



Referenzwertgleichungen für die mikrobielle Biomasse und Basalatmung an Graslandstandorten

Autorinnen

Anna-Sofia Hug und Janine Moll-Mielewczik

Partner

Andreas Gubler (Kanton Zürich), Andreas Fliessbach (FiBL), Juliane Hirte und Florian Walder (Agroscope)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF
Agroscope

Impressum

Herausgeber	Agroscope Reckenholzstrasse 191 8046 Zürich www.agroscope.ch
Auskünfte	Janine Moll-Mielewczik
Download	www.agroscope.ch/science
Copyright	© Agroscope 2024
ISSN	2296-729X
DOI	https://doi.org/10.34776/as188g

Haftungsausschluss :

Die in dieser Publikation enthaltenen Angaben dienen allein zur Information der Leser/innen. Agroscope ist bemüht, korrekte, aktuelle und vollständige Informationen zur Verfügung zu stellen – übernimmt dafür jedoch keine Gewähr. Wir schliessen jede Haftung für eventuelle Schäden im Zusammenhang mit der Umsetzung der darin enthaltenen Informationen aus. Für die Leser/innen gelten die in der Schweiz gültigen Gesetze und Vorschriften, die aktuelle Rechtsprechung ist anwendbar.

Inhalt

Zusammenfassung	4
Summary	5
Résumé	6
Riassunto	7
1 Einleitung	8
2 Methoden	9
2.1 Bestehende Referenzwertgleichungen zur Beurteilung von mikrobiologischen Messwerten.....	9
2.2 Datenherkunft und -harmonisierung für die Herleitung der neuen Referenzwertgleichungen.....	10
2.3 Herleitung der neuen Referenzwertgleichungen	11
2.4 Unterschiedliche Beprobungstiefen.....	12
2.5 Software	13
3 Ergebnisse	13
3.1 Referenzwertgleichungen für Ackerstandorte	13
3.2 Referenzwertgleichungen für Graslandstandorte.....	17
3.3 Wichtigste erklärende Variablen der Referenzwertgleichungen	19
3.4 Überprüfung der Datenmenge zur Erstellung von Referenzwertgleichungen.....	19
3.5 Umrechnungsfaktoren für Werte aus unterschiedlichen Beprobungstiefen.....	20
4 Diskussion	22
5 Schlussfolgerungen und Ausblick	24
Literaturverzeichnis	25
Abbildungsverzeichnis	27
Tabellenverzeichnis	27
Anhang	28
Übersicht Messwerte der Datensätze.....	28
Trainings- und Testsets zur Herleitung der Referenzwertgleichungen	31
Acker 0-20 cm.....	31
Grasland 0-20 cm	31
Grasland 0-10 cm	31

Zusammenfassung

Für ein intaktes Bodensystem spielen Bodenorganismen eine zentrale Rolle, da sie für die Aufrechterhaltung von Bodenfunktionen wie die Regulierungs- und Produktionsfunktion hauptverantwortlich sind. In der Schweiz werden Zustand und Entwicklung dieser Organismen durch die bodenbiologischen Summenparameter, mikrobielle Biomasse und Basalatmung erfasst. Um diese Informationen sowohl im Vollzug als auch im Rahmen der Langzeit-Bodenbeobachtungsprogramme nutzen zu können, ist die qualitative Beurteilung der erhobenen Messwerte essentiell. Eine Möglichkeit, diese Bewertung vorzunehmen, ist die Referenzierung der gemessenen Werte anhand standorttypischer Eigenschaften. Ein Ansatz zur Ableitung solcher standortspezifischer Referenzwerte ist die Referenzwertgleichung, mit welcher anhand von Standorteigenschaften entsprechende Erwartungswerte abgeschätzt werden können. Für die Schweiz stehen Referenzwertgleichungen für die mikrobielle Biomasse und Basalatmung zur Verfügung, welche die standortspezifischen Bodenvariablen organischer Kohlenstoff, pH-Wert, Ton- und Sandgehalt, als erklärende Variablen beinhalten (VBB/BSA, 2009). Allerdings sind die Referenzwertgleichungen bislang lediglich für Ackerstandorte hergeleitet worden, während entsprechende Gleichungen für Graslandstandorte nur für die mikrobielle Biomasse mit der Messmethode Substrat-induzierte Respiration vorlagen. Dies liegt daran, dass für Graslandstandorte bislang noch nicht genügend Daten für die Herleitung von Gleichungen für die Basalatmung und die mikrobielle Biomasse (Fumigations-Extraktionsmethode) vorhanden waren.

Neben der Überprüfung der Referenzwertgleichungen für Ackerstandorte wurden in dieser Studie neue Referenzwertgleichungen für Graslandstandorte erarbeitet. Zu diesem Zweck wurden bestehende Datensätze, welche mikrobielle Summenparameter und standorttypische Bodenvariablen umfassen, zusammengestellt. Diese Daten wurden nach gleichen oder ähnlichen Methoden erhoben wie die Daten, die für die bestehenden Referenzwertgleichungen genutzt wurden. Für die Graslandstandorte wurden zudem zwei verschiedene Bodentiefen – 0-10 cm und 0-20 cm – berücksichtigt, welche in der Schweiz je nach Monitoringprogramm angewendet werden. Die Datengrundlage umfasste 111 Ackerstandorte, 62 Graslandstandorte für die Beprobungstiefe 0-20 cm, sowie 33 Graslandstandorte für 0-10 cm. Mit diesem neuen umfassenden Datensatz wurde untersucht, inwieweit die Referenzwertgleichungen eine robuste Schätzung der gemessenen Daten liefern, welche erklärenden Variablen den grössten Einfluss auf die Erwartungswerte haben und wie viele Standorte für eine Ableitung von robusten Referenzwertgleichungen erforderlich sind. Dazu wurden lineare Regressionen mit den gleichen Inputvariablen wie bei den bestehenden Gleichungen basierend auf einer Kreuzvalidierungsmethode durchgeführt und es wurde die Gleichung mit dem kleinsten Standardfehler der Regression (RMSE) gewählt. Für die Gleichungen der Ackerstandorte konnten die bestehenden mit den neuen Gleichungen mittels Korrelationen verglichen werden.

Die Überprüfung der bestehenden Referenzwertgleichungen für Ackerstandorte ergab, dass diese als robust bewertet werden können. Die neu hergeleiteten Referenzwertgleichungen für Graslandstandorte zeigten für die mikrobielle Biomasse eine hohe Übereinstimmung von berechneten und gemessenen Werten für beide Beprobungstiefen (beide mit einem $R^2 = 0.86$). Für die Basalatmung war die Güte der Übereinstimmung insgesamt deutlich niedriger und zudem für die beiden Beprobungstiefen verschieden (0–20 cm: $R^2 = 0.69$; 0–10 cm: $R^2 = 0.56$). Im Vergleich zu den Referenzwertgleichungen für Ackerstandorte ermöglichten die Referenzwertgleichungen für Graslandstandorte eine genauere Abschätzung der mikrobiellen Biomasse und eine ähnlich genaue Abschätzung der Basalatmung. Die wichtigsten erklärenden Variablen waren für beide Landnutzungen der organische Kohlenstoff und der Ton-Gehalt für die mikrobielle Biomasse und der organische Kohlenstoff und pH-Wert für die Basalatmung. Die Abschätzung der benötigten Datenmenge für eine robuste Herleitung von Referenzwertgleichungen ergab, dass für Ackerstandorte und Graslandstandorte (0-20 cm Beprobungstiefe) ausreichend viele Daten vorhanden sind. Für die Referenzwertgleichung für Graslandstandorte (Beprobungstiefe 0-10 cm) hingegen ist die Datenmenge noch zu knapp.

Die neu hergeleiteten Referenzwertgleichungen für Grasland erlauben eine erste qualitative Beurteilung der mikrobiellen Biomasse und der Basalatmung für die Beprobungstiefe 0-20 cm. Für eine robustere Gleichung für die Beprobungstiefe 0-10 cm sind jedoch weitere Messdaten erforderlich. Des Weiteren kann angenommen werden, dass sich die Genauigkeit der hergeleiteten standorttypischen mikrobiellen Referenzwerte durch die Erweiterung der Referenzwertgleichungen mit weiteren erklärenden Variablen, wie beispielsweise klimatische Bedingungen, verbessern lässt.

Summary

Soil organisms play a central role in an intact soil system, as they are primarily responsible for maintaining soil functions such as regulation and production. In Switzerland, the status and development of these organisms are recorded using the soil biological sum parameters microbial biomass and basal respiration. A qualitative assessment of the measured values is essential in order to be able to use this information both in law enforcement and in long-term soil monitoring programmes. One assessment method is to compare the measured values to reference values on the basis of typical site characteristics. These site-specific reference values can be derived from the reference value equation, which is used to estimate corresponding expected values based on site characteristics. Reference value equations for microbial biomass and basal respiration are available for Switzerland which include the site-specific soil variables organic carbon, pH value, clay and sand content as explanatory variables (VBB/BSA, 2009). However, reference value equations have so far been derived only for arable sites, while corresponding equations for grassland sites were available only for microbial biomass using the substrate-induced respiration method. This is due to the fact that insufficient data were available for grassland sites to derive equations for basal respiration and microbial biomass (fumigation extraction method).

In addition to reviewing the reference value equations for arable sites, new reference value equations for grassland sites were developed in this study. For this purpose, existing data sets comprising microbial sum parameters and site-specific soil variables were compiled. These data were collected using the same or similar methods as the data used for the existing reference value equations. For the grassland sites, the two different soil depths – 0-10 cm and 0-20 cm – used in different monitoring programmes in Switzerland were also taken into account. The data set comprised 111 arable sites, 62 grassland sites for the 0-20 cm sampling depth and 33 grassland sites for 0-10 cm. This new comprehensive data set was used to investigate the extent to which the reference value equations provide a robust estimate of the measured data, which explanatory variables have the greatest influence on the expected values and how many sites are required to derive robust reference value equations. For this purpose, linear regressions were conducted with the same input variables as for the existing equations based on a cross-validation method and the equation with the smallest standard error of the regression (RMSE) was selected. For the equations for the arable sites, the existing equations were compared with the new equations using correlations.

The revision of the existing reference value equations for arable sites showed that they can be assessed as robust. The newly derived reference value equations for grassland sites showed a high level of agreement between calculated and measured values for microbial biomass for both sampling depths (both with an $R^2 = 0.86$). For basal respiration, the overall agreement was significantly lower and also different for the two sampling depths (0-20 cm: $R^2 = 0.69$; 0-10 cm: $R^2 = 0.56$). Compared to the reference value equations for arable sites, the reference value equations for grassland sites enabled a more accurate estimation of microbial biomass and a similarly accurate estimation of basal respiration. The main explanatory variables for both land uses were organic carbon and clay content for microbial biomass and organic carbon and pH for basal respiration. The estimation of the required amount of data for a robust development of reference value equations showed that sufficient data is available for arable and grassland sites (0-20 cm sampling depth). For the reference value equation for grassland sites (sampling depth 0-10 cm), however, the amount of data is still too limited.

The newly derived reference value equations for grassland allow an initial qualitative assessment of the microbial biomass and basal respiration for the sampling depth 0-20 cm. However, further measurement data are required for a more robust equation for the sampling depth 0-10 cm. Furthermore, it can be assumed that the accuracy of the derived site-specific microbial reference values can be improved by extending the reference value equations with further explanatory variables, such as climatic conditions.

Résumé

Les organismes du sol jouent un rôle central dans le maintien d'un système pédologique intact, étant principalement responsables des fonctions de régulation et de production du sol. En Suisse, l'état et le développement de ces organismes sont recensés par des paramètres biologiques globaux, tels que la biomasse microbienne et la respiration basale. Pour pouvoir utiliser ces informations aussi bien dans l'exécution que dans le cadre des programmes d'observation à long terme des sols, l'évaluation qualitative des valeurs mesurées est essentielle. Une méthode pour cette évaluation consiste à référencer les valeurs mesurées à l'aide de caractéristiques typiques du site. Pour déduire ces valeurs de référence spécifiques au site, il est possible d'utiliser l'équation des valeurs de référence, qui permet d'estimer les valeurs anticipées à l'aide des caractéristiques du site. Pour la Suisse, il existe des équations de valeur de référence pour la biomasse microbienne et la respiration basale, qui comprennent les caractéristiques du sol spécifiques au site, telles que le carbone organique, le pH, la teneur en argile et en sable, comme paramètres explicatifs (VBB/BSA, 2009). Cependant, les équations de référence n'ont été établies que pour les sols arables, alors que les équations correspondantes pour les prairies n'étaient disponibles que pour la biomasse microbienne mesurée par la méthode de respiration induite par le substrat. Cela s'explique par le fait que, pour les prairies, il n'y avait pas encore suffisamment de données pour déduire les équations de la respiration basale et de la biomasse microbienne (méthode d'extraction par fumigation).

Outre la vérification des équations de référence pour les sites de culture, cette étude a élaboré de nouvelles équations de référence pour les prairies. A cette fin, des ensembles de données existants, comprenant des paramètres microbiens totaux et des paramètres de sol typiques du site, ont été rassemblés. Ces données ont été prélevées selon des méthodes identiques ou similaires à celles utilisées pour les équations de référence existantes. Pour les prairies, deux profondeurs de sol différentes - 0-10 cm et 0-20 cm - ont été prises en compte, conformément aux pratiques appliquées en Suisse dans le cadre du programme de monitoring. La base de données comprenait 111 sites de cultures, 62 sites de prairies pour la profondeur d'échantillonnage de 0-20 cm, ainsi que 33 sites de prairies pour la profondeur d'échantillonnage de 0-10 cm. Avec ce nouvel ensemble de données, nous avons examiné dans quelle mesure les équations de valeur de référence fournissent une estimation robuste des valeurs mesurées, quels paramètres ont la plus grande influence sur les valeurs anticipées et combien de sites sont nécessaires pour dériver des équations de valeur de référence robustes. Pour cela, des régressions linéaires ont été calculées avec les mêmes paramètres d'entrée que pour les équations existantes, en utilisant une méthode de validation croisée. L'équation présentant la plus petite erreur standard de régression (RMSE) a été choisie. Pour les équations des sites de culture, les équations existantes ont pu être comparées aux nouvelles équations par corrélation.

La vérification des équations de référence existantes pour les sols arables a montré qu'elles pouvaient être considérées comme fiables. Les nouvelles équations de référence pour les prairies ont montré une forte concordance entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées pour la biomasse microbienne aux deux profondeurs d'échantillonnage (toutes deux avec un $R^2 = 0,86$). Pour la respiration basale, la qualité de la concordance était nettement plus faible et variait selon la profondeur d'échantillonnage (0-20 cm : $R^2 = 0,69$; 0-10 cm : $R^2 = 0,56$). Comparées aux équations de référence pour les terres arables, les équations de référence pour les prairies ont permis une estimation plus précise de la biomasse microbienne et une estimation tout aussi précise de la respiration basale. Les principaux paramètres explicatifs pour les terres arables comme pour les prairies étaient le carbone organique et la teneur en argile pour la biomasse microbienne et le carbone organique et le pH pour la respiration basale. L'estimation de la quantité de données nécessaires pour une dérivation robuste des équations de valeur de référence a montré qu'il y avait suffisamment de données disponibles pour les sites de cultures et les sites de prairies (profondeur d'échantillonnage de 0 à 20 cm). En revanche, pour l'équation de référence des prairies (profondeur d'échantillonnage de 0 à 10 cm), la quantité de données est encore trop faible.

Les nouvelles équations de référence pour les prairies permettent une première évaluation qualitative de la biomasse microbienne et de la respiration basale pour la profondeur d'échantillonnage de 0-20 cm. Toutefois, des prélèvements supplémentaires sont nécessaires pour obtenir une équation plus robuste pour la profondeur d'échantillonnage de 0 à 10 cm. En outre, les valeurs de référence microbiennes typiques du site peuvent être améliorées en élargissant les équations des valeurs de référence avec d'autres paramètres explicatifs, telles que les conditions climatiques.

Riassunto

Gli organismi del suolo svolgono un ruolo centrale per l'integrità del sistema suolo, poiché sono i principali responsabili del mantenimento delle sue funzioni, tra cui quella di regolazione e produzione. In Svizzera lo stato e lo sviluppo di questi organismi sono rilevati mediante i parametri somma pedobiologici, la biomassa microbica e la respirazione basale. L'utilizzo di queste informazioni sia nell'esecuzione sia nell'ambito dei programmi di osservazione del suolo non può prescindere dalla valutazione qualitativa delle misurazioni rilevate. La valutazione può essere effettuata con la referenziazione dei valori misurati sulla base di caratteristiche specifiche del sito. I valori di riferimento specifici del sito possono essere ricavati con l'equazione dei valori di riferimento, che serve a stimare i valori attesi in base alle caratteristiche del sito. Per la Svizzera sono disponibili equazioni dei valori di riferimento per la biomassa microbica e la respirazione basale, che includono come variabili esplicative le seguenti variabili pedologiche specifiche del sito: carbonio organico, valore del pH, tenore di argilla e sabbia (VBB/BSA, 2009). Tuttavia, le equazioni dei valori di riferimento sono state sinora ricavate solo per le aree coltivate, mentre per i siti prativi esistevano corrispondenti equazioni solo per la biomassa microbica con il metodo di misurazione della respirazione indotta dal substato (SIR). Ciò era dovuto all'insufficienza dei dati da cui ricavare equazioni per la respirazione basale e la biomassa microbica (metodo della fumigazione-estrazione).

Oltre alla verifica delle equazioni dei valori di riferimento per le aree coltivate, in questo studio sono state elaborate nuove equazioni dei valori di riferimento per i siti prativi. Sono state quindi raccolte serie di dati comprendenti parametri somma microbici e variabili pedologiche specifiche del sito. Questi dati sono stati rilevati con metodi uguali o simili a quelli utilizzati per i dati delle equazioni dei valori di riferimento esistenti. Per i siti prativi sono state inoltre considerate due diverse profondità del suolo (0–10 cm e 0–20 cm), utilizzate in Svizzera a seconda del programma di monitoraggio. La base di dati comprendeva 111 aree coltivate, 62 siti prativi per la profondità di campionamento di 0–20 cm e 33 siti prativi per la profondità di 0–10 cm. Con questa nuova, ampia serie di dati si è proceduto a esaminare fino a che punto le equazioni dei valori di riferimento forniscono una stima robusta dei dati misurati, quali variabili esplicative hanno la maggiore influenza sui valori attesi e quanti siti sono necessari per ottenere equazioni dei valori di riferimento robuste. A tal fine sono state eseguite regressioni lineari con le stesse variabili di input delle equazioni esistenti sulla base di un metodo di convalida incrociata ed è stata scelta l'equazione con il minore errore quadratico medio della regressione (RMSE). Per le aree coltivate le equazioni esistenti sono state confrontate con le nuove mediante correlazioni.

Dalla verifica delle equazioni dei valori di riferimento per le aree coltivate è emerso che possono essere ritenute robuste. Le nuove equazioni dei valori di riferimento ottenute per i siti prativi hanno evidenziato un'elevata concordanza tra i valori calcolati e quelli misurati per le due profondità di campionamento (entrambe con un $R^2 = 0,86$) per la biomassa microbica. Per la respirazione basale la concordanza è risultata nel complesso molto inferiore e diversa per le due profondità di campionamento (0–20 cm: $R^2 = 0,69$; 0–10 cm: $R^2 = 0,56$). Rispetto alle equazioni dei valori di riferimento per le aree coltivate, quelle per i siti prativi hanno consentito una stima più precisa della biomassa microbica e una stima altrettanto precisa della respirazione basale. Le principali variabili esplicative per i due usi del suolo erano il carbonio organico e il tenore di argilla per la biomassa microbica e il carbonio organico e il valore del pH per la respirazione basale. Dalla stima della quantità di dati necessaria per una derivazione robusta delle equazioni dei valori di riferimento è risultato che i dati disponibili sono sufficienti per le aree coltivate e i siti prativi con profondità di campionamento di 0–20 cm, mentre non lo sono per le equazioni dei valori di riferimento per i siti prativi con profondità di campionamento di 0–10 cm.

Le nuove equazioni dei valori di riferimento ottenute per le superfici prative consentono una prima valutazione qualitativa della biomassa microbica e della respirazione basale per la profondità di campionamento 0–20 cm, ma per la profondità di campionamento 0–10 cm sono necessarie ulteriori misurazioni per ottenere un'equazione più robusta. Si ipotizza inoltre che la precisione dei valori di riferimento microbiologici tipici del sito può essere migliorata ampliando le equazioni dei valori di riferimento con altre variabili esplicative, come le condizioni climatiche.

1 Einleitung

Bodenorganismen sind für die Aufrechterhaltung der meisten Bodenfunktionen von grosser Bedeutung. Neben der Zersetzung von organischem Material und der Aufrechterhaltung von Nährstoffkreisläufen, bauen Bodenorganismen Schadstoffe im Boden ab und tragen zu sauberem Grund- und Trinkwasser bei. Bodenorganismen verkitten zudem Bodenkrümel zu einem stabilen Gefüge mit einem vernetzten Porensystem, das auch grosse Niederschlagsmengen schnell versickern lassen und speichern kann und leisten damit einen wichtigen Beitrag zum Wasserkreislauf und zur Verhinderung von Erosion. Es ist daher nicht verwunderlich, dass bei der Evaluierung der Bedürfnisse der Kantone und des Bundes hinsichtlich der Überwachung der Ressource Boden der Bodenbiologie eine hohe Relevanz beigemessen wurde und die Berücksichtigung bodenbiologischer Indikatoren in den Bodenbeobachtungsprogrammen empfohlen wird (Gubler et al., 2020).

Für die Bodenbeobachtung wie auch für den Vollzug im Bodenschutz ist aber nicht nur das Messen der bodenbiologischen Indikatoren, sondern auch deren Beurteilung von grosser Bedeutung. Eine Beurteilung ist gerade auch für die Kommunikation mit umweltpolitischen Entscheidungsträgern, Bewirtschaftenden und der interessierten Bevölkerung sehr wichtig. Die Schwierigkeit bei der qualitativen Bewertung des Bodenzustandes liegt in der grossen Heterogenität der Böden, die für jeden Standort nahezu einzigartige Bedingungen schafft. Daher sollte eine Beurteilung jeweils auf die standortspezifischen Bedingungen bezogen werden können. Zu erwartende standorttypische Werte von Bodenindikatoren können zum Beispiel anhand von Bodeneigenschaften, die diese Werte massgebend beeinflussen, hergeleitet werden (Serna-Chavez et al., 2013, Horrigue et al., 2016, Richter et al., 2018).

Ein solches Beurteilungsinstrument zur Herleitung von standorttypischen Referenzwerten in der Schweiz wurde erstmals von Oberholzer et al. (1999), Oberholzer und Scheid (2007) und VBB/BSA (2009) für die Summenparameter mikrobielle Biomasse und Basalatmung für Acker- und teilweise für Graslandstandorte entwickelt: In Abhängigkeit des organischen Kohlenstoffgehaltes (C_{org}), dem pH-Wert und der Körnung wurden für das Schweizer Mittelland Regressionsgleichungen für standortspezifische Referenzwerte empirisch hergeleitet (sogenannte Referenzwertgleichungen). Basierend auf den hergeleiteten standorttypischen Referenzwerten können die gemessenen Werte beurteilt werden: Es kann anhand der 67 und 95 % Vertrauensbereiche ausgesagt werden, ob die Messwerte sich im Vergleich zum Schweizer Mittelland in einem «normalen» Bereich befinden oder eher erhöhte oder tiefe Werte aufweisen und können somit qualitativ bewertet werden. Mikrobielle Messwerte können auch direkt mit den standortspezifischen Referenzwerten verglichen werden, indem die Messwerte durch die entsprechenden Referenzwerte dividiert werden. Dieser Quotient wurde von Hug et al. (2021) als Zustandsindikator Q eingeführt und ist ein qualitativer Indikator für den aktuellen Zustand des Standortes. Details zur Herleitung der Referenzwertgleichungen und zum Beurteilungsschema werden in Kap. 2.1 erläutert.

Derzeit liegen für Ackerböden Referenzwertgleichungen für die Tiefe 0-20 cm für die mikrobielle Biomasse, gemessen mit der Fumigations-Extraktionsmethode (FE), der substratinduzierten Respiration (SIR), und für die Basalatmung vor (Kap. 2.1, Gleichung 1-3). Für Graslandstandorte beschränken sich die Referenzwertgleichungen auf eine Gleichung für die mikrobielle Biomasse, gemessen mit der SIR für die Bodentiefe 0-10 cm (Kap. 2.1, Gleichung 5).

Es zeigt sich also, dass die Referenzwertgleichungen noch nicht für alle relevanten Situationen der Bodenbeobachtung vorliegen, gerade weil im Grasland unterschiedliche Beprobungstiefen (0-10 cm (KABO) und 0-20 cm (NABO)) berücksichtigt werden müssen. Des Weiteren wird sowohl in der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO) als auch in den kantonalen Bodenbeobachtungsprogrammen (KABO) die mikrobielle Biomasse seit 2017 nur noch mit der Fumigations-Extraktionsmethode bestimmt, für welche die Referenzgleichung für Graslandstandorte ebenfalls noch aussteht. Im Rahmen der hier vorgestellten Studie soll diese Lücke geschlossen und Referenzwertgleichungen für die mikrobielle Biomasse, bestimmt mit der Fumigations-Extraktionsmethode und für die Basalatmung auf Graslandstandorten abgeleitet werden. Die spezifischen Ziele dieser Arbeit waren:

- I. Zusammenstellung und Harmonisierung vorhandener Datensätze zur mikrobiellen Biomasse und Basalatmung an Acker- und Graslandstandorten.
- II. Ableitung von Referenzwertgleichungen für Graslandstandorte für die Beprobungstiefen 0-10 cm und 0-20 cm und Prüfung des Einflusses der Beprobungstiefe auf die Referenzwertgleichungen.

- III. Aktualisierung der Referenzwertgleichungen für Ackerstandorte mit den neuen Daten und Validierung anhand der bestehenden Gleichungen von Oberholzer et al. (1999), Oberholzer und Scheid (2007) und VBB/BSA (2009).

2 Methoden

2.1 Bestehende Referenzwertgleichungen zur Beurteilung von mikrobiologischen Messwerten

Als Grundlage für die in dieser Studie neu hergeleiteten Referenzwertgleichungen dienten die etablierten Referenzwertgleichungen für Ackerstandorte von Oberholzer et al. 1999, Oberholzer und Scheid 2007, und VBB/BSA 2009 (Gleichungen 1-5), basierend auf $n = 252$ Standorten für die mikrobielle Biomasse und $n = 251$ für die Basalatmung. Anhand dieser Referenzwertgleichungen können standortspezifische Referenzwerte für Ackerstandorte im Schweizer Mittelland empirisch hergeleitet werden.

Ackerstandorte, 0-20 cm Bodentiefe

Mikrobielle Biomasse FE [mg C_{mik} kg⁻¹ TS]

$$\ln(\text{BM-FE}) = 4.703 + 0.963 \ln(C_{\text{org}}) + 0.063 \text{ pH} + 0.214 \ln(\text{Ton}) + 0.0008 \text{ Sand} \quad (1)$$

Mikrobielle Biomasse SIR [mg C_{mik} kg⁻¹ TS]

$$\ln(\text{BM-SIR}) = 3.58 + 0.82 \ln(C_{\text{org}}) + 0.15 \text{ pH} + 0.31 \ln(\text{Ton}) + 0.005 \text{ Sand} \quad (2)$$

Basalatmung, pro Stunde [mg CO₂-C kg⁻¹ TS h⁻¹]

$$\ln(\text{BA}) = 2.697 + 0.625 \ln(C_{\text{org}}) + 0.199 \text{ pH} - 0.146 \ln(\text{Ton}) - 0.0009 \text{ Sand} - \ln(88) \quad (3)$$

Basalatmung, pro Tag [mg CO₂ kg⁻¹ TS 24 h⁻¹]

$$\ln(\text{BA}) = 2.697 + 0.625 \ln(C_{\text{org}}) + 0.199 \text{ pH} - 0.146 \ln(\text{Ton}) - 0.0009 \text{ Sand} \quad (4)$$

Grasland, 0-10 cm Bodentiefe

Mikrobielle Biomasse SIR [mg C_{mik} kg⁻¹ TS]

$$\ln(\text{BM-SIR}) = 3.61 + 0.92 \ln(C_{\text{org}}) + 0.28 \text{ pH} + 0.17 \ln(\text{Ton}) \quad (5)$$

Sämtliche Berechnungen gelten für Böden mit einem C_{org} -Gehalt von 1-4%, einem Tongehalt von 10-40% und einem pH-Wert von 4.3-7.5. Hierbei entspricht C_{org} dem organischen Kohlenstoffgehalt in % des Gewichts der Feinerde (bestimmt gemäss FAL Methode (FAL, FAW, RAC; 1998)), Ton und Sand entsprechen den jeweiligen Körnungsanteilen in % (Ton + Schluff + Sand + Humus = 100%) und \ln dem natürlichen Logarithmus. Der letzte Term in Gleichung 3 entspricht der Einheiten-Umrechnung von mg CO₂-C kg⁻¹ TS h⁻¹ zu mg CO₂ kg⁻¹ TS (24h)⁻¹ (vgl. auch Hug et al. (2021)).

Die mit Hilfe der Referenzwertgleichungen berechneten Erwartungswerte werden als Referenzwerte bezeichnet. Zusätzlich werden Referenzbereiche berechnet. Der Bereich, in dem die gemessene mikrobielle Biomasse resp. Basalatmung als normal beurteilt werden, ist der Bereich, in dem ein berechneter Wert mit einer Wahrscheinlichkeit von 67% liegt, der statistisch gesehen dem 67%-igen Vertrauensbereich (VB67) der multiplen Regression entspricht. Analog dazu werden Werte darüber und darunter als «hoch» bzw. «tief» und Werte ober- und unterhalb des 95%-Vertrauensbereichs (VB95) als «sehr hoch» bzw. «sehr tief» eingestuft. Die Vertrauensbereiche werden mit dem Standardfehler der Schätzung (se_{est} ; «standard error of estimate») für die \ln -transformierten Werte gebildet, wobei

VB67 = $\ln(y) \pm se_{est}$ bzw. VB95 = $\ln(y) \pm 2 se_{est}$. Nach der Rücktransformation entsprechen die Vertrauensbereiche den relativen Abweichungen vom Referenzwert. Das Beurteilungsschema erlaubt demnach eine qualitative Einteilung der Messwerte in fünf Klassen von «sehr tief» bis «sehr hoch». Sowohl der Referenzwert als auch die Referenzwertbereiche sind spezifisch für die jeweilige Bodenprobe bzw. den betreffenden Standort und müssen für jede Bodenprobe bzw. jeden Standort separat berechnet werden.

2.2 Datenherkunft und -harmonisierung für die Herleitung der neuen Referenzwertgleichungen

Die hier verwendeten Bodendaten (Gesamtkohlenstoff (TC), C_{org} , pH-Wert, Ton-, Schluff- und Sandgehalt, Basalatmung (BA) und mikrobielle Biomasse (BM)) der Kantone Aargau (AG), Bern (BE), Graubünden (GR), St. Gallen (SG) und Zürich (ZH) konnten über den Schweizer Bodendatensatz (NABODAT, 02.08.2021) bezogen werden und stammen aus den Kantonalen Bodenbeobachtungen oder aus dem Projekt «Mykorrhiza-Infektionspotential» (MIP) von Jansa et al. (2014), welches Messungen an verschiedenen KABO Standorten vornahm. Es handelt sich dabei sowohl um Acker- als auch Graslandstandorte. Zusätzlich wurde der Datensatz mit Graslandstandorten vom Kanton Solothurn (SO) ergänzt. Weitere Daten stammen von Oberholzer und Scheid (2007), Walder et al. (2023), vom NABO Bio Monitoring und von der NABO Bio Status-Erhebung (Tabelle 1). Um die Datengrundlage möglichst breit zu halten wurde darauf verzichtet, die Gleichungen direkt basierend auf dem Datensatz der bestehenden Referenzwertgleichungen zu erstellen. Es wurden jeweils nur die aktuellsten Messungen berücksichtigt, bei welcher alle geforderten Messparameter an einem Standort vorhanden waren und so wurden keine Wiederholungen von Messungen (Zeitreihen) an einem Standort einbezogen (s. Abschnitt Datenharmonisierung). Um auch für die Ackerstandorte einen möglichst breit abgestützten Datensatz verwenden zu können, wurden nicht die Daten von Oberholzer et al. (1999) verwendet, sondern ein zusätzlicher Datensatz aus dem Projekt hubs46 (Walder et al. 2023) hinzugezogen.

Um die Genauigkeit der angewendeten Methoden zur Herleitung der neuen Referenzwertgleichungen für Graslandstandorte abschätzen zu können, wurde eine neue Gleichung für Ackerstandorte hergeleitet und mit den bestehenden Referenzwertgleichungen verglichen (Gleichungen 1 und 4). Für diesen Vergleich wurden nur Daten von Ackerstandorten verwendet. Die Messbereiche (Minimum, Maximum, Median und Mittelwert) der Datensätze (Tabelle 1) sind im Anhang aufgeführt.

Tabelle 1: Ausgewertete Datensätze (Anzahl Standorte und Probenahmetiefen für Acker und Grasland)

Datensatz	Ackerstandorte		Graslandstandorte	
	Anzahl	Tiefe (cm)	Anzahl	Tiefe (cm)
KABO ZH	10	0-20	13	0-20
KABO SG	0		9	0-20
SO	0		4	0-20
KABO AG	7	0-20	2	0-10
KABO BE	3	0-10	18	0-10
KABO BE	19	0-20	18	0-20
KABO GR	0		8	0-10
KABO GR	2	0-20	1	0-20
NABO 04*	0		5	0-10
NABO**	13	0-20	17	0-20
hubs46	60	0-20	0	

*Zustandserhebung NABO 2004 (Oberholzer und Scheid, 2007); **NABO Bio-Erhebung 2020 und NABO Bio-Status (2018 – 2020)

Datenharmonisierung

Da in dieser Studie auf den bestehenden Referenzwertgleichungen von Oberholzer et al. (1999) aufgebaut wird, wurde darauf geachtet, dass die neuen Messdaten möglichst mit denselben Methoden erhoben wurden. Einige Anpassungen mussten aber erfolgen um die verschiedenen Datensätze zusammenführen zu können. Zur Bestimmung des C_{org} -Gehalts haben Oberholzer et al. (1999) die FAL-Methode verwendet (FAL, FAW, RAC; 1998). Der Kohlenstoffgehalt der Proben des MIP-Projekts und der NABObio-Proben wurde mittels Elementaranalyse statt mit der FAL-Methode gemessen. Bei den MIP-Daten wurde der organische Kohlenstoff-Gehalt mit dem Faktor 1.18 gemäss Gubler et al. (2018) in den C_{org} -Gehalt nach FAL umgerechnet. Für die Daten der NABO wurde ein standortspezifischer Umrechnungsfaktor aus Gubler et al. (2018) verwendet. Für die Körnung wählten Oberholzer et al. (1999) die Formel gemäss FAL: Ton + Schluff + Sand + Humus = 100%. In jenen Fällen, in welchen Ton + Schluff + Sand = 100% angegeben waren, wurde der benötigte C_{org} -Gehalt mit dem Faktor 1.725 in Humus umgerechnet (Humus = $C_{org} * 1.725$) und die Körnung dementsprechend angepasst. Zur Messung der Körnung wurde die FAL-Methode KOM verwendet (FAL, FAW, RAC; 1998). Der pH-Wert wurde an getrockneten Proben in einer $CaCl_2$ Lösung gemessen. Für alle Umrechnungen von C_{org} , und pH-Wert wurde der Mittelwert verwendet, falls mehrere Replikate pro Standort und Zeitpunkt vorhanden waren. Für die Körnung wurde in dem Fall nicht der Mittelwert genommen, sondern die erste Messung, damit das Verhältnis von Ton : Schluff : Sand nicht verändert wurde durch das Mitteln.

Sowohl die mikrobielle Biomasse (bestimmt mit der Fumigations-Extraktions-Methode (FE-C)) als auch die Basalatmung wurden gemäss den FAL-Methoden gemessen (FAL, FAW, RAC; 1998). Falls mehrere Replikate zeitgleich gemessen wurden, wurde sowohl für die FE-C als auch für die BA der Mittelwert pro Zeitpunkt und Standort verwendet. Die Basalatmung in der Gleichung 4 ist in $mg\ CO_2\ kg^{-1}\ Boden\ TS\ 24\ h^{-1}$, die Messwerte aus dem Bodendatensatz (NABODAT, 02.08.21) sind jedoch in $mg\ CO_2-C\ kg^{-1}\ TS\ h^{-1}$ angegeben. Letztere wurden in $mg\ CO_2\ kg^{-1}\ Boden\ TS\ 24\ h^{-1}$ umgerechnet, indem die Werte mit $(44 * 24 / 12)$ multipliziert wurde.

Falls eine Zeitreihe von einem Standort vorhanden war und die Messparameter pH-Wert, C_{org} , BA und BM zeitgleich gemessen wurden, wurde jeweils der neuste Messwert genommen. Wenn keine zeitgleiche Messung der Körnung vorhanden war, wurden die Körnungswerte der Ersterhebung verwendet. Dies betrifft sowohl die NABO- als auch einige der KABO-Standorte.

Für die Berechnungen wurden die Werte der Basalatmung, der mikrobiellen Biomasse, des C_{org} sowie des Ton- und Sandgehaltes mit dem natürlichen Logarithmus transformiert, wie dies auch bei Oberholzer et al. (1999) der Fall war. Ausnahme ist der Sandgehalt, der bei Oberholzer et al. (1999) nicht, in dieser Studie jedoch In-transformiert wurde.

Datensätze

Basierend auf der in Kap. 2.3 beschriebenen Datenharmonisierung konnten folgende Datensätze zusammengestellt werden (n = Anzahl Standorte):

- Grasland 0-10 cm (n = 33)
- Grasland 0-20 cm (n = 62)
- Acker 0-20 cm (n = 111)

Für spezielle Fragestellungen wurden folgende Teilmengen der oben genannten drei Datensätzen herangezogen (jeweils im Text erwähnt):

- hubs46 Acker 0-20 cm (n = 60, Walder et al. 2023), Messung ausschliesslich in Winterweizen.
- KABO BE Grasland 0-10 und 0-20 cm (n = 18), Messungen gleichzeitig in den zwei Beprobungstiefen.

2.3 Herleitung der neuen Referenzwertgleichungen

Um die neu hergeleiteten Referenzwertgleichungen mit den bestehenden Gleichungen vergleichen zu können, wurden für die Berechnung der mikrobiellen Biomasse (BM-FE) resp. Basalatmung (BA, pro Tag) dieselben Inputvariablen wie bei Oberholzer et al. (1999), Oberholzer und Scheid (2007) und VBB/BSA (2009) verwendet:

Mikrobielle Biomasse [$\text{mg C}_{\text{mik}} \text{ kg}^{-1} \text{ TS}$] / Basalatmung [$\text{mg CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ TS } 24 \text{ h}^{-1}$]

$$\ln(\text{BM} / \text{BA}) = z + a \ln(\text{C}_{\text{org}}) + b \ln(\text{pH}) + c \ln(\text{Ton}) + d \ln(\text{Sand}) \quad (6)$$

Um den Achsenschnittpunkt z und die Koeffizienten a , b , c und d für die erklärenden Variablen C_{org} -Gehalt, pH-Wert, Ton- und Sandgehalt zur Berechnung der mikrobiellen Biomasse (BM-FE) resp. Basalatmung (BA, pro Tag) ableiten zu können, wurde ein Klassifikations- und Regressions-Trainingsansatz verwendet (Kuhn, 2008). Die Datensätze wurden mittels geschichteter Zufallsstichprobe (stratified random split) in ein Trainingsset (80% der Daten) und ein Testset (20% der Daten) eingeteilt. Der Datensatz Grasland 0-10 cm ($n = 33$) wurde aufgrund der relativ geringen Anzahl Standorte mit 67% in das Trainingsset und 33% in das Testset unterteilt. Anschliessend wurde das Modell (Gleichung 6) mittels k -facher Kreuzvalidierung (Acker 0-20 cm: 10-fach mit 10 Wiederholungen; Grasland 0-20 cm und 0-10 cm: 5-fach mit 10 Wiederholungen) angepasst, so dass das gefittete Modell unter Verwendung der besten Koeffizienten herausgegeben werden konnte. Als Mass für die Übereinstimmung der hergeleiteten Referenzwerte und tatsächlichen Messwerte wurde der Standardfehler der Regression (root mean square error, RMSE) verwendet. Abschliessend wurden für alle Messwerte die entsprechenden Referenzwerte mit Hilfe der hergeleiteten Referenzwertgleichungen berechnet. Die relative Wichtigkeit der erklärenden Variablen C_{org} -Gehalt, pH-Wert, Ton- und Sandgehalt wurde basierend auf einem einfachen linearen Modell mittels Varianzdekomposition der de-korrelierten Regressoren abgeschätzt (Correlation-Adjusted (marginal) coRelation, CAR-scores; Zuber and Strimmer, 2011).

Die Vertrauensbereiche, die zur Beurteilung der Messwerte gebraucht werden, wurden mit dem Standardfehler der Schätzung (se_{est} ; standard error of estimate) für die \ln -transformierten Werte gebildet (analog zu Oberholzer et al. (1999) und VBB/BSA (2009); vgl. Kap. 2.1). Um die in dieser Studie angewendete Methodik resp. statistische Umsetzung zur Herleitung von Referenzwertgleichungen zu prüfen, wurden zunächst Referenzwertgleichungen für Ackerstandorte erstellt und anschliessend mit den bestehenden Gleichungen (1) und (4) von Oberholzer et al. (1999) verglichen (Kap.2.1). Hierfür wurden deren R^2 (gemessene Werte vs. berechnete Werte) als Mass für die Modelgüte (goodness of fit) verwendet. Als weitere Qualitätskontrolle der neu hergeleiteten Referenzwertgleichungen für Ackerstandorte diente der Vergleich der Beurteilung der Messwerte («sehr tief» bis «sehr hoch») – einmal anhand der bestehenden und einmal anhand der neuen Referenzwertgleichung.

Es wurde zudem geprüft, wie viele Daten notwendig sind, um einen möglichst repräsentativen Messbereich der mikrobiellen Biomasse und der Basalatmung abzudecken. Dafür wurden 50-mal zufällige Stichproben von $n = 10, 20, 30, \dots 100$ Proben gezogen und die Differenzen zwischen dem grössten und kleinsten Referenzwert pro Stichprobe berechnet. Die Differenzen wurden als Boxplots dargestellt und die notwendige Datenmenge, um eine robuste Referenzwertgleichung herzuleiten, wurde visuell abgeschätzt: Solange der durch die Zufallsstichprobe abgedeckte Bereich grösser wurde, können durch zusätzliche Stichproben neue Informationen gewonnen werden, so dass die Anzahl der Stichproben noch zu gering ist. Dabei gingen wir davon aus, dass sobald die Kurve flacher wird und die Varianz innerhalb der Boxplots abnimmt genügend Stichproben vorhanden sind, um die vorhandenen Bedingungen gut zu repräsentieren und um eine zuverlässige Gleichung herleiten zu können. Hinzukommend musste berücksichtigt werden, dass beim Erreichen der maximalen Anzahl n pro Datensatz, die Varianz auch abnimmt.

2.4 Unterschiedliche Beprobungstiefen

Je nach Bodenbeobachtungsprogramm werden Graslandstandorte von 0 bis in 10 cm oder 20 cm Tiefe beprobt. Damit beziehen sich die Messwerte auf unterschiedliche Bodentiefen, was eine gemeinsame Auswertung erschwert. Das KABO Bern misst die Basalatmung, die mikrobielle Biomasse (FE) und die Begleitparameter pH-Wert, C_{org} und Körnung sowohl in 0-10 cm als auch 0-20 cm Probenahmetiefe. Anhand der 18 Graslandstandorte des KABO BE wurde geprüft, ob die Werte aus 0-10 cm in die von 0-20 cm umgerechnet werden können. Hierfür wurde die Güte der linearen Beziehungen zwischen den Werten aus 0-10 cm und 0-20 cm Tiefe bestimmt (Spearman Korrelation, $Rho > 0.8$). Ein weiteres Kriterium war die Parallelität der Regressionslinie zur 1:1-Linie. Ist diese gegeben, lässt sich ein Umrechnungsfaktor ableiten, ohne auf komplexe Umrechnungen zurückgreifen zu müssen.

2.5 Software

Alle Berechnungen, Analysen und Visualisierungen wurden mit der R Umgebung (R Core Team, 2023) und den R Packages dplyr (Version 1.1.4; Wickham et al., 2023), caret (Version 6.0-93; Kuhn et al., 2022), relaimpo (Version 2.2-7; Groemping, 2006) und ggplot2 (Version 3.4.4; Wickham, 2016) durchgeführt.

3 Ergebnisse

3.1 Referenzwertgleichungen für Ackerstandorte

Im Folgenden werden die Referenzwertgleichungen für die mikrobielle Biomasse und Basalatmung für Ackerstandorte präsentiert, die zur Validierung der in dieser Studie angewendete Methodik resp. statistischen Umsetzung neu hergeleitet wurden. Diese basieren auf dem Datensatz «Acker 0-20 cm» (n = 111) (Tabelle 1).

Ackerstandorte, 0-20 cm Bodentiefe

Mikrobielle Biomasse FE [mg C_{mik} kg⁻¹ TS]

$$\ln(\text{BM-FE}) = 4.2746 + 0.7140 \ln(\text{C}_{\text{org}}) + 0.1181 \text{ pH} + 0.1803 \ln(\text{Ton}) + 0.1098 \ln(\text{Sand}) \quad (7)$$

Basalatmung [mg CO₂ kg⁻¹ TS 24 h⁻¹]

$$\ln(\text{BA}) = 1.8642 + 0.7236 \ln(\text{C}_{\text{org}}) + 0.1840 \text{ pH} - 0.0227 \ln(\text{Ton}) + 0.1678 \ln(\text{Sand}) \quad (8)$$

Für die mikrobielle Biomasse (Gleichung 7) beträgt der RMSE 0.24 und der Standardfehler der Residuen (se_{est}) 0.2424. Der RMSE der Gleichung für die Basalatmung (Gleichung 8) ist 0.32 und der se_{est} beträgt 0.3093. Der se_{est} der Gleichungen 7 und 8 und die daraus berechneten Grenzen für den Zustandsindikator Q (vgl.2.1) sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Grenzwerte für den Zustandsindikator Q basierend auf den Gleichungen 7 und 8 für «Acker 0-20 cm» für die mikrobielle Biomasse resp. Basalatmung.

	Mikrobielle Biomasse	Basalatmung
Grenze «sehr tief» zu «tief»	$e^{(-2*0.2424)} = 0.62$	$e^{(-2*0.3093)} = 0.54$
Grenze «tief» zu «normal»	$e^{(-0.2424)} = 0.78$	$e^{(-0.3093)} = 0.73$
Grenze «normal» zu «hoch»	$e^{(0.2424)} = 1.27$	$e^{(0.3093)} = 1.36$
Grenze «hoch» zu «sehr hoch»	$e^{(2*0.2424)} = 1.62$	$e^{(2*0.3093)} = 1.86$

In Abbildung 1 sind die anhand der neu hergeleiteten Referenzwertgleichungen (Gleichungen 7 und 8) berechneten Werte gegenüber den gemessenen Werten für den gesamten Datensatz dargestellt (blau). Zudem wurden die Werte auch gemäss den bestehenden Gleichungen, die in der Arbeitshilfe der VBB beschrieben sind, berechnet (VBB/BSA, 2009) und im selben Plot dargestellt (rot). Ein Vergleich der R² Werte der bestehenden (R²: 0.66 resp. 0.56) mit der neuen Gleichung (R²: 0.68 resp. 0.57) zeigt, dass die Referenzwerte mit beiden Ansätzen ähnlich genau berechnet werden können. Für die Basalatmung korrelieren die berechneten Werte weniger gut mit den gemessenen Werten als für die mikrobielle Biomasse, dies sowohl mit dem bestehenden als auch mit dem neuen Modell. Die beiden Regressionsgeraden für die Basalatmung verlaufen parallel, wobei sie sich in den Extrembereichen zunehmend von der 1:1-Linie entfernen.

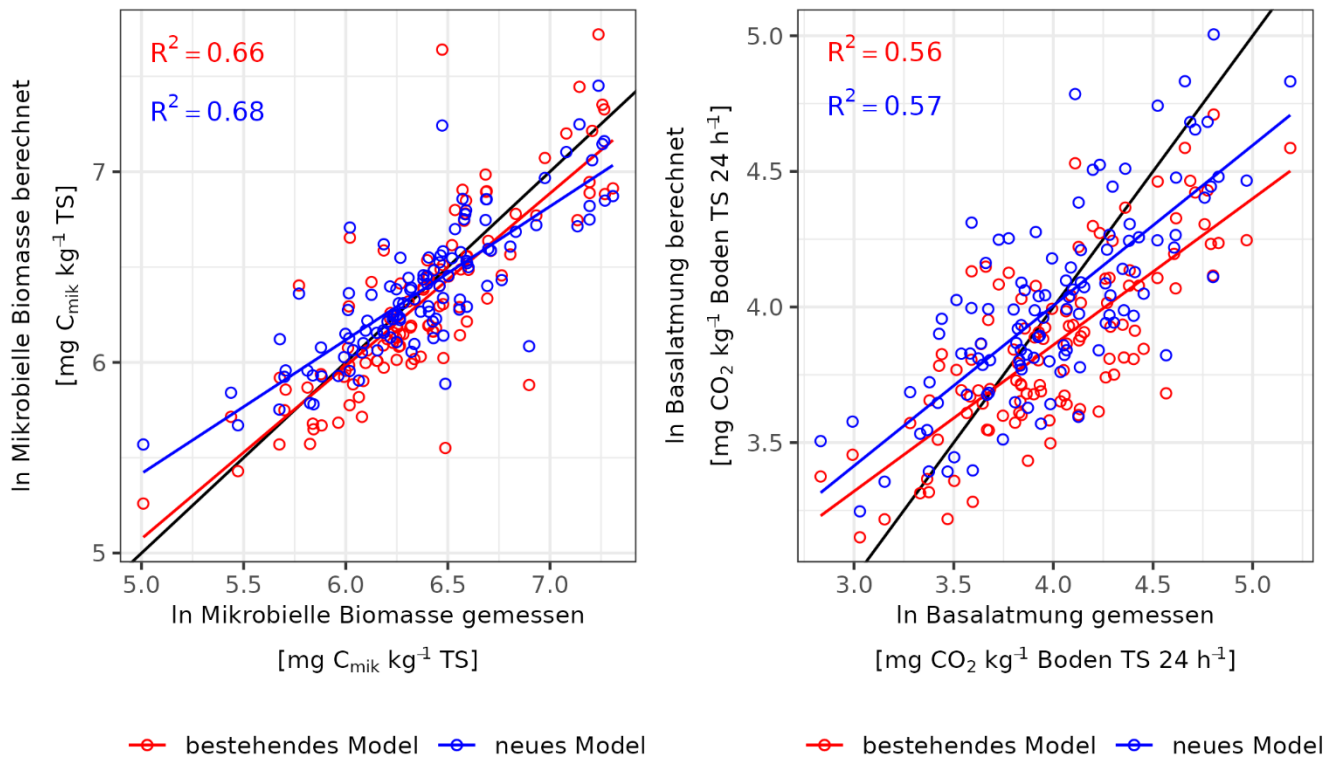


Abbildung 1: Berechnete Werte für die mikrobielle Biomasse (links) und Basalatmung (rechts) gemäss den Referenzwertgleichungen, welche mit dem Acker 0-20 cm Datensatz hergeleitet wurden, gegenüber den gemessenen Werten (beide logarithmiert), in Blau berechnet nach den neuen Gleichungen 7 und 8, in Rot nach den bestehenden Gleichungen 1 und 4. Jeder Datenpunkt entspricht einem Standort. Blaue und rote Linien stellen die linearen Beziehungen der berechneten und gemessenen Werte dar, die schwarze Linie ist die 1:1-Linie. Unterschiedliche Bewertung der Messwerte in Abhängigkeit der verwendeten Gleichung.

Die Bewertung der Messwerte fällt in Abhängigkeit der verwendeten Referenzwertgleichung (neu oder bestehend) unterschiedlich aus. 85 von 111 (77%) der gemessenen mikrobiellen Biomassewerte werden anhand der neuen Gleichung in dieselbe Kategorie eingeteilt wie mit der bestehenden Gleichung. Die restlichen Einteilungen sind meistens um eine Kategorie nach oben oder unten verschoben, wobei die bestehende Gleichung die Bewertungen eher eine Kategorie höher (73% der 26 anders eingestuftten Messungen) als tiefer (19% von 26 anders eingestuftten Messungen) einstuft (Tabelle 3). Bei der Basalatmung werden 61 von 111 (55%) der gemessenen Werte in dieselbe Kategorie eingeteilt. Für die anderen Werte fällt die Bewertung nach der bestehenden Referenzwertgleichung meist um eine Kategorie höher aus (84% der 50 anders eingestuftten Messungen) als nach der neuen Referenzwertgleichung und nur 3% der 50 anders eingestuftten Messungen werden in eine Kategorie tiefer eingeteilt (Tabelle 3).

Tabelle 3: Bewertung der mikrobiellen Biomasse und Basalatmung des Datensatzes «Acker 0-20 cm» (n = 111) nach den bestehenden und den neu hergeleiteten Referenzwerten.

Mikrobielle Biomasse			Basalatmung		
Bestehendes Modell	Neues Modell	Anzahl	Bestehendes Modell	Neues Modell	Anzahl
sehr hoch	sehr hoch	2	sehr hoch	sehr hoch	2
sehr hoch	hoch	1	sehr hoch	hoch	17
sehr hoch	normal	1	sehr hoch	normal	5
hoch	hoch	12	hoch	hoch	1
hoch	normal	14	hoch	normal	24
normal	normal	63	normal	normal	46
normal	tief	3	normal	tief	1
tief	normal	5	tief	normal	1
tief	tief	5	tief	tief	9
tief	sehr tief	1	tief	sehr tief	0
sehr tief	normal	1	sehr tief	normal	0
sehr tief	tief	0	sehr tief	tief	2
sehr tief	sehr tief	3	sehr tief	sehr tief	3

Einfluss einer einheitlichen Kultur auf die Qualität der Referenzwertgleichung

Um zu prüfen, ob sich die Qualität der hergeleiteten Referenzwertgleichungen verbessert, wenn diese auf einem Datensatz basiert, der von einer einheitlichen Kultur stammt, wurden Gleichungen für Ackerstandorte basierend auf dem hubs46 Datensatz mit ausschliesslich Winterweizen (Walder et al., 2023) hergeleitet (Gleichung 9 und 10).

Ackerstandorte, hubs46 Datensatz, 0-20 cm Bodentiefe

Mikrobielle Biomasse FE [mg C_{mik} kg⁻¹ TS]

$$\ln(\text{BM}) = 4.7415 + 0.8201 \ln(\text{C}_{\text{org}}) + 0.1596 \text{ pH} - 0.0315 \ln(\text{Ton}) + 0.0677 \ln(\text{Sand}) \quad (9)$$

Basalatmung, pro Tag [mg CO₂ kg⁻¹ TS 24 h⁻¹]

$$\ln(\text{BM}) = 1.4285 + 0.7848 \ln(\text{C}_{\text{org}}) + 0.1933 \text{ pH} - 0.0379 \ln(\text{Ton}) + 0.2715 \ln(\text{Sand}) \quad (10)$$

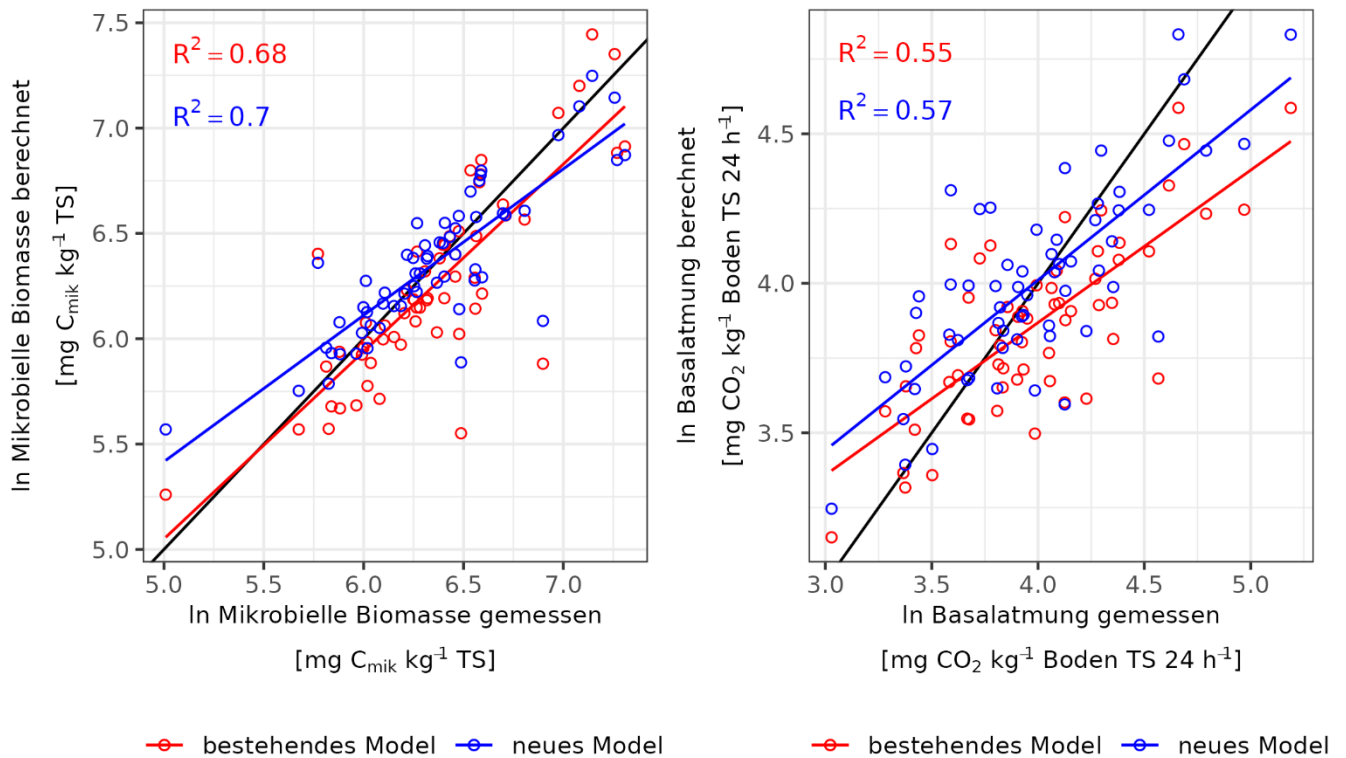


Abbildung 2: Berechnete Werte für die mikrobielle Biomasse (links) und Basalatmung (rechts) gemäss den Referenzwertgleichungen, welche mit dem **hubs46** Datensatz hergeleitet wurden, gegenüber den gemessenen Werten (beide logarithmiert), in Blau berechnet nach den neuen Gleichungen 9 und 10, in Rot nach den bestehenden Gleichungen 1 und 4. Jeder Datenpunkt entspricht einem Standort. Blaue und rote Linien stellen die linearen Beziehungen der berechneten und gemessenen Werte dar, die schwarze Linie ist die 1:1-Linie.

Das Verwenden von Daten, die auf Messungen von einer einheitlichen Kultur basieren, resultiert in einem ähnlich hohen R^2 (mikrobielle Biomasse: 0.7, $se_{\text{est}} = 0.2513$; Basalatmung: 0.57, $se_{\text{est}} = 0.3057$), wie das Verwenden eines heterogenen Datensatzes (mikrobielle Biomasse: 0.68; Basalatmung: 0.57, vgl. Abbildung 1). Der Unterschied zum R^2 der bestehenden Gleichung (mikrobielle Biomasse: 0.68; Basalatmung: 0.55) ist ebenfalls gering (Abbildung 2).

Fazit: Der Vergleich der bestehenden mit den neu hergeleiteten Gleichungen zeigt, dass das beschriebene Vorgehen zur Herleitung von Referenzwertgleichungen robuste Resultate ergibt.

3.2 Referenzwertgleichungen für Graslandstandorte

Basierend auf den Ergebnissen der Validierung mit dem Ackerstandorte-Datensatz, wurde mit derselben Vorgehensweise Referenzwertgleichungen für Graslandstandorte für die mikrobielle Biomasse und Basalatmung hergeleitet. Im Folgenden werden diese für eine Beprobungstiefe von 0-10 cm und 0-20 cm präsentiert.

Grasland, 0-10 cm Bodentiefe

Mikrobielle Biomasse FE [mg C_{mik} kg⁻¹ TS]

$$\ln(\text{BM-FE}) = 4.5245 + 0.7495 \ln(\text{C}_{\text{org}}) + 0.0133 \text{ pH} + 0.5646 \ln(\text{Ton}) + 0.0252 \ln(\text{Sand}) \quad (11)$$

Basalatmung, pro Tag [mg CO₂ kg⁻¹ TS 24 h⁻¹]

$$\ln(\text{BA}) = 4.9952 + 0.5794 \ln(\text{C}_{\text{org}}) + 0.1421 \text{ pH} - 0.3540 \ln(\text{Ton}) - 0.1655 \ln(\text{Sand}) \quad (12)$$

Grasland, 0-20 cm Bodentiefe

Mikrobielle Biomasse FE [mg C_{mik} kg⁻¹ TS]

$$\ln(\text{BM-FE}) = 1.7448 + 1.0460 \ln(\text{C}_{\text{org}}) + 0.0188 \text{ pH} + 0.6574 \ln(\text{Ton}) + 0.5879 \ln(\text{Sand}) \quad (13)$$

Basalatmung, pro Tag [mg CO₂ kg⁻¹ TS 24 h⁻¹]

$$\ln(\text{BA}) = 1.7480 + 0.9176 \ln(\text{C}_{\text{org}}) + 0.1172 \text{ pH} + 0.0329 \ln(\text{Ton}) + 0.2989 \ln(\text{Sand}) \quad (14)$$

Die berechneten Werte für die mikrobielle Biomasse und Basalatmung korrelieren mit $R^2 = 0.86$ und 0.56 mit den gemessenen Werten für die Bodentiefe 0-10 cm (Abbildung 3, oben) und mit $R^2 = 0.86$ und 0.69 für die Bodentiefe 0-20 cm (Abbildung 3, unten). Die se_{est} -Werte der Gleichungen 11 – 14 und die dazugehörigen Grenzwerte für die Bewertungsklassen «sehr tief» bis «sehr hoch» sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Der RMSE zeigt, dass der hergeleitete Referenzwert für die Basalatmung im Durchschnitt stärker vom tatsächlichen Messwert abweicht, als derjenige für die mikrobielle Biomasse (Tabelle 5). Im Vergleich zu den Ackerstandorten ist die Übereinstimmung der hergeleiteten Referenzwerte und tatsächlichen Messwerte für die Graslandstandorte insgesamt deutlich höher.

Tabelle 4: Grenzwerte für den Zustandsindikator Q basierend auf den Gleichungen 11–14 für «Grasland 0-10 cm» und «Grasland 0-20» für die mikrobielle Biomasse resp. Basalatmung.

		Mikrobielle Biomasse	Basalatmung
0 – 10 cm	Grenze «sehr tief» zu «tief»	$e^{(-2 \cdot 0.1456)} = 0.75$	$e^{(-2 \cdot 0.2595)} = 0.60$
	Grenze «tief» zu «normal»	$e^{(-0.1456)} = 0.86$	$e^{(-0.2595)} = 0.77$
	Grenze «normal» zu «hoch»	$e^{(0.1456)} = 1.17$	$e^{(0.2595)} = 1.30$
	Grenze «hoch» zu «sehr hoch»	$e^{(2 \cdot 0.1456)} = 1.34$	$e^{(2 \cdot 0.2595)} = 1.68$
0 – 20 cm	Grenze «sehr tief» zu «tief»	$e^{(-2 \cdot 0.2101)} = 0.66$	$e^{(-2 \cdot 0.2689)} = 0.58$
	Grenze «tief» zu «normal»	$e^{(-0.2101)} = 0.81$	$e^{(-0.2689)} = 0.76$
	Grenze «normal» zu «hoch»	$e^{(0.2101)} = 1.23$	$e^{(0.2689)} = 1.31$
	Grenze «hoch» zu «sehr hoch»	$e^{(2 \cdot 0.2101)} = 1.52$	$e^{(2 \cdot 0.2689)} = 1.71$

Tabelle 5: Übereinstimmung der hergeleiteten Referenzwerte mit den Messwerten (Standardfehler der Regression, RMSE) und Genauigkeit der hergeleiteten (besten) Referenzwertgleichung (Standardfehler se_{est}).

	RMSE	se_{est}
Acker 0-20 cm (n = 112)		
Mikrobielle Biomasse	0.24	0.2424
Basalatmung	0.32	0.3093
Grasland 0-20 cm (n = 62)		
Mikrobielle Biomasse	0.22	0.2101
Basalatmung	0.27	0.2689
Grasland 0-10 cm (n = 33)		
Mikrobielle Biomasse	0.17	0.1456
Basalatmung	0.27	0.2595

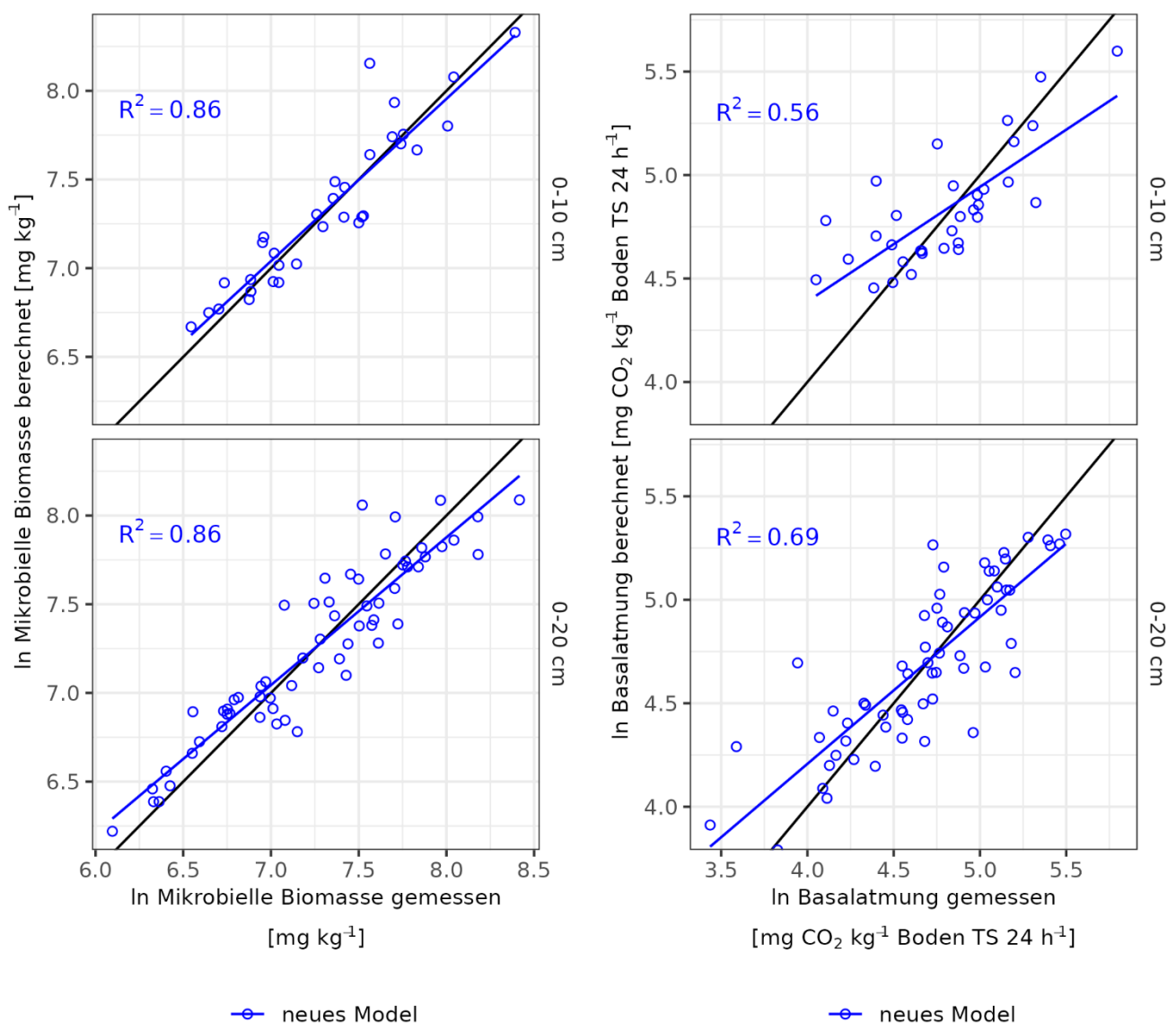


Abbildung 3: Berechnete Werte für die mikrobielle Biomasse (links) und Basalatmung (rechts) gemäss den Referenzwertgleichungen, welche mit den **Grasland 0-10 cm** (oben) und **Grasland 0-20 cm** (unten) Datensätzen hergeleitet wurden, gegenüber den gemessenen Werten (beide logarithmiert), berechnet nach den Gleichungen 11-14. Jeder Datenpunkt entspricht einem Standort. Die blaue Linie stellt die linearen Beziehungen der berechneten und gemessenen Werte dar, die schwarze Linie ist die 1:1-Linie.

3.3 Wichtigste erklärende Variablen der Referenzwertgleichungen

Um die in dieser Studie hergeleiteten Referenzwerte resp. Bewertungen für Graslandstandorte mit jenen der Ackerstandorte vergleichen zu können, wurden dieselben erklärenden Variablen wie bei Oberholzer et al. (1999) und VBB/BSA (2009) verwendet. Zusätzlich wurde hier getestet, welche dieser Variablen den grössten relativen Anteil an der erklärten Varianz haben. Sowohl für die mikrobielle Biomasse als auch für die Basalatmung ist der C_{org} -Gehalt mit Abstand der bedeutendste Faktor, um die Varianz der hergeleiteten mikrobiellen Werte zu erklären (Abbildung 4). Der zweitwichtigste Faktor für die mikrobielle Biomasse ist der Tongehalt, für die Basalatmung der pH-Wert.

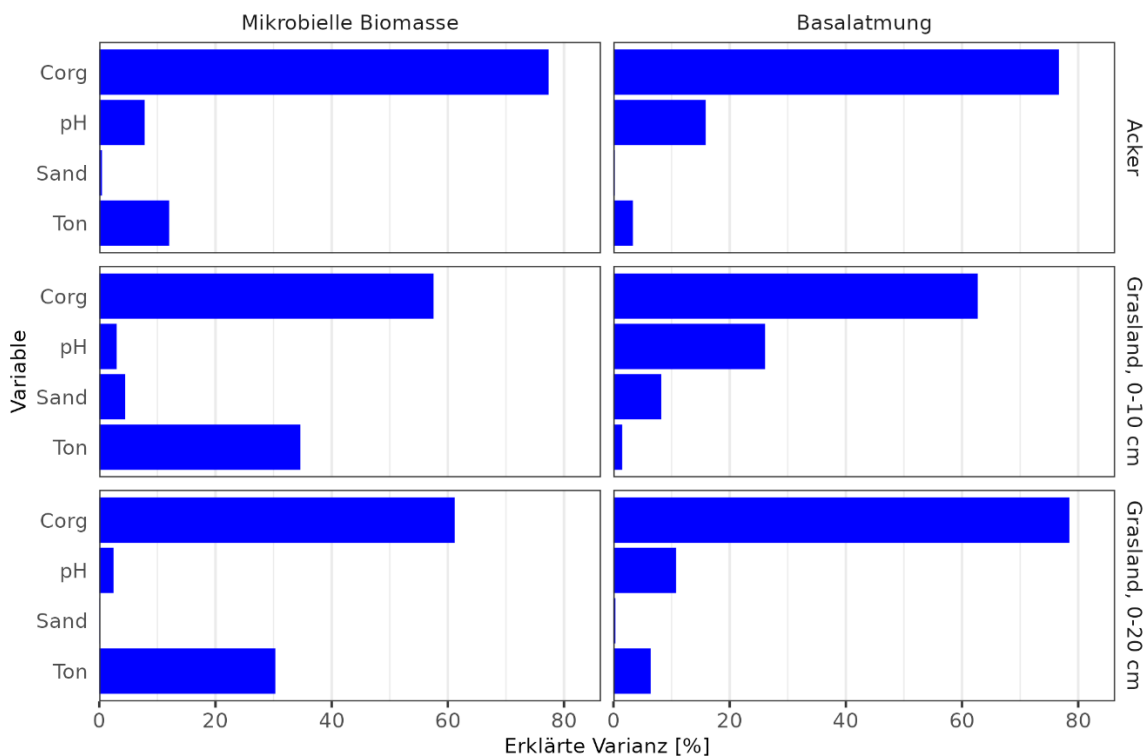


Abbildung 4: Erklärte Varianz (CAR scores) in der berechneten mikrobiellen Biomasse (links) und Basalatmung (rechts) durch die verwendeten Inputvariablen C_{org} , pH-Wert ($CaCl_2$), Sand- und Tongehalt.

3.4 Überprüfung der Datenmenge zur Erstellung von Referenzwertgleichungen

Die Anzahl der Datenpunkte, die erforderlich ist, um einen möglichst repräsentativen Messbereich mit der Referenzgleichung abzubilden, ist von entscheidender Bedeutung. Anhand der Datensätze «Acker 0-20 cm» ($n = 111$) und «Grasland 0-20 cm» ($n = 62$) und «Grasland 0-10 cm» ($n = 33$) wurde für die Basalatmung und die mikrobielle Biomasse abgeschätzt, wie viele Daten notwendig sind, um einen möglichst repräsentativen Messbereich abzudecken. Abbildung 5 zeigt, dass der Messbereich (Differenz max. - min.) für die mikrobielle Biomasse bei ca. 70 Proben für Ackerstandorte und ca. 30 für Graslandstandorte über alle Stichproben konstant wird, die Varianz zwischen den Stichproben kleiner wird und somit der Messbereich mit dieser Probenzahl gut abgebildet werden kann. Zur Herleitung der Basalatmung wiederum, die grundsätzlich einen grösseren Schwankungsbereich aufweist, werden rund 90 Proben für Ackerstandorte und ca. 50 Proben für Graslandstandorte benötigt.

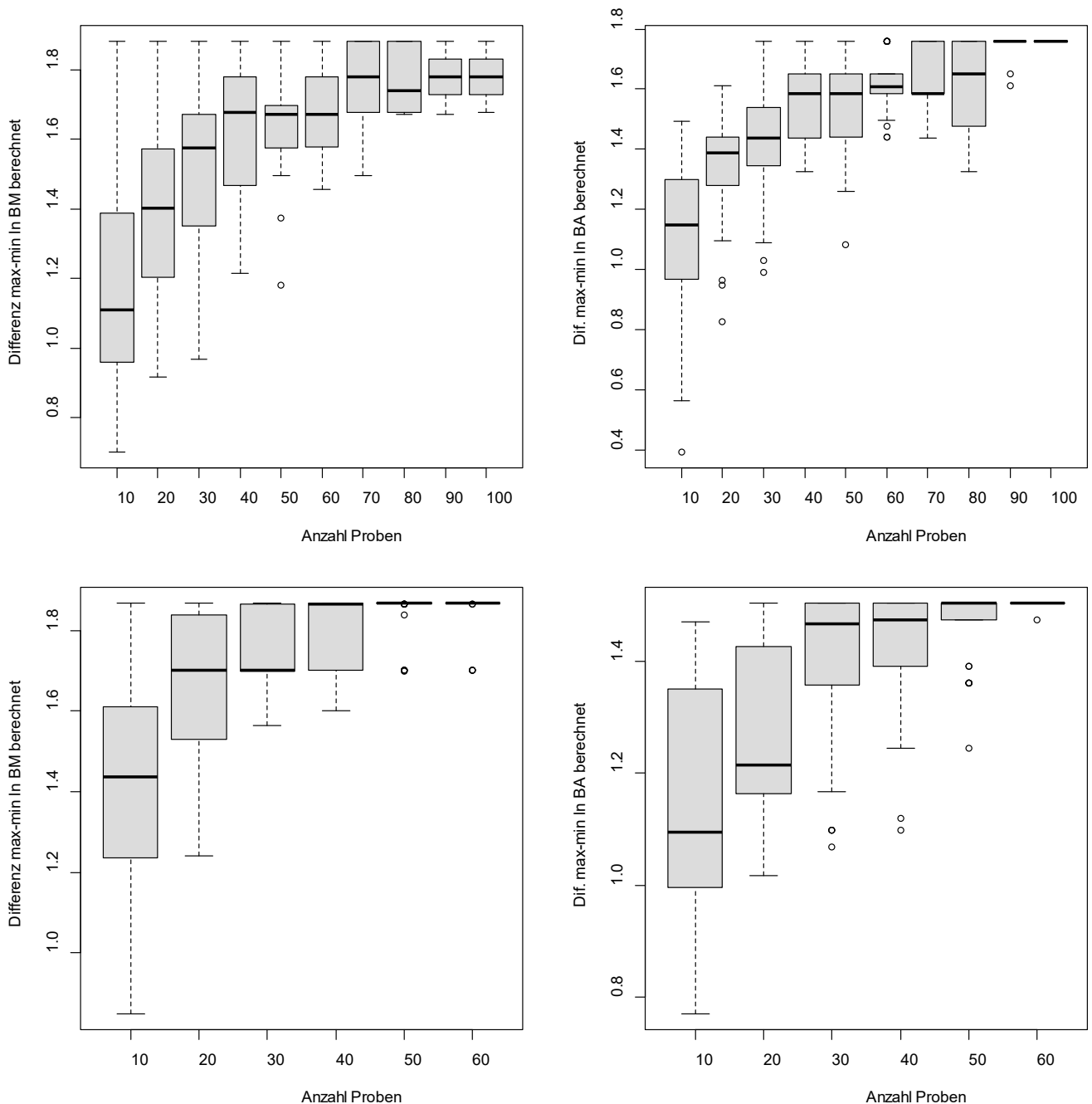


Abbildung 5: Differenzen zwischen dem grössten und kleinsten Referenzwert für 50 zufällig gezogene Stichproben pro Stichprobenumfang für die mikrobielle Biomasse (links) und die Basalatmung (rechts) oben für die Ackerstandorte ($n = 111$) und unten für die Graslandstandorte mit Beprobungstiefe 0-20 cm ($n = 62$).

3.5 Umrechnungsfaktoren für Werte aus unterschiedlichen Beprobungstiefen

Anhand der 18 Graslandstandorte des KABO BE konnte geprüft werden, ob eine Umrechnung der Werte aus einer Probenahmetiefe von 0-10 cm auf jene von 0-20 cm möglich ist. Die Werte für die mikrobielle Biomasse, die Basalatmung, den C_{org} -Gehalt und den pH verlaufen parallel zur 1:1 Linie und können daher mit einem messparameter-spezifischen Faktor umgerechnet werden (Tabelle 6 und Abbildung 8). Bei der Körnung ist besonders beim Tongehalt keine gute Korrelation der Werte aus 0-10 cm und 0-20 cm Beprobungstiefe vorhanden. Beim Sand besteht zwar ein linearer Zusammenhang, die Regressionsgerade zeigt jedoch keine Parallelität zur 1:1-Linie. Da sich Sand-, Schluff- und Tongehalte ergänzen und der Tongehalt schlecht abgeschätzt werden kann, wurde für die Körnung gesamthaft kein Umrechnungsfaktor angegeben.

Tabelle 6: Umrechnungsfaktoren von 0-10 cm auf 0-20 cm Beprobungstiefe für Grasland.

Messparameter	Rho, p (0-10 cm vs. 0-20 cm)	Umrechnung 0-10 cm auf 0-20 cm Tiefe
Mikrobielle Biomasse (BM-FE) [mg C _{mik} kg ⁻¹ TS]	0.93, p < 0.001	BM (20 cm) = 0.73 * BM (10 cm)
Basalatmung (BA) [mg CO ₂ kg ⁻¹ Boden TS 24 h ⁻¹]	0.82, p < 0.001	BA (20 cm) = 0.64 * BA (10 cm)
C _{org} FAL [Gew. %]	0.93, p < 0.001	C _{org} (20 cm) = 0.80 * C _{org} (10 cm)
pH (CaCl ₂)	0.99, p < 0.001	pH (20 cm) = 0.99 * pH (10 cm)
Ton [%]	0.46, p = 0.060	
Sand [%]	0.84, p < 0.001	

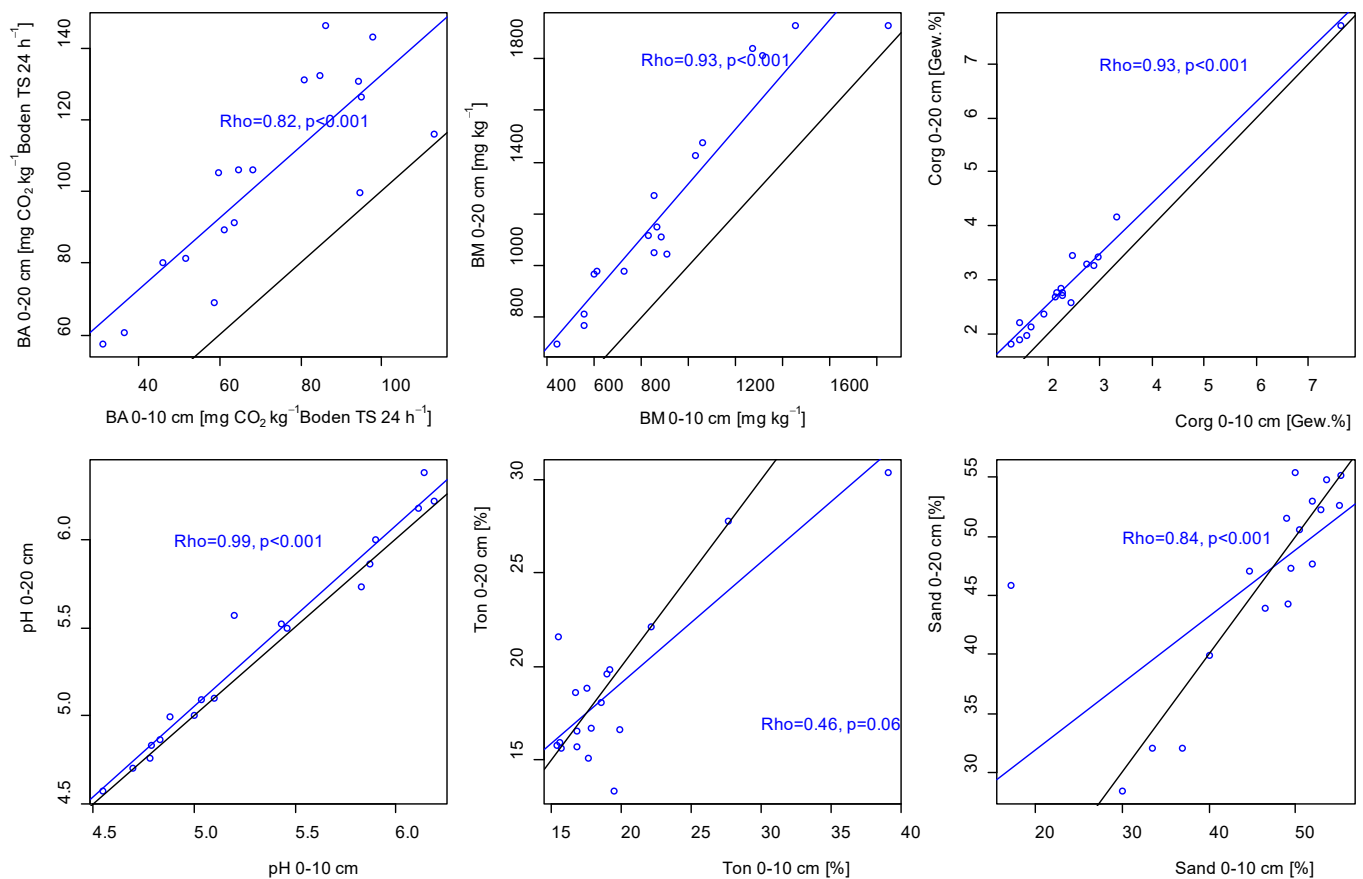


Abbildung 6: Vergleich der Messparameter Basalatmung, mikrobielle Biomasse, C_{org}, pH-Wert, Ton- und Sandgehalt in 0-10 cm vs. 0-20 cm Beprobungstiefe für Grasland (n = 18) (beide logarithmiert). Blaue Linie: Lineare Beziehung der Messwerte 0-10 cm und Messwerte 0-20 cm, schwarze Linie: 1:1-Linie.

4 Diskussion

Referenzwertgleichungen für Grasland 0-20 cm und Grasland 0-10 cm

Mit den hier ausgewerteten Daten zur mikrobiellen Biomasse und zur Basalatmung konnten neue Referenzwertgleichungen für Graslandstandorte abgeleitet werden, die die beiden Beprobungstiefen 0-10 cm und 0-20 cm berücksichtigen. Die hier eingeführten Referenzwertgleichungen erlauben die Berechnung robuster Referenzwerte für die mikrobielle Biomasse und die Basalatmung von Grasland, insbesondere für die Beprobungstiefe von 0-20 cm. Die Referenzwertgleichungen weisen für beide Beprobungstiefen für die mikrobielle Biomasse relativ hohe R^2 -Werte (berechneter vs. gemessener Wert) auf.

Die Referenzwertgleichungen für Grasland zeigen eine etwas bessere Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Werten als die für Ackerland. Die höheren R^2 -Werte für Graslandstandorte deuten darauf hin, dass Referenzwerte für Dauerkulturen ohne Fruchtfolge besser herzuleiten sind als für Ackerkulturen. Wobei auch im Datensatz, der auf einer standardisierten Kultur (hubs46) basiert, die Referenzwertgleichungen im Vergleich zum Gesamtdatensatz aus verschiedenen Kulturen nicht eindeutig besser waren. Die Fruchtfolge scheint also nicht der einzige Grund für die geringere Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Werte der Ackerstandorte zu sein. Ackerstandorte unterscheiden sich auch in anderen Bewirtschaftungspraktiken vom Grasland, wie z.B. der Bodenbearbeitung, die ebenfalls einen entscheidenden Einfluss auf die mikrobiellen Parameter haben können (de Brito Ferreira et al. 2010, Hungria et al. 2009). Zudem stehen die höheren R^2 Werte der Grasland-Referenzwertgleichungen möglicherweise auch mit den engeren Wertebereichen von mikrobiellen Messwerten auf Graslandstandortkollektiven im Zusammenhang (Hug et al., 2018).

Es zeigte sich auch, dass die Referenzwertgleichungen sowohl für Acker- als auch für Graslandstandorte für die Basalatmung im Mittel stärker von den tatsächlichen Messwerten abweichen als für die mikrobielle Biomasse, was frühere Ergebnisse von Oberholzer et al. (1999) und VBB/BSA (2009) unterstützt. Die berechneten Werte zeigten insbesondere für hohe und tiefe Basalatmungswerte grössere Abweichungen von den tatsächlich gemessenen Werten, insbesondere auf Ackerstandorten.

Für die Erstellung einer robusten Referenzgleichung ist eine ausreichende Datenbasis entscheidend. Dies sollte mit dem vorliegenden Ackerstandorte-Datensatz getestet werden, in dem mit Hilfe einer visuellen Abschätzung analysiert wurde, ob mit zusätzlichen Daten die Variabilität der ermittelten Referenzwerte weiter abnimmt oder ob bereits ein Plateau erreicht ist, was auf eine ausreichende Datenlage hindeuten würde. Für die Ableitung der Referenzwertgleichungen erscheint der Datensatz «Acker 0-20 cm» mit $n = 111$ ausreichend – die Variabilität sinkt mit zusätzlichen Daten nicht mehr. Beim Datensatz «Grasland 0-20 cm» mit $n = 62$ erscheint die Variabilität ähnlich klein wie beim grösseren Datensatz «Acker 0-20 cm». Wenn der Datensatz «Grasland 0-10 cm» mit seinen 33 Proben anhand der Variabilität des grösseren Datensatzes «Grasland 0-20 cm» beurteilt wird, zeigt dieser noch eine hohe Variabilität der Basalatmung bei der Kategorie mit 30 Proben auf, die noch weit vom Plateau entfernt ist. Da bei Grünlandstandorten im Allgemeinen eine geringere Variabilität der Daten zu erwarten ist, da es keine Änderungen der Kultur und der Bodenbearbeitung wie bei Ackerland gibt, kann davon ausgegangen werden, dass kleinere Stichprobengrößen ausreichen, um robuste Referenzwertgleichungen zu erhalten. Das Muster im Datensatz «Grünland 0-20 cm» ($n = 62$) deutet darauf hin, dass die Variabilität ab ca. 30 Proben für die mikrobielle Biomasse und ab ca. 50 Proben für die Basalatmung nicht weiter abnimmt und ein Plateau erreicht, was ein weiterer Hinweis darauf ist, dass für den Datensatz «Grasland 10 cm» noch weitere Daten für eine robuste Ableitung von Referenzwertgleichungen benötigt werden. Der Erweiterung der bodenbiologischen Datenbasis sollte daher auch in Zukunft eine hohe Priorität eingeräumt werden.

Erklärende Variablen

Eine Prüfung der Wichtigkeit der in dieser Studie verwendeten erklärenden Variablen für die mikrobielle Biomasse hat ergeben, dass der Gehalt an organischem Kohlenstoff am bedeutendsten ist, gefolgt vom Tongehalt und pH-Wert. Dies deckt sich auch mit weiteren Studien, die diese Variablen als Haupteinfluss für die mikrobielle Biomasse definierten (Fierer et al., 2009, Horrigue et al., 2016; Terrat et al., 2017; Rutgers et al., 2019). Im Vergleich zur

mikrobiellen Biomasse scheint es bei der Basalatmung neben dem organischen Kohlenstoff ein weniger eindeutiges Muster der Wichtigkeit der verwendeten Variablen zu geben.

Das Einbeziehen von möglichen weiteren erklärenden Variablen könnte die Genauigkeit von hergeleiteten standort-typischen Referenzwerten verbessern, insbesondere für die Basalatmung. Ein Faktor, der bisher unbeachtet blieb, sind die für biologische Prozesse im Boden relevanten klimatischen Bedingungen wie Jahrestemperatur und Niederschlagsmittel. Sernaz-Chavez et al. (2013) definierten Temperatur und Niederschlag resp. Feuchtigkeitsvariablen als wichtigste Inputgrößen für die mikrobielle Biomasse, gefolgt vom pH-Wert und Bodennährstoffen (N_{tot}). Fierer et al. (2009) nennen zudem als wichtigen Einflussfaktor die Pflanzenproduktivität, um die mikrobielle Biomasse zu berechnen. Des Weiteren könnten beispielsweise Kohlenstofffraktionen (Wang et al., 2017), Kationenaustauschkapazität, die aktuelle Feldfrucht (Adhikari et al., 2023) oder bodenphysikalische Messgrößen (Terrat et al., 2017) miteinbezogen werden. Auch die Wasserhaltekapazität und Nährstoffe wie Kalium und Stickstoff können Einfluss auf die mikrobielle Biomasse haben, wie bei Richter et al. (2018) für Graslandstandorte in Irland gezeigt wurde. Die Ergebnisse dieser Studien legen die Vermutung nahe, dass der Einbezug weiterer erklärender Variablen für die Berechnung von Referenzwerten für mikrobielle Bodenparameter eine Verbesserung bringen können. Um eine direkte Vergleichbarkeit mit den bestehenden Referenzwertgleichungen (Oberholzer et al. 1999, Oberholzer und Scheid 2007, VBB/BSA 2009) zu haben, wurde hier aber darauf verzichtet weitere erklärende Variablen einzubeziehen. Die mit den Referenzwertgleichungen berechneten mikrobielle Biomasse- und Basalatmungswerte können eine wichtige Grundlage zur Weiterverwendung in Modellen bilden: beispielsweise als Inputgrößen in Earth system models von globalen oder nationalen Kohlenstoffkreisläufen (Wieder et al., 2013; Wang et al., 2017). Dies zeigt die Wichtigkeit auf, solche Referenzwertgleichungen zukünftig noch weiter zu entwickeln um die Messwerte, insbesondere der Basalatmung, noch besser abbilden zu können.

Unterschiedliche Bewertung der Messwerte in Abhängigkeit der verwendeten Gleichung

Die abgeleiteten Referenzwertgleichungen erlauben eine qualitative Beurteilung der Messwerte, beispielsweise gemäss dem Beurteilungsschema von Oberholzer et al. (1999). In dieser Studie fiel diese Bewertung der mikrobiellen Messwerte, in Abhängigkeit der verwendeten Referenzwerte (bestehende oder neu hergeleitete), teilweise unterschiedlich aus. Sowohl bei der mikrobiellen Biomasse als auch bei der Basalatmung werden mit den neuen Gleichungen die Werte tendenziell eine Stufe tiefer bewertet, wobei dies bei der Basalatmung ausgeprägter ist als bei der mikrobiellen Biomasse. Diese systematische Verschiebung lässt den Schluss zu, dass die beiden Referenzwertgleichungen (neu und bestehend) zwar ähnlich genau Basalatmungswerte herleiten können, dass jedoch die bisherigen errechneten Referenzwerte eine tendenzielle Überschätzung in der qualitativen Beurteilung darstellen.

Umrechnungsfaktoren für Werte aus unterschiedlichen Beprobungstiefen

Die hier präsentierten Umrechnungsfaktoren für die Basalatmung, die mikrobielle Biomasse, C_{org} und pH-Wert erlauben, Daten aus unterschiedlichen Messnetzen mit unterschiedlichen Probenahmetiefen zu harmonisieren, zusammen auszuwerten und zu interpretieren. Dies würde zum einen die Möglichkeit eröffnen, die Datenbasis der vergleichsweise seltenen bodenbiologischen Messwerte zu bündeln und somit zu erweitern. Andererseits erlaubt der Umrechnungsfaktor die Fortsetzung einer Zeitreihe, auch wenn die Probenahmetiefe geändert würde. Die Zusammenführung ist jedoch generell nicht unproblematisch und zeigt insbesondere bei der Körnung Schwierigkeiten auf, wo die Korrelationen im vorliegenden Datensatz, insbesondere beim Tongehalt, sehr gering waren. Da die Körnung für die Referenzwertgleichungen der mikrobiellen Biomasse und Basalatmung auch eine wichtige erklärende Variable ist, wurden für diese Studie die Werte nicht umgerechnet.

Die Umrechnungsfaktoren für die beiden Bodentiefen 0-10 cm und 0-20 cm basieren auf einer relativ geringen Datenmenge. Falls die Beprobungstiefe von einem Bodenmonitoring geändert oder Daten mit unterschiedlichen Beprobungstiefen gemeinsam ausgewertet werden sollten, sind verlässliche Umrechnungsfaktoren notwendig. Hierfür empfehlen wir einmalig zeitgleich eine Beprobung aller Standorte in 0-10 cm und 0-20 cm Bodentiefe durchzuführen und neben den mikrobiellen Messgrößen auch den C_{org} , pH-Wert und den Ton- und Sandgehalt zu analysieren.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit der vorliegenden Studie konnten die Referenzwertgleichungen für die mikrobielle Biomasse und die Basalatmung fürs Grasland erweitert werden. Ein Vergleich der bestehenden mit den neu hergeleiteten Gleichungen zeigte, dass die neuen Gleichungen den bestehenden sehr ähnlich sind und diese bestätigen. Die auf den Referenzwerten basierenden Beurteilungen jedoch fallen je nach verwendetem Modell leicht unterschiedlich aus. Deshalb wird empfohlen, für Ackerstandorte weiterhin die bestehenden Modelle gemäss VBB/BSA (2009) zu verwenden.

Diese Studie liefert erste Referenzwertgleichungen für Graslandstandorte im Schweizer Mittelland. Für eine erste Beurteilung von mikrobiellen Messwerten von Graslandstandorten können die Referenzwertgleichungen für die Beprobungstiefe von 0-20 cm verwendet werden. Die Auswertungen weisen aber darauf hin, dass der Datensatz für die Beprobungstiefe 0-10 cm noch nicht genügend gross war, um diese Arbeiten als abgeschlossen zu betrachten. Um verlässlichere Referenzwerte herzuleiten braucht es für die 0-10 cm Beprobungstiefe grundsätzlich eine grössere Datenbasis.

Für die Basalatmung zeigen die Referenzwertgleichungen eine eher tiefe Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Werten. Weitere erklärende Variablen könnten hier einbezogen werden, wobei klimatische Variablen am vielversprechendsten erscheinen, um dies in Zukunft zu verbessern. Für den Vollzug interessant könnte auch die Herleitung von Referenzwerten für Alpstandorte, für intensiv genutzte Graslandstandorte im Mittelland, getreideorientierten Ackerbau etc. sein. Dies würde bedingen, dass die Nutzungsklassen (Acker, Grasland) feiner unterteilt würden.

Die mikrobiologischen Summenparameter sind bisher die einzigen bodenbiologischen Parameter, für die standort-spezifische Referenzwerte vorliegen. Dadurch sind sie einerseits für den Vollzug, aber auch für umweltpolitische Entscheidungsträger von grosser Bedeutung. Darüber hinaus sind solche Referenzwerte für mikrobielle Bodeneigenschaften ein erster Schritt, um mikrobielle Prozesse - wie z.B. die Veratmung von Bodenkohlenstoff - in Modellierungen globaler oder nationaler Kohlenstoffkreisläufe zu integrieren.

Literaturverzeichnis

- Adhikari, K., Anderson, K.R., Smith, D.R., Owens, P.R., Moore, P.A. & Libohova, Z., 2023. Identifying key factors controlling potential soil respiration in agricultural fields. *Agricultural & Environmental Letters*, 8.
- Ferreira, E.P.B. dos Santos, H.P., Riberio Costa, J., De-Polli, H., Rumjanek, N.G. 2010. Microbial soil quality indicators under different crop rotations and tillage management. *Rev. Ciênc. Agron.* 41, 117-183.
- FAL, FAW, RAC (1998). Schweizerische Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten, Band 2, Bodenuntersuchung zur Standortcharakterisierung.
- Fierer, N. & Jackson, R.B., 2006. The diversity and biogeography of soil bacterial communities. *Proc Natl Acad Sci U S A.*; 103: 626–631. <https://doi.org/10.1073/pnas.0507535103> PMID: 16407148
- Groemping, U., 2006. "Relative Importance for Linear Regression in R: The Package relaim-po." *Journal of Statistical Software*, 17(1), 1–27.
- Gubler, A., Wächter, D., Schwab, P., 2018. Homogenisierung von Bodenkohlenstoff-Daten: Harmonisierung der Resultate aus Nassoxidation (FAL-Methode) und Trockenveraschung. *AgroscopeScience* 62, 2018.
- Gubler, A., Meuli, R., Keller, A. 2020. Bedürfnisse der Kantone und des Bundes rund um ein Monitoring der Ressource Boden. Nationale Bodenbeobachtung, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU). Verfügbar unter: www.nabo.ch.
- Horrigue, W., Dequiedt, S., Chemidlin, Pre´vost-Boure´ N., Jolivet, C., Saby, NPA., Arrouays, D., et al., 2016. Predictive model of soil molecular microbial biomass. *Ecol Indic.* Elsevier Ltd; 64: 203–211.
- Horwitz, W. & Albert, R., 2006. The Horwitz Ratio (HorRat): A useful index of method performance with respect to precision. *J. AOAC Int.*, 89: pp. 1095-1109.
- Hug, A.S., Moll, J., Gubler, A., 2021. Monitoring Bodenbiologie. Auswertung bodenmikrobiologischer Daten von kantonalen und nationalen Bodenbeobachtungsstandorten. *AgroscopeScience* 110, 2021.
- Hungria M., Franchini, J.C., Brandão-Junior, o., Kaschuk, G., Souza, R.A., 2009. Soil microbial activity and crop sustainability in a long-term experiment with three soil-tillage and two crop-rotation systems. *Applied Soil Ecology*, 42, 288-296.
- Jansa, J., Erb, A., Oberholzer, H.-R., Smilauer, P., Egli, S., 2014. Soil and geography are more important determinants of indigenous arbuscular mycorrhizal communities than management practices in Swiss agricultural soils. *Molecular Ecology*, 23, 2118-2135.
- Kuhn, M., 2008. Building Predictive Models in R Using the caret Package. *Journal of Statistical Software*, 28(5), 1–26. <https://doi.org/10.18637/jss.v028.i05>
- Mösch, D. & Hunziker, M., 2015. 10 Jahre Bodenmikrobiologie-Monitoring. *UMWELT AARGAU Sondernummer* 45, 11-15.
- Oberholzer, H.-R., Rek, J., Weisskopf, P., Walther, U., 1999. Evaluation of soil quality by means of micro-biological parameters related to the characteristics of individual arable sites. *Agribiological Rese-arch* 52 (2), 113–125.
- Oberholzer, H.-R. & Scheid, S., 2007. Bodenmikrobiologische Kennwerte. Erfassung des Zustands landwirtschaftlicher Böden im NABO-Referenzmessnetz anhand biologischer Parameter (NABObio). *Umwelt-Wissen* Nr. 0723. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.
- Richter, A., Huallacháin, D. Ó., Doyle, E., Clipson, N., Van Leeuwen, J. P., Heuvelink, G. B., Creamer, R. E., 2018. Linking diagnostic features to soil microbial biomass and respiration in agricultural grassland soil: a large-scale study in Ireland. *European Journal of Soil Science*, 69, 414-428.
- Schwab, P, Weisskopf, P., Oberholzer, H.R., Scheid, S., Berli, M., 2006. Langzeitbeobachtung von physikalischen und biologischen Bodeneigenschaften Pilotprojekt LAZBO. Teil 4 Folgerungen, Empfehlungen und Ausblick für die Langzeitbeobachtung. Hrsg. Agroscope FAL Reckenholz, Zürich, 37 S.

- Serna-Chavez, H.M., Fierer, N., Van Bodegom, P.M., 2013. Global drivers and patterns of microbial abundance in soil. *Glob Ecol Biogeogr.*; 22: 1162–1172.
- Terrat, S., Horigue, W., Dequiedt S., Saby, N.P.A., Lelièvre, M., Nowak, V., et al., 2017. Mapping and predictive variations of soil bacterial richness across France. *PLoS ONE* 12(10): e0186766. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186766>.
- VBB/BSA 2009. Arbeitshilfe zur Anwendung und Interpretation bodenbiologischer Parameter. Arbeitsgruppe Vollzug Bodenbiologie VBB/BSA, Frick.
- VOL, Volkswirtschaftsdirektion des Kantons Bern, 2017. Bodenbericht 2017. 129 S.
- VBBö, 1998. Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBö) vom 1. Juli 1998, Stand 12.04. 2016. SR 814.12.
- Walder, F., Büchi, L., Wagg, C., Colombi, T., Banerjee, S., Hirte, J., Mayer, J., Six, J., Keller, T., Charles, R., van der Heijden, M. G. A., 2023. Synergism between production and soil health through crop diversification, organic amendments and crop protection in wheat-based systems. *Journal of Applied Ecology*, 60, 2091–2104. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14484>
- Wang, K., Peng, C., Zhu, Q., Zhou, X., Wang, M., Zhang, K., Wang, G., 2017. Modeling global soil carbon and soil microbial carbon by integrating microbial processes into the ecosystem process model TRIPLEX-GHG. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 9. <https://doi.org/10.1002/2017MS000920>.
- Wickham, H., 2016. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. ISBN 978-3-319-24277-4, <https://ggplot2.tidyverse.org>.
- Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K., Vaughan, D., 2023. *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. R package version 1.1.4, <https://github.com/tidyverse/dplyr>
- Wieder, W. R., Bonan, G. B., Allison, S. D., 2013. Global soil carbon projections are improved by modelling microbial processes. *Nature Climate Change*, 3(10), 909–912. <https://doi.org/10.1038/nclimate1951>.
- Zuber, V., and K. Strimmer., 2011. High-dimensional regression and variable selection using CAR scores. *Statist. Appl. Genet. Mol. Biol.* 10: 34. DOI:10.2202/1544-6115.1730

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Berechnete Werte für die mikrobielle Biomasse (links) und Basalatmung (rechts) gemäss den Referenzwertgleichungen, welche mit dem Acker 0-20 cm Datensatz hergeleitet wurden, gegenüber den gemessenen Werten (beide logarithmiert), in Blau berechnet nach den neuen Gleichungen 7 und 8, in Rot nach den bestehenden Gleichungen 1 und 4. Jeder Datenpunkt entspricht einem Standort. Blaue und rote Linien stellen die linearen Beziehungen der berechneten und gemessenen Werte dar, die schwarze Linie ist die 1:1-Linie. Unterschiedliche Bewertung der Messwerte in Abhängigkeit der verwendeten Gleichung.....	14
Abbildung 2: Berechnete Werte für die mikrobielle Biomasse (links) und Basalatmung (rechts) gemäss den Referenzwertgleichungen, welche mit dem hubs46 Datensatz hergeleitet wurden, gegenüber den gemessenen Werten (beide logarithmiert), in Blau berechnet nach den neuen Gleichungen 9 und 10, in Rot nach den bestehenden Gleichungen 1 und 4. Jeder Datenpunkt entspricht einem Standort. Blaue und rote Linien stellen die linearen Beziehungen der berechneten und gemessenen Werte dar, die schwarze Linie ist die 1:1-Linie.....	16
Abbildung 3: Berechnete Werte für die mikrobielle Biomasse (links) und Basalatmung (rechts) gemäss den Referenzwertgleichungen, welche mit den Grasland 0-10 cm (oben) und Grasland 0-20 cm (unten) Datensätzen hergeleitet wurden, gegenüber den gemessenen Werten (beide logarithmiert), berechnet nach den Gleichungen 11-14. Jeder Datenpunkt entspricht einem Standort. Die blaue Linie stellt die linearen Beziehungen der berechneten und gemessenen Werte dar, die schwarze Linie ist die 1:1-Linie.....	18
Abbildung 4: Erklärte Varianz (CAR scores) in der berechneten mikrobiellen Biomasse (links) und Basalatmung (rechts) durch die verwendeten Inputvariablen C_{org} , pH-Wert ($CaCl_2$), Sand- und Tongehalt.....	19
Abbildung 5: Differenzen zwischen dem grössten und kleinsten Referenzwert für 50 zufällig gezogene Stichproben pro Stichprobenumfang für die mikrobielle Biomasse (links) und die Basalatmung (rechts) oben für die Ackerstandorte ($n = 111$) und unten für die Graslandstandorte mit Beprobungstiefe 0-20 cm ($n = 62$).	20
Abbildung 6: Vergleich der Messparameter Basalatmung, mikrobielle Biomasse, C_{org} , pH-Wert, Ton- und Sandgehalt in 0-10 cm vs. 0-20 cm Beprobungstiefe für Grasland ($n = 18$) (beide logarithmiert). Blaue Linie: Lineare Beziehung der Messwerte 0-10 cm und Messwerte 0-20 cm, schwarze Linie: 1:1-Linie.....	21

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausgewertete Datensätze (Anzahl Standorte und Probenahmetiefen für Acker und Grasland)	10
Tabelle 2: Grenzwerte für den Zustandsindikator Q basierend auf den Gleichungen 7 und 8 für «Acker 0-20 cm» für die mikrobielle Biomasse resp. Basalatmung.....	13
Tabelle 3: Bewertung der mikrobiellen Biomasse und Basalatmung des Datensatzes «Acker 0-20 cm» ($n = 111$) nach den bestehenden und den neu hergeleiteten Referenzwerten.....	15
Tabelle 4: Grenzwerte für den Zustandsindikator Q basierend auf den Gleichungen 11–14 für «Grasland 0-10 cm» und «Grasland 0-20» für die mikrobielle Biomasse resp. Basalatmung.....	17
Tabelle 5: Übereinstimmung der hergeleiteten Referenzwerte mit den Messwerten (Standardfehler der Regression, RMSE) und Genauigkeit der hergeleiteten (besten) Referenzwertgleichung (Standardfehler se_{est}).	18
Tabelle 6: Umrechnungsfaktoren von 0-10 cm auf 0-20 cm Beprobungstiefe für Grasland.....	21
Tabelle 7: Messwerte der Datensätze (BA, BM, C_{org} (FAL), pH, Sand, Schluff, Ton)	28
Tabelle 8: Messbereiche von C_{org} , pH-Wert, Ton- und Sandgehalt für das Trainingsset «Acker 0-20 cm» ($n = 92$)	31
Tabelle 9: Messbereiche für C_{org} , pH-Wert, Ton- und Sandgehalt des Trainingsset «Grasland 0-20 cm» ($n = 50$).	31
Tabelle 10: Messbereiche für C_{org} , pH-Wert, Ton- und Sandgehalt des Trainingsset «Grasland 0-10 cm» ($n = 25$).	31

Anhang

Übersicht Messwerte der Datensätze

Tabelle 7: Messwerte der Datensätze (BA, BM, C_{org} (FAL), pH, Sand, Schluff, Ton)

Datensatz	Parameter	Einheit	Grasland						Acker					
			n	Tiefe	Mean	Med.	Min.	Max.	n	Tiefe	Mean	Med.	Min.	Max.
ZH	BA	mg CO ₂ -C kg ⁻¹ TS h ⁻¹	13	0-20	1.56	1.40	0.71	2.68	10	0-20	0.78	0.69	0.27	1.42
	BM	mg/kg	13	0-20	1942	1894	700	3111	10	0-20	650	497	230	1349
	C _{org} (FAL)*	%	13	0-20	3.88	4.17	1.67	5.16	10	0-20	2.24	2.12	0.82	4.22
	pH		13	0-20	6.2	6.2	5.3	6.8	10	0-20	6.2	6.6	4.9	6.9
	Sand**	%	13	0-20	43	46	28	61	10	0-20	49	49	37	68
	Schluff**	%	13	0-20	25	25	18	33	10	0-20	27	27	19	34
	Ton**	%	13	0-20	24	23	17	33	10	0-20	20	20	11	29
SG	BA	mg CO ₂ -C kg ⁻¹ TS h ⁻¹	9	0-20	1.83	1.78	1.23	2.78						
	BM	mg/kg	9	0-20	2751	2540	1683	4520						
	C _{org} (FAL)*	%	9	0-20	4.83	4.32	2.53	7.89						
	pH		9	0-20	5.7	5.7	4.3	6.5						
	Sand**	%	9	0-20	39	40	16	51						
	Schluff**	%	9	0-20	25	22	17	43						
	Ton**	%	9	0-20	26	26	21	31						
SO	BA	mg CO ₂ -C kg ⁻¹ TS h ⁻¹	4	0-20	1.55	1.68	0.81	2.02						
	BM	mg/kg	4	0-20	1151	1161	580	1700						
	C _{org} (FAL)	%	4	0-20	2.42	2.30	1.90	3.16						
	pH		4	0-20	6.3	6.3	5.8	6.7						
	Sand**	%	4	0-20	47	42	38	68						
	Schluff**	%	4	0-20	32	35	17	41						
	Ton**	%	4	0-20	17	17	11	22						
AG	BA	mg CO ₂ -C kg ⁻¹ TS h ⁻¹	2	0-10	2.17	2.17	2.05	2.29	7	0-20	0.74	0.76	0.44	1.14
	BM	mg/kg	2	0-10	1940	1940	1579	2300	7	0-20	688	679	410	1026

Datensatz	Parameter	Einheit	Grasland						Acker					
			n	Tiefe	Mean	Med.	Min.	Max.	n	Tiefe	Mean	Med.	Min.	Max.
	C _{org} (FAL)	%	2	0-10	3.96	3.96	3.66	4.27	7	0-20	2.31	2.24	1.56	3.09
	pH		2	0-10	7.0	7.0	7.0	7.1	7	0-20	6.7	6.8	5.2	7.3
	Sand**	%	2	0-10	12	12	9	16	7	0-20	32	30	9	68
	Schluff**	%	2	0-10	53	53	46	59	7	0-20	41	49	19	56
	Ton**	%	2	0-10	28	28	30	26	7	0-20	24	28	11	38
BE	BA	mg CO ₂ -C kg ⁻¹ TS h ⁻¹	18	0-10	1.18	1.20	0.65	1.66		0-10				
	BM	mg/kg	18	0-10	1241	1114	696	1927		0-10				
	C _{org} (FAL)	%	18	0-10	3.01	2.74	1.82	7.70		0-10				
	pH		18	0-10	5.4	5.3	4.6	6.4		0-10				
	Sand**	%	18	0-10	46	47	28	55		0-10				
	Schluff**	%	18	0-10	30	29	11	42		0-10				
	Ton**	%	18	0-10	19	17	13	30		0-10				
	BA	mg CO ₂ -C kg ⁻¹ TS h ⁻¹	18	0-20	0.81	0.75	0.35	1.28	19	0-20	0.71	0.71	0.19	1.39
	BM	mg/kg	18	0-20	928	862	444	1845	19	0-20	627	607	301	1391
	C _{org} (FAL)	%	18	0-20	2.50	2.27	1.28	7.63	19	0-20	2.24	1.70	1.05	7.50
	pH		18	0-20	5.3	5.2	4.6	6.2	19	0-20	5.8	5.8	4.9	7.1
	Sand**	%	18	0-20	45	49	17	55	19	0-20	49	50	30	64
	Schluff**	%	18	0-20	31	29	24	43	19	0-20	26	25	14	39
	Ton**	%	18	0-20	19	18	15	39	19	0-20	18	18	10	35
GR	BA	mg CO ₂ -C kg ⁻¹ TS h ⁻¹	8	0-10	2.06	1.98	1.01	3.74	2	0-20	0.97	0.97	0.89	1
	BM	mg/kg	8	0-10	2083	2023	841	4409	2	0-20	1073	1073	715	1431
	C _{org} (FAL)	%	8	0-10	5.04	4.09	2.81	9.50	2	0-20	3.71	4	2.97	4
	pH		8	0-10	5.90	6.0	4.5	7.0	2	0-20	7.1	7	6.8	7
	Sand**	%	8	0-10	38	23	16	66	2	0-20	35	35	30	39
	Schluff**	%	8	0-10	31	32	16	44	2	0-20	34	34	24	43
	Ton**	%	8	0-10	22	23	13	32	2	0-20	26	26	22	29
	BA	mg CO ₂ -C kg ⁻¹ TS h ⁻¹	1	0-20	1.94	1.94	1.94	1.94	2	0-20	0.97	0.97	0.89	1.05
	BM	mg/kg	1	0-20	2389	2389	2389	2389	2	0-20	1073	1073	715	1431
	C _{org} (FAL)	%	1	0-20	5.45	5.45	5.45	5.45	2	0-20	3.72	3.72	2.97	4.47

Datensatz	Parameter	Einheit	Grasland						Acker					
			n	Tiefe	Mean	Med.	Min.	Max.	n	Tiefe	Mean	Med.	Min.	Max.
	pH		1	0-20	7.2	7.2	7.2	7.2	2	0-20	7.1	7.1	6.8	7.4
	Sand**	%	1	0-20	25	25	25	25	2	0-20	35	35	30	39
	Schluff**	%	1	0-20	39	39	39	39	2	0-20	34	34	24	43
	Ton**	%	1	0-20	27	27	27	27	2	0-20	26	26	22	29
NABO	BA	mg CO ₂ -C kg ⁻¹ TS h ⁻¹	5	0-10	1.37	1.44	0.92	1.72	0	0-10				
	BM	mg/kg	5	0-10	2371	2521	1564	3107	0	0-10				
	C _{org} (FAL)	%	5	0-10	4.17	4.11	3.09	6.17	0	0-10				
	pH		5	0-10	5.5	5.2	4.8	6.4	0	0-10				
	Sand**	%	5	0-10	32	32	24	43	0	0-10				
	Schluff**	%	5	0-10	31	32	25	35	0	0-10				
	Ton**	%	5	0-10	30	30	21	37	0	0-10				
	BA	mg CO ₂ -C kg ⁻¹ TS h ⁻¹	17	0-20	1.44	1.33	0.78	2.54	13	0-20	0.62	0.54	0.23	1.38
	BM	mg/kg	17	0-20	1570	1576	703	2325	13	0-20	667	601	299	1331
	C _{org} (FAL)*	%	17	0-20	4.09	3.98	2.03	8.89	13	0-20	1.74	1.67	1.07	2.71
	pH		17	0-20	5.2	5.4	4.0	6.3	13	0-20	6.2	6.3	5.1	7.3
	Sand**	%	17	0-20	37	40	14	60	13	0-20	29	29	7	55
	Schluff**	%	17	0-20	33	33	22	49	13	0-20	44	41	19	66
	Ton**	%	17	0-20	22	22	8	45	13	0-20	25	23	12	58
hubs46	BA	mg CO ₂ -C kg ⁻¹ TS h ⁻¹	0	0-20					60	0-20	0.68	0.58	0.24	2.04
	BM	mg/kg	0	0-20					60	0-20	623	555	150	1493
	C _{org} (FAL)	%	0	0-20					60	0-20	1.73	1.45	0.65	4.93
	pH		0	0-20					60	0-20	6.8	6.9	4.9	8.0
	Sand**	%	0	0-20					60	0-20	42	42	16	62
	Schluff**	%	0	0-20					60	0-20	34	33	24	48
	Ton**	%	0	0-20					60	0-20	21	20	11	42
	* mit CN Analyzer gemessen und in C _{org} (FAL) umgerechnet													
	** Sand+Ton+Schluff+Humus=100%													

Trainings- und Testsets zur Herleitung der Referenzwertgleichungen

Acker 0-20 cm

Für den Datensatz «Acker 0-20 cm» sind Messungen von 111 Standorten vorhanden. Das Trainingsset (80% der Daten) zur Herleitung einer Referenzwertgleichung für die mikrobielle Biomasse auf Ackerstandorten mit einer Beprobungstiefe 0-20 cm deckte folgende Messwerte ab (Tabelle 10).

Tabelle 8: Messbereiche von C_{org} , pH-Wert, Ton- und Sandgehalt für das **Trainingsset «Acker 0-20 cm»** (n = 92)

	Min.	Median	Mean	Max.
C_{org} [% gew.]	0.65	1.60	1.92	7.50
pH-Wert	4.9	6.7	6.6	8.0
Ton [% gew.]	10	19	21	42
Sand [% gew.]	8	42	42	68

Grasland 0-20 cm

Für den Datensatz «Grasland 0-20 cm» sind Messungen von 62 Standorten vorhanden. Diese wurden in ein Trainingsset (n=50, Tabelle 5) und ein Testset (n=12) zufällig eingeteilt. Das Trainingsset zur Herleitung der Referenzwertgleichungen für Grasland 0-20 cm deckte folgende Messwerte ab:

Tabelle 9: Messbereiche für C_{org} , pH-Wert, Ton- und Sandgehalt des **Trainingsset «Grasland 0-20 cm»** (n = 50).

	Min.	Median	Mean	Max.
C_{org} [% gew.]	1.28	3.32	3.57	8.89
pH-Wert	4.0	5.5	5.6	7.2
Ton [% gew.]	8	21	22	44
Sand [% gew.]	14	43	41	68

Grasland 0-10 cm

Für den Datensatz «Grasland 0-10 cm» sind Messungen von 33 Standorten vorhanden. Diese wurden in ein Trainingsset (n=25) und ein Testset (n=8) zufällig eingeteilt. Das Trainingsset zur Herleitung der Referenzwertgleichungen für Grasland 0-10 cm deckte folgende Messwerte ab:

Tabelle 10: Messbereiche für C_{org} , pH-Wert, Ton- und Sandgehalt des **Trainingsset «Grasland 0-10 cm»** (n = 25).

	Min.	Median	Mean	Max.
C_{org} [% gew.]	1.82	3.25	3.73	9.50
pH-Wert	4.5	5.5	5.6	7.1
Ton [% gew.]	13	21	22	37
Sand [% gew.]	9	41	39	66