



Monitoring Bodenbiologie

**Auswertung bodenmikrobiologischer Daten
von kantonalen und nationalen
Bodenbeobachtungsstandorten**

Autorinnen und Autoren

Anna-Sofia Hug, Janine Moll und Andreas Gubler

Partner

Claudia Maurer, Dominik Müller,
Marco Lanfranchi und Florian Walder



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Wirtschaft, Bildung und Forschung WBF
Agroscope

NABO



Kanton Bern
Canton de Berne



Amt für Natur und Umwelt
Uffizi per la natira e l'ambient
Ufficio per la natura e l'ambiente



KANTON AARGAU



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	Anna Sophia Hug E-Mail: anna.hug@agroscope.admin.ch
Gestaltung	Petra Asare
Titelbild	NABO, KABO BE, KABO GR, KABO AG
Download	www.agroscope.ch/science
Copyright	© Agroscope 2021
ISSN	2296-729X
DOI	https://doi.org/10.34776/as110g

Inhalt

Summary, results & outlook	4
Résumé, résultats & perspectives	6
Zusammenfassung, Erkenntnisse & Ausblick	9
1 Einleitung	11
2 Daten und Methoden	13
2.1 Bodenbiologische Messnetze NABO und KABO	13
2.2 Probenahme	15
2.3 Bestimmung mikrobiologischer Messwerte und Begleitparameter	15
2.4 Beurteilung anhand standortspezifischer Referenzwerte	15
2.5 Auswertung der zeitlichen Entwicklung	17
3 Ergebnisse & Diskussion	19
3.1 Zusammenführung der Daten aus KABO- und NABO-Messnetzen	19
3.2 Umgang mit methodischen Unterschieden	20
3.2.1 Unterschiedliche Periodizität	20
3.2.2 Unterschiedliche Beprobungstiefen	23
3.3 Der metabolische Quotient (qCO_2) zur Beurteilung des Mikrobioms	26
3.4 Vergleich der Beurteilung anhand der Quotienten Q_{FE-C} und Q_{BA} mit der Beurteilung der Bodenstruktur anhand des C_{org} :Ton-Verhältnisses	27
4 Dank	30
5 Literaturverzeichnis	30
6 Anhang	32
6.1 Zeitliche Verläufe des metabolischen Quotienten	32
6.2 Vergleich 0-10 cm vs. 0-20 cm	35

Summary, results & outlook

In order to assess whether soil functions are maintained in the long term, information on the status of soils and its evolution, including with regard to soil biology, is essential. To date, spatially and temporally high-resolution soil data have been scarce. It is therefore all the more important to make optimal use of the synergies of existing soil monitoring programs – *inter alia* by jointly analyzing the data. In this report, we show how biological data from various soil monitoring programs can be jointly analyzed and interpreted, despite certain methodological differences. For this, we analyzed data from four monitoring programs (the Swiss Soil Monitoring Network [NABO] and the Cantonal Soil Monitoring Programs of Aargau, Bern and Graubünden [KABO AG, KABO BE and KABO GR]) and assessed the microbiological parameters using the reference values derived by Oberholzer et al. (1999). These instruments for assessing soil biological parameters must, however, be further developed as well as also being redeveloped for certain land uses (cf. also recommendations in Gubler et al. 2020). In addition, we introduce a status indicator Q, which indicates the current (soil biology) status of a site.

Our main findings, recommendations, prospects and next steps are summarized in the boxes below:

Soil Data of Differing Origin (cf. Chap. 3.1)

- Standardized sampling as well as sample preparation and analysis by the same laboratory in each case should be striven for, in order to enable the comparison of microbiological data over several years and between different sites and monitoring programs.
- Data from the various monitoring programs come from different geographical regions and possess different value ranges for the site characteristics.
- We recommend relating the comparison of different sites to the assessments by means of the reference values (assessment categories or status indicators Q_{BA} , Q_{FE-C} and Q_{SIR} , see box below). By doing so, differences in site characteristics are taken into account.
(Abbr.: BA: Basalatmung (german), soil respiration; FE-C and SIR: microbial biomass determined by fumigation extraction or substrate-induced respiration.)

Data Storage and Harmonization

- Uniform management of all soil data minimizes the effort of harmonizing data prior to its evaluation.
- The soil information system NABODAT is available for storage.
- Data flow and the interface between laboratory and target system (NABODAT) must also be defined.

Different Periodicity of Sampling (cf. Kap. 3.2.1)

- The long-term evolution of a collective (e.g. all of the sites in a monitoring program) can be illustrated with the aid of a pillar diagram. However, changes over time are only interpretable when the same collective is always considered for the individual points in time.
- For this reason, time gaps in sites where annual measurements are not made should be filled in by constantly repeating the measurement values of a site for each additional year until a new measurement is taken. This yields unbroken (virtual) time series.

Different Sampling Depths (cf. Chap. 3.2.2)

- Samples from different depths cannot be compared with one another on the basis of absolute values, but only by means of quotients like Q_{BA} , Q_{FE-C} and Q_{SIR} (see box below) or qCO_2 .
- The reference-value model for 0-10 cm soil depth also appears to be suitable for the samples from a depth of 0-20 cm. Potentially, however it needs an additional compensation for the greater soil depth. This question cannot be answered conclusively, since the dataset in this project is too small.
- A uniform sampling depth for all monitoring programs (0-20 cm for all land uses) would be advantageous for Swiss-wide evaluations, and is to be discussed. The reference methods must be adapted accordingly. Here, we must clarify what impact an altered sampling depth would have on the interpretability of (existing) time series from the respective site.

Status Indicator Q = Quotient of the Measured Value and Reference Value (cf. Chap. 2.4)

- Site-specific reference values enable a qualitative assessment of microbiological measurements.
- The status indicator Q is calculated by dividing the measured value by the site-specific reference value. Accordingly, for the different measurands we use Q_{BA} , Q_{FE-C} and Q_{SIR} .
- For Q_{BA} , Q_{FE-C} and $Q_{SIR} = 1$, the measured value corresponds to the site-specific reference value; for $Q > 1$ it is higher; for $Q < 1$ it is lower.
- Q can also be used to deduce the previous assignment to the five quality categories of 'very low', 'low' ..., 'high', 'very high'. In addition, however, increases and decreases within a category are also visible with Q.
- Unlike the five qualitative categories, Q is a continuous numerical quantity. This simplifies graphic representation and statistical evaluations.
- Q is advantageous for the evaluation and graphic representation of entire collectives, since the results of the individual sites can be easily aggregated.
- For communication with farmers and lay persons, qualitative categories such as 'very high' or 'low' are to be used for preference.

Metabolic Quotient qCO_2 for Assessment of the Microbiome (cf. Chap. 3.3)

- When interpreting soil microbiological measurements, qCO_2 can usefully supplement the assessment by means of the status quotients Q_{FE-C} and Q_{BA} .
- There is no close correlation between qCO_2 and Q_{FE-C} or Q_{BA} ; qCO_2 may be considered as additional information/an additional aspect.

Comparison of the Microbiological and Physical Forms of Assessment (cf. Chap. 3.4)

- Certain correlations are recognisable between the two forms of assessment; certain soils are evaluated similarly from both a microbiological and physical viewpoint, particularly if the clay content lies between 10–20%.
- For soils with high and low clay content, the assessments are at times diametrically opposed to one another.
- The status indicator Q_{FE-C} or Q_{BA} and the C_{org} : Clay ratio are used to assess different functions or aspects of the soil. Q_{FE-C} and Q_{BA} are used for the microbiological assessment. By contrast, the C_{org} : Clay ratio can be used for a physical assessment of soil structure.

Prospects and Next Steps (cf. Chap. 1, Question V)

- To assess the microbiological quality of grassland sites (or other land uses such as forest sites or high-altitude sites), site-specific reference values for both biomass FE and basal respiration must be derived.
- Just how the reference-value models can be applied to different sampling depths, or whether the different sampling depths must be offset in the regression equations, must be clarified.
- Updating of the existing models by means of newer and larger datasets.
- Extension of the data resource in order to develop indicators, i.e. consideration of further sites. An analysis of the potential sites would be a useful initial step here (comparison of NABO and cantonal monitoring programs [KABO]).
- Discussion of a uniform sampling depth for all land uses and future investigations.

Résumé, résultats & perspectives

Il est nécessaire de disposer d'informations sur l'état et l'évolution des sols, y compris sur les aspects biologiques, pour évaluer si leurs fonctions peuvent être préservées à long terme. Des données pédologiques à haute résolution spatiale et temporelle sont encore rares. Il est donc d'autant plus important d'exploiter de manière optimale les synergies entre les programmes d'observation des sols existants. Évaluer collectivement les données est l'un des moyens d'y parvenir. Nous montrons dans le présent rapport comment les données des réseaux d'observation biologique des sols peuvent être évaluées et interprétées conjointement, malgré certaines différences méthodologiques. À cette fin, nous avons pu examiner les données de quatre réseaux d'observation biologique des sols (NABO, KABO AG, KABO BE et KABO GR) et évaluer les valeurs microbiologiques mesurées selon les valeurs de référence d'Oberholzer et al. (1999). Ces bases d'évaluation des valeurs microbiologiques doivent cependant encore être développées, voire remaniées pour certaine utilisation des sols (voir à cet égard les recommandations de Gubler et al. 2020). Nous présentons également ici un indicateur d'état Q qui permet de décrire l'état biologique actuel du sol d'un site.

Dans les encadrés ci-dessous nous résumons nos principaux résultats et recommandations - suivi par les perspectives:

Données pédologiques provenant de différentes sources (cf. chap. 3.1)

- Afin de pouvoir comparer sur plusieurs années les données microbiologiques de différents sites et réseaux de mesures, un échantillonnage standardisé, de même que la préparation et l'analyse d'échantillons effectuées toujours par le même laboratoire, sont souhaitables.
- Les données des différents réseaux de mesures proviennent de régions géographiques distinctes et présentent des domaines de valeurs différents selon les conditions de site.
- Nous recommandons, pour la comparaison de sites, d'utiliser les évaluations reposant sur des valeurs de référence (classes d'évaluation ou indicateurs d'état Q_{BA} , Q_{FE-C} et Q_{SIR} ; voir encadré ci-dessous). De cette façon, les différentes caractéristiques du site sont prises en compte.
(Abrév.: BA : Basalatmung (allemand): respiration basale; FE-C, SIR: biomasse microbienne déterminée par la fumigation-extraction ou la respiration induite par le substrat)

Stockage des données et harmonisation

- Une gestion uniforme de toutes les données pédologiques permet de limiter le travail d'harmonisation des données avant leur évaluation.
- Les données peuvent être stockées dans le système d'information pédologique NABODAT.
- Le flux de données et l'interface entre le laboratoire et le système cible (NABODAT) sont également à définir.

Périodicité d'échantillonnage différente (cf. chap. 3.2.1)

- L'évolution à long terme d'un collectif (p. ex. tous les sites d'un réseau de mesures) peut être représentée au moyen d'un diagramme à barres. Les changements dans le temps ne sont toutefois interprétables que si l'on prend toujours en compte ce même collectif pour les différentes dates de mesures.
- Les intervalles de temps entre les échantillonnages doivent être comblés pour les sites qui n'ont pas été mesurés à chaque fois (autrement dit annuellement). Pour ce faire, on reprend chaque année les valeurs mesurées précédemment, jusqu'à ce qu'une nouvelle mesure soit effectuée. On obtient ainsi des séries temporelles (virtuelles) sans lacune.

Profondeurs d'échantillonnage différentes (cf. chap. 3.2.2)

- Les échantillons provenant de profondeurs différentes ne peuvent pas être comparés entre eux sur la base de valeurs absolues, mais uniquement sur la base de quotients tels que Q_{BA} , Q_{FE-C} et Q_{SIR} (voir encadré ci-dessous) ou de qCO_2 .
- Le modèle de référence pour une profondeur de sol de 0 à 10 cm semble également convenir pour les échantillons de 0 à 20 cm. Il est toutefois possible qu'il faille une compensation supplémentaire pour la plus grande profondeur. Il n'est pas possible d'apporter ici de réponse définitive, car la base de données utilisée pour le présent rapport est trop restreinte.
- Une profondeur d'échantillonnage uniforme pour tous les réseaux de mesures (0 à 20 cm quelle que soit l'utilisation) serait un avantage pour les évaluations à l'échelle nationale et devrait être discutée. Les méthodes de référence devraient être adaptées en conséquence. Il convient donc de clarifier l'influence qu'aurait une modification de la profondeur d'échantillonnage sur l'interprétabilité des séries temporelles pour les sites concernés.

Indicateur d'état Q = quotient de la valeur mesurée divisée par la valeur de référence (cf. chap. 2.4)

- Les valeurs de référence spécifiques au site permettent une évaluation qualitative des valeurs microbiologiques mesurées.
- L'indicateur d'état Q est calculé en divisant la valeur mesurée par la valeur de référence spécifique au site. Nous utilisons pour les différentes grandeurs mesurées les quotients Q_{BA} , Q_{FE-C} et Q_{SIR} correspondants.
- Pour Q_{BA} , Q_{FE-C} et $Q_{SIR} = 1$, la valeur mesurée correspond à la valeur de référence spécifique au site; pour $Q > 1$, elle se situe en dessus de cette valeur de référence et pour $Q < 1$, en dessous.
- L'indicateur Q peut également être transcrit sous la forme de classes d'évaluation qualitatives (au nombre de cinq) utilisées jusqu'ici: «très faible», «faible», ..., «très élevée». Mais Q permet aussi d'exprimer des augmentations et des diminutions au sein d'une même classe.
- Contrairement aux cinq classes qualitatives, Q est une valeur numérique continue, ce qui simplifie la représentation graphique et les évaluations statistiques.
- Q représente un avantage pour l'évaluation et la représentation graphique de collectifs dans leur ensemble, car les résultats des différents sites peuvent être facilement agrégés.
- Les classes qualitatives, telles que «très élevée» ou «faible», sont par contre à privilégier pour la communication avec les agriculteurs ou les profanes.

Quotient métabolique qCO_2 pour l'évaluation du microbiome (cf. chap. 3.3)

- Lors de l'interprétation de mesures microbiologiques du sol, le quotient qCO_2 permet de compléter utilement l'évaluation basée sur les quotients d'état Q_{FE-C} et Q_{BA} .
- Il n'existe pas de corrélation étroite entre les quotients qCO_2 et Q_{FE-C} resp. Q_{BA} , qCO_2 peut être considéré comme information complémentaire.

Comparaison entre formes d'évaluation microbiologique et physique (cf. chap. 3.4)

- Entre les deux formes d'évaluation, des corrélations sont perceptibles: certains sols sont évalués de manière similaire des points de vue microbiologique et physique, notamment lorsque la teneur en argile est comprise entre 10 et 20 %.
- Les évaluations sont parfois diamétralement opposées s'agissant de sols riches ou au contraire pauvres en argile.
- Les indicateurs d'état Q_{FE-C} resp. Q_{BA} , de même que le rapport $C_{org}:argile$, sont utilisés pour évaluer diverses fonctions ou aspects du sol.
- Pour l'évaluation microbiologique, on utilise Q_{FE-C} et Q_{BA} . Par contre, pour une évaluation physique de la structure du sol, on utilise le rapport $C_{org}:argile$.

Perspectives et prochaines étapes (cf. chap. 1, question V)

- Pour évaluer la qualité microbiologique des sites herbagers (ou dévolus à d'autres utilisations tels les sites forestiers ou les sites d'altitude), il faut calculer des valeurs de référence spécifiques au site pour la biomasse FE, mais aussi pour la respiration basale.
- Il convient de clarifier de quelle manière les modèles de référence peuvent être appliqués aux différentes profondeurs d'échantillonnage ou s'il est nécessaire de les compenser dans des équations de régression.

- Actualisation des modèles existants en recourant à des bases de données plus récentes et plus complètes.
- Élargissement de la base de données pour le calcul d'indicateurs (prise en compte d'autres sites). Dans un premier temps, une analyse des sites potentiels serait judicieuse (comparaison des réseaux de mesures KABO-NABO).
- Discussion sur une profondeur d'échantillonnage uniforme, quelle que soit l'utilisation, pour toutes les enquêtes futures.

Zusammenfassung, Erkenntnisse & Ausblick

Um zu beurteilen, ob die Bodenfunktionen langfristig erhalten bleiben, sind Informationen über den Zustand und die Entwicklung der Böden notwendig, auch betreffend der Bodenbiologie. Bis heute sind räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Bodendaten selten. Umso wichtiger ist es daher, Synergien bestehender Bodenbeobachtungsprogramme optimal zu nutzen. Auch indem Daten gemeinsam ausgewertet werden.

Im vorliegenden Bericht zeigen wir, wie Daten bodenbiologischer Messnetze trotz gewisser methodischer Unterschiede zusammen ausgewertet und interpretiert werden können. Dafür werteten wir Daten von vier bodenbiologischen Messnetzen (NABO, KABO AG, KABO BE und KABO GR) aus und beurteilten die mikrobiologischen Messwerte gemäss den Referenzwerten von Oberholzer et al. (1999). Diese Grundlagen zur Beurteilung von bodenbiologischen Messwerten müssen weiterentwickelt bzw. für gewisse Landnutzungen auch neu erarbeitet werden (vgl. dazu auch Empfehlungen in Gubler et al. 2020). Weiter präsentieren wir einen Zustandsindikator Q, der den aktuellen (bodenbiologischen) Zustand eines Standortes anzeigt.

Unsere wichtigsten Erkenntnisse und Empfehlungen, sowie der Ausblick haben wir in den folgenden Boxen zusammengefasst:

Bodendaten unterschiedlicher Herkunft (vgl. Kap. 3.1)

- Um mikrobiologische Daten über mehrere Jahre, zwischen verschiedenen Standorten und Messnetzen vergleichen zu können, sind eine standardisierte Probenahme und die Probenaufbereitung und Analyse durch stets dasselbe Labor anzustreben.
- Die Daten der verschiedenen Messnetze kommen aus unterschiedlichen geographischen Regionen und weisen daher verschiedene Wertebereiche der Standorteigenschaften auf.
- Wir empfehlen, den Vergleich von Standorten auf die Beurteilungen anhand der Referenzwerte (Beurteilungsklassen oder Zustandsindikatoren Q_{BA} , Q_{FE-C} und Q_{SIR} , siehe Kasten unten) zu beziehen. Damit werden unterschiedliche Standorteigenschaften miteinbezogen.

Datenablage und -harmonisierung

- Ein einheitliches Datenmanagement aller Bodendaten minimiert den Aufwand für die Harmonisierung von Daten vor der Auswertung.
- Für die Ablage steht das Bodeninformationssystem NABODAT zur Verfügung.
- Ebenfalls zu definieren ist der Datenfluss resp. die Schnittstelle zwischen Labor und dem Zielsystem (NABODAT).

Unterschiedliche Periodizität der Beprobung (vgl. Kap. 3.2.1)

- Die langfristige Entwicklung eines Kollektivs (z.B. aller Standorte eines Messnetzes) kann mit Hilfe eines Säulendiagramms visualisiert werden. Veränderungen über die Zeit sind jedoch nur interpretierbar, wenn für die einzelnen Zeitpunkte stets dasselbe Kollektiv betrachtet wird.
- Deshalb sollten Zeitlücken bei Standorten, die nicht jährlich gemessen wurden, aufgefüllt werden, indem die Messwerte eines Standortes für jedes weitere Jahr konstant wiederholt werden bis eine neue Messung erfolgt. Dies ergibt lückenlose (virtuelle) Zeitreihen.

Unterschiedliche Beprobungstiefen (vgl. Kap. 3.2.2)

- Proben aus unterschiedlichen Tiefen können nicht anhand absoluter Werte miteinander verglichen werden, sondern nur mittels Quotienten wie Q_{BA} , Q_{FE-C} und Q_{SIR} (siehe Kasten unten) oder qCO_2 .
- Das Referenzwertmodell für 0-10 cm Bodentiefe scheint auch für die Proben aus 0-20 cm geeignet zu sein. Möglicherweise braucht es aber eine zusätzliche Kompensation für die grössere Bodentiefe. Dies lässt sich nicht abschliessend beantworten, da die Datengrundlage in dieser Arbeit zu gering ist.
- Eine einheitliche Beprobungstiefe aller Messnetze (0-20 cm für alle Nutzungen) wäre für schweizweite Auswertungen vorteilhaft und ist zu diskutieren. Die Referenzmethoden müssen entsprechend angepasst werden. Dabei ist abzuklären, welchen Einfluss eine geänderte Beprobungstiefe auf die Interpretierbarkeit von (bestehenden) Zeitreihen des jeweiligen Standortes hätte.

Zustandsindikator Q = Quotient aus Messwert und Referenzwert (vgl. Kap. 2.4)

- Standortsspezifische Referenzwerte ermöglichen eine qualitative Beurteilung von mikrobiologischen Messwerten.
- Der Zustandsindikator Q wird berechnet, indem der Messwert durch den standortsspezifischen Referenzwert dividiert wird. Für die verschiedenen Messgrößen verwenden wir entsprechend Q_{BA} , Q_{FE-C} und Q_{SIR} .
- Für Q_{BA} , Q_{FE-C} und $Q_{SIR} = 1$ entspricht der gemessene Wert dem standortsspezifischen Referenzwert, für $Q > 1$ liegt er darüber, für $Q < 1$ darunter.
- Anhand von Q lässt sich auch die bisherige qualitative Beurteilung in die fünf Klassen «sehr tief», «tief», ..., «sehr hoch» ableiten. Zusätzlich sind mit Q aber auch Zu- und Abnahmen innerhalb einer Klasse sichtbar.
- Im Gegensatz zu den fünf qualitativen Klassen ist Q eine kontinuierliche numerische Grösse. Dies vereinfacht die grafische Darstellung und statistische Auswertungen.
- Q ist bei der Auswertung und graphischen Darstellung ganzer Kollektive vorteilhaft, weil die Resultate der einzelnen Standorte einfach aggregiert werden können.
- Für die Kommunikation mit Landwirten und Laien sind die qualitativen Klassen wie «sehr hoch» oder «tief» zu bevorzugen.

Metabolischer Quotient qCO_2 zur Beurteilung des Mikrobioms (vgl. Kap. 3.3)

- Bei der Interpretation von bodenmikrobiologischen Messungen kann qCO_2 die Beurteilung anhand der Zustandsquotienten Q_{FE-C} und Q_{BA} sinnvoll ergänzen.
- Zwischen qCO_2 und Q_{FE-C} bzw. Q_{BA} besteht kein enger Zusammenhang, qCO_2 kann als zusätzliche Information betrachtet werden.

Vergleich der mikrobiologischen mit der physikalischen Beurteilungsform (vgl. Kap. 3.4)

- Zwischen den beiden Beurteilungsformen sind bestimmte Zusammenhänge erkennbar, gewisse Böden werden sowohl aus mikrobiologischer Sicht als auch aus physikalischer Sicht ähnlich beurteilt, insbesondere wenn der Tongehalt zwischen 10-20 % liegt.
- Für tonreiche und tonarme Böden liegen die Beurteilungen z.T. diametral zueinander.
- Mit dem Zustandsindikator Q_{FE-C} bzw. Q_{BA} und dem C_{org} :Ton-Verhältnis werden unterschiedliche Funktionen resp. Aspekte des Bodens beurteilt. Für die mikrobiologische Beurteilung werden Q_{FE-C} und Q_{BA} verwendet. Hingegen kann für eine physikalische Beurteilungen der Bodenstruktur das C_{org} :Ton-Verhältnis eingesetzt werden.

Ausblick (vgl. Kap. 1, Frage V)

- Zur Beurteilung der mikrobiologischen Qualität von Graslandstandorten (oder anderen Nutzungen wie Waldstandorte oder Höhenstandorte) müssen standortsspezifische Referenzwerte für die Biomasse FE, aber auch für die Basalatmung hergeleitet werden.
- Es muss abgeklärt werden, wie die Referenzwertmodelle auf unterschiedliche Beprobungstiefen angewendet werden können oder ob die unterschiedlichen Beprobungstiefen in den Regressionsgleichungen kompensiert werden müssen.
- Aktualisierung der bestehenden Modelle anhand neuerer und grösserer Datensätze.
- Ausweitung der Datenbasis für die Erarbeitung von Indikatoren, d.h. Berücksichtigung weiterer Standorte. Als erster Schritt dafür wäre eine Analyse der potentiellen Standorte sinnvoll (Messnetzvergleich KABO-NABO).
- Diskussion über eine einheitliche Beprobungstiefe für alle Landnutzungen und für alle zukünftigen Untersuchungen.

1 Einleitung

Böden erfüllen viele wichtige Funktionen: Sie sind die Grundlage für die land- und forstwirtschaftliche Produktion, sie sind Lebensraum für Flora und Fauna und wichtig für den Wasserhaushalt, die Nährstoffkreisläufe und die Filterung von Schadstoffen (Greiner et al. 2018, Keller et al. 2018). Um Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen rechtzeitig zu erkennen, müssen Zustand und zeitliche Entwicklung der Böden erfasst werden.

Für viele Bodenfunktionen spielen Bodenorganismen eine entscheidende Rolle. Ein Monitoring des Bodens sollte daher auch bodenbiologische Parameter miteinbeziehen. Um ein möglichst umfassendes Abbild der Bodenbiologie zu erhalten, schliesst ein solches Monitoring idealerweise verschiedene Organismengruppen der Mikro- und Mesofauna bis hin zur Makrobiologie ein und kombiniert klassische Methoden (faunistische bzw. morphologische Untersuchungen und mikrobiologische Summenparameter) mit neueren molekulargenetischen Techniken.

In der Schweiz existieren auf kantonaler und nationaler Ebene verschiedene Messnetze, die bodenbiologische Parameter erfassen (Hug et al. 2018, Maurer et al. 2020). Dabei erheben alle die mikrobiologischen Summenparameter Biomasse und Basalatmung. Diese geben Auskunft über die Menge der Mikroorganismen und deren Aktivität. Um die Zusammensetzung dieser Lebensgemeinschaften zu erfassen, braucht es molekulargenetische Analysen. Diese entwickeln sich rasch und werden zukünftig eine bedeutende Rolle in der Bodenbeobachtung spielen.

Konsistente Zeitreihen von bodenbiologischen Parametern über längere Zeiträume sind sowohl im In- als auch im Ausland selten. Das bodenbiologische Monitoring der Nationalen Bodenbeobachtung (NABObio) startete 2012 mit der jährlichen Beprobung von ausgewählten Standorten (Hug et al. 2018). Die bodenbiologischen Untersuchungen in kantonalen Bodenbeobachtungen (KABO) laufen seit rund 15 Jahren. Drei dieser KABOs verwenden zur Bestimmung der mikrobiologischen Summenparameter dieselben Methoden wie NABObio (Maurer et al. 2020). Die vorhandenen bodenbiologischen Daten der KABOs und der NABO können daher gemeinsam ausgewertet werden.

Erste Vorschläge zur Aggregation und Kommunikation bodenbiologischer Messungen wurden im Bericht zu NABObio präsentiert (Hug et al. 2018). Im vorliegenden Bericht haben wir diese Vorschläge weiter ausgearbeitet und auf eine breitere Datenbasis gestellt. Dazu werteten wir die Daten des NABObio-Messnetzes gemeinsam mit jenen der drei oben erwähnten kantonalen Messnetze aus.

Eine Abklärung der Bedürfnisse der Kantone und des Bundes rund um das Monitoring der Ressource Boden ergab, dass der Bodenbiologie eine grosse Bedeutung beigemessen wird. Alle Akteure sind sich einig, dass die Bodenorganismen Teil jedes Bodenbeobachtungsprogrammes sein sollten (Gubler et al. 2020). Um die erhobenen Parameter und damit den aktuellen Zustand des Bodens beurteilen zu können, sind standortspezifische Vergleichs- bzw. Referenzwerte für verschiedene Methoden notwendig. Ein weiteres Bedürfnis ist, die gewonnenen Informationen in Form von Indikatoren einfach verständlich und klar kommunizierbar zu machen. Der Beurteilung und Kommunikation bodenbiologischer Messungen widmen wir uns ebenfalls in diesem Bericht.

Die **Ziele** dieses Projektes/Berichtes sind:

- Daten der bodenbiologischen Messnetze dreier KABOs und der NABO zusammen auszuwerten;
- dadurch eine breitere Datenbasis schaffen, um die langfristige Entwicklung von bodenbiologischen Summenparametern zu beurteilen;
- offene Fragen und Probleme bei gemeinsamen Auswertungen zu identifizieren;
- langfristig auf Basis der gemeinsamen Datengrundlage Indikatoren abzuleiten.

Aus den genannten Zielen leiten sich folgende **Fragestellungen** ab:

- I. Wie können die Daten verschiedener Messnetze gemeinsam ausgewertet und dargestellt werden? (Kap. 3.1)
- II. Wie können hierbei methodische Unterschiede (insbesondere betreffend Periodizität und Beprobung) gehandhabt werden? (Kap. 3.2)

- III. Wie ergänzen sich der metabolische Quotient und die Beurteilung der mikrobiellen Summenparameter? (Kap. 3.3)
- IV. Wie vergleichbar sind die Bewertungen der mikrobiologischen Referenzgleichungen mit der Beurteilung der Bodenstruktur aufgrund des C_{org} :Ton-Verhältnisses? (Kap. 3.4)
- V. Welche weiteren Arbeitsschritte müssen angegangen werden, insbesondere für die Herleitung von Indikatoren? (Boxen)

2 Daten und Methoden

2.1 Bodenbiologische Messnetze NABO und KABO

Die NABO betreibt seit 2012 ein bodenbiologisches Monitoring (NABObio): An 30 ausgewählten NABO-Standorten werden seit 2012 jährlich die mikrobielle Biomasse und die Basalatmung¹, die DNS-Menge, der Artenreichtum und die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft² bestimmt³. Diese Messgrößen liefern Informationen über Menge, Aktivität und Qualität des Mikrobioms. Zur umfassenden Interpretation der bodenbiologischen Messungen werden sowohl chemische und physikalische Begleitparameter, als auch Informationen über das Klima und die Bewirtschaftung erfasst.

Die Datenreihe von NABObio konnten wir mit den Messwerten von Oberholzer et al. (2007) ergänzen: In den Jahren 2004 und 2005 wurden 32 NABO-Standorte beprobt und auf die mikrobiologischen Parameter Biomasse, bestimmt mit den Methoden Substratinduzierte Respiration (BM SIR) und Chloroform-Fumigation-Extraktion (BM FE), und die Basalatmung untersucht.

Der Kanton Bern untersucht seit 1999 19 KABO-Standorte, wobei an 18 Standorten je eine Acker- und eine pedologisch entsprechende Dauergrünlandfläche beprobt wird. Die Probenahme erfolgt jeweils im zweiten Hauptnutzungsjahr der Kunstwiese, d. h. je nach Fruchtfolge alle 5-8 Jahre. Zusätzlich wird der Standort «Oberacker» auf 6 Parzellen (in 12 Teilparzellen eingeteilt) beprobt. Seit 2018 werden die Standorte auch molekularbiologisch untersucht (in Zusammenarbeit mit der Gruppe «Molekulare Ökologie», Agroscope).

Der Kanton Aargau betreibt seit 2005 ein bodenbiologisches Monitoring im Rahmen der kantonalen Bodenbeobachtung KABO. Beprobt werden im KABO aktuell 21 landwirtschaftlich genutzte Standorte, weitere Standorte wurden im Laufe der Zeit aufgegeben. Zusätzlich beobachtet werden Naturschutzflächen, bei welchen der Oberboden abgetragen wurde. Seit 2006 werden 8 Standorte (Acker und Wiese) jährlich beprobt. 2012 und 2013 wurden nochmals je 14 Standorte beprobt und untersucht.

Der Kanton Graubünden beprobt seit 2006 jeweils in vier aufeinanderfolgenden Jahren dieselben 5 landwirtschaftlich genutzten Standorte in unterschiedlich hoch gelegenen Talböden. Anschliessend werden 5 neue Standorte beprobt. 2020 wurden nun erneut jene 5 Standorte beprobt, die 2006 erstmals untersucht wurden. Diese werden neu auch molekulargenetisch analysiert (in Zusammenarbeit mit der Gruppe «Molekulare Ökologie», Agroscope).

Der Kanton Fribourg betreibt ebenfalls ein bodenbiologisches Monitoring. Zwischen 1987 und 2006 wurde an 250 Standorten neben vielen weiteren chemischen und physikalischen Messgrößen auch die mikrobielle Biomasse ATP und die organische Kohlenstoffmineralisierung bestimmt. Die Messwerte der mikrobiellen Biomasse bestimmt mit der ATP Methode sind nicht mit den Werten der SIR- oder FE-Methode vergleichbar. Die bodenbiologischen Daten des KABO Fribourg können deshalb nicht in die gemeinsame Auswertung integriert werden.

¹ Bestimmt durch die Gruppe «Pflanzen-Boden-Interaktionen», Agroscope

² Bestimmt durch die Gruppe «Molekulare Ökologie», Agroscope

³ Die Waldstandorte werden seit 2017 nicht mehr jährlich beprobt.

Tabelle 1: Zusammenstellung der in dieser Studie untersuchten Messnetze.

Messnetz	Anzahl Standorte	Zeitreihe seit	Beprobungstiefen (cm)	Beprobungsrhythmus	Kommentare/Besonderheiten
NABObio	10 Acker 10 Grasland 10 Wald (bis 2016)	2012 <i>ergänzt mit Erhebung 2004/05</i>	Acker, Grasland und Wald 0-20	Jährlich	Beprobte wird ein Subset der 113 NABO-Standorte. Die jährlichen Messungen im NABObio-Messnetz werden durch eine einmalige Staturerhebung aller NABO-Standorte ergänzt.
KABO AG	14 Acker 5 Grasland & Naturschutzflächen	2005	Acker 0-20 Grasland und Naturschutzflächen 0-10	Seit 2006 werden 8 Standorte (Acker und Wiese) jährlich beprobt	2012 und 2013 wurden nochmals je 14 Standorte beprobt und untersucht. Naturschutzflächen: Abhumusierter und umgebrochener Standort nebeneinander.
KABO BE	18 Acker & 18 Grasland Oberacker: 1 Acker	2004 2004	Acker 0-20 Grasland 0-10 & 0-20 0-5, 0-10, 0-20	Je nach Fruchtfolge alle 5-8 Jahre. Jährlich 4 Teilparzellen	Die Probenahme erfolgt im 2. Hauptnutzungsjahr der Kunstwiese. 1 Ackerfläche mit 6 Parzellen und je 2 Verfahren (Direktsaat, Pflug), insgesamt 12 Teilparzellen.
KABO GR	4 Acker 27 Grasland ⁴	2006	Acker 0-20 Grasland 0-10	In 4 aufeinander folgenden Jahren dieselben 5 Standorte, anschliessend 5 neue Standorte	Ab Frühling 2020 werden zusätzlich molekularbiologische Untersuchungen gemacht, in Zusammenarbeit mit der Gruppe «Molekulare Ökologie», Agroscope. Die fünf Standorte des 4-jährigen Beprobungszyklus sind regionsspezifisch und liegen in unterschiedlich hoch gelegenen Talböden.

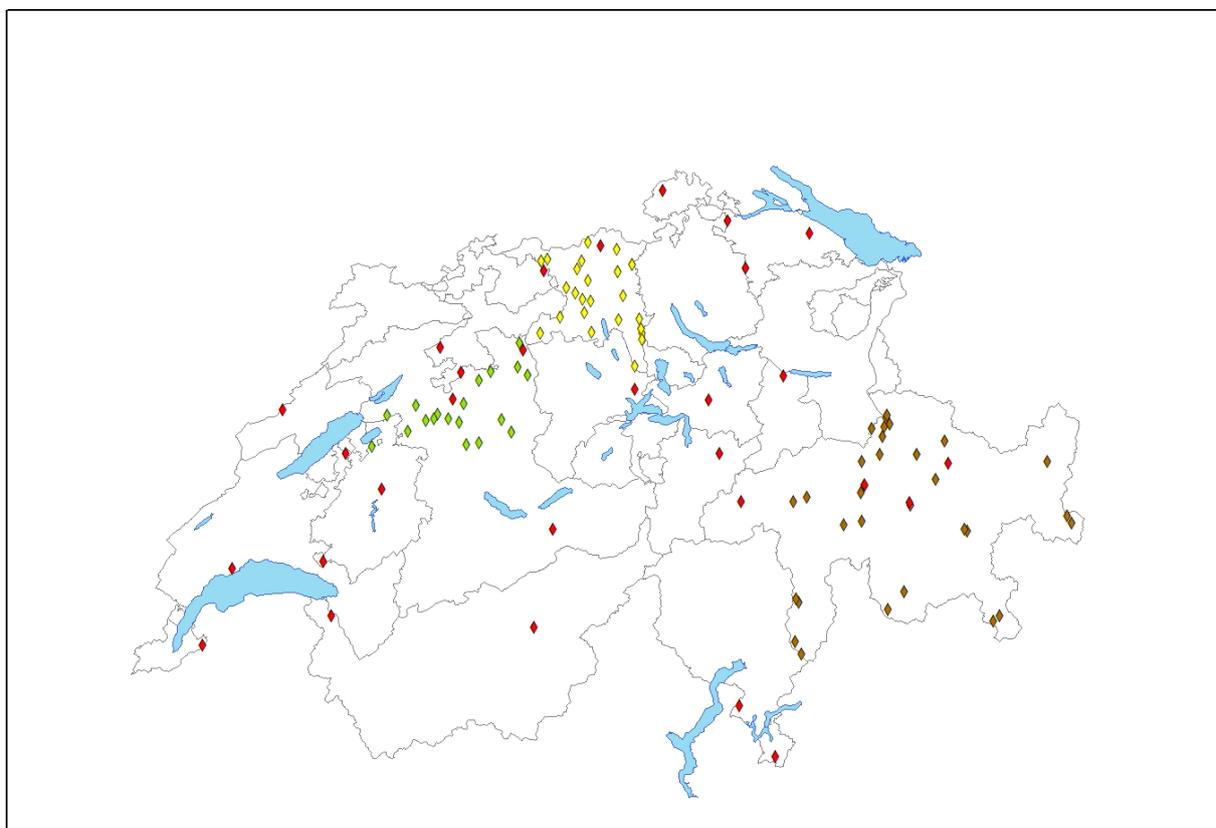


Abbildung 1: Messnetze und Standorte: NABObio (rot), KABO AG (gelb), KABO BE (grün), KABO GR (braun).

⁴ davon 2 Acker-, 13 Graslandstandorte mit 4-jährigem Beprobungszyklus

2.2 Probenahme

Sowohl die NABO als auch die KABOs führen die bodenbiologischen Analysen an Mischproben durch. Die Anzahl Einstiche und die Grösse der Beprobungsflächen sind dabei unterschiedlich. Allen gemein ist jedoch, dass sie immer an exakt demselben Ort zu Vegetationsbeginn entnommen werden. Die NABO führt ihre Probenahme selber durch. Die Kantonalen Fachstellen machen diese teilweise selber oder vergeben die Arbeiten an externe Partner. Die Kantone beproben die Ackerstandorte bis in eine Tiefe von 20 cm und die Graslandstandorte bis 10 cm. Die Standorte der NABO werden in allen Nutzungsklassen bis 20 cm beprobt. Detaillierte Angaben zu den jeweiligen Messnetzen können der Literatur entnommen werden (Mösch und Hunziker 2015, VOL 2017, Bräm 2011, Hug et al. 2018).

2.3 Bestimmung mikrobiologischer Messwerte und Begleitparameter

Sowohl die NABO also auch die drei Kantone lassen die mikrobielle Biomasse (Chloroform-Fumigation-Extraktions-Methode, bis 2017 auch Substratinduzierte Respiration SIR⁵) und die Basalatmung, gemäss den Referenzmethoden der Eidg. Landw. Forschungsanstalten (FAL, FAW, RAC, 1998) an der Agroscope durch die Gruppe «Pflanzen-Boden-Interaktionen» bestimmen. Die KABOs lassen zusätzlich die Begleitparameter pH, C_{org} und Körnung analysieren. Bei NABObio werden die Begleitparameter pH, C_{org}, C_{tot} und N_{tot} im Labor der NABO gemessen. Die Körnungsdaten von NABObio stammen grösstenteils von der NABO-Ersterhebung (1987 und folgende Jahre) und werden nicht jährlich neu erhoben.

Mit der Chloroform-Fumigation-Extraktions-Methode kann sowohl der mikrobielle Biomasse-Kohlenstoff (BM FE-C) als auch der mikrobielle Biomasse-Stickstoff (BM FE-N) bestimmt werden. Für diesen Bericht betrachten wir nur die Messgrösse BM FE-C. Der Lesbarkeit halber wird stets nur BM FE geschrieben – womit jedoch der mikrobielle Biomasse-Kohlenstoff gemeint ist.

2.4 Beurteilung anhand standortspezifischer Referenzwerte

Die mikrobielle Biomasse und die Basalatmung werden durch die Standortfaktoren geprägt, insbesondere durch die Landnutzung und die Bodeneigenschaften. Die gemessenen Werte können von Standort zu Standort sehr unterschiedlich sein. Daher werden standortspezifische Referenzwerte benötigt, um die Messwerte qualitativ zu beurteilen. Anstatt der absoluten Messwerte können dann die entsprechenden standortspezifischen Beurteilungen verglichen werden.

Für das Schweizer Mittelland wurden Regressionen für standortspezifische Referenzwerte empirisch hergeleitet (Oberholzer et al. 1999, Oberholzer und Scheid 2007, VBB/BSA 2009). Für Ackerböden existieren Referenzwertmodelle für Biomasse FE, Biomasse SIR und Basalatmung (Gleichung 1-3), für Grasland nur für Biomasse SIR (Gleichung 4). 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.

Ackerstandorte, 0-20 cm Bodentiefe

Mikrobielle Biomasse FE (mg C_{mik} kg⁻¹ TS)

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

Mikrobielle Biomasse SIR (mg C_{mik} kg⁻¹ TS)

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

⁵ Bis 2017 wurde die mikrobielle Biomasse bei allen vier Programmen zusätzlich mit der Methode Substratinduzierte Respiration (SIR) gemessen.

Basalatmung (mg CO₂-C kg⁻¹ TS h⁻¹)

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

Grasland, 0-10 cm Bodentiefe

Mikrobielle Biomasse SIR (mg C_{mik} kg⁻¹ TS)

$$\ln(\text{BM-SIR}) = 3.61 + 0.92 \ln(\text{C}_{\text{org}}) + 0.28 \text{ pH} + 0.17 \ln(\text{Ton}) \quad (4)$$

Hierbei entspricht C_{org} dem organischen Kohlenstoffgehalt in %, Ton und Sand den entsprechenden Körnungsanteilen in %, und *ln* dem natürlichen Logarithmus. Der letzte Term in Gleichung 3 entspricht der Einheiten-Umrechnung von mg CO₂ kg⁻¹ TS (24h)⁻¹ zu mg CO₂-C kg⁻¹ TS h⁻¹.

Gemäss dem Beurteilungsschema von Oberholzer et al. (1999) gelten Messwerte innerhalb des 67%-Vertrauensbereiches (VB₆₇) als «normal». Werte darüber und darunter werden als «hoch» bzw. «tief» betrachtet. Werte ober- und unterhalb des 95%-Vertrauensbereichs (VB₉₅) als «sehr hoch» bzw. «sehr tief». Die Bereiche werden mit dem Standardfehler der Schätzung (se_{est}; «standard error of estimate») für die log-transformierten Werte gebildet, wobei VB₆₇ = *ln*(y) ± se_{est} bzw. VB₉₅ = *ln*(y) ± 2se_{est}. Nach der Rücktransformation entsprechen die Vertrauensbereiche relativen Abweichungen vom Referenzwert. Das Beurteilungsschema erlaubt demnach eine Einteilung in fünf Klassen von sehr tief bis sehr hoch, die Messwerte können damit eingeordnet und kommuniziert werden.

Die mikrobiellen Messwerte können allerdings auch direkt mit den standortspezifischen Messwerten verglichen werden, indem die Messwerte durch die entsprechenden Referenzwerte dividiert werden (vgl. Gleichung 5). Unseres Wissens wurde dieser Quotient bisher nicht verwendet, wir bezeichnen ihn hier als Zustandsindikator Q und präzisieren mit einem Subskript, für welche Messgrösse Q berechnet wurde (Q_{BA}, Q_{FE-C} bzw. Q_{SIR}).

$$Q = \frac{\text{Messwert}}{\text{standortspezifischer Referenzwert}} \quad (5)$$

Q ist somit ein Indikator für den aktuellen Zustand des Standortes, der sich auf die jeweilige Messgrösse bezieht. Für Q > 1 liegt der Messwert über dem standortspezifischen Referenzwert, für Q < 1 darunter. Mit dem berechneten Zustandsindikator Q kann die von Oberholzer et al. (1999) definierte Beurteilungsklasse ermittelt werden, die entsprechenden Grenzwerte sind in Tabelle 2 festgehalten. Die Grenzen der Vertrauensbereiche für Q (bzw. der Beurteilungsstufen) berechnen sich folgendermassen (wobei se = se_{est}):

Grenze „sehr tief“ zu „tief“	= untere Grenze VB ₉₅	= e ^{-2se}
Grenze „tief“ zu „normal“	= untere Grenze VB ₆₇	= e ^{-se}
Grenze „normal“ zu „hoch“	= obere Grenze VB ₆₇	= e ^{se}
Grenze „hoch“ zu „sehr hoch“	= obere Grenze VB ₉₅	= e ^{2se}

Tabelle 2: Qualitative Beurteilung der Summenparameter anhand des Zustandsindikators Q (Messwert dividiert durch Referenzwert). Die tabellierten Werte sind gerundet, für die exakten Werte müssen die obigen Formeln verwendet werden.

		Ackerbau		Grasland	
		Basalatmung	Biomasse FE	Biomasse SIR	Biomasse SIR
seest ⁶		0.201	0.2054	0.1836	0.2114
----- Wertebereiche für Q -----					
Beurteilung	sehr tief	<0.67	<0.66	<0.69	<0.66
	tief	0.67-0.81	0.66-0.81	0.69-0.83	0.66-0.80
	normal	0.82-1.22	0.82-1.22	0.84-1.20	0.81-1.23
	hoch	1.23-1.49	1.23-1.50	1.21-1.44	1.24-1.53
	sehr hoch	>1.49	>1.50	>1.44	>1.53

Der Vorteil des Zustandsindikators Q ist, dass es sich um eine numerische und kontinuierliche Grösse handelt, im Gegensatz zu den diskreten Klassen des Beurteilungsschemas. Dadurch...

- ist ersichtlich, wo der Messwert innerhalb der Klasse liegt. Beispielsweise ob ein «normaler» Messwerte an der oberen Grenze liegt und damit nahe bei der Bewertung «hoch».
- vereinfachen sich grafische Darstellungen und statistische Auswertungen, beispielsweise um Korrelationen zu Boden- und Standorteigenschaften zu analysieren.
- lässt sich Q sehr einfach für ganze Standortkollektive zusammenfassen (sei es als Durchschnitt oder Median). Somit kann der aktuelle Zustand des Kollektives und dessen zeitliche Entwicklung erfasst werden.
- sind auch Veränderungen innerhalb einer Klasse sichtbar. Dies ist auf der Ebene Einzelstandorte zwar kaum sinnvoll, auf der Ebene ganzer Kollektive hingegen aussagekräftiger, als wenn nur die Klassen betrachtet werden.

Folglich ist der Zustandsindikator Q insbesondere für die Beschreibung und Auswertung von Standortkollektiven vorteilhaft. Der Mittelwert oder der Median über das Kollektiv kann als Indikator für den aktuellen Zustand des betrachteten Kollektivs dienen. Auf der Ebene der einzelnen Standorte sind die fünf Klassen des Beurteilungsschemas hingegen ausreichend. Insbesondere für die Kommunikation mit Landwirten und Laien sind die qualitativen Klassen zu bevorzugen. Denn es ist zu beachten, dass es sich bei den Referenzwerten um empirische Modelle handelt, deren Genauigkeit und Allgemeingültigkeit beschränkt ist.

2.5 Auswertung der zeitlichen Entwicklung

Die unter 2.4 beschriebenen Regressionsformeln (Gleichungen 1, 2 und 3) wurden für Ackerstandorte und für Proben aus einer Tiefe von 0-20 cm erarbeitet. Da die NABO alle Landnutzungen 0-20 cm tief beprobt und wir nur Messwerte, die von Proben derselben Beprobungstiefe stammen, vergleichen möchten, fokussieren wir uns in diesem Bericht auf Ackerstandorte mit der Beprobungstiefe von 0-20 cm. Die Vergleichbarkeit von Messwerten mit unterschiedlichen Beprobungstiefen besprechen wir in Kapitel 3.2.2. Basierend auf den genannten Einschränkungen konnten wir die Messwerte von 46 Ackerstandorten (35, falls der Oberacker als 1 Standort gezählt wird) auswerten (Tabelle 3).

⁶ Die Werte für seest wurden aus H.R Oberholzers Excel-Vorlagen für die Auswertung entnommen.

Tabelle 3: Für die Auswertung berücksichtigte NABO- und KABO-Standorte (nur Ackerstandorte).

Messnetz / Datensatz	Anzahl Standorte	Messwerte berücksichtigt von - bis	C _{org} [Gew.-%] (min/mean/max)	pH (min/mean/max)
NABO	10	2012-2018	0.9 1.8 3.0	5.6 6.6 7.5
NABO 04/05 ⁷	7	2004/05	1.6 1.9 2.8	5.3 6.2 7.3
KABO AG	7	2005 - 2018	1.5 2.3 3.2	6.5 7.0 7.4
KABO BE	15	2004 - 2018	1.0 1.7 5.4	4.9 5.8 7.0
Oberacker Kanton BE	1 mit 12 Teilparzellen	2004 - 2018	1.2 1.6 2.1	5.7 6.0 6.7
KABO GR	2	2006 - 2018	1.7 3.3 4.7	6.9 7.1 7.3
Total Standorte	35 resp. 46			

Damit die gemessenen mikrobiologischen Werte anhand der Regressionsgleichungen beurteilt werden können, müssen zu jedem Messwert auch der pH-Wert und die C_{org}-, Ton- und Sandgehalte vorhanden sein. Für Messwerte, die keine zeitgleich gemessenen Begleitparameter aufwiesen, haben wir den Standortmittelwert verwendet. Beispielsweise wurden beim KABO AG für die Begleitparameter Standortmittelwerte verwendet – gebildet aus der Ersterhebung im Jahre 2005 und weiteren Bestimmungsjahren ab 2016. Die fünf verschiedenen Zeitreihen unterscheiden sich zudem in der Periodizität der Beprobung. Probleme, die sich daraus bei der gemeinsamen Auswertung ergeben, besprechen wir in Kapitel 3.2.1.

⁷ Alles NABObio-Standorte.

3 Ergebnisse & Diskussion

Im folgenden Kapitel stellen wir die Ergebnisse der gemeinsamen Auswertung der NABObio- und KABO-Daten vor. Die Abschnitte dieses Kapitels beziehen sich auf die Fragestellungen, die wir in der Einleitung formuliert haben.

3.1 Zusammenführung der Daten aus KABO- und NABO-Messnetzen

Um Daten über mehrere Jahre, aber auch zwischen verschiedenen Standorten und Bodenbeobachtungsprogrammen vergleichen zu können, braucht es eine standardisierte Probenahme von gut dokumentierten Standorten. Ebenfalls von Bedeutung ist die Probenaufbereitung und Analyse durch stets dasselbe Labor. Dies ist für die hier verwendeten Daten von NABObio und den drei KABOs der Fall. Bei der gemeinsamen Auswertung der 46 Ackerstandorte mussten wir berücksichtigen, dass die Standorteigenschaften der Messnetze sehr unterschiedlich sind. Beispielsweise weisen die Standorte des KABO GR hohe C_{org} -Gehalte mit einem grossen Wertebereich und jene des KABO AG höhere Ton-Gehalte auf (Abbildung 2; Standorte aus Tabelle 1).

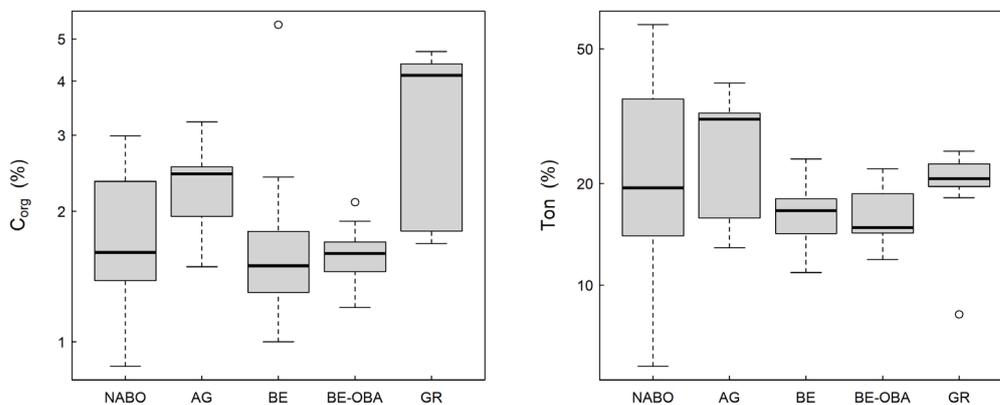


Abbildung 2: Standorteigenschaften für die fünf berücksichtigten Datensätze. Gehalte an organischem Kohlenstoff (C_{org} ; links) und Ton (%) des Oberbodens 0-20 cm. Die Boxen schliessen jeweils die Werte vom 1. bis 3. Quartil ein, der horizontale Strich markiert den Median.

Bodeneigenschaften wie der C_{org} - und der Ton-Gehalt sind bei der Beurteilung der gemessenen Werte zentral. Ein hoher C_{org} -Gehalt z.B. ergibt einen hohen standortspezifischen Referenzwert für die mikrobielle Biomasse. Derselbe gemessene Wert für die Biomasse kann folglich je nach C_{org} -Gehalt als «gut» oder «schlecht» eingestuft werden. Auch der pH-Wert und die Körnung beeinflussen die Referenzwerte.

Bei unserem Vorgehen möchten wir der Standortabhängigkeit der Messwerte Rechnung tragen und werden uns im Folgenden beim Vergleichen der Daten auf die Beurteilungsklassen und auf den Zustandsquotienten Q_{FE-C} , Q_{BA} oder Q_{SIR} beziehen (vgl. auch Kapitel 2.4).

3.2 Umgang mit methodischen Unterschieden

In diesem Bericht werten wir Daten von mehreren Messnetzen aus. Neben den beschriebenen Unterschieden der Standorteigenschaften sind die Periodizität der Beprobung und die Beprobungstiefe weitere bedeutende Unterscheidungsmerkmale (vgl. Tabelle 1). In diesem Kapitel beschreiben wir die Probleme, die daraus entstehen können, zeigen mögliche Lösungswege auf und formulieren Punkte, die bei einer gemeinsamen Auswertung berücksichtigt werden sollten.

3.2.1 Unterschiedliche Periodizität

Mit den fünf Datensätzen, die für unsere Auswertung zur Verfügung stehen, erhalten wir einen Überblick über den mikrobiologischen Zustand von 46 Dauerbeobachtungsstandorten (35, falls der Oberacker als 1 Standort gezählt wird), wobei die Zeitreihen z.T. bis 2004 zurückreichen. Tabelle 4 zeigt die Beurteilung der mikrobiellen Biomasse FE. Dabei ist zu erkennen, dass bei allen Messnetzen zeitliche Lücken vorhanden sind. Weiter kommen neue Standorte hinzu oder gewisse werden nicht mehr beprobt.

Um allfällige Tendenzen deutlich zu machen, visualisieren wir die langfristige Entwicklung mit Hilfe eines Säulendiagramms. Bei diesem Vorgehen wird ersichtlich, dass sich die jeweiligen Anteile der Klassen über die Zeit ändern (Abbildung 3). Was jedoch nicht erkennbar ist, ob es sich dabei um dieselben Standorte handelt – es werden für die einzelnen Jahre unterschiedliche Kollektive beurteilt, sowohl in ihrer Anzahl als auch in der Zusammensetzung.

Tabelle 4: Standorte und Beurteilung der mikrobiellen Biomasse FE. Die Teilparzellen des Standorts Oberacker werden zwar jährlich beprobt, jedoch in der Regel nicht 0-20 cm tief. (NA: kein Wert).

Programm	Standort	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
NABO	NABO25	hoch	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	normal	normal	normal	normal	normal	normal	normal	
	NABO28	hoch	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	normal	normal	normal	normal	normal	normal	normal	
	NABO46	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	normal	normal	normal	tief	normal	tief	normal	
	NABO54	normal	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	normal	normal	normal	normal	normal	normal	normal	
	NABO63	normal	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	normal	normal	normal	normal	normal	NA	NA	
	NABO68	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	normal	normal	normal	normal	normal	normal	normal	normal
	NABO77	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	hoch	hoch	normal	hoch	hoch	hoch	hoch	
	NABO87	hoch	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	normal	hoch	normal	normal	normal	normal	normal	
	NABO95	normal	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	normal	normal	normal	normal	normal	normal	normal	
	NABO102	hoch	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	sehr hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	
KABO AG	101he	NA	normal	normal	normal	normal	normal	normal	normal	normal	normal	normal	normal	normal	normal	normal	
	100ob	NA	NA	hoch	normal	normal	hoch	normal	normal	normal	normal	normal	normal	normal	normal	NA	
	104me	NA	NA	tief	sehr tief	sehr tief	sehr tief	hoch	normal	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	105me	NA	NA	normal	normal	normal	tief	hoch	NA	normal	normal	NA	NA	NA	NA	NA	
	153su	NA	NA	sehr tief	sehr tief	sehr tief	sehr tief	normal	tief	tief	sehr tief	tief	tief	normal	normal	normal	
	159st	NA	NA	sehr tief	sehr tief	NA	sehr tief	sehr tief	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	158me	NA	NA	NA	NA	NA	NA	hoch	NA	normal	normal	NA	normal	NA	NA	NA	
KABO BE	GRA_KW	sehr tief	NA	NA	NA	NA	NA	NA	sehr hoch	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	RUB_KW	sehr hoch	NA	NA	NA	NA	NA	NA	normal	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	BAN_KW	sehr hoch	NA	NA	NA	NA	normal	NA	NA	NA	NA	hoch	NA	NA	NA	NA	
	ROG_KW	NA	normal	NA	NA	NA	NA										
	UET_KW	NA	normal	NA	normal	NA	NA	NA	NA								
	BUC_KW	NA	normal	NA	NA	NA	NA	NA	NA	normal	NA	NA	NA	normal	NA	NA	
	MAD_KW	NA	NA	hoch	NA	NA	NA	NA	NA	hoch	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	SCH_KW	NA	NA	normal	NA	normal	NA	NA	NA	NA							
	CLA_KW	NA	NA	hoch	NA	NA	NA	NA	normal	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	
	RUE_KW	NA	NA	NA	hoch	NA	hoch	NA	NA	NA							
	MOE_KW	NA	NA	NA	normal	NA	NA	NA	NA	NA	hoch	NA	NA	NA	NA	NA	
	KIR_KW	NA	NA	NA	NA	NA	normal	NA	NA	NA	NA	NA	NA	normal	NA	NA	
	HIN_KW	NA	NA	NA	NA	NA	normal	NA	NA	NA	NA	NA	NA	normal	NA	NA	
	NIE_KW	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	hoch	NA	NA	NA	NA	
AUS_KW	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	normal	NA	NA	NA	NA	NA		
Oberacker Kanton BE	OBA1_DS	NA	NA	tief	NA	NA	NA	NA									
	OBA1_PF	NA	NA	normal	NA	NA	NA	NA									
	OBA2_DS	NA	NA	normal	NA	NA	NA	NA									
	OBA2_PF	NA	NA	normal	NA	NA	NA	NA									
	OBA3_DS	NA	NA	tief	NA	NA	NA	NA									
	OBA3_PF	NA	NA	normal	NA	NA	NA	NA									
	OBA4_DS	NA	NA	normal	NA	NA	NA	NA									
	OBA4_PF	NA	NA	normal	NA	NA	NA	NA									
	OBA5_DS	NA	NA	normal	NA	NA	NA	NA									
	OBA5_PF	NA	NA	tief	tief	NA	NA	NA	NA								
	OBA6_DS	NA	NA	normal	NA	NA	NA	NA									
	OBA6_PF	NA	NA	normal	NA	NA	NA	NA									
	KABO GR	GR046	NA	NA	NA	hoch	normal	normal	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		GR025	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch	NA	NA	NA	NA

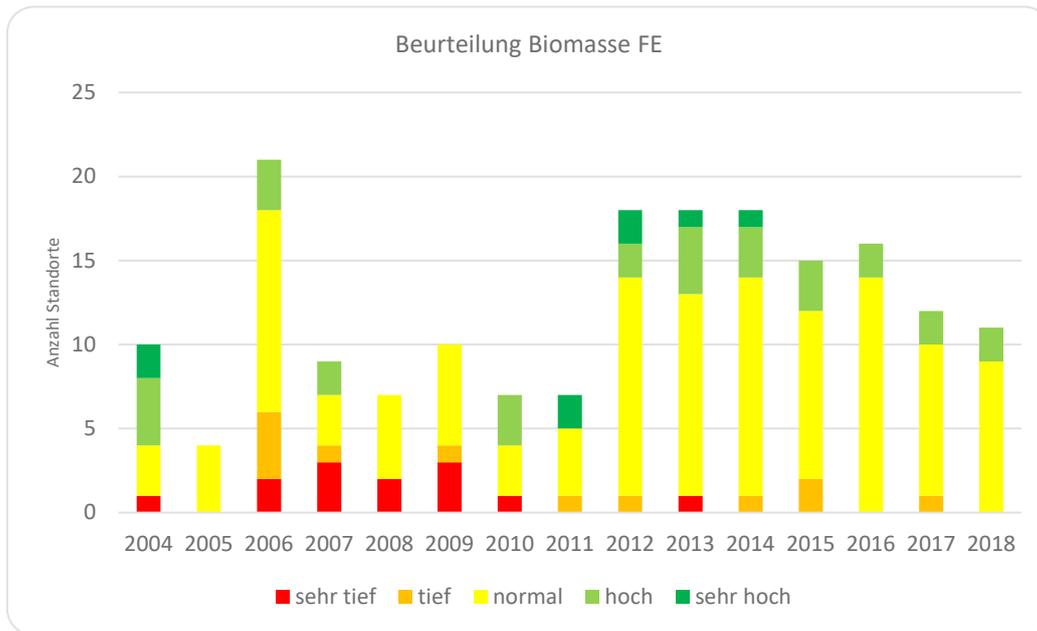


Abbildung 3: **Mikrobielle Biomasse FE** Anzahl Standorte und deren Beurteilung (Grafik basiert auf Tabelle 4, n=46). Durch zeitliche Lücken und das Zusammenfassen unterschiedlicher Standortkollektive pro Zeitpunkt können die Säulen nicht direkt verglichen werden.

Die Problematik der wechselnden Kollektive lässt sich folgendermassen lösen: Wir füllen die Zeitlücken mit dem letztmals gemessenen Wert auf, bis ein neuer Messpunkt vorhanden ist. Dabei entstehen (virtuelle) Zeitreihen mit jährlichen Werten (Tabelle 5). In unserem Fall ist es naheliegend, die jährliche Auflösung zu wählen, weil dies die höchste zeitliche Auflösung der Messwerte ist.

Das Monitoring hat zum Ziel, Veränderungen über die Zeit festzustellen. Daher sollten bei diesem Vorgehen nur Standorte verwendet werden, die mindestens zweimal gemessen wurden. Standorte, die nur einmal gemessen wurden, sind sowohl in der Tabelle 5, als auch in den Diagrammen der Abbildung 4 und Abbildung 5, nicht mehr enthalten⁸.

Das Säulendiagramm (Abbildung 4 und Abbildung 5) zeigt nun, dass das Kollektiv grösser wird. Dies geschieht immer, wenn Standorte erstmals gemessen und in die Zeitreihe aufgenommen werden. Ab einem gewissen Zeitpunkt (2012) bleibt die Anzahl Standorte stabil, d.h. es kommen keine weiteren dazu. Ab diesem Moment betrachtet man immer dasselbe Kollektiv mit denselben Standorten. Tendenzen werden so sichtbar und nachvollziehbar gemacht. Bei der mikrobiellen Biomasse FE (Abbildung 4) bleiben die Anzahl Standorte in den jeweiligen Beurteilungsklassen ziemlich konstant, bei der Basalatmung (Abbildung 5) dagegen scheint die Anzahl Standorte mit den Beurteilungsklassen «hoch» und «sehr hoch» zuzunehmen bzw. «normal» abzunehmen.

Damit aufgegebene Standorte nicht dauerhaft im Datensatz verbleiben, empfiehlt es sich, ein zeitliches Limit festzulegen, beispielsweise 10 oder 15 Jahre. Wird ein Standort innerhalb dieser Frist nicht erneut beprobt, wird die Zeitreihe aus dem Datensatz entfernt. So kann verhindert werden, dass der Datensatz immer mehr inaktive Standorte enthält, die zeitliche Stabilität vortäuschen.

⁸ Alle Standorte Teilparzellen Oberacker, ausser OBA5 PF, und Standorte AUS und NIE vom KABO BE.

Tabelle 5: Standorte und Beurteilung der mikrobielle Biomasse FE, dargestellt als «lückenlose» Zeitreihen ab Messbeginn an den einzelnen Standorten. Jahre, in welchen Messungen vorliegen, sind in Tabelle 4 ersichtlich.

Programm	Standort	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
NABO	NABO25	hoch	normal													
	NABO28	hoch	normal													
	NABO46	NA	normal	normal	normal	tief	normal	tief	normal							
	NABO54	normal														
	NABO63	normal														
	NABO68	NA	normal	normal	normal	normal	normal	normal								
	NABO77	NA	hoch	hoch	normal	hoch	hoch	hoch	hoch							
	NABO87	hoch	normal	hoch	normal	normal	normal	normal								
	NABO95	normal														
	NABO102	hoch	sehr hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch								
KABO AG	101he	NA	normal													
	100ob	NA	NA	hoch	normal	normal	normal	hoch	normal							
	104me	NA	NA	tief	sehr tief	sehr tief	sehr tief	normal								
	105me	NA	NA	normal	normal	normal	tief	hoch	hoch	normal						
	153su	NA	NA	sehr tief	sehr tief	sehr tief	sehr tief	normal	tief	tief	sehr tief	tief	normal	normal	normal	normal
	159st	NA	NA	sehr tief												
158me	NA	NA	NA	NA	NA	NA	hoch	hoch	normal							
KABO BE	GRA_KW	sehr tief	sehr hoch													
	RUB_KW	sehr hoch	normal													
	BAN_KW	sehr hoch	normal	normal	normal	normal	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch					
	ROG_KW	NA	normal													
	UET_KW	NA	normal													
	BUC_KW	NA	normal													
	MAD_KW	NA	NA	hoch												
	SCH_KW	NA	NA	normal												
	CLA_KW	NA	NA	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	normal						
	RUE_KW	NA	NA	NA	hoch											
MOE_KW	NA	NA	NA	NA	normal	normal	normal	normal	normal	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	
KIR_KW	NA	NA	NA	NA	NA	normal										
HIN_KW	NA	NA	NA	NA	NA	normal										
Oberacker	OBA5_PF	NA	NA	tief												
	GR046	NA	NA	NA	hoch	normal										
	GR025	NA	sehr hoch													

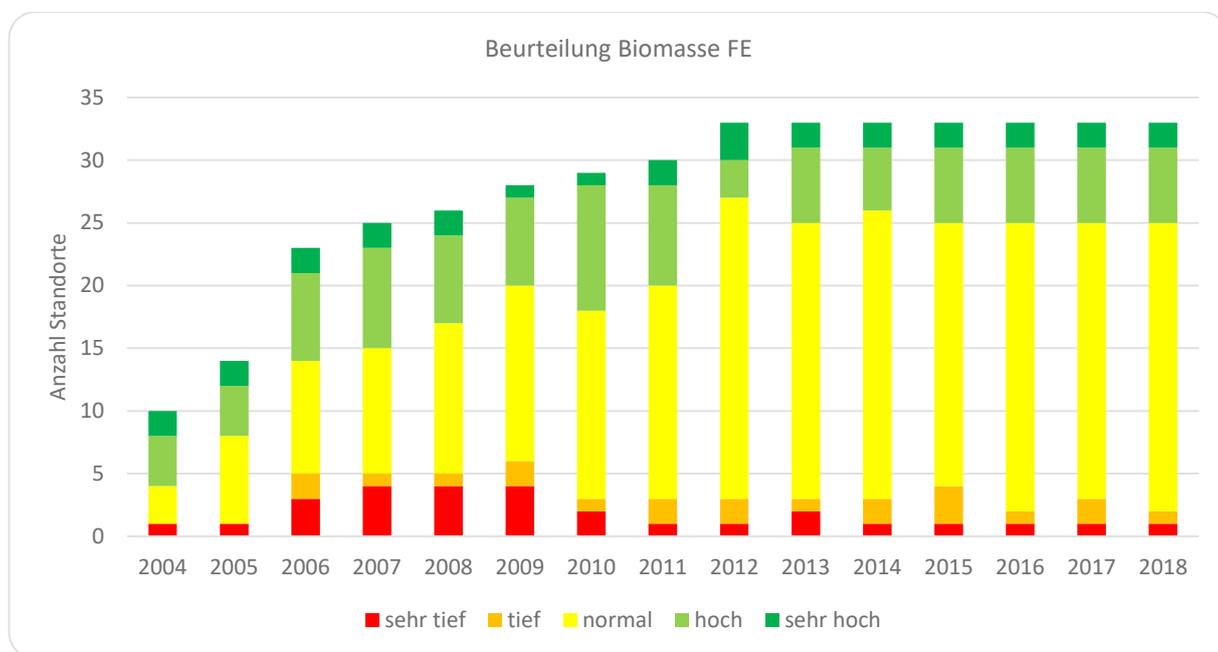


Abbildung 4: Mikrobielle Biomasse FE Anzahl Standorte und deren Beurteilung, Darstellung als Zeitreihe (n=33). Grafik basiert auf Tabelle 5. Ab 2012 wird immer dasselbe Standortkollektiv betrachtet und die Säulen sind dadurch miteinander vergleichbar.

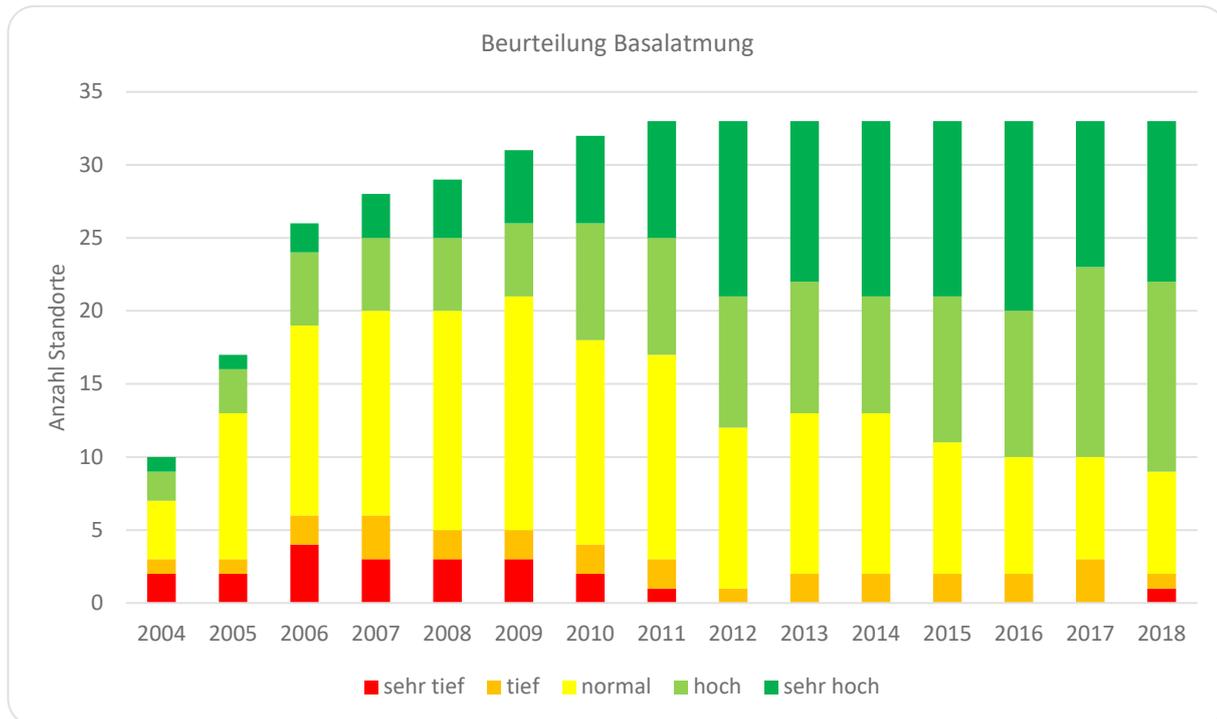


Abbildung 5: **Basalatmung** Anzahl Standorte und deren Beurteilung, Darstellung als Zeitreihe (n=33). Ab 2011 wird immer dasselbe Standortkollektiv betrachtet und die Säulen sind dadurch miteinander vergleichbar.

3.2.2 Unterschiedliche Beprobungstiefen

Der Humusgehalt und das Vorhandensein von Bodenorganismen verändern sich mit zunehmender Tiefe. Daher hat die Beprobungstiefe auch einen grossen Einfluss auf mikrobielle Messwerte wie die Basalatmung und die Biomasse. Dies zeigen auch Daten des KABO BE, das an Graslandstandorten gleichzeitig Proben aus 0-10 cm wie auch 0-20 cm Tiefe entnimmt. Dies ermöglicht den direkten Vergleich der Messwerte der beiden Beprobungstiefen. Da standortspezifische Referenzwerte bei Grasland nur für Biomasse SIR existieren, betrachten wir in diesem Abschnitt nur diesen Parameter. Die Resultate sind jedoch auf Biomasse FE und Basalatmung übertragbar, da auch bei diesen Messgrössen ähnliche Tiefengradienten beobachtet werden.

In Abbildung 6 ist erwartungsgemäss ersichtlich, dass die Messwerte für die Biomasse SIR der Tiefe 0-20 cm geringer sind als jene für 0-10 cm. Die Werte für 0-20 cm erreichen durchschnittlich nur 70 % des Niveaus, das für 0-10 cm beobachtet wurde⁹. Dieser Prozentsatz ist erstaunlich stabil und für alle Proben/Standorte sehr ähnlich. Ähnliche Verhältnisse wurden auch für die Biomasse FE-C (74 %) und die Basalatmung beobachtet (67 %; vgl. Anhang). Aufgrund der geringen Anzahl Beobachtungen (n=16) bleibt unklar, ob diese Proportionen allgemein gültig sind für (Schweizer) Graslandböden. Wir vermuten, dass diese je nach Region und Höhenlage deutlich abweichen.

Bei Grasland ist der C_{org} -Gehalt normalerweise an der Oberfläche am höchsten und nimmt über die obersten Zentimeter deutlich ab. Daher ist die C_{org} -Konzentration bei Proben aus 0-10 cm höher als bei Proben aus 0-20 cm. Dies führt dazu, dass erstere in der Regel auch eine höhere Biomasse aufweisen. Folglich sollten Messwerte aus unterschiedlichen Beprobungstiefen nicht direkt verglichen werden.

⁹ Für das Verhältnis SIR 0-20 cm: SIR 0-10 cm betragen Mittelwert und Median 0.70, der Interquartilbereich erstreckt sich von 0.65 bis 0.74.

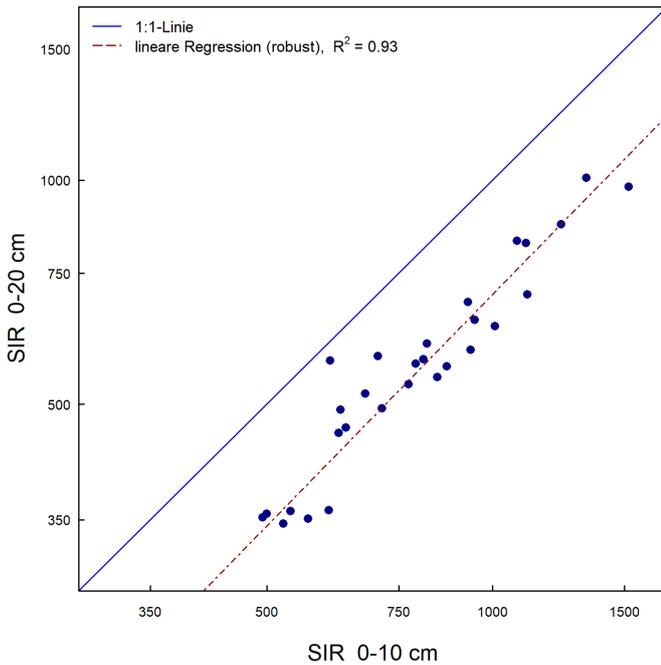


Abbildung 6: Vergleich der Messwerte für die Biomasse SIR aus 0-10 cm vs. 0-20 cm Tiefe für Grasland-Standorte der KABO BE, $n = 16$, beide Achsen log-skaliert. Lineare Regression, robust: $\ln(\text{SIR } 0-10) = -0.58 + 1.03 \ln(\text{SIR } 0-20)$; $R^2 = 0.93$.

Obschon die Regression der standortspezifischen Referenzwerte für Grasland für 0-10 cm Bodentiefe hergeleitet wurde (vgl. Kap. 2.4), verwendeten wir sie für beide Bodentiefen, um Q_{SIR} zu berechnen. Vergleichen wir die Tiefen von 0-10 cm und 0-20 cm anhand von Q_{SIR} (Abbildung 7), ist der Unterschied deutlich kleiner als beim Vergleich der absoluten Messwerte (Abbildung 6). Für 0-20 cm ist Q_{SIR} tendenziell etwas tiefer als für 0-10 cm, allerdings fällt die Bewertung sehr ähnlich aus und es besteht eine enge Korrelation ($R^2 = 0.86$). Daraus schliessen wir, dass das Referenzwertmodell auch für Proben aus der Tiefe 0-20 cm anwendbar ist. Somit können beide Beprobungstiefen gemeinsam ausgewertet werden, sofern der Quotient Q_{SIR} und nicht die absoluten Werte betrachtet werden. Bei einem Monitoring mit wiederholten Beprobungen an fixen Standorten ist es zudem wichtiger, dass die Beprobungstiefe dieser Standorte über die Zeit konstant bleibt. Denn für die Auswertung werden in diesem Fall zunächst die Zeitreihen der einzelnen Standorte (bzw. deren Entwicklung) betrachtet, bevor sie dann zum Gesamtbild aggregiert werden (hierarchisches Modell).

Das Referenzwertmodell für 0-10 cm Bodentiefe scheint folglich auch für die Proben aus 0-20 cm geeignet zu sein. Dies dürfte hauptsächlich daran liegen, dass das Modell C_{org} als erklärende Variable enthält. Die tieferen C_{org} -Gehalte der Proben aus 0-20 cm Tiefe gegenüber denjenigen aus 0-10 cm ergeben tiefere Referenzwerte, wie sie für die Messwerte SIR beobachtet wurden (vgl. oben). Möglicherweise braucht es aber eine zusätzliche Kompensation für die grössere Bodentiefe. Dies lässt sich nicht abschliessend beantworten, da die Datengrundlage zu gering ist. Die Messungen der Biomasse SIR wurden allerdings bei Agroscope 2017 eingestellt.

Für Grasland bestehen für die aktuell gemessenen mikrobiologischen Messgrössen (d.h. Basalatmung und Biomasse FE) keine Referenzwertmodelle. Zur Beurteilung der mikrobiologischen Qualität von Graslandstandorten sollten deshalb unbedingt standortspezifische Referenzwerte für die Biomasse FE, aber auch für die Basalatmung hergeleitet werden. Hierbei sollte auch abgeklärt werden, wie diese Referenzwertmodelle auf unterschiedliche Beprobungstiefen angewendet werden können, sofern diese auch zukünftig nicht einheitlich sein sollten.

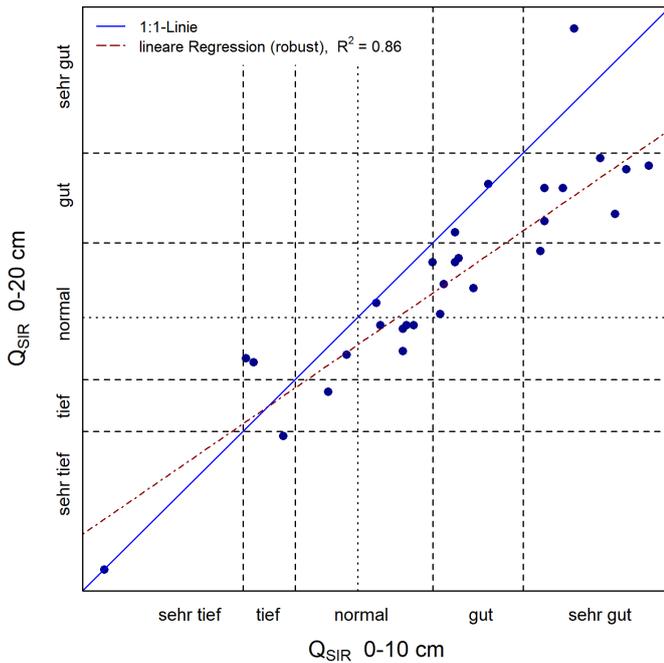


Abbildung 7: Vergleich von Q_{SIR} 0-10 cm vs. 0-20 cm für Grasland-Standorte der KABO BE, $n = 16$.

Die beiden Beprobungstiefen können auch anhand des metabolischen Quotienten qCO_2 (Quotient aus Basalatmung und Biomasse FE, vgl. Kap. 3.3) verglichen werden. Hier stimmen die Werte aus den Tiefen 0-10 cm vs. 0-20 cm sogar noch besser überein als für Q_{SIR} (Abbildung 8).

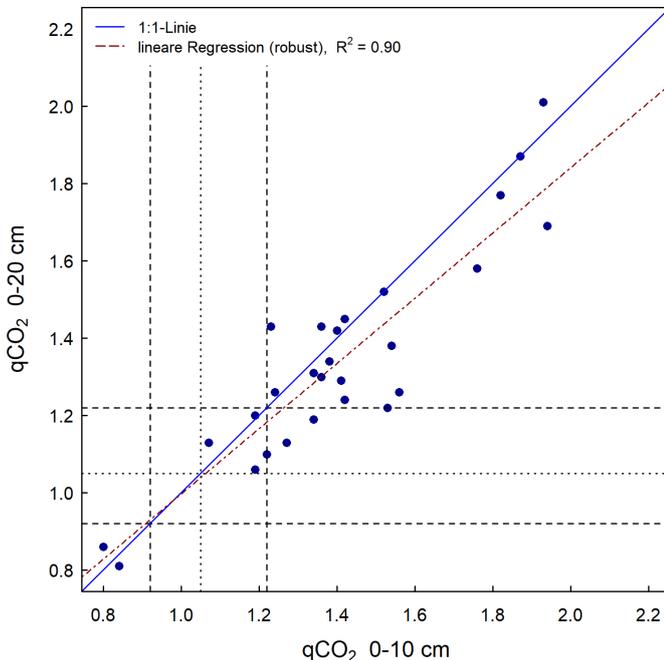


Abbildung 8: Vergleich des metabolischen Quotienten qCO_2 aus den Beprobungstiefen 0-10 cm vs. 0-20 cm für Grasland-Standorte der KABO BE, $n = 16$.

Auch wenn eine gemeinsame Auswertung beider Beprobungstiefen möglich ist, sind die unterschiedlichen Tiefen eine zusätzliche Fehlerquelle. Daher sollte in Zukunft eine einheitliche Beprobungstiefe angestrebt werden, denn neben der Bodennutzung hat auch die Beprobungstiefe einen grossen Einfluss auf den sicheren Nachweis von umweltbedingten Veränderungen der erhobenen Parameter (Maurer et al. 2020). Messwerte aus Tiefen <10 cm streuten stark, was auf grössere Unsicherheiten bei der Probenahme hinweist. Dies spricht für eine einheitliche Beprobungstiefe von 0-20 cm.

3.3 Der metabolische Quotient (qCO_2) zur Beurteilung des Mikrobioms

Der metabolische Quotient qCO_2 wird aus der Basalatmung und der mikrobiellen Biomasse gebildet. Er ist ein Mass dafür, wie effizient Mikroorganismen das Substrat (also ihre Nahrung) nutzen. Je grösser qCO_2 , desto mehr Substrat wird zu CO_2 veratmet, und desto weniger Substrat wird in die mikrobielle Biomasse eingebaut. Hohe Werte weisen darauf hin, dass die mikrobielle Gemeinschaft Stressoren ausgesetzt ist (Anderson und Domsch, 2010). In ökologisch bewirtschafteten Flächen ist der metabolische Quotient meist geringer als in konventionell bewirtschafteten Flächen (Fließbach et al. 2007, Heinze et al. 2010, Mäder et al. 2002). Damit kann der qCO_2 als Indikator für den Zustand der mikrobiellen Gemeinschaft verwendet werden. In diesem Abschnitt stellen wir die Beurteilung des Mikrobioms anhand des metabolischen Quotienten der Beurteilung anhand der Referenzwerte (Zustandsindikator Q) gegenüber.

Die Gegenüberstellung der Quotienten qCO_2 und beispielsweise Q_{FE-C} zeigt, dass Standorte mit einer normalen bis guten Beurteilung des Mikrobioms sowohl tiefe, normale als auch hohe Werte für den metabolischen Quotienten zeigen können. Dies deutet darauf hin, dass die Beurteilungsinstrumente unterschiedliche Aspekte des Mikrobioms berücksichtigen. Bei der Interpretation von bodenbiologischen Messungen können sich die beiden Instrumente daher ergänzen.

Die Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen, dass zwischen qCO_2 und Q_{FE-C} eine negative Korrelation (Rangkorrelation nach Spearman $\rho_s = -0.24$) und zwischen qCO_2 und Q_{BA} eine positive Korrelation ($\rho_s = 0.46$) besteht, wobei letztere deutlicher ausgeprägt ist. Der Zusammenhang zwischen qCO_2 und den beiden Quotienten Q_{FE-C} und Q_{BA} ist allerdings gering, die entsprechenden linearen Regressionen können nur einen kleinen Teil der Variabilität erklären mit R^2 von 0.07 (qCO_2 vs. Q_{FE-C}) bzw. 0.25 (qCO_2 vs. Q_{BA}). Die beobachteten Korrelationen kommen in erster Linie durch den mathematischen Zusammenhang $qCO_2 = \text{Basalatmung} : \text{Biomasse FE-C}$ zustande. Er führt dazu, dass bei hohen Werten für die Basalatmung höhere qCO_2 bzw. bei tieferen Werten für die Biomasse höhere qCO_2 möglich sind.

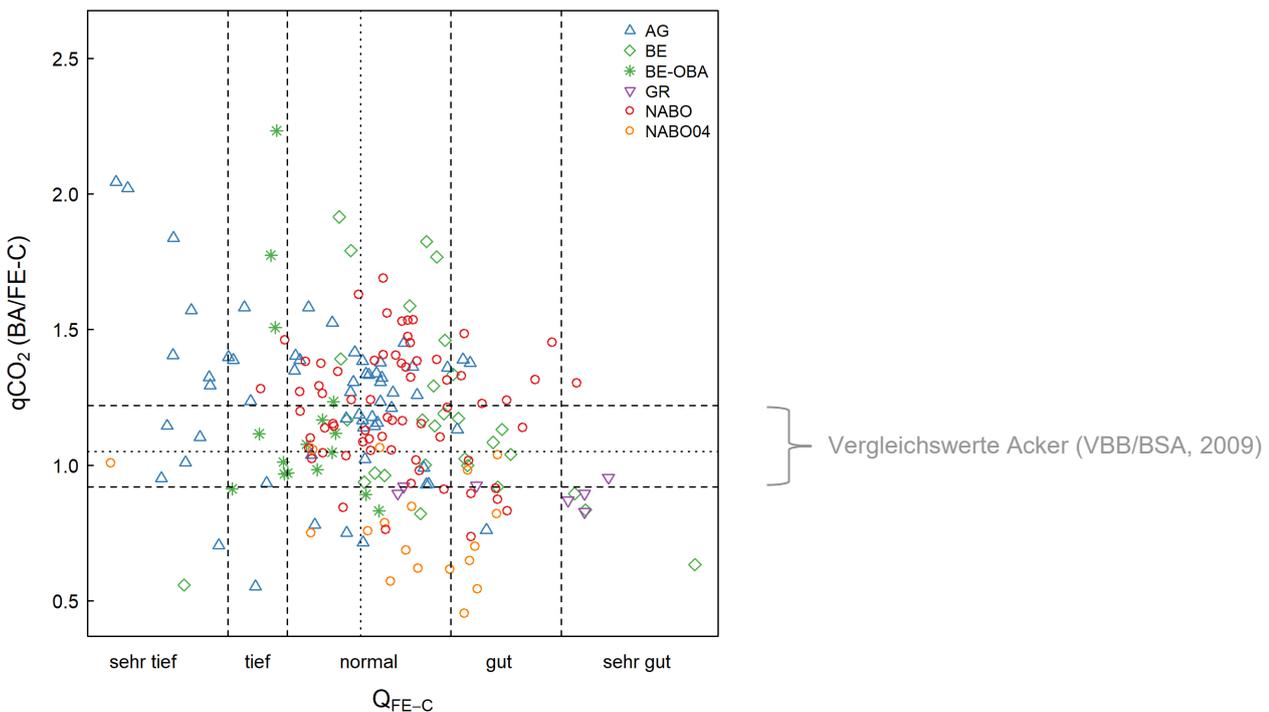


Abbildung 9: Vergleich des metabolischen Quotienten qCO_2 mit den Q_{FE-C} . Die Vergleichswerte der «Arbeitshilfe zur Anwendung und Interpretation bodenbiologischer Parameter» (VBB/BSA, 2009) zeigen für Ackerland für qCO_2 einen Median von 1.05 (horizontale gepunktete Linie), 1. und 3. Quartil: 0.92 bzw. 1.22 (horizontale gestrichelte Linien).

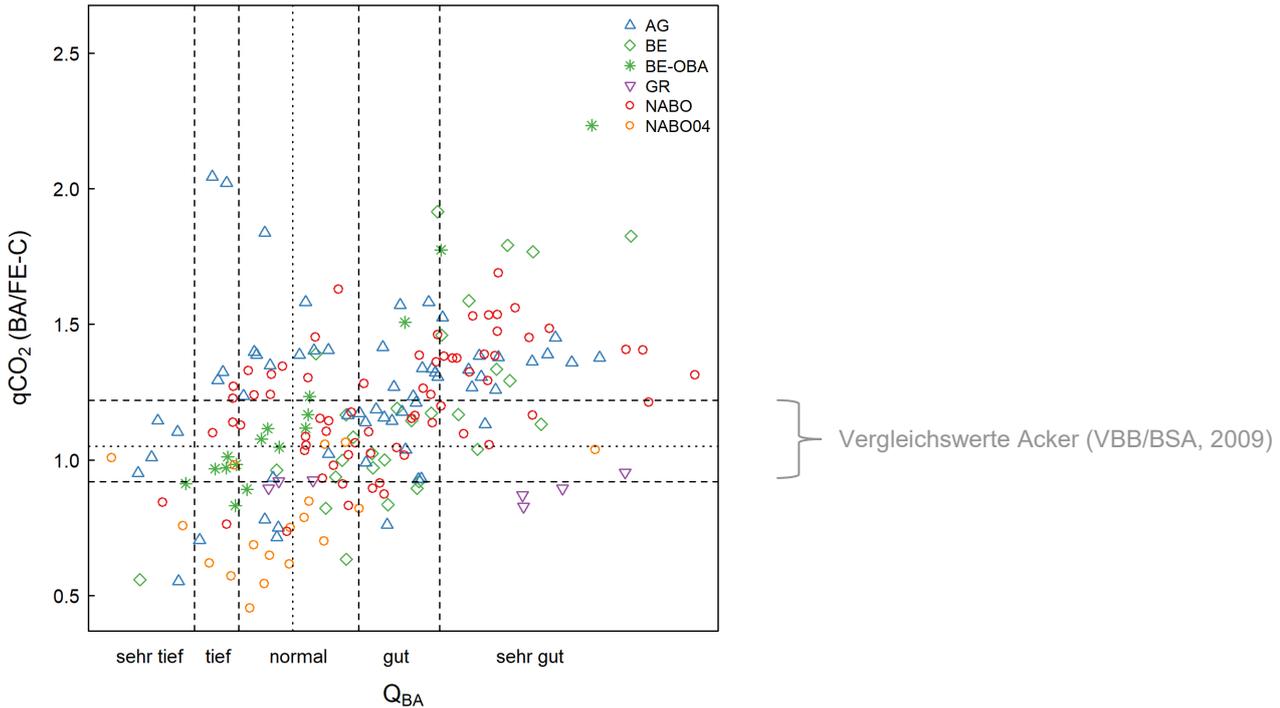


Abbildung 10: Vergleich des metabolischen Quotienten qCO_2 mit Q_{BA} . Die Vergleichswerte der «Arbeitshilfe zur Anwendung und Interpretation bodenbiologischer Parameter» (VBB/BSA, 2009) zeigen für Ackerland für qCO_2 einen Median von 1.05 (horizontale gepunktete Linie), 1. und 3. Quartil: 0.92 bzw. 1.22 (horizontale gestrichelte Linien).

3.4 Vergleich der Beurteilung anhand der Quotienten Q_{FE-C} und Q_{BA} mit der Beurteilung der Bodenstruktur anhand des C_{org} :Ton-Verhältnisses

Johannes et al. (2017) untersuchten für Böden im Schweizer Mittelland die C_{org} - und Ton-Gehalte sowie die Qualität der Bodenstruktur. Hierbei hatten Böden mit höheren C_{org} :Ton-Verhältnissen eine bessere Struktur im Vergleich zu Böden mit tieferen Verhältnissen. Basierend auf diesen Daten leiteten die Autoren Grenzwerte ab, um die Bodenstruktur anhand des C_{org} :Ton-Verhältnisses zu bewerten (Tabelle 6). Gegenwärtig wird auch diskutiert, ob sich diese Grenzwerte dazu eignen, standortspezifische Referenzwerte für die organische Substanz bzw. C_{org} abzuleiten (vgl. dazu auch Cercle sol, VBBio-BioSA, Bulletin 19, 2020).

Tabelle 6: C_{org} :Ton-Verhältnisse und deren Bewertung (Johannes et al. 2017). Gehalte an C_{org} und Ton: beide als Gew.-%, C_{org} bestimmt mit FAL-Methode (Dichromat-Oxidation).

C_{org} : Ton	C_{org} : Ton (dezimal)	Bewertung
>1:8	> 0.125	sehr gut
1:10 < Wert < 1:8	0.1 < Wert < 0.125	gut
1:13 < Wert < 1:10	0.077 < Wert < 0.1	ungenügend
< 1:13	< 0.077	schlecht

Die Bodenstruktur beeinflusst massgeblich die Lebensgemeinschaften im Boden, umgekehrt beeinflussen die Bodenlebewesen auch die Bodenstruktur. Daher ist eine Korrelation zwischen den Beurteilungssystemen zu erwarten. Die Referenzwerte für BA und FE-C berücksichtigen zudem die standortspezifischen C_{org} - und Ton-Gehalte, die beiden Beurteilungsansätze basieren somit zumindest teilweise auf derselben Datengrundlage. Im

Folgenden wenden wir die Beurteilung anhand des C_{org} :Ton-Verhältnisses auf die hier untersuchten Standorte der KABOs und der NABO an. Die Bewertung für die Bodenstruktur verglichen wir mit der Beurteilung anhand der Quotienten Q_{BA} und Q_{FE-C} .

Erkennbar ist, dass gewisse Standorte sowohl hinsichtlich ihres Mikrobioms als auch ihrer Bodenstruktur mit «gut» bis «sehr gut» bewertet wurden (siehe Abbildung 11). Ein Grossteil der Standorte wurde anhand des Q_{FE-C} als «normal» eingestuft, hinsichtlich ihres C_{org} :Ton-Verhältnisses jedoch als «schlecht». Es gibt jedoch auch Standorte, die diametral verschiedene Beurteilungen aufweisen: Sie weisen eine «sehr gute» Bodenstruktur auf, die mikrobiellen Biomasse-Werte hingegen wurden als «sehr tief» eingestuft.

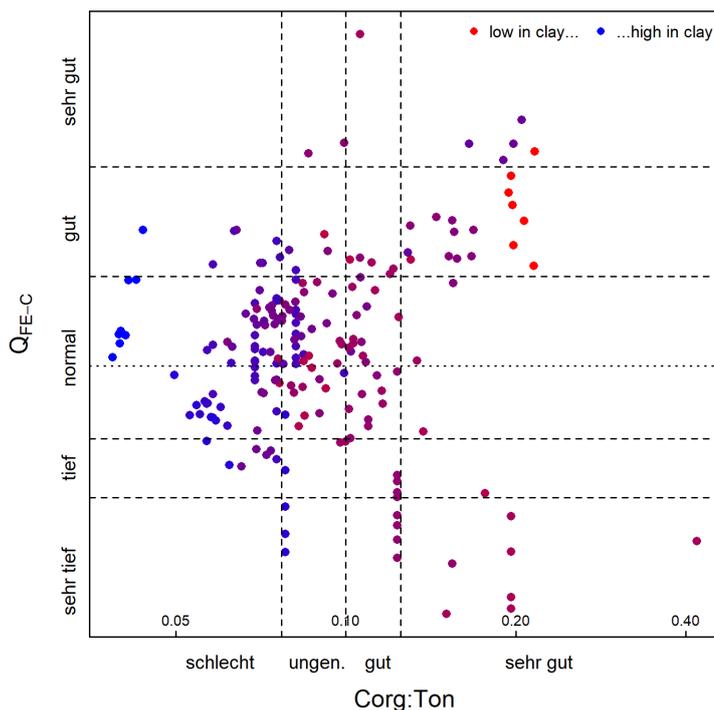


Abbildung 11: Beurteilung der Standorte anhand ihres C_{org} :Ton-Verhältnisses und des Quotienten Q_{FE-C} (46 Standorte). Die graduelle Einfärbung entspricht dem Tongehalt.

Betrachtet man den Aspekt des Ton- bzw. des C_{org} -Gehaltes etwas genauer, ist erkennbar, dass vor allem Böden mit einem hohem Tongehalt unterschiedliche Beurteilungen erhalten haben (Abbildung 11). Für den C_{org} -Gehalt scheint es keinen so klaren Zusammenhang zu geben. Böden mit hohem C_{org} -Gehalt zeigen sowohl gleiche als auch unterschiedliche Beurteilungen (Abbildung 12).

Auch der Vergleich der Beurteilungen anhand Q_{BA} mit dem C_{org} :Ton-Verhältnis zeigt, dass diese vor allem bei Standorten mit sehr hohem resp. tiefem Tongehalt unterschiedliche Bewertungen führen (Abbildung 13). Bei Standorten mit einem Tongehalt zwischen 10-20 % (violette Einfärbung) stimmt die Bewertung der beiden Quotienten am besten überein. Für Böden mit hohem Tongehalten ist es oft schwierig(er), genügend organische Substanz aufzubauen, um ein gutes C_{org} :Ton-Verhältnis zu erreichen. Umgekehrt erreichen sandige Böden relativ leicht ein hohes C_{org} :Ton-Verhältnis. Für die Biomasse und insbesondere die Basalatmung erreichen die hier gezeigten tonreichen Böden hingegen gute Bewertungen, sandige Böden teilweise ebenfalls sehr gute, teilweise aber auch schlechte Bewertungen. Wir folgern daraus, dass die standortspezifischen mikrobiologischen Referenzwerte stärker von der Textur als vom C_{org} :Ton-Verhältnis beeinflusst werden.

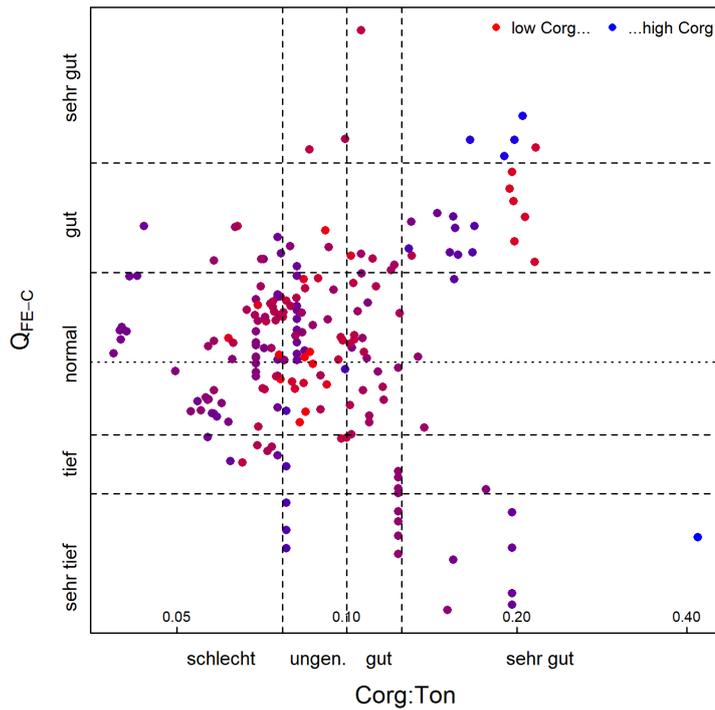


Abbildung 12: Beurteilung der Standorte anhand ihres C_{org} :Ton-Verhältnisses und des Quotienten Q_{FE-C} (46 Standorte). Die graduelle Einfärbung entspricht dem C_{org} -Gehalt.

Die beiden Konzepte beurteilen unterschiedliche Aspekte des Bodens (Bodenstruktur bzw. Bodenbiologie). Zwischen diesen bestehen zwar viele Interaktionen, die Bodenbiologie jedoch wird neben der Bodenstruktur von vielen weiteren Faktoren beeinflusst. Daher sind die beobachteten Unterschiede in der Bewertung zu erwarten und plausibel.

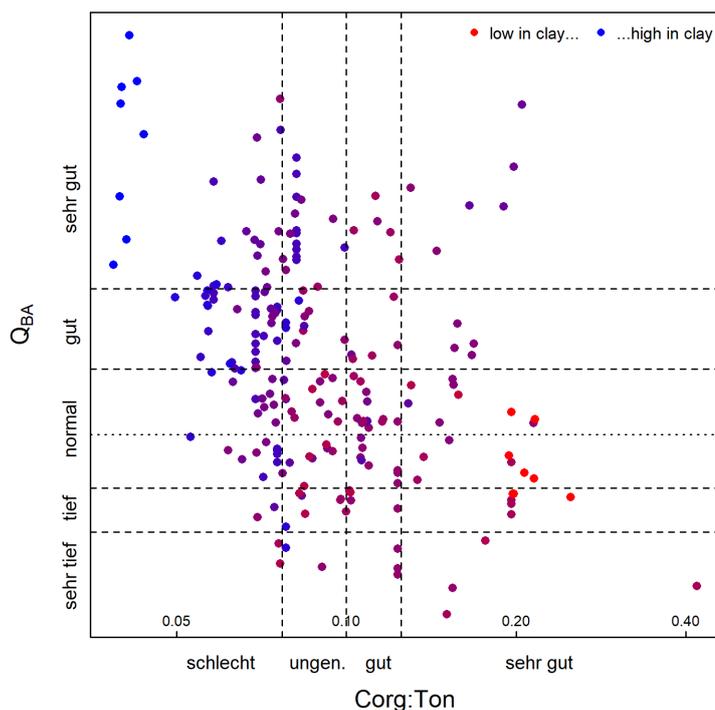


Abbildung 13: Beurteilung der Standorte anhand ihres C_{org} :Ton-Verhältnisses und des Quotienten Q_{BA} (46 Standorte). Die graduelle Einfärbung entspricht dem Tongehalt.

4 Dank

Ein Dankeschön gebührt der Sektion Boden der Abteilung Boden und Biotechnologie des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) und dem Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) für die Unterstützung und das Vertrauen in unsere Arbeit. Zudem danken wir den Mitarbeitenden der kantonalen Bodenschutzfachstellen für ihre fachlichen Inputs und ihr Vertrauen: Claudia Maurer (Kt. BE), Marco Lanfranchi (Kt. GR) und Dominik Müller (Kt. AG). Weiter bedanken wir uns für die Zusammenarbeit mit der Gruppe «Pflanzen-Boden-Interaktionen» (Agroscope): bei Susanne Müller und Andrea Bonvicini für die Laborarbeiten und bei Florian Walder für den fachlich-wissenschaftlichen Austausch.

5 Literaturverzeichnis

- Anderson, T.-H., Domsch, K.H., 2010. Soil microbial biomass: The eco-physiological approach. *Soil Biol. Biochem* 42: 2039-2043.
- Bräm, E., 2011. Bodenbiologische Untersuchungen in Graubünden. VBB-Bulletin. Nr. 13, 14–17.
- Cercle sol, VBBio-BioSA, 2020. Humus-Referenzwert für Ackerböden. Leitfaden für die Entwicklung eines Referenzwerts für den Vollzug. In press.
- FAL, FAW, RAC (1998). Schweizerische Referenzmethoden der Eidgenössischen landwirtschaftlichen Forschungsanstalten, Band 2, Bodenuntersuchung zur Standort-charakterisierung.
- Fließbach, A., Oberholzer, H., Gunst, L., Mäder, P., 2007. Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. *Agric. Ecosyst. Environ.* 118, 273–284.
- Greiner L., Nussbaum M., Papritz A., Fraefel M., Zimmermann S., Schwab P., Grêt-Regamey A., Keller A. 2018. Assessment of soil multi-functionality to support the sustainable use of soil resources on the Swiss Plateau. *Geoderma Regional*, 14, e00181.
- 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.
- Heinze, S., Raupp, J., Joergensen, R.G., 2010. Effects of fertilizer and spatial heterogeneity in soil pH on microbial biomass indices in a long-term field trial of organic agriculture. *Plant Soil* 328: 203-215.
- Hug A.S., Gubler A., Gschwend F., Widmer F., Oberholzer H., Frey B., Meuli R.G. 2018. NABObio – Bodenbiologie in der Nationalen Bodenbeobachtung, Ergebnisse 2012–2016, Handlungsempfehlungen und Indikatoren. *Agroscope Science* 63. Zürich-Reckenholz.
- Johannes A., Matter A., Schulin R., Weisskopf P., Paveye Ph.C., Boivin P. 2017: Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? *Geoderma* 302: 14-21.
- Keller A., Franzen J., Knüsel P., Papritz A., Zürrer M. 2018. Bodeninformations-Plattform Schweiz (BIP-CH). Thematische Synthese TS4 des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68), Bern.
- Mäder, P., Fließbach, A., Dubois, D., Gunst, L., Fried, P., Niggli, U., 2002. Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Science* 296: 1694-1697.
- Maurer C., Müller D., Lanfranchi M., Weisskopf P., Oberholzer H.R., Walder F. 2020. Mikrobiologische Parameter in der Kantonalen Bodenbeobachtung – eine Synthese. *Agrarforschung Schweiz* 11: 147-153.

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 microbiological parameters related to the characteristics of individual arable sites. *Agribiological Research* 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.

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.

6 Anhang

6.1 Zeitliche Verläufe des metabolischen Quotienten

Die folgenden Abbildungen zeigen die zeitlichen Verläufe des metabolischen Quotienten der NABO- und KABO-Standorte (AG, BE und GR). Die Quotienten wurde alle mit der Basalatmung dividiert durch die Biomasse FE-C berechnet. Die Acker- und Graslandstandorte werden jeweils getrennt dargestellt. Beim allfälligen Vergleich der Quotienten ist zu beachten, dass die Graslandstandorte der NABO 0-20 cm tief und jene der KABOs 0-10 cm tief beprobt werden. Dies Abbildungen sollen als Zusatzinformation dienen und werden nicht weiter besprochen oder interpretiert.

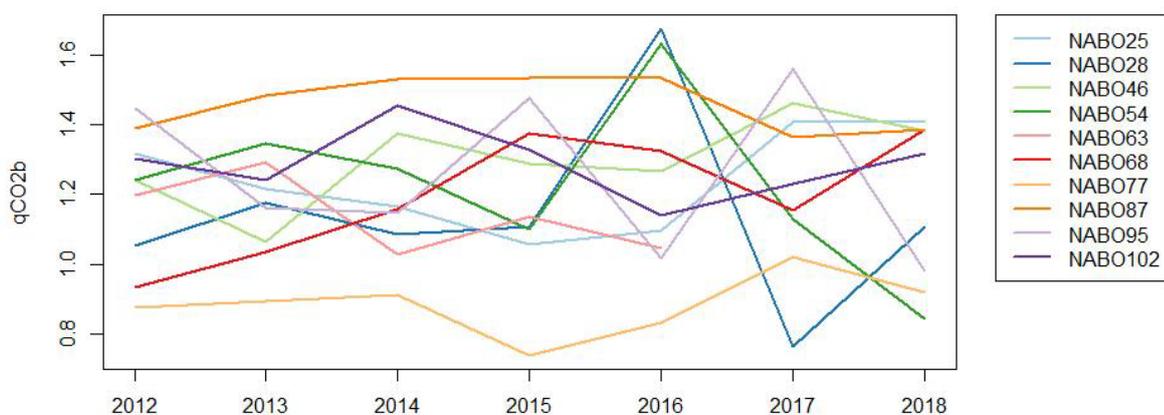


Abbildung 14: Zeitlicher Verlauf des metabolischen Quotienten qCO_2 der NABO bio-Ackerstandorte.

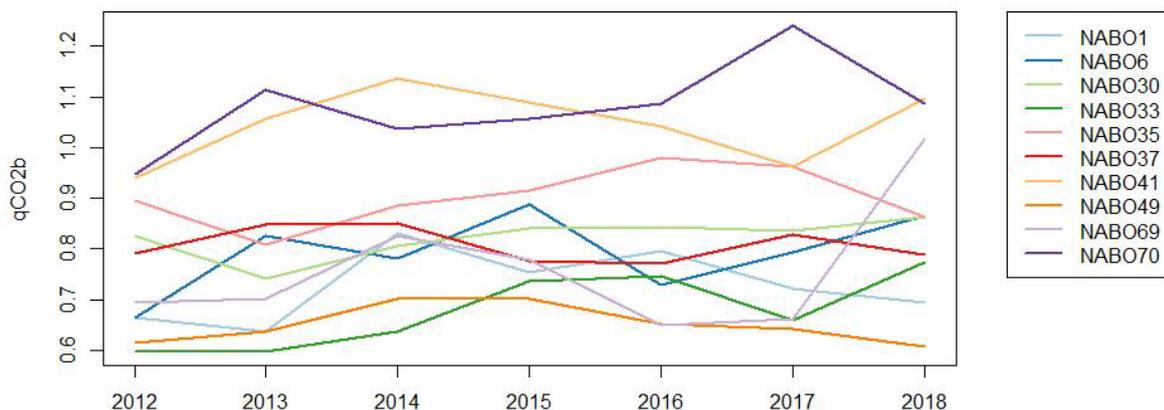


Abbildung 15: Zeitlicher Verlauf des metabolischen Quotienten qCO_2 der NABO bio-Graslandstandorte.

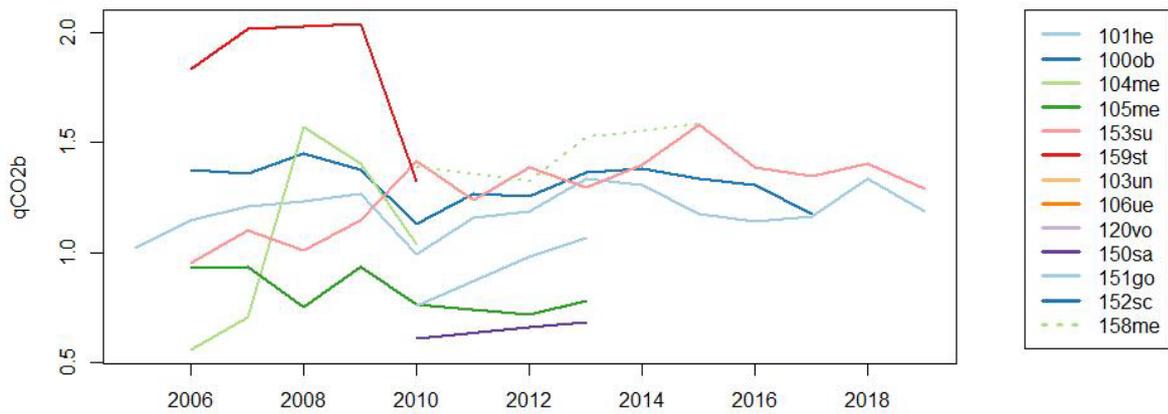


Abbildung 16: Zeitlicher Verlauf des metabolischen Quotienten qCO_2 der **KABO AG-Ackerstandorte**.

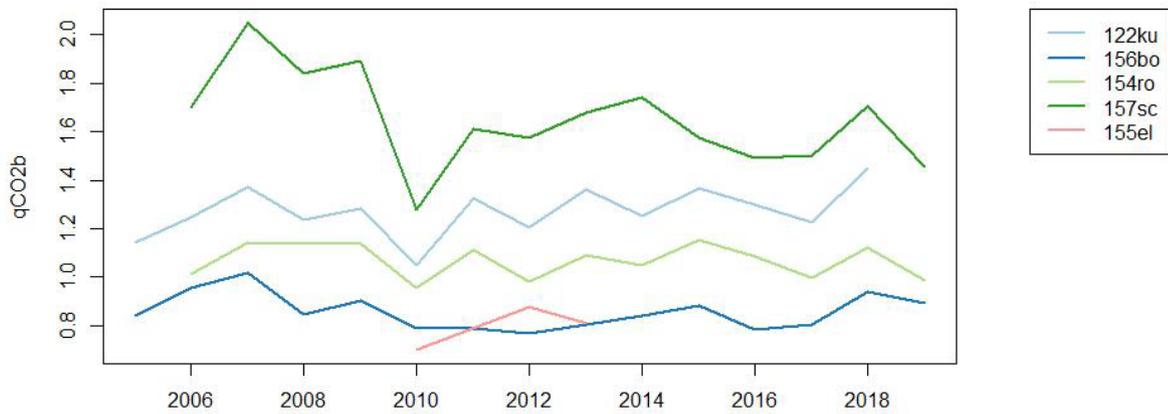


Abbildung 17: Zeitlicher Verlauf des metabolischen Quotienten qCO_2 der **KABO AG-Graslandstandorte**.

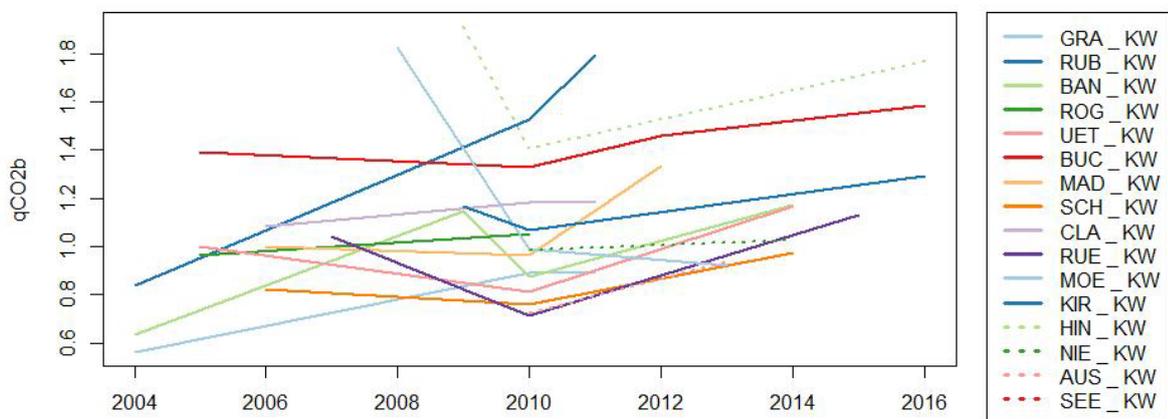


Abbildung 18: Zeitlicher Verlauf des metabolischen Quotienten qCO_2 der **KABO BE-Ackerstandorte**.

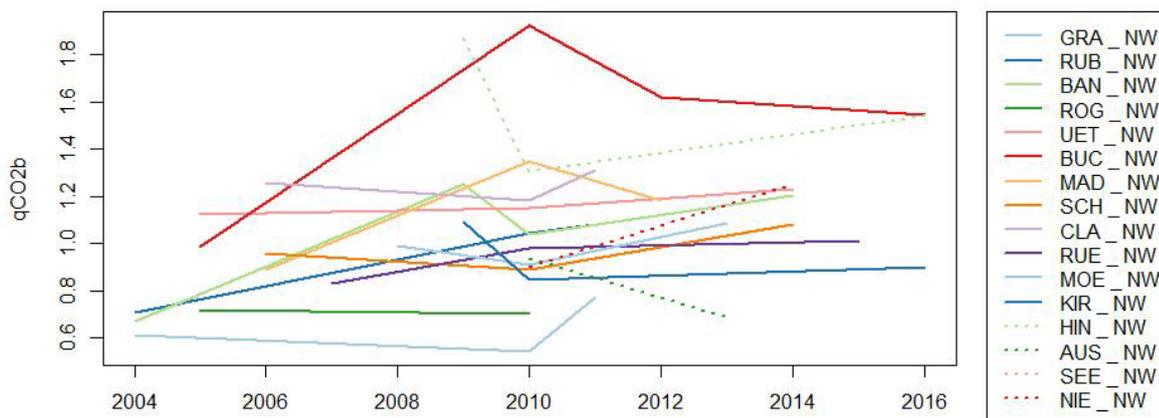


Abbildung 19: Zeitlicher Verlauf des metabolischen Quotienten qCO_2 der **KABO BE-Graslandstandorte**.

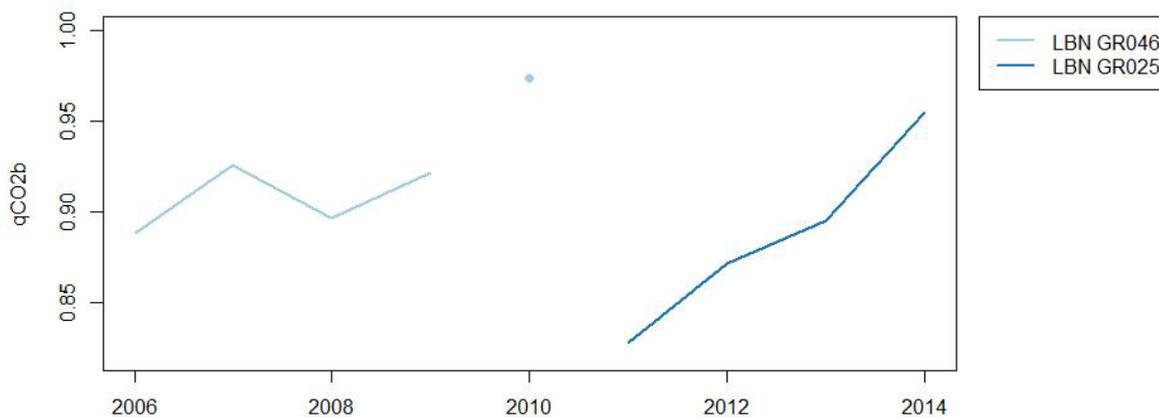


Abbildung 20: Zeitlicher Verlauf des metabolischen Quotienten qCO_2 der **KABO GR-Ackerstandorte**. Der Messwert von 2010 stammen von einer separaten Messkampagne (MIP) und ist daher als einzelne Punkt dargestellt und nicht in die Zeitreihe des Standorts LBN GR046 eingefügt.

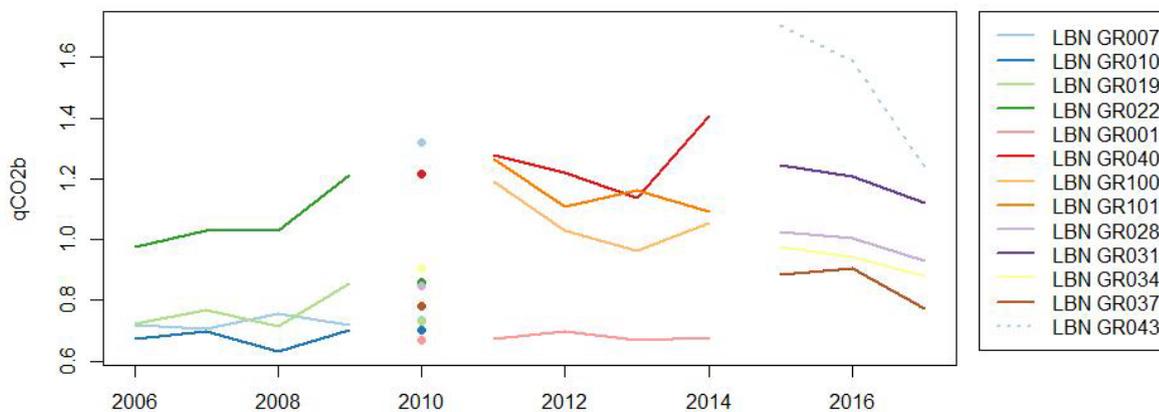


Abbildung 21: Zeitlicher Verlauf des metabolischen Quotienten qCO_2 der **KABO GR-Graslandstandorte**. Die Messwerte von 2010 stammen von einer separaten Messkampagne (MIP) und sind daher als einzelne Punkte dargestellt und nicht in die Zeitreihe der Standorte eingefügt.

6.2 Vergleich 0-10 cm vs. 0-20 cm

Die Messwerte für die Proben aus 0-20 cm Bodentiefe weisen auch für die Biomasse FE-C (Abbildung 22) und die Basalatmung (Abbildung 23) tiefere Werte auf im Vergleich zu 0-10 cm Tiefe. Im Durchschnitt erreicht die Biomasse für 0-20 cm 74 % des Werts aus 0-10 cm Tiefe (Median 74 %, Interquartilbereich von 70 bis 78 %). Die Basalatmung 0-20 cm erreicht durchschnittlich 67 % des Niveaus von 0-10 cm (Median 66, Interquartilbereich von 60 bis 73 %). Die Basalatmung weist im Vergleich zu den beiden Biomasse-Parametern eine grössere Streuung für das Verhältnis Messwert 0-20 cm zu Messwert 0-10 cm auf (erkennbar am grösseren Interquartilbereich sowie dem tieferen R^2 der Regression).

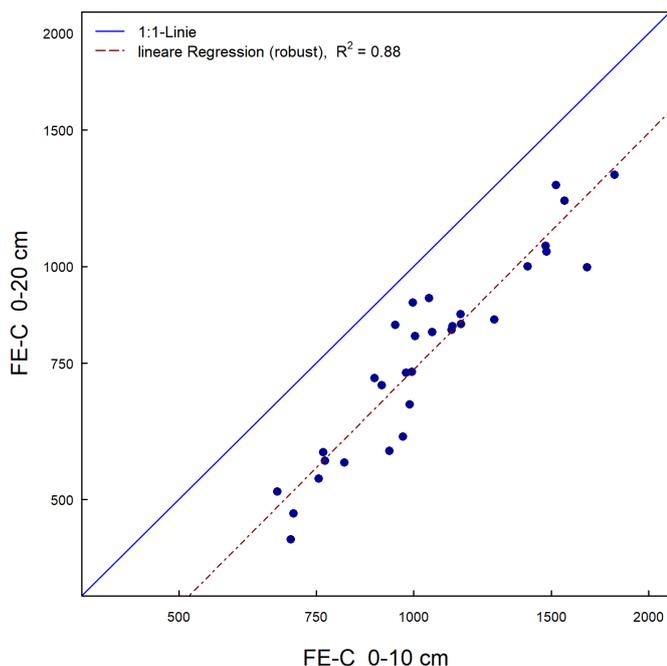


Abbildung 22: Vergleich der Messwerte für die Biomasse FE-C aus 0-10 cm vs. 0-20 cm Tiefe für Grasland-Standorte der KABO BE, $n = 16$, beide Achsen log-skaliert. Lineare Regression, robust: $\ln(\text{FE-C } 0-10) = -0.41 + 1.02 \ln(\text{FE-C } 0-20)$. $R^2 = 0.88$.

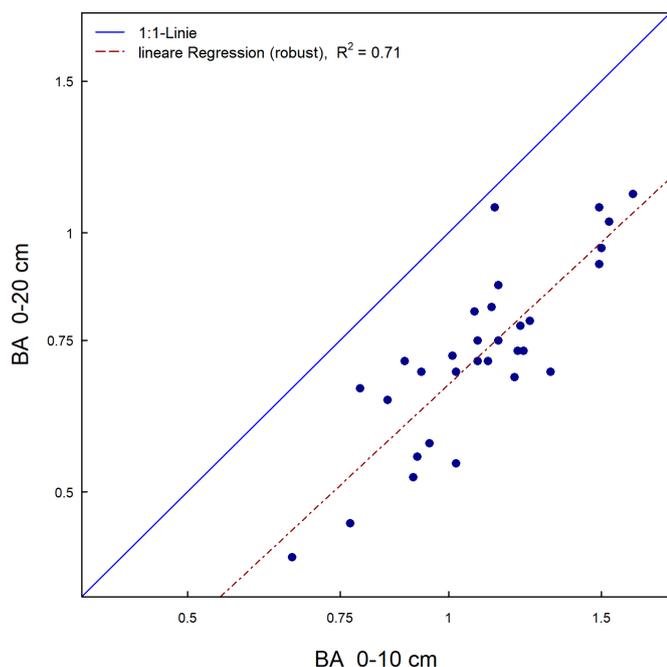


Abbildung 23: Vergleich der Messwerte für die Basalatmung BA aus 0-10 cm vs. 0-20 cm Tiefe für Grasland-Standorte der KABO BE, $n = 16$, beide Achsen log-skaliert. Lineare Regression, robust: $\ln(\text{BA } 0-10) = -0.41 + 0.94 \ln(\text{BA } 0-20)$. $R^2 = 0.71$.