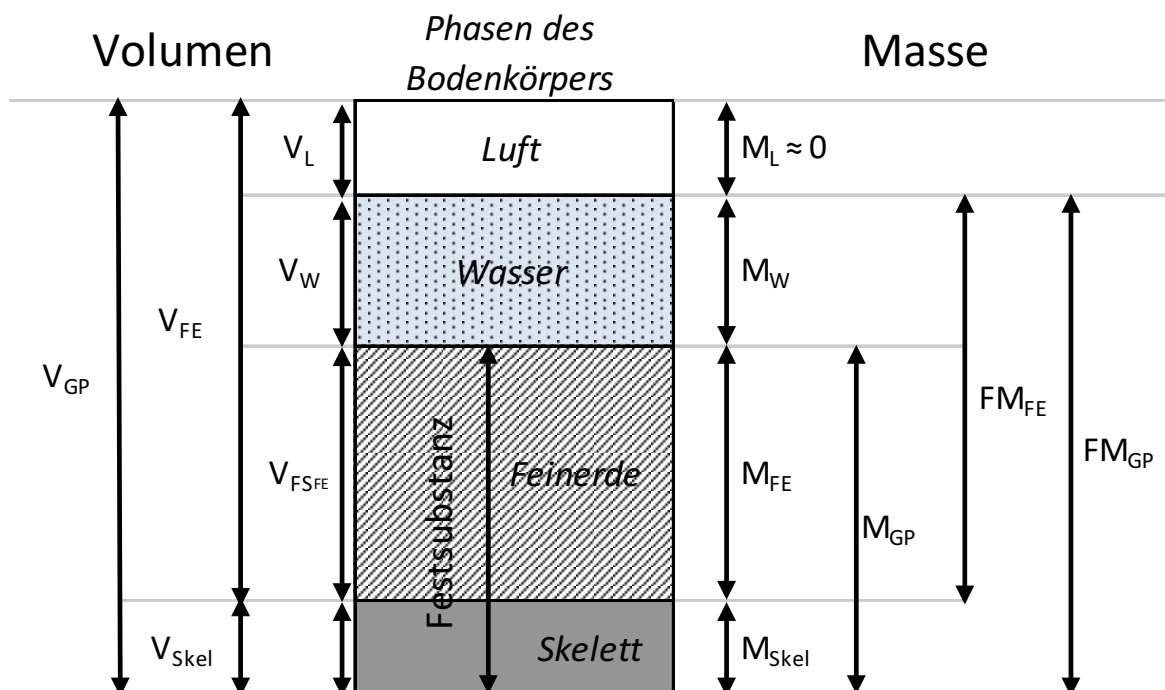


Abbildung 1: Definition der Massen und Volumina der Bodenphasen bzw. -proben (überarbeitet aus Hillel 2003).

## 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
<b>DS 1 ohne Waldstandorte</b>	<b>70</b>	<b>237</b>
<b>DS 1 für finales Modell (ohne Ausreisser)</b>	<b>69</b>	<b>223</b>

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
<b>Total</b>	<b>69</b>	<b>223</b>	<b>Total</b>	<b>69</b>	<b>223</b>



## 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 <sub>2</sub> )	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
<b>Ton</b> (% g/g)	5.5	16.0	22.0	28.0	59.0	23.3	10.5
<b>Schluff</b> (% g/g)	14.0	32.5	36.8	44.6	73.1	37.7	10.5
<b>Sand</b> (% g/g)	7.8	31.0	40.0	48.0	80.0	39.0	15.5
<b>pH</b>	3.9	5.2	5.7	6.5	7.5	5.8	0.9
<b>OC</b> (% g/g)	1.12	2.05	3.07	4.30	16.08	3.34	1.69
<b>WG<sub>FE</sub></b> (% g/g)	14.4	30.0	37.4	46.9	91.5	40.2	13.8
<b>Skel</b> (% cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	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
<b>RG<sub>FE</sub> Probe</b> (g/cm <sup>3</sup> )	0.55	0.89	1.04	1.17	1.44	1.03	0.19
<b>LD<sub>FE</sub>*</b> (g/cm <sup>3</sup> )	0.61	0.95	1.10	1.21	1.47	1.09	0.18

\* berechnet aus RG<sub>FE</sub>-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.

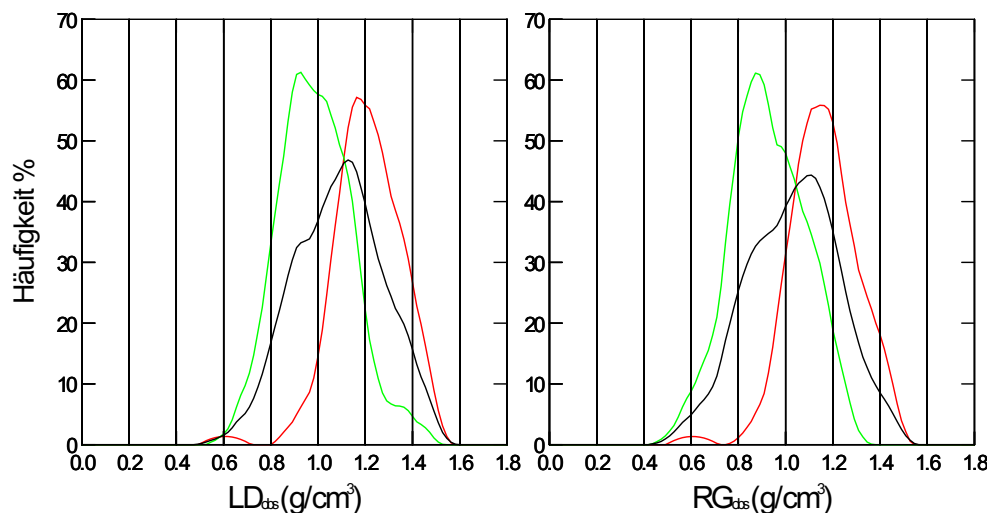


Abbildung 2: Dichtefunktion der beobachteten Werte für Lagerdichtede  $LD_{obs}$  und Raumgewicht  $RG_{obs}$  für alle Daten (schwarz), für Standorte mit Bodenbearbeitung (rot) und Standorte ohne Bodenbearbeitung (grün).

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.

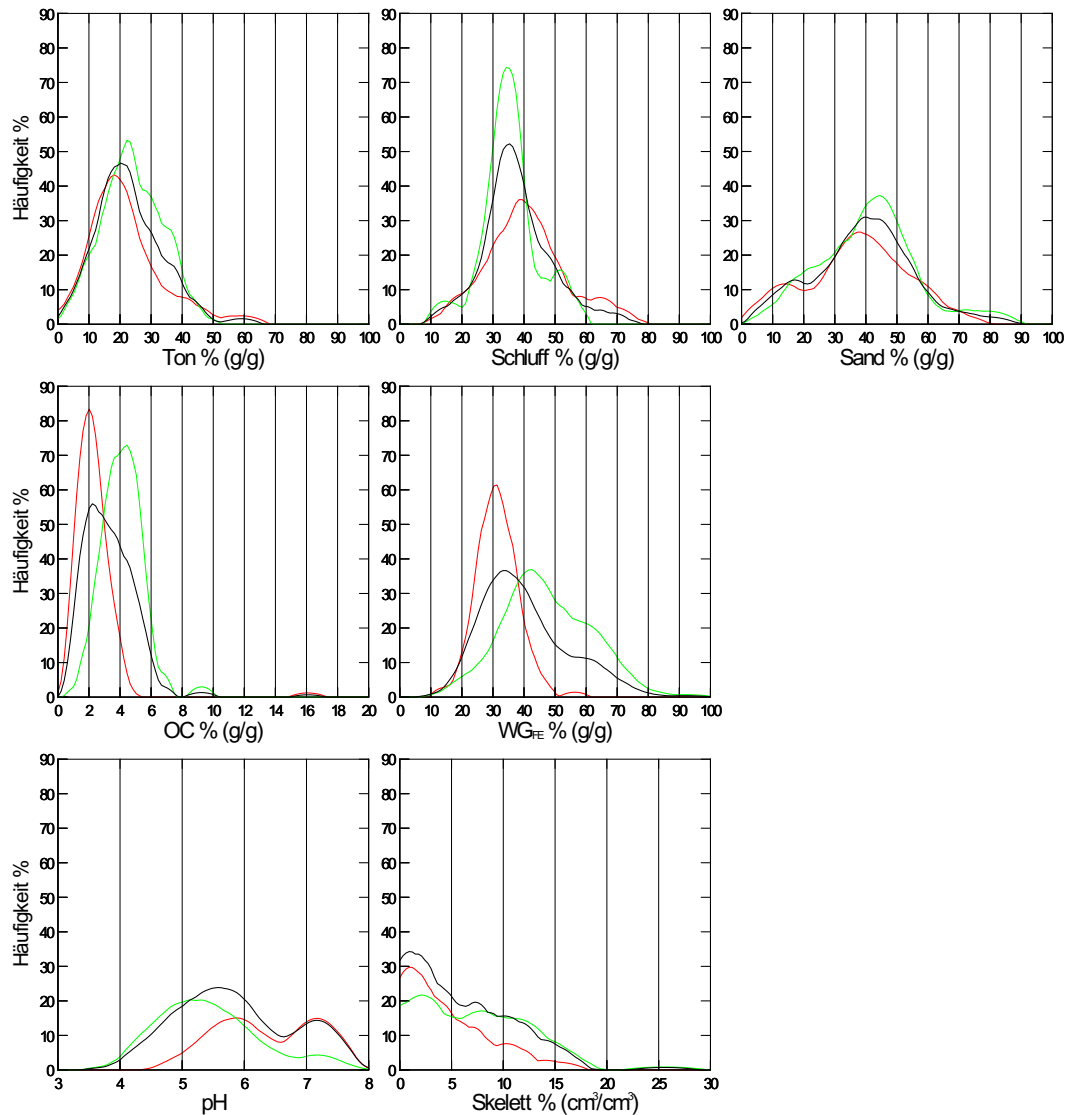


Abbildung 3: Dichtefunktion der beobachteten Werte der erklärenden Variablen für alle Daten (schwarz), für Standorte mit Bodenbearbeitung (rot) und Standorte ohne Bodenbearbeitung (grün).

### 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  $0.9 \text{ g/cm}^3$  (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.

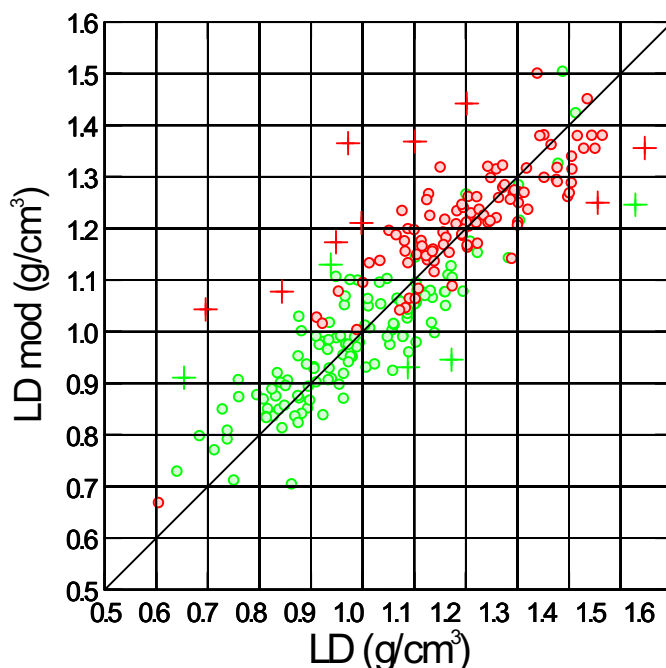


Abbildung 4: Lagerungsdichte geschätzt gemäss Formel 5 ( $LD_{mod}$ ) versus bestimmte Lagerungsdichte ( $LD$ ) der Standorte mit Bodenbearbeitung (rot) und ohne Bodenbearbeitung (grün). Symbole: Daten, die für die Modellbildung verwendet worden sind, sind als Kreis, Ausreisser als Kreuz dargestellt.

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.

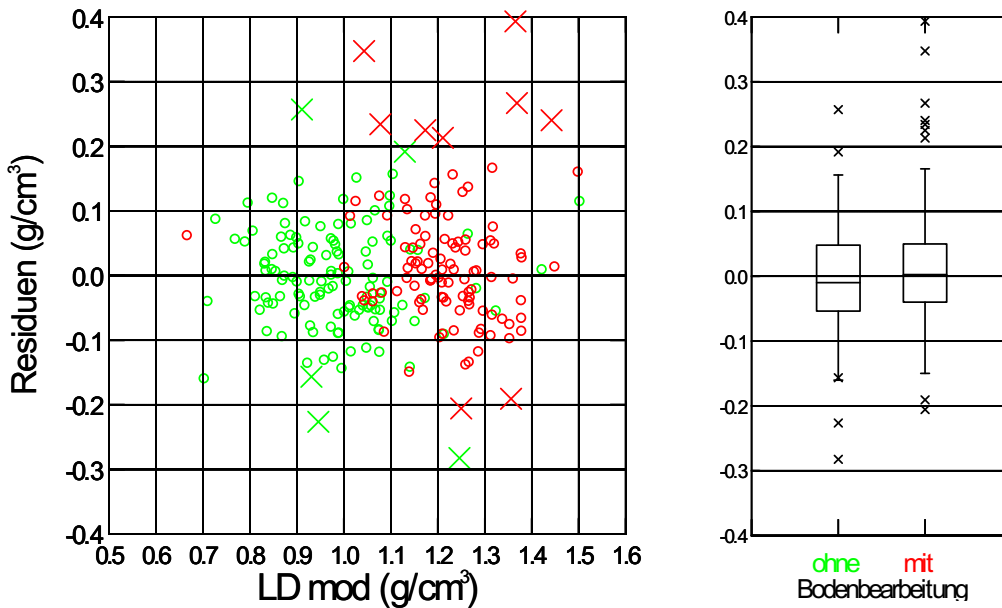


Abbildung 5: Residuen des Modelles gemäss Formel 5. Links: Residuen vs. geschätzte Lagerungsdichte (LD mod). Rechts: Boxplot der Residuen vs. Faktor mit/ohne Bodenbearbeitung. Kreise stellen die Beobachtungen des Kalibrationsdatensatzes dar, Ausreisser (welche nicht zur Modellbildung verwendet wurden)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

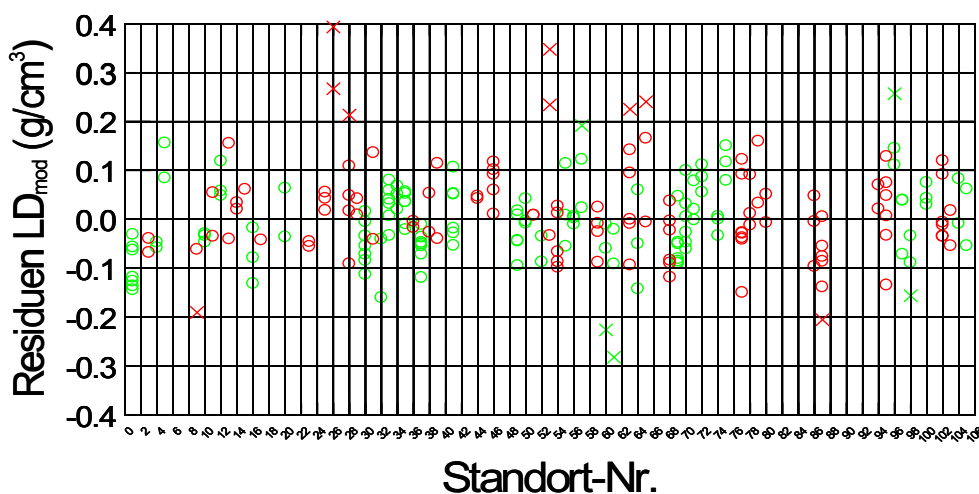


Abbildung 6: Residuen des Modelles LD mod nach Standort, Standorte mit Bodenbearbeitung (rot) und ohne Bodenbearbeitung (grün), Symbol für Ausreisser = Kreuz.

### 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).

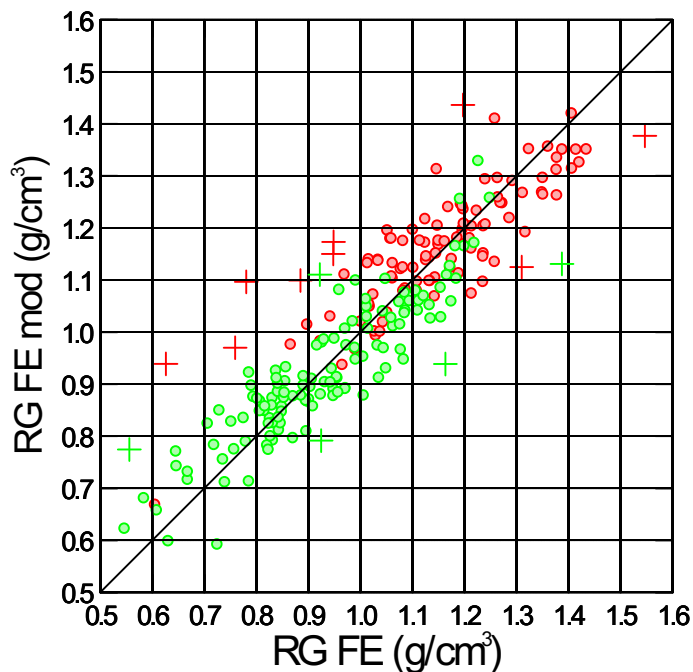


Abbildung 7: Raumgewicht geschätzt gemäss Formeln 5 und 6 versus gemessenes Raumgewicht ( $RG_{FE}$ ) der Standorte mit Bodenbearbeitung (rot) und ohne Bodenbearbeitung (grün). Symbole: Daten, die für die Modellbildung verwendet worden sind als Kreis, jene der Ausreisser als Kreuz dargestellt.

### 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  $0.015 \text{ g/cm}^3$  grösser und beträgt  $0.086 \text{ g/cm}^3$ .

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

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

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

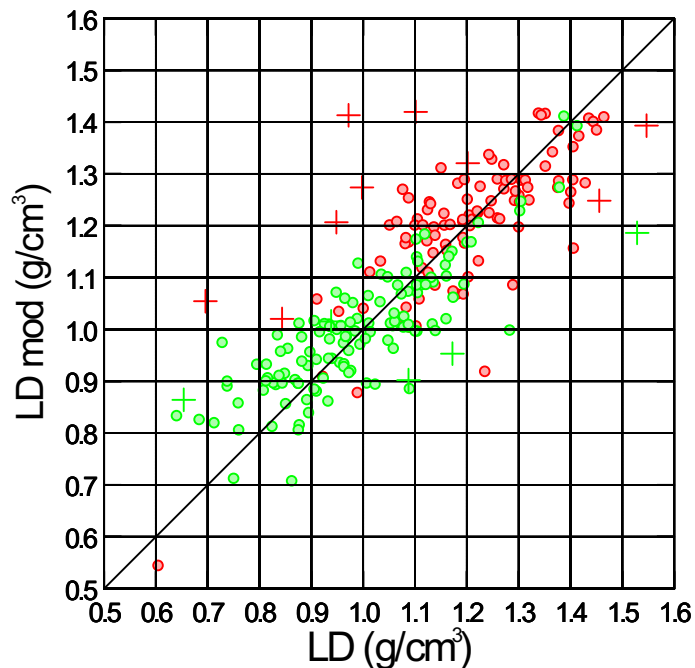


Abbildung 8: Lagerungsdichte geschätzt gemäss Formel 7 ( $LD_{mod}$ ) versus an Bodenproben bestimmte Lagerungsdichte ( $LD$ ) der Standorte mit Bodenbearbeitung (rot) und ohne Bodenbearbeitung (grün). Symbole: Daten, die für die Modellbildung verwendet worden sind als Kreis, jene der Ausreisser als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

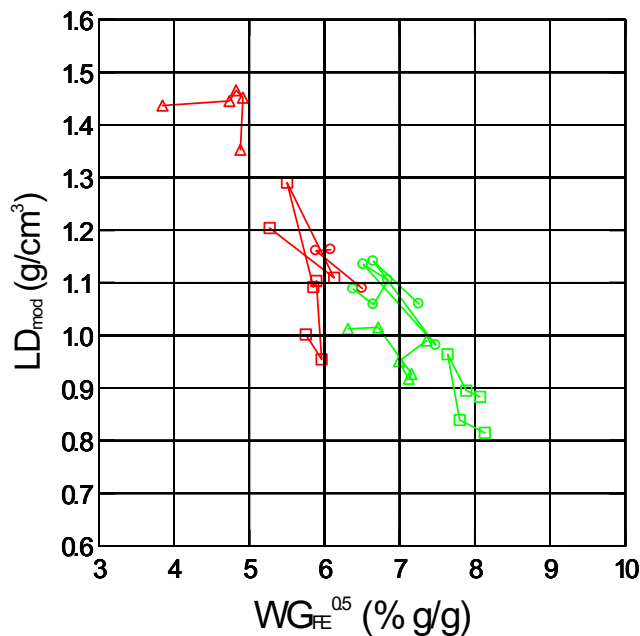


Abbildung 9: Lagerungsdichte bestimmt an Bodenproben ( $LD_{obs}$ ) in Abhängigkeit (der Wurzel) des gravimetrischen Wassergehaltes ( $WG_{FE}^{0.5}$ , % g/g) für sechs ausgewählte NABObio-Standorte, wiederholte Beprobungen desselben Standortes sind durch Linien verbunden.

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



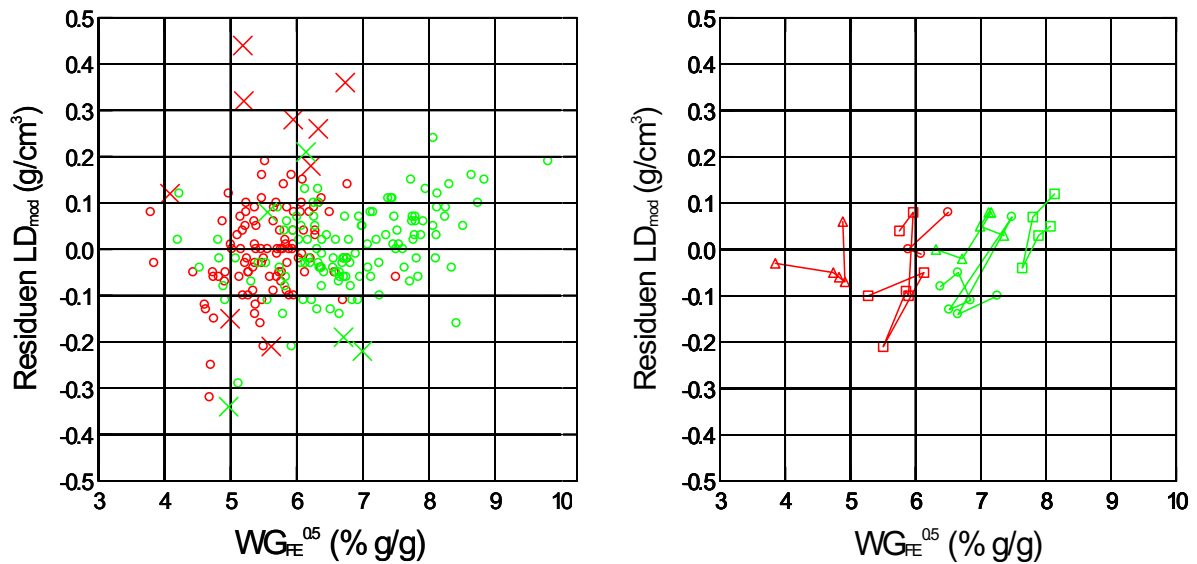


Abbildung 10: Residuen der Schätzungen mit Modell nach Formel 7 ohne Wassergehalt ( $LD_{mod}$ ) in Abhängigkeit (der Quadratwurzel) des Wassergehaltes ( $WG_{FE}^{0.5}$ ), gemessen an Bodenproben.

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.

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

$$RMSE = 0.0813$$

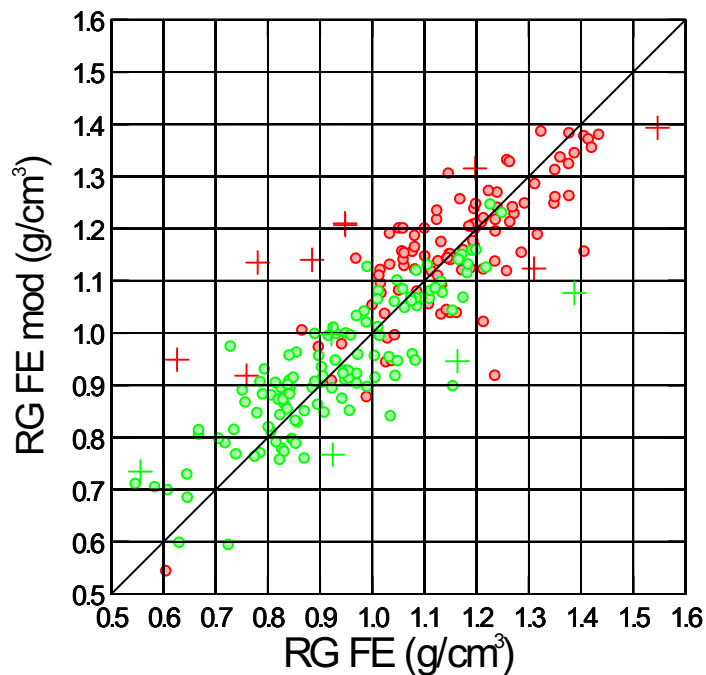


Abbildung 11: Raumgewicht geschätzt gemäss Formeln 7 und 6 ( $RG_{FE\ mod}$ ) versus an Bodenproben bestimmtes Raumgewicht ( $RG_{FE}$ ) der Standorte mit Bodenbearbeitung (rot) und ohne Bodenbearbeitung (grün), Symbole: Daten, die für die Modellbildung verwendet worden sind als Kreis, jene der Ausreisser 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  $0.07 \text{ g/cm}^3$  geschätzt werden. Bei einer mittleren Dichte von  $1.0 \text{ g/cm}^3$  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
<b>RMSE (<math>\text{g/cm}^3</math>)</b>	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](http://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. *Agroscope Science*, 34, 2016 1-16. [www.agroscope.ch/science](http://www.agroscope.ch/science)
- Gubler A., Wächter D., Schwab P. (2018): Homogenisierung von Bodenkohlenstoff-Daten: Harmonisierung der Resultate aus Nassoxydation (FAL-Methode) und Trockenveraschung. *Agroscope Science*, 62, 2018 1-9. [www.agroscope.ch/science](http://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. *Agroscope Science*, 40, 2016, 1-34. [www.agroscope.ch/science](http://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:
<b>Datensatz 3</b> RG&OC-Datensatz	Zusätzlich Daten mit OC-Gehalten und Körnung	102	<b>368</b>	Wegfall von 92 Erhebungen ohne OC-Bestimmung
<b>Datensatz 2</b>	<b>Nur „ungestörte“ Proben</b> (ohne frisch bearbeitete Böden)	<b>101</b>	<b>354</b>	Ausschluss von Stao 67 (organischer Boden) und *Wegfall von 14 Erhebungen deren Proben in gestörtem Bodenzustand (frisch bearbeitet) genommen worden sind.
<b>Datensatz 1</b>	<b>Nur Daten mit plausiblen Körnungswerten **</b>	<b>92</b>	<b>322</b>	**Wegfall von 9 Standorte ohne plausible Körnungswerte (Stao 2, 6, 7, 22, 48, 88, 90, 92, 106) => 32 Erhebungen weniger
<b>Datensatz für Analyse</b>	<b>DS 1 ohne Waldstandorte</b>	<b>70</b>	<b>237</b>	<b>Waldstandorte ausgeschlossen</b>
<b>Datensatz für Modell</b>	<b>DS 1 ohne Waldstandorte und Ausreisser</b>	<b>69</b>	<b>223</b>	<b>Ausreisser bereinigter Datensatz. Standorte mit und ohne Bodenbearbeitung</b>

## 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
	<b>Log_OC</b>	<b>-0,819</b>
Textur (Ton, Schluff, Sand) und deren Transformation	Ton	-0,268
	<b>Wurzel(Ton)</b>	<b>-0,246</b>
	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	<b>Wurzel(WG_FE) * Log_OC</b>	<b>-0,846</b>
	<b>Wurzel(WG_FE)*Wurzel (Ton)</b>	<b>-0,579</b>
	Log_WG_Ton	-0,390
	Log_WG_WurzelTon	-0,469
	Log_WG_LogOC	-0,843
	WurzelWG_WuzelOC	-0,839

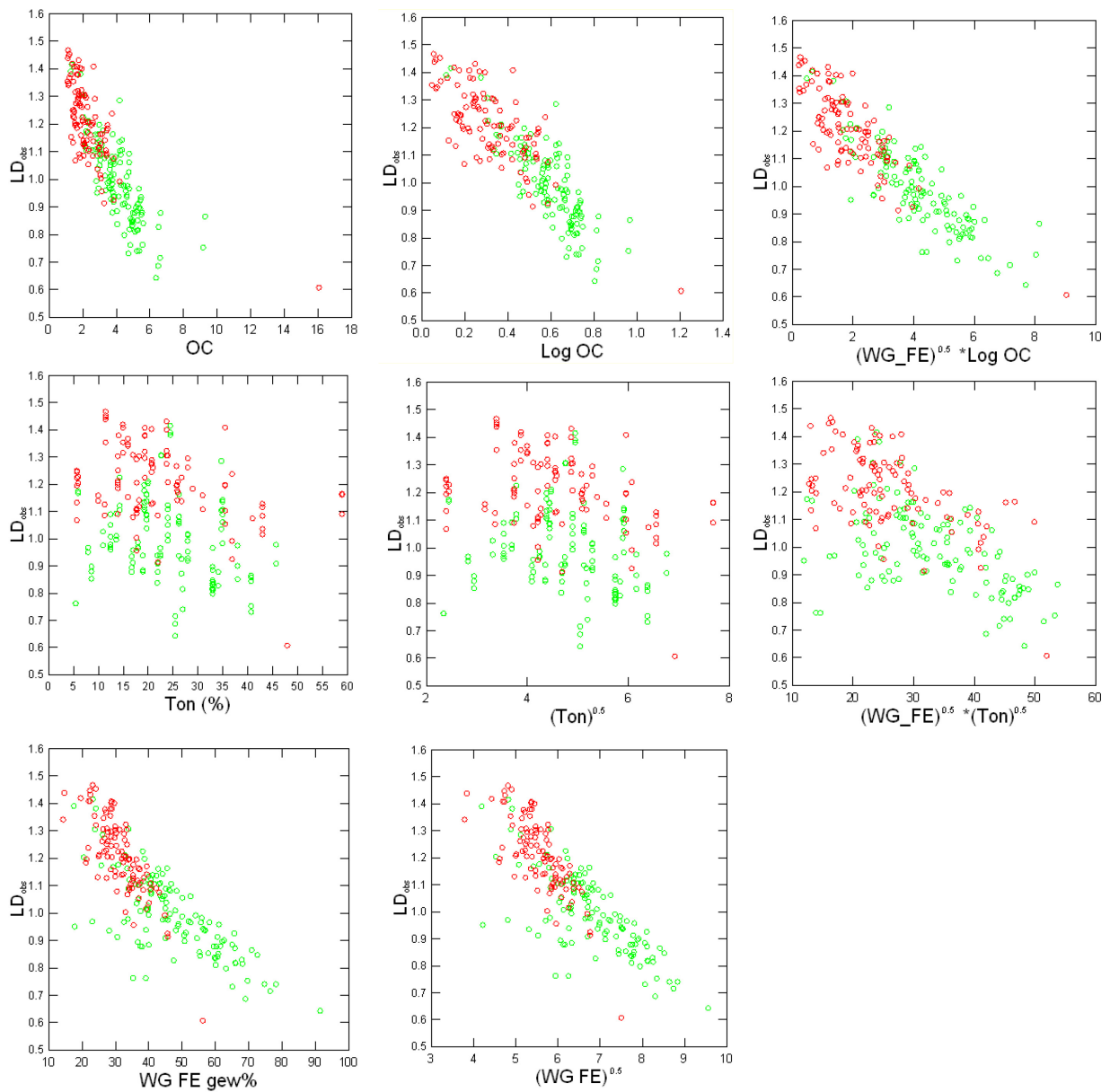


Abbildung 12: Streudiagramme für die gemessene Lagerungsdichte ( $LD_{obs}$ ) in Abhängigkeit der möglichen erklärenden Variablen Gehalt an organischem Kohlenstoff (OC) bzw.  $\log_{10}(OC)$ , Tongehalt der Feinerde (Ton), gravimetrischer Wassergehalt der Feinerde ( $WG_{FE}$ ) sowie ausgewählte Interaktionen.



### 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.

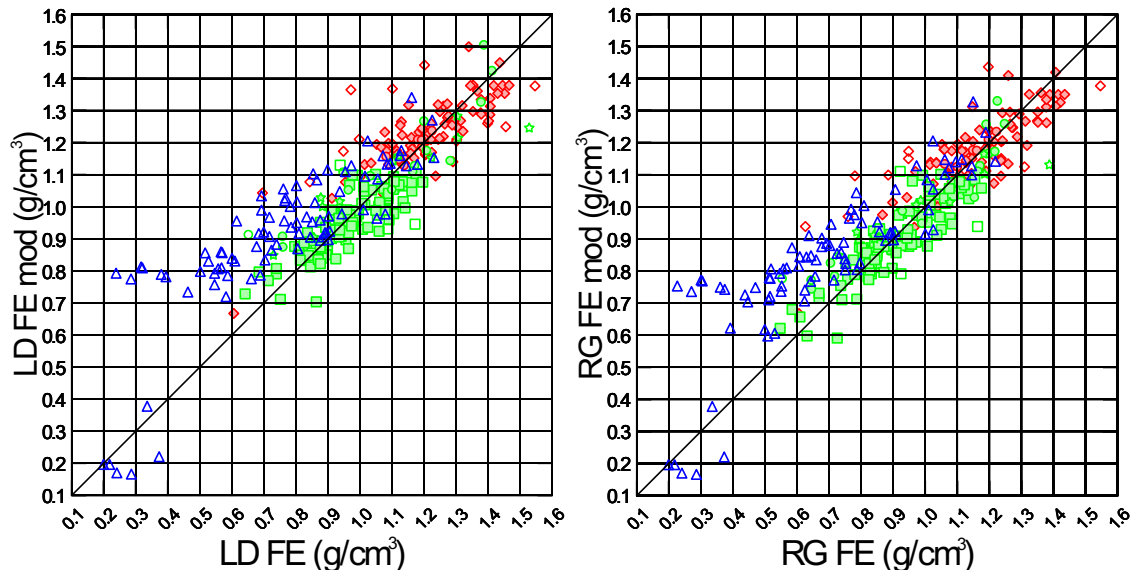


Abbildung 13: Lagerungsdichte und Raumgewicht geschätzt gemäss Formel 5 (LD FE mod) bzw. Formel 6 (RG FE mod) vs. an Bodenproben bestimmte Werte (LD FE bzw. RG FE) für alle Standorte aus Datensatz 1.

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