Landesamt
für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz

KlimLandRP

Klima- und Landschaftswandel
in Rheinland-Pfalz

Auswirkungen des Klimawandels auf die Ressource Boden in Rheinland-Pfalz

Schlussbericht Modul Boden

Teil I Bodenkohlenstoff

Laufzeit:	01.04.2008-30.09.2011 (3,5 Jahre)
Berichtszeitraum:	August 2008 - September 2011
Homepage:	www.klimlandrp.de

Projektpartner:

Universität Trier
Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz
Johannes Gutenberg Universität Mainz
Landesforsten Rheinland-Pfalz
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
PIK
Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht
RLP AgroScience

Autorenverzeichnis

Dr. Tilmann Sauer
Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen
Hauptstraße 16, 67705 Trippstadt
E-mail: tilmann.sauer@klimawandel-rlp.de
Telefon: +49 (0) 6306-911-177
Fax: +49 (0) 6306-911-200

Dr. Ulrich Dehner
Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz
Emy-Roeder-Weg 5, 55129 Mainz
E-mail: ulrich.dehner@lgb-rlp.de
Telefon: +49 (0) 6131-9254-274

Thomas Wiesner
Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz
Emy-Roeder-Weg 5, 55129 Mainz
E-mail: thomas.wiesner@lgb-rlp.de
Telefon: +49 (0) 6131-9254-282

Dr. Stephan Sauer
Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz
Emy-Roeder-Weg 5, 55129 Mainz
E-mail: stephanus.sauer@lgb-rlp.de
Telefon: +49 (0) 6131-9254-275

Michael Goldschmitt
Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz
Emy-Roeder-Weg 5, 55129 Mainz
E-mail: michael.goldschmitt@lgb-rlp.de
Telefon: +49 (0) 6131-9254-157

Dr. Ernst-Dieter Spies
Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz
Emy-Roeder-Weg 5, 55129 Mainz
E-mail: ernst-dieter.spies@lgb-rlp.de
Telefon: +49 (0) 6131-9254-283
Fax: +49 (0) 6131-9254-123

Zitierhinweis:

SAUER, T., DEHNER, U., WIESNER, T., SAUER, S., GOLDSCHMITT, M. & SPIES, E.-D. (2013): Auswirkungen des Klimawandels auf die Ressource Boden in Rheinland-Pfalz. – Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen [Hrsg.]: Schlussberichte des Landesprojekts Klima- und Landschaftswandel in Rheinland-Pfalz (KlimLandRP), Teil 1, Modul Boden (Teil I Bodenkohlenstoff) 43 S.

Zusammenfassung

Böden sind weltweit der größte terrestrische Speicher für organischen Kohlenstoff. Im Boden ist organischer Kohlenstoff von grundlegender Bedeutung für die Nährstoffversorgung von Pflanzen, die Gefügeeigenschaften, das Wasserspeichervermögen, die biologischen Vielfalt und die Regulierung des globalen Kohlenstoffkreislaufs. Mit 1550 Gigatonnen ist er etwa doppelt so groß wie der atmosphärische Kohlenstoffspeicher. Im Rahmen des KlimLandRP-Projektes wurden die Bodenkohlenstoffvorräte rheinland-pfälzischer Böden berechnet und auf Basis der Bodenübersichtskarte 1: 200.000 (BÜK200) regionalisiert. Auf diese Weise können Bodenregionen ausgewiesen werden, die aufgrund ihrer Vorräte von besonderer Bedeutung im Klimawandel sind.

Am Landesamt für Geologie und Bergbau liegen Punktdaten mit Angaben zum organischen Kohlenstoff aus drei Punktdatenbanken vor: (1) der Datenbank der Bodenzustandsberichte, (2) der Gesamtdatenbank GESDAT und (3) Punktdaten der forstlichen Standortskartierung.

Für die Übertragung der Punktdaten in die Fläche wurden die Geometrien der BÜK200 verwendet. Über Substrat-Horizontkombinationen wurden die Punktdaten in einem expertenbasierten Ansatz, nach boden- und substratsystematischen Kriterien, in die Fläche übertragen. Die Auswertung der Kohlenstoffvorräte erfolgt erst auf Basis der landnutzungsbezogenen Leitprofile, dann über die Flächenanteile der Leitbodenformen.

Auf Basis der Leitbodenformen sind in Rheinland-Pfalz in Niedermooren mit knapp über 900 t ha^{-1} die größten Kohlenstoffmengen gespeichert. Mit großem Abstand folgen die Auenböden mit knapp 200 t ha^{-1}. Die geringsten Kohlenstoffmengen mit weniger als 50 t ha^{-1} sind in Rendzinen, Rankern und Syrosemen vorhanden. Die größte Verbreitung auf der Bodenübersichtskarte haben Braunerden und Regosole mit mittleren Kohlenstoffvorräten von 60 und 90 t ha^{-1}.

Die Kohlenstoffvorräte der Leitbodenformen der BÜK200N betragen für eine Bilanztiefe von maximal zwei Metern 115 t ha^{-1} für Ackerböden und 128 t ha^{-1} für Grünlandböden. Der Mineralboden der Waldstandorte hat im Mittel einen Kohlenstoffvorrat von 101 t ha^{-1}. Grünlandböden zeigen in den oberen 30 cm mit 76 t ha^{-1} die größten Kohlenstoffvorräte. Es folgen mit 60 t ha^{-1} die Ackerböden und 55 t ha^{-1} die Waldböden. Im Unterboden/Untergrund sind bei den Ackerböden 55 t ha^{-1}, in den Grünlandböden 52 t ha^{-1} und in den Waldböden 45 t ha^{-1} Kohlenstoff gespeichert.

Die Übertragung der Punktdaten in die Fläche ermöglicht eine flächenhafte Auswertung der Kohlenstoffvorräte. Bei der Betrachtung des gesamten Bodenprofils sind das Oberrheintiefland und Rheinhessen mit mehr als 140 t ha^{-1} die wichtigsten Regionen für die Kohlenstoffspeicherung. Mit deutlichem Abstand folgen die Mittelgebirgsregionen mit weniger als 120 t ha^{-1}. Die geringsten Vorräte sind in den Böden des Gutlandes im Westen von Rheinland-Pfalz gespeichert. Von besonderer Bedeutung für die Speicherung von Kohlenstoff sind Moorböden und Grund- oder Stauwasser beeinflusste Böden. In der Oberrheintiefebene sind neben den Auenböden die flächenhaft verbreiteten Tschernoseme wichtige Kohlenstoffspeicher, in Rheinhessen sind es die weit verbreiteten Kolluvisole. Das sind die Standorte,

die in Zukunft besonders geschützt werden müssen, um wichtige Kohlenstoffspeicherstätten zu erhalten.

Einen weiteren Datensatz mit Angaben zum Bodenkohlenstoffvorrat bietet die Bodenzustandserhebung (BZE) im Wald. Die Messwerte wurden in Rheinland-Pfalz bisher zu zwei Zeitpunkten (BZE I 1989/1990 und BZE II 2006/2007) in einem gleichmäßigen Raster in festgelegten Tiefenstufen erhoben. Aufgrund der Wiederholungsmessungen am selben Standort kann mit diesem Datensatz die zeitliche Entwicklung der Bodenkohlenstoffvorräte dokumentiert werden. Die Datenerhebung der BZE I ergab für die organische Auflage im Mittel etwa 16 t ha^{-1} Kohlenstoff. In den oberen 30 cm des Mineralbodens sind ca. 52 t ha^{-1} Kohlenstoff gespeichert und unterhalb von 30 cm etwas mehr als 23 t ha^{-1}. Die Wiederholungsmessungen der BZE II zeigen keine signifikant höheren oder geringeren Werte. Insgesamt berechnen sich für den Mineralboden knapp 80 t ha^{-1} und für den Mineralboden und die Auflagehorizonte ein Wert von knapp 100 t ha^{-1}.

Die Kohlenstoffvorräte der BZE Profile sind aufgrund des geringeren Speicherraums und einer geringeren Trockenrohdichte im Unterboden/Untergrund geringer als im Unterboden/Untergrund der Leitbodenformen der BÜK200N. Hier zeigt sich ein prinzipieller Unterschied der beiden Datengrundlagen. Die Leitbodenformen der BÜK200N wurden gezielt als Leitprofile für die Bodenübersichtskarte ausgewählt und sollen eine landnutzungsabhängige Bodenform einer mehr oder weniger großen Fläche repräsentieren. Das Raster der BZE führt dazu, dass die Auswahl der Profile zufällig ist und diese keine bestimmten Flächen repräsentieren. Daher finden sich in diesem Datensatz deutlich mehr Profile mit einer geringeren Gründigkeit als dies bei den Bodenformen der BÜK200 der Fall ist. Im Ergebnis führt dies – trotz der relativ guten Übereinstimmung der Kohlenstoffvorräte im Oberboden – bei der Berechnung der Gesamtvorräte des Mineralbodens zu einem Unterschied von im Mittel erheblichen 30 t ha^{-1}.

Insgesamt berechnen sich die Kohlenstoffvorräte in Rheinland-Pfalz auf etwa 200. Mio. Tonnen. Nach den Anteilen der jeweiligen Landnutzung an der Gesamtfläche berechnen sich für Ackerböden 88 Mio. t Kohlenstoff, für Waldböden 82 Mio. t und für Grünlandböden knapp 30 Mio. t Kohlenstoff. Moorböden und Grund- oder Stauwasser beeinflusste Böden sind von besonderer Bedeutung für die Speicherung von Kohlenstoff. Bei der räumlichen Betrachtung sind die Oberrheintiefebene und Rheinhessen wichtige Kohlenstoffspeicher. Jedoch weisen grade diese Regionen in Rheinland-Pfalz viele Böden mit hohen Kohlenstoffvorräten auf, wo der Siedlungsdruck und damit der Flächenverbrauch besonders hoch sind. Hier besteht mit Blick auf den Klimaschutz ein besonderes Konfliktpotential bei der Landnutzung.

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung ... 8

2 Material und Methoden ... 9

2.1 Datenkollektive zum organischen Kohlenstoff am Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz ... 9

2.2 Übertragung der Punktdaten in die Fläche ... 11

2.3 Datenkollektiv der Bodenzustandserhebung Wald ... 14

3 Ergebnisse ... 15

3.1 Analyse der Punktdaten der Bodenzustandsberichte ... 15

3.2 Bodenkohlenstoffvorräte der Leitprofile der BÜK200N ... 18

3.3 Regionalisierung der Bodenkohlenstoffvorräte ... 22

3.4 Bodenkohlenstoffvorräte der Bodenzustandserhebung Wald ... 31

4 Zusammenführung der Ergebnisse und Diskussion ... 37

4.1 Vergleich der einzelnen Auswertungen ... 37

4.2 Vulnerable Regionen in Rheinland-Pfalz und mögliche Veränderungen des Bodenkohlenstoffvorräte ... 39

5 Literaturverzeichnis ... 42

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Punkte mit Messwerten zum Kohlenstoffgehalt in Rheinland-Pfalz. 10
Abb. 2.2: Landnutzung. 10
Abb. 2.3: Waldfläche und Messpunkte der Bodenzustandserhebung (BZE II) in Rheinland-Pfalz. ... 14
Abb. 3.1: Kohlenstoffgehalte der Oberböden der verschiedenen Landnutzungen. 15
Abb. 3.2: Kohlenstoffgehalte der Bodenartenhauptgruppen der Landnutzungen Acker, Grünland und Wald 16
Abb. 3.3: Mächtigkeit der Oberböden der verschiedenen Landnutzungen. 17
Abb. 3.4: Kohlenstoffvorräte der Oberböden für verschiedene Landnutzungen. 17
Abb. 3.5: Kohlenstoffvorräte der oberen 30 cm für verschiedene Landnutzungen. 18
Abb. 3.6: Kohlenstoffvorräte getrennt nach Speichertiefen der drei Landnutzungen. 19
Abb. 3.7: Gesamtkohlenstoffvorräte der Landnutzungen Acker, Grünland und Wald. 20
Abb. 3.8: Kohlenstoffvorräte der Leitprofile der BÜK200N nach verschieden Bodentypen. 21
Abb. 3.9: Kohlenstoffvorräte der Leitprofile der BÜK200N nach verschieden Bodentypen. 22
Abb. 3.10: Naturräume in Rheinland-Pfalz. 23
Abb. 3.11: Kohlenstoffvorräte rheinland-pfälzischer Böden bis in eine Tiefe von 30 cm. 24
Abb. 3.12: Kohlenstoffvorräte rheinland-pfälzischer Böden bis in eine Tiefe von 30 bis 200 cm. 26
Abb. 3.13: Kohlenstoffvorräte rheinland-pfälzischer Böden bis in eine Tiefe von zwei Metern. 28
Abb. 3.14: Kohlenstoffvorräte der Landnutzungen Acker, Grünland und Wald auf der BÜK200N. 30
Abb. 3.15: Kohlenstoffvorräte der Landnutzungen Acker, Grünland und Wald der BÜK200N. 31
Abb. 3.16: Kohlenstoffvorräte verschiedener Speichertiefen (BZE I und BZE II). 32
Abb. 3.17: Kohlenstoffvorräte im Mineralboden bis 2 m Tiefe und zusätzlich mit Auflagehorizonte. ... 33
Abb. 4.1: Kohlenstoffvorräte der oberen 30 cm im Vergleich der verschiedenen Datengrundlagen. 38
Abb. 4.2: Vergleich der Gründigkeit der Leitprofile der BÜK200N und der BZE II Bodenprofile. 39

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Anzahl der Messwerte und in Klammern Anzahl der Messpunkte. 11
Tab. 2.2: Anzahl der Messwerte der Punktdatenbanken. 12
Tab. 2.3: Bodenhorizonte der Punktdaten zur Ermittlung von mittleren Bodendaten für die Leitbodenform 361 der BÜK200N. 13
Tab. 2.4: Leitbodenform 361 BÜK200N. 13
Tab. 3.1: Kohlenstoffvorräte rheinland-pfälzischer Böden bis in eine Tiefe von 30 cm nach Naturräumen. 25
Tab. 3.2: Kohlenstoffvorräte rheinland-pfälzischer Böden bis in eine Tiefe von 30 bis 200 cm nach Naturräumen. 27
Tab. 3.3: Kohlenstoffvorräte rheinland-pfälzischer Böden bis in eine Tiefe von zwei Metern nach Naturräumen. 29
Tab. 3.4: Standortvariablen mit den Regressionskoeffizienten der statistischen Analyse. 34
Tab. 3.6: Bestimmtheitsmaße und Standortvariablen der manuellen Auswahl. 36
Tab. 3.5: Bestimmtheitsmaße und Standortvariablen der automatisierten Analyse. 36

1 Einführung

Im Boden ist organischer Kohlenstoff (C_{org} oder SOC – Soil Organic Carbon) von grundlegender Bedeutung für die Nährstoffversorgung von Pflanzen, die Gefügeeigenschaften, das Wasserspeichervermögen, die biologische Vielfalt und die Regulierung des globalen Kohlenstoffkreislaufs. Böden sind weltweit der größte terrestrische Speicher für organischen Kohlenstoff. Mit 1550 Gigatonnen ist er etwa doppelt so groß wie der atmosphärische Kohlenstoffspeicher (LAL 2004). Organischer Kohlenstoff gelangt durch abgestorbene Vegetationsteile oder Bodenorganismen in den Boden. Der größte Teil dieses Kohlenstoffs wird von Mikroorganismen mineralisiert, nur ein geringer Anteil verbleibt im Boden und wird zu Humus. Die Stabilisierung von Kohlenstoff im Boden wird von verschiedenen Bodeneigenschaften und Mechanismen gesteuert. Dazu gehören die Komplexierung mit Metallionen, die Ton-Humus-Kopplung und die Tatsache, dass ein Teil der organischen Substanz schlecht von Mikroorganismen weiter verarbeitet werden kann und zunächst erhalten bleibt. Entweder ist das Material schwer zersetzbar oder die Umweltbedingungen hemmen die mikrobielle Aktivität, z.B. in kaltem, trockenem, saurem oder anaerobem Milieu (Freibauer & Schrumpf 2005).

Im Rahmen des KlimLandRP-Projektes wurden Bodenkohlenstoffvorräte rheinland-pfälzischer Böden berechnet und auf Basis der Bodenübersichtskarte 1: 200.000 (BÜK200) regionalisiert. Auf diese Weise können Bodenregionen ausgewiesen werden, die aufgrund ihrer Vorräte von besonderer Bedeutung im Klimawandel sind. Das Thema Bodenkohlenstoff betrifft sowohl den Klimaschutz als auch die Klimawandelfolgen, denn der Boden kann als Kohlenstoffsenke einerseits einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten oder als Kohlenstoffquelle den Klimawandel verstärken, anderseits beeinflussen Veränderungen im Kohlenstoffhaushalt die Funktion als Pflanzen- und Produktionsstandort. Eine Temperaturzunahme im Winterhalbjahr kann bei einer ausreichenden Bodenfeuchte die Mineralisierungsprozesse der organischen Substanz beschleunigen. Zukünftig trockenere Sommermonate verringern auf terrestrischen Böden möglicherweise die Mineralisation. Veränderungen der organischen Bodensubstanz sind daher stark standortabhängig. Landnutzung und Landnutzungsänderungen haben ebenfalls einen großen Einfluss auf den organischen Bodenkohlenstoff. Landnutzungsänderungen können sowohl direkte Folge des Klimawandels sein oder aber auch die Folge von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel.

2 Material und Methoden

2.1 Datenkollektive zum organischen Kohlenstoff am Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz

Am Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz liegen in einer Punktdatenbank der ca. 9.000 Analysedaten von Auflage- und Bodenhorizonten mit gemessenen Werten zum organischen Kohlenstoff von ca. 3.700 Messpunkten vor (Tab. 2.1). Es handelt sich dabei überwiegend um Klumpenstichproben (Abb. 2.1), die im Rahmen der Bodenzustandsberichte (BZB) gewonnen wurden. Daneben liegen Analysedaten von zahlreichen weiteren Standorten vor. Das Datenkollektiv verteilt sich auf landwirtschaftlich genutzte Flächen (2.150 Punkte), Waldflächen (1.270 Punkte) und Siedlungsgebiete (288 Punkte).

Für eine rein landnutzungsbezogene Auswertung der Daten wurde zunächst nur der oberste Horizont betrachtet. Dazu wurden alle mineralischen Bodenhorizonte, die an der Bodenoberfläche beginnen aus dem Datenkollektiv ausgewählt. Es handelt sich dabei um humose Oberböden der Landnutzungen Ackerbau, Obstbau, Weinbau, Grünland, Laubwald, Nadelwald, Mischwald und Siedlung. Bei den Waldstandorten bleiben die Auflagehorizonte (Humusauflage) unberücksichtigt.

In einem zweiten Arbeitsschritt wurde der Kohlenstoffvorrat berechnet. Zur Berechnung werden Angaben über Horizontmächtigkeit, Steingehalt (Grobboden > 2 mm) und Trockenrohdichte des Feinboden (< 2 mm) in Klassen benötigt. Für etwa 6.500 Messwerte liegen diese Angaben vor. Da wiederum nur die Oberböden ausgewertet wurden, verringerte sich das Datenkollektiv auf 3.111 Messwerte bzw. Messpunkte.

Die Berechnung wurde wie folgt durchgeführt: Über die Angabe der Horizontmächtigkeit wird das Bodenvolumen bestimmt. Diesem Volumen wird das Volumen, welches durch Steine (Bodenskelett > 2 mm) im Boden eingenommen wird, abgezogen. Über die Trockenrohdichte und das Volumen des Feinbodens wird anschließend die Feinbodenmenge berechnet. Mit den Angaben des Kohlenstoffgehalts kann abschließend der Kohlenstoffvorrat des Feinbodens horizontweise berechnet werden. Sowohl der Steingehalt, als auch die Trockenrohdichte liegen als Geländeschätzungen in Form von Klassenwerten vor. Für die Berechnung wurden die jeweiligen Klassenmittel verwendet.

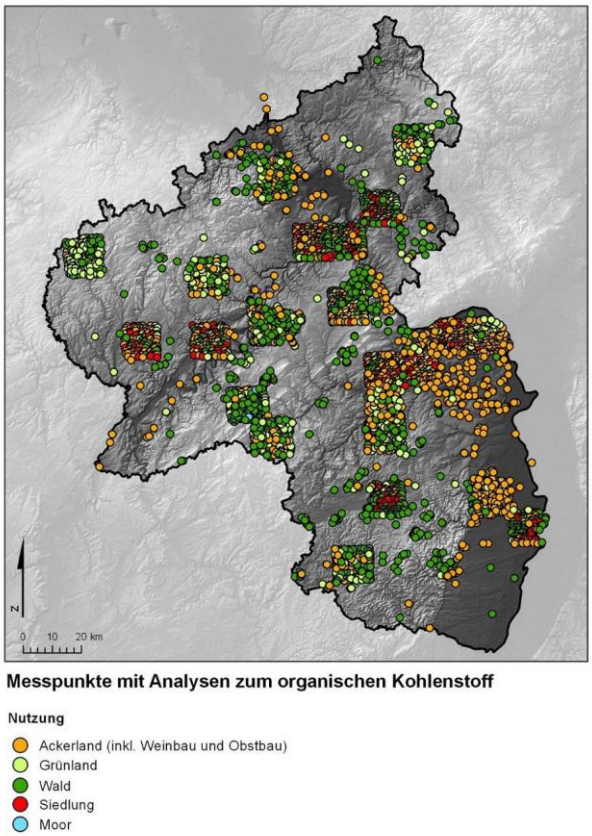

Abb. 2.1: Punkte mit Messwerten zum Kohlenstoffgehalt in Rheinland-Pfalz (LGB 2009).

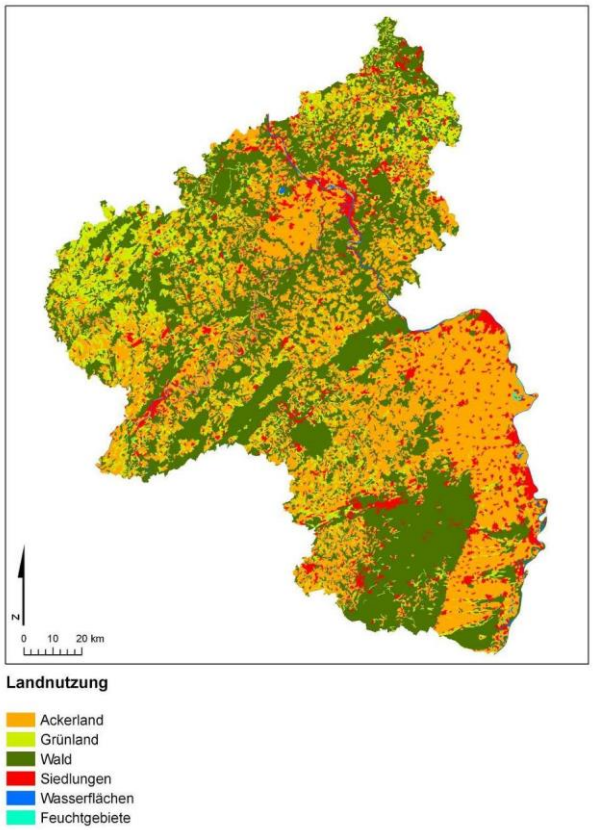

Abb. 2.2: Landnutzung (Corine Landcover 2000).

In einer dritten Auswertung wurde der Kohlenstoffvorrat für die oberen 30 cm der Böden berechnet, um landnutzungsbedingte Unterschiede der Oberbodenmächtigkeiten (vgl. Abb. 3.3) auszuschließen. In die Berechnung gingen alle Standorte ein, für die Angaben über den Kohlenstoffgehalt bis mindestens 30 cm Tiefe vorliegen (vgl. Tab. 2.1, letzte Spalte: die erste Zahl gibt die Anzahl der Messwerte an, die Zahl in ( ) gibt die Anzahl der Messpunkte an).

Tab. 2.1: Anzahl der Messwerte und in Klammern Anzahl der Messpunkte.

Nutzung	Kohlenstoffgehalt alle Messwerte	Kohlenstoffgehalt nur Oberboden	Kohlenstoffvorrat alle Messwerte	Kohlenstoffvorrat nur Oberboden	Kohlenstoffvorrat 0-30 cm
Ackerbau	2028	1002	1401	821	947 (756)
Obstbau	247	117	176	87	83 (54)
Weinbau	1132	397	290	186	196 (142)
Grünland	1425	621	1149	560	937 (499)
Laubwald	1842	632	1561	585	1150 (489)
Nadelwald	1056	355	894	336	633 (262)
Mischwald	964	283	774	258	512 (219)
Siedlung	294	288	284	278	113 (110)
Gesamt	**8998**	**3695**	**6529**	**3111**	**4571 (2532)**

Darüber hinaus liegen weitere Punktdaten mit Angaben zum organischen Kohlenstoff aus der Gesamtdatenbank GESDAT des LGB und Punktdaten der forstlichen Standortskartierung vor. Die beiden letzteren Datenquellen beinhalten zusätzlich gemessene Werte zur Trockenrohdichte (Tab. 2.2). Dies ermöglicht eine genauere Berechnung der Kohlenstoffvorräte, als dies bei der Verwendung der Klassenmittel der Fall ist. Für den Steingehalt gilt jedoch der am Profil bestimmte Wert als bessere Schätzung, als der in der Probe enthaltene Steingehalt.

2.2 Übertragung der Punktdaten in die Fläche

Für die Übertragung der Punktdaten in die Fläche wurden die Geometrien der Bodenübersichtskarte 1: 200.000 (BÜK200) verwendet. Um die räumliche Auflösung der BÜK200 zu erhöhen, wurden die Flächen der Bodenformengesellschaften mit CORINE-Landcover-Daten (CORINE 2000, Abb. 2.2) in einem Geographischen Informationssystem (GIS) verschnitten. Daraus resultieren landnutzungsbezogene Geometrien für alle Bodenformengesellschaften. Den einzelnen Flächen wurde jeweils eine landnutzungsbezogene Leitbodenform zugewiesen. Die Anzahl der in der Karte verwendeten Leitbodenformen wurde dadurch von ursprünglich 236 auf 458 erhöht. Den meisten Einheiten konnte eine landnutzungsbezogene Leitbodenform aus der jeweiligen Bodenformengesellschaft zugewiesen werden. War dies nicht möglich, wurde die Leitbodenform synthetisch aus einer Leitbodenform einer anderen Landnutzung generiert. Die landnutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte 1: 200.000 wird im Folgenden als BÜK200**N** bezeichnet.

Als Datengrundlagen für die Übertragung der Punktdaten in die Fläche dienten Daten aus drei verschiedenen Punktdatenbanken: (1) die oben bereits beschriebene Punktdatenbank der Bodenzustandsberichte (BZB), (2) die Gesamtdatenbank GESDAT des LGB und (3)

Punktdaten der forstlichen Standortskartierung (für den nördlichen Landesteil von Rheinland-Pfalz). Da die BÜK200N nur die Nutzungen Acker, Grünland und Wald unterscheidet, mussten die Eingangsdaten auf Basis dieser drei Landnutzungen aggregiert werden. In Tab. 2.2 ist die Anzahl der Messdaten der einzelnen Punktdatenbanken zusammengestellt.

Tab. 2.2: Anzahl der Messwerte der Punktdatenbanken.

	Kohlenstoffgehalt	**Trockenrohdichte (gemessen)**
BZB	8.988	0
GESDAT	2.520	1.846
Forst	3.291	2.975
Gesamt	14.799	4.821

Über Substrat-Horizontkombinationen wurden die Punktdaten in einem expertenbasierten Ansatz nach Dehner et al. (2001) in die Fläche übertragen. Dazu wurden bodentypübergreifende Auswertungen der gemessenen Kohlenstoffgehalte durchgeführt. Die Analysedaten wurden – wenn nötig unabhängig von der geographischen Lage – nach boden- und substratsystematischen Kriterien ausgewertet. Der Datensatz wurde dann nach Substraten und Horizonten sortiert. Für die resultierenden Substrat-Horizont-Gruppen wurden schließlich die statistischen Kennzahlen der C_{org}-Gehalte aus den Einzelwerten berechnet. Im Unterschied zu der oben beschrieben Vorgehensweise gingen hier nicht die Klassenmittel der Trockenrohdichte, sondern gemessene Werte der Trockenrohdichte des Feinbodens in die Berechnung ein (vgl. Tab. 2.2). Die oben beschriebene Berechnung der Bodenkohlenstoffvorräte wurde bei dieser Analyse auch für die Unterböden bis in eine Tiefe von maximal zwei Metern durchgeführt, so dass der Gesamtkohlenstoffvorrat für die einzelnen Leitprofile bis in diese Tiefe berechnet werden konnte. Folgende Tabellen soll das Vorgehen am Beispiel der Leitbodenform 361 verdeutlichen. In Tab. 2.3 sind die Horizontdaten aus verschiedenen Bodenprofilen zusammengestellt, die für die Horizonte der Leitbodenform 361 der BÜK200N entsprechende Substrate aufweisen. In Tab. 2.4. werden die Horizontdaten Sand-, Schluff-, Tongehalt, Trockenrohdichte und C_{org} mit der Leitbodenform 361 der BÜK200N verknüpft.

Tab. 2.3: Bodenhorizonte der Punktdaten zur Ermittlung von mittleren Bodendaten für die Leitbodenform 361 der BÜK200N.

Bodentyp	Horizont	Hauptkom-ponente	Nebenkom-ponente	Stratigraphie	Sand	Schluff	Ton	TRD	C_{org}
					[%]	[%]	[%]	[g cm^{-3}]	[%]
SS-BB	Ah				20,4	39,5	40,1	0,89	5,35
BB-SS	Ah	Lol			20,6	70,5	8,9	0,48	11,21
SS-BB	Ah	+VTbs			30,3	53,4	16,3	0,32	14,19
SS-BB	Ah	+VTbs			25,8	46,8	27,4	0,46	10,36
BB	Ah	Lol			21,3	74,2	4,5	0,89	5,13
SS-BB	Ah	Lol	^t, ^sa		23,3	65,2	11,5	1,03	3,70
BB	Ah	+VTbs		qp	21,3	70,6	8,1	0,8	6,56
BB	Ah	Lol	^t, ^sa	d	25,2	65,9	8,9	0,88	6,08
BB	Ah	+VTbs			22,5	61,4	16,1	0,76	9,07
SS-BB	Ah	Lol	^q	d	29,1	51,2	19,7	0,84	6,29
SS-BB	Ah	Lol			25,8	68,5	5,7	1,08	3,16
Mittelwert	**Ah**				**24,1**	**60,7**	**15,2**	**0,77**	**7,37**
SS-BB	Bv	Lol						1,48	1,77
BB-SS	Bv	+VTbs			11,9	77,1	11	1,31	0,90
SS-BB	Bv1	Lol			18,4	63,3	18,3	1,44	1,02
BB	Bv	Lol	^tsf	d	18,6	56,3	25,1	1,42	0,57
BB	Bv	Lol	^tsf	d	26,5	55,4	18,1	1,56	1,41
BB	Bv	Lol	^tsf	d	23,6	58,9	17,5	1,43	1,58
BB	Bv	Lol	^tsf	d	28,9	50,1	21	1,57	1,03
BB	Bv	Lol	^tsf	d	22,5	55,2	22,3	1,43	1,50
BB	Bv	+VTbs	^tsf	d	24,1	57,7	18,2	1,26	0,99
SS-BB	Bv2	+VTbs			21,9	52,8	25,3	1,40	1,82
SS-BB	Bv2	+VTbs			12,0	61,8	26,2	1,34	2,38
SS-BB	Bv1	Lol			18,7	52,4	28,9	1,13	3,80
BB	Bv1	Lol			18,0	77,7	4,3	1,31	0,66
SS-BB	Bv	+VTbs	^t, ^sa		16,4	73,0	10,6	1,30	1,61
BB	Bv1	Lol		qp				1,33	0,99
BB	Bv1	Lol	^t, ^sa	d	19,7	69,4	10,9	1,43	1,71
BB	Bv2	+VTbs	^t, ^sa	d	20,0	74,4	5,6	1,53	0,43
BB	Bv	Lol			17,8	64,7	17,5	1,16	2,85
SS-BB	Bv	Lol	^q	d	19,8	61,3	18,9	1,20	1,80
SS-BB	Bv	Lol			20,9	73,9	5,2	1,24	0,48
Mittelwert	**Bv**				**20,0**	**63,1**	**16,9**	**1,36**	**1,46**
BB	Cv1	^tsf			19,9	38,2	41,9	1,66	0,21
BB	IICv	^q, ^tsf			21,7	37,3	41,0	1,72	0,16
BB	Cv	^sa			22,5	39,5	38,0	1,72	0,27
BB	Cv	^q, ^g, ^tsf			20,6	38,7	40,7	1,69	
BB	Cv	^tsf			22,9	47,2	29,9	1,64	0,17
SS-BB	Cv	^sa						1,69	0,16
BB	IICv2	^tsf			17,2	46,6	36,2	1,69	0,15
BB	Cv	^tsf						1,64	0,31
BB	Cv2	^tsf			20,9	48,2	30,9	1,74	0,20
BB	Cv1	^tsf			19,5	48,0	32,5	1,50	
BB	Cv	^t, ^sa			23,3	46,9	29,8	1,74	0,20
LL	Cv	^tsf			24	46,5	29,5	1,51	0,21
RN-BB	Cv2	^tsf						1,62	
sBB	CvC	^tsf			21,9	28,0	50,1	1,61	0,13
sBB	CvSw	^sa, ^tsf			19,1	23,9	57,0	1,61	0,20
SS-BB	Cv	^t, ^sa			17,8	28,0	54,2	1,61	0,15
Mittelwert	**Cv**				**20,9**	**39,8**	**39,4**	**1,65**	**0,19**

Tab. 2.4: Leitbodenform 361 BÜK200N: Braunerde aus lößlehmhaltigen, bimstephraführendem, grusführendem Schluff (Hauptlage mit Quarzsandstein und Sandstein/Unterdevon) über Gruslehm (Basislage mit Quarzsandstein und Sandstein/Unterdevon) über sehr tiefen Tonschiefer (Unterdevon).

Horizont	**Tiefe**	**Bodenart**	**Skeltett-klasse**	**Ton**	**Schluff**	**Sand**	**TRD**	**C_{org}**
	[cm]			**[%]**	**[%]**	**[%]**	**[g cm-3]**	**[%]**
Ah	3	Lu	3	**24,1**	**60,7**	**15,2**	**0,77**	**7,32**
Bv	40	Lu	3	**20,0**	**63,1**	**16,9**	**1,36**	**1,46**
lCv	150	Ls3	4	**20,9**	**39,8**	**39,4**	**1,65**	**0,19**
mCv	-	-	6	-	-	-	-	-

2.3 Datenkollektiv der Bodenzustandserhebung Wald (BZE)

Einen weiteren Datensatz mit Angaben zum Bodenkohlenstoffvorrat bietet die Bodenzustandserhebung (BZE) Wald. Die bundesweite BZE ist eine Gemeinschaftsaufgabe von Bund und Ländern. Der Erhebung liegt eine von der Bund-Länderarbeitsgruppe BZE erstellte Arbeitsanleitung (BMELV 2006) zugrunde. In Rheinland-Pfalz ist die BZE Teil des Forstlichen Umweltmonitorings, das von der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft (FAWF) in Trippstadt durchgeführt wird. Die Messwerte wurden in Rheinland-Pfalz bisher zu zwei Zeitpunkten (BZE I 1989/1990 und BZE II 2006/2007) in einem gleichmäßigen Raster erhoben (Abb. 2.3). Die Erhebung erfolgt dabei nicht wie oben beschrieben horizontweise, sondern nach festgelegten Tiefenstufen. Für die BZE II wurden 165 Rasterpunkte beprobt. Aufgrund von Neuaufforstungen 22 Rasterpunkte mehr als bei der BZE I. Mit der Wiederholungsmessung von 143 Rasterpunkten am selben Standort kann die zeitliche Entwicklung der Bodenkohlenstoffvorräte zwischen der BZE I und der BZE II dokumentiert werden.

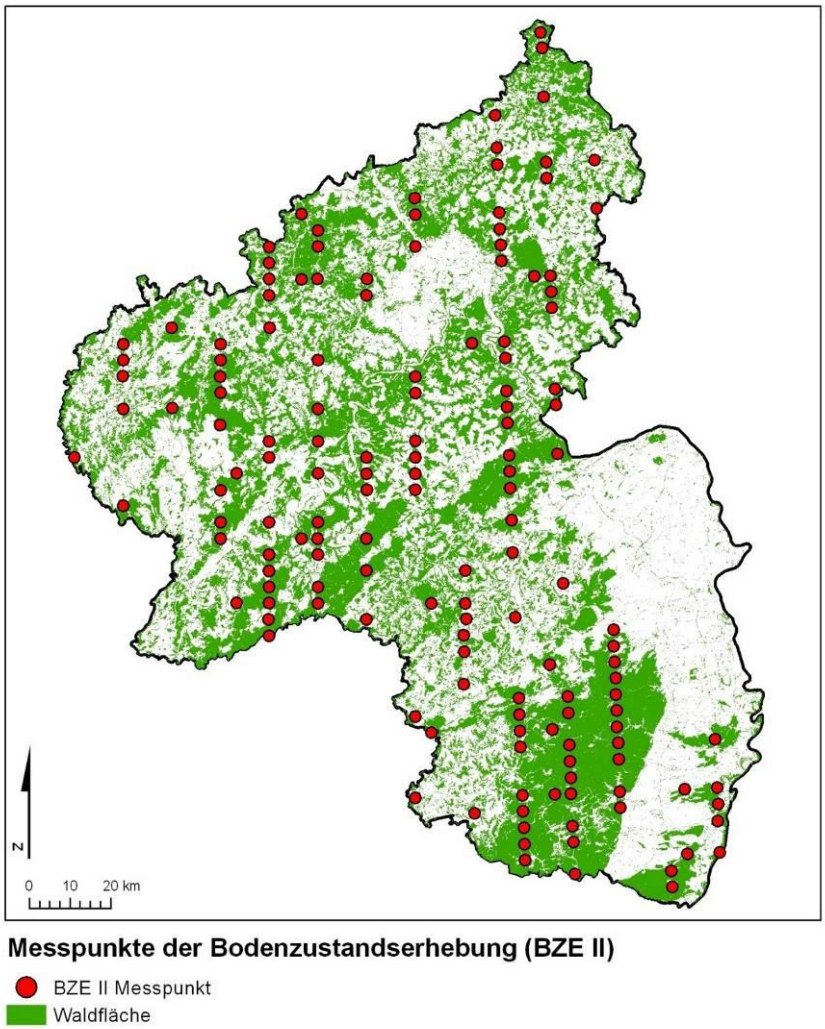

Abb. 2.3: Waldfläche und Messpunkte der Bodenzustandserhebung (BZE II) in Rheinland-Pfalz (verändert nach FAWF 2012).

3 Ergebnisse

3.1 Analyse der Punktdaten der Bodenzustandsberichte (BZB)

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Auswertung der Punktdatenbank in Form von Boxplots dargestellt. Die Box beinhaltet 50% der Werte, die „wisker caps“ zeigen die Werte zwischen dem 10. und 90. Perzentil. Die Punkte kennzeichnen das 5. und das 95. Perzentil. Die durchgezogene Linie beschreibt den Median, die gestrichelte Linie den Mittelwert. Innerhalb des Datenkollektives konnten die Landnutzungen Acker, Weinbau, Obstbau, Grünland, Laubwald, Nadelwald, Mischwald und Siedlung unterschieden werden. Die Anzahl der Messwerte bzw. -standorte ist unterhalb des jeweiligen Boxplots angegeben.

In Abb. 3.1 sind die Kohlenstoffgehalte der Oberböden getrennt nach Landnutzungen zusammengestellt. Oberböden, die durch Acker-, Wein- und Obstbau genutzt werden, weisen im Mittel einen Kohlenstoffgehalt von knapp unter 2% auf. Die Oberböden der Grünlandstandorte besitzen mit etwa 3% einen etwas höheren Kohlenstoffgehalt. Waldböden zeigen mit über 5% die höchsten Kohlenstoffgehalte im Oberboden. Proben aus Siedlungsgebieten beinhalten im Mittel etwas mehr als 2% Kohlenstoff. Der große Unterschied zwischen Median und Mittelwert bei den Waldstandorten zeigt eine linksschiefe Verteilung der Messwerte an. Die Spannweite der Messwerte nimmt von den acker-, wein- und obstbaulich genutzten Standorten über die Grünlandstandorte zu den Waldstandorten zu.

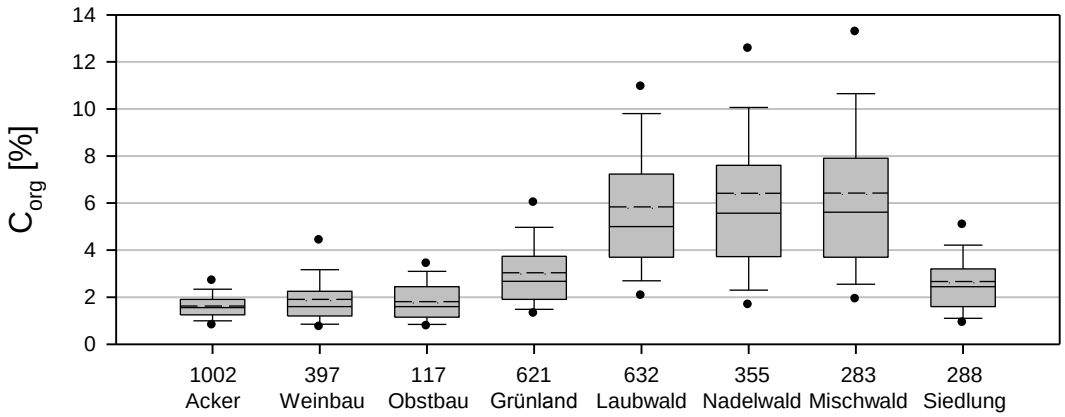

Abb. 3.1: Kohlenstoffgehalte der Oberböden der verschiedenen Landnutzungen.

Eine weitere Differenzierung der Kohlenstoffgehalte kann durch die Aufschlüsselung nach den vier Bodenartenhauptgruppen erfolgen (Abb. 3.2). Die geringsten Kohlenstoffgehalte finden sich bei den Landnutzungen Acker, Grünland und Wald bei der Bodenartenhauptgruppe Sand, die höchsten bei Ton. Dazwischen haben Lehm und Schluff eine ähnliche Größenordnung.

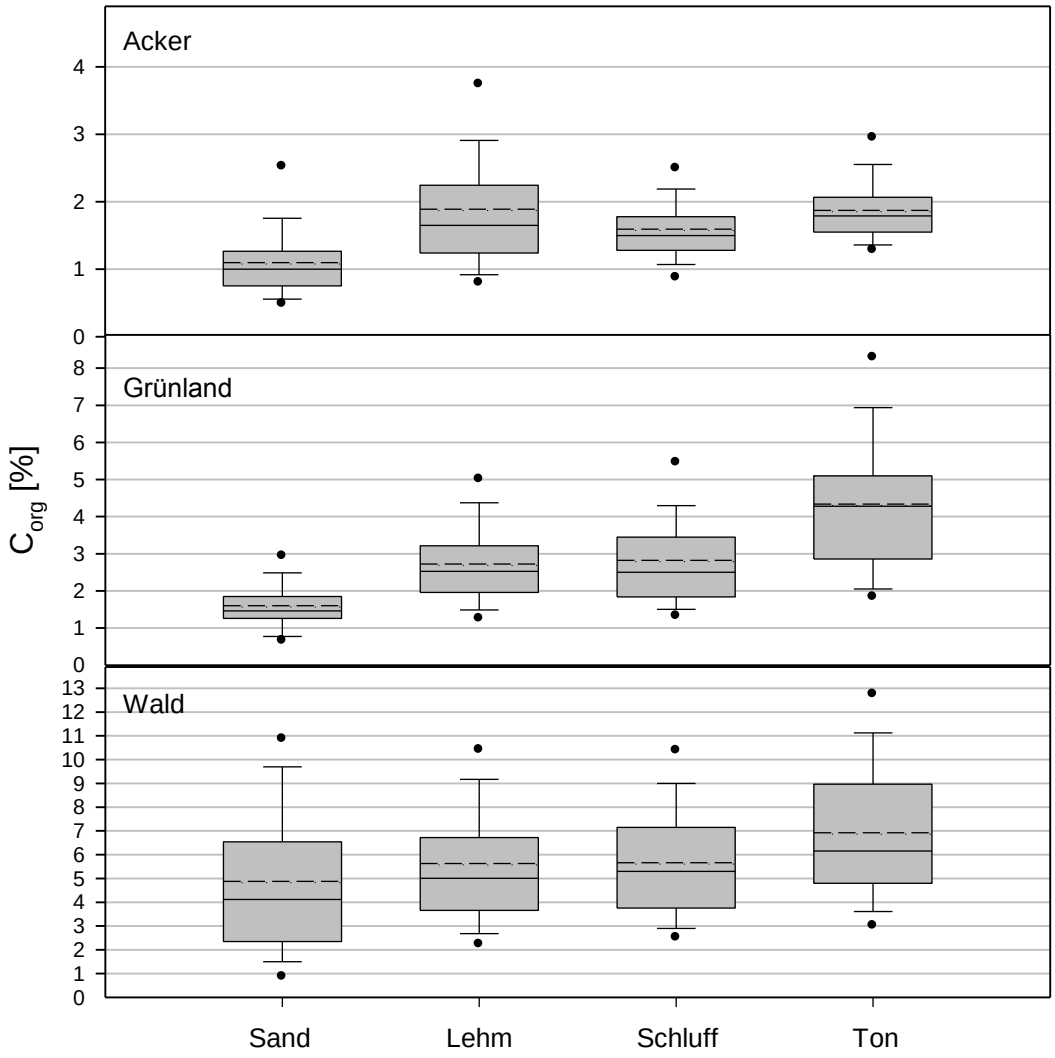

Abb. 3.2: Kohlenstoffgehalte der Bodenartenhauptgruppen der Landnutzungen Acker, Grünland und Wald.

Für die Berechnung der Kohlenstoffvorräte sind die Trockenrohdichte des Feinbodens und die Mächtigkeit der Oberböden von Bedeutung. In Abb. 3.3 ist die Mächtigkeit der Oberböden getrennt für die acht Landnutzungen dargestellt. Hier zeigt sich im Vergleich zu Abb. 4.4 ein gegenläufiges Bild. Die Nutzungen Acker-, Wein- und Obstbau zeichnen sich im Vergleich zu den Waldböden durch größere Horizontmächtigkeiten der Oberbodenhorizonte aus. Sie beträgt im Mittel zwischen 20 und 30 cm. Die Oberböden von Grünlandstandorten

haben mit ca. 18 cm eine etwas geringere Mächtigkeit als die rezent bearbeiteten Oberböden der Ackerstandorte. Am geringsten ist die Mächtigkeit der Oberböden der Waldstandorte; sie liegt im Mittel bei nur 5 cm. Auffällig ist die hohe Streuung der Messwerte bei den Böden in Siedlungsgebieten. Hier liegt die mittlere Mächtigkeit bei 20 cm.

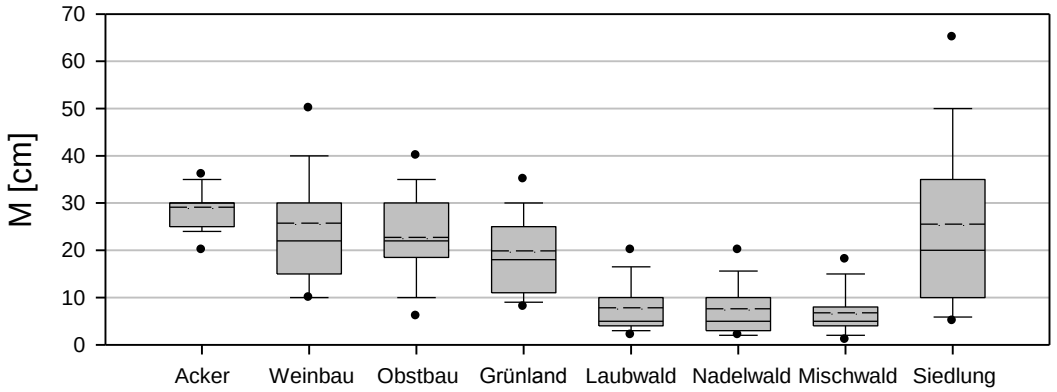

Abb. 3.3: Mächtigkeit der Oberböden der verschiedenen Landnutzungen.

In Abb. 3.4 sind die berechneten Kohlenstoffvorräte der Oberböden in Tonnen pro Hektar (t ha^{-1}) für die verschiedenen Landnutzungen zusammengestellt. Im Mittel zeigen die Oberböden in Siedlungsgebieten mit knapp 60 t ha^{-1} bei hoher Streuung die höchsten Kohlenstoffvorräte. In den Oberböden von Acker- und Grünlandstandorten sind im Mittel etwa 50 t ha^{-1} Kohlenstoff gespeichert. Oberböden von wein- und obstbaulich genutzten Standorten speichern etwa 40 t ha^{-1} Kohlenstoff. Mit 20 bis 30 t ha^{-1} ist auf Waldstandorten am wenigsten Kohlenstoff in den Oberböden enthalten. Hier kommen die geringe Mächtigkeit der Oberböden und die im Verhältnis zu den anderen Landnutzungen geringe Trockenrohdichte des Feinbodens zum Tragen (die Humusauflage ist unberücksichtigt).

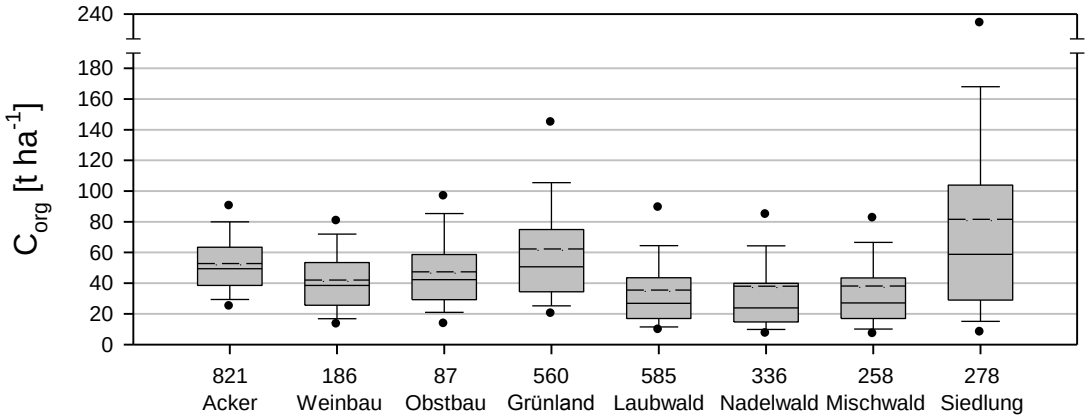

Abb. 3.4: Kohlenstoffvorräte der Oberböden für verschiedene Landnutzungen.

Um einen gemeinsamen Bezugsrahmen für die unterschiedlichen Landnutzungen zu erhalten, wurde der Kohlenstoffvorrat für die oberen 30 cm der Böden berechnet. In Abb. 3.5 sind die Kohlenstoffvorräte der Böden bis in eine Tiefe von 30 cm für die acht Landnutzungen zusammengestellt. Im Vergleich zu Abb. 3.4 zeigt sich ein verändertes Bild. Böden in Siedlungsbereichen besitzen mit knapp 90 t ha^{-1} nach wie vor die höchsten Kohlenstoffvorräte. Es folgen die Grünlandstandorte mit ca. 70 t ha^{-1}. Waldböden liegen mit etwa 60 t ha^{-1} jetzt vor den acker-, wein- und obstbaulich genutzten Standorte die bis in eine Tiefe von 30 cm zwischen 40 und 50 t ha^{-1} Kohlenstoff speichern.

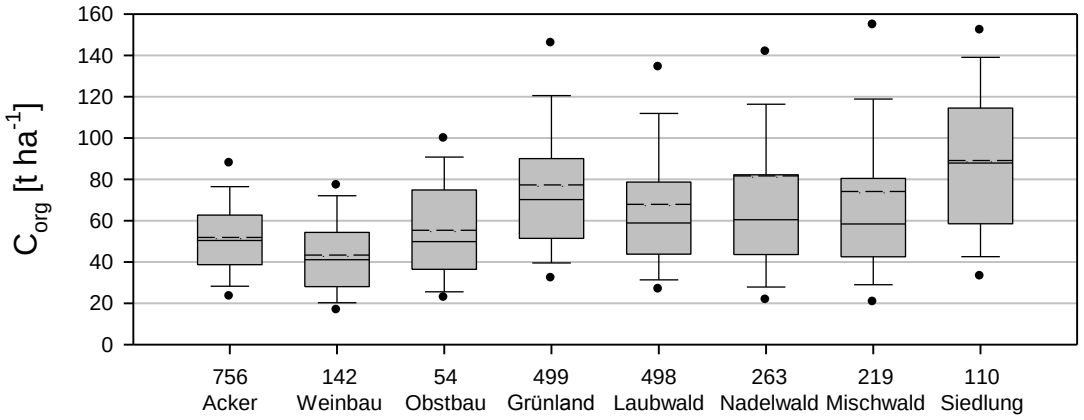

Abb. 3.5: Kohlenstoffvorräte der oberen 30 cm für verschiedene Landnutzungen.

3.2 Bodenkohlenstoffvorräte der Leitprofile der BÜK200N

Die Auswertung der Kohlenstoffvorräte der BÜK200N erfolgt zunächst auf Basis der landnutzungsbezogenen Leitprofile. In der folgenden Abb. 3.6 sind die Kohlenstoffvorräte der oberen 30 cm des Bodens und des Unterbodens/Untergrunds bis in eine Tiefe von maximal 200 cm zusammengestellt. Für alle drei Landnutzungen zeigt sich, dass der Kohlenstoffvorrat in den Unterböden/Untergrund im Mittel (Median) geringer ist als im Oberboden, allerdings die Werte eine höhere Streuung als der Oberboden aufweisen. Die Grünlandstandorte haben sowohl in den oberen 30 cm, als auch im Unterboden/Untergrund die höchsten Kohlenstoffvorräte. Die Daten zeigen bei dieser Landnutzung auch die größte Streuung. Ackerböden haben in den oberen 30 cm die geringste Streuung der Werte, im Unterboden/Untergrund fällt dagegen eine große Spannweite an Werten auf. Die Waldstandorte haben im Mittel sowohl im Ober- als auch im Unterboden die geringsten Kohlenstoffvorräte der drei Landnutzungen. Die Streuung der Werte liegt in den oberen 30 cm zwischen denen der Acker- und Grünlandstandorte, im Unterboden ist sie im Vergleich der drei Landnutzungen am geringsten. Auffällig ist der Unterschied der Kohlenstoffvorräte der Leitprofile im Vergleich mit den Punktdaten der BZE (vgl. Kap. 3.1). Bei den Flächenprofilen der BÜK200N sind die mittleren Kohlenstoffvorräte der oberen 30 cm der Ackerstandorte höher als bei den Punktdaten der BZE. Die Flächenprofile der Grünland- und Waldflächen zeigen im Mittel dagegen geringere

Kohlenstoffvorräte als die Punktdaten. Die Gründe dafür liegen vor allem darin, dass hier gemessene Trockenrohdichten und nicht die Klassenmittel in die Berechnung eingehen. Ein Vergleich der einzelnen Datensätze erfolgt in Kap. 4.1.

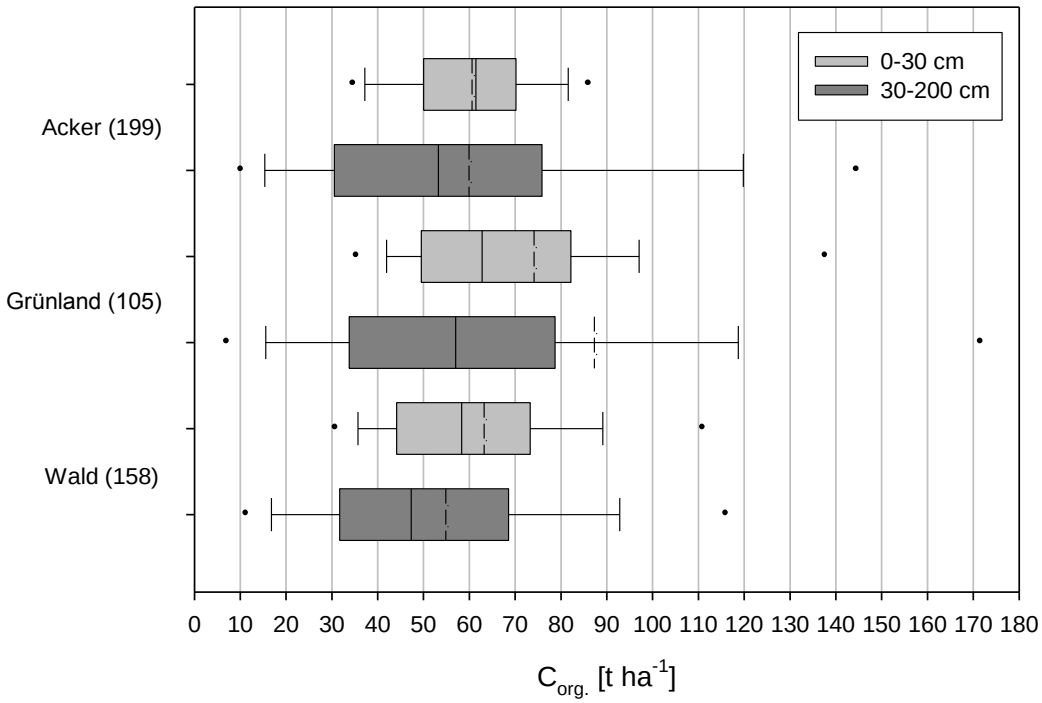

Abb. 3.6: Kohlenstoffvorräte getrennt nach Speichertiefen der drei Landnutzungen. In Klammern die Anzahl der Leitbodenformen der BÜK200N.

In Abb. 3.7 sind die Kohlenstoffvorräte der drei Landnutzungen der Leitbodenformen der BÜK200N für den gesamten Mineralboden bis in eine Tiefe von maximal zwei Meter zusammengestellt. Acker- und Waldprofile zeigen eine ähnliche Verteilung der Werte, mit einem Median von etwa 110 t ha^{-1}. Die Grünlandstandorte haben mit 120 t ha^{-1} einen etwas höheren Kohlenstoffvorrat bei einer größeren Streuung der Werte. Die Auflagehorizonte der Waldnutzung bleiben auch hier unberücksichtigt.

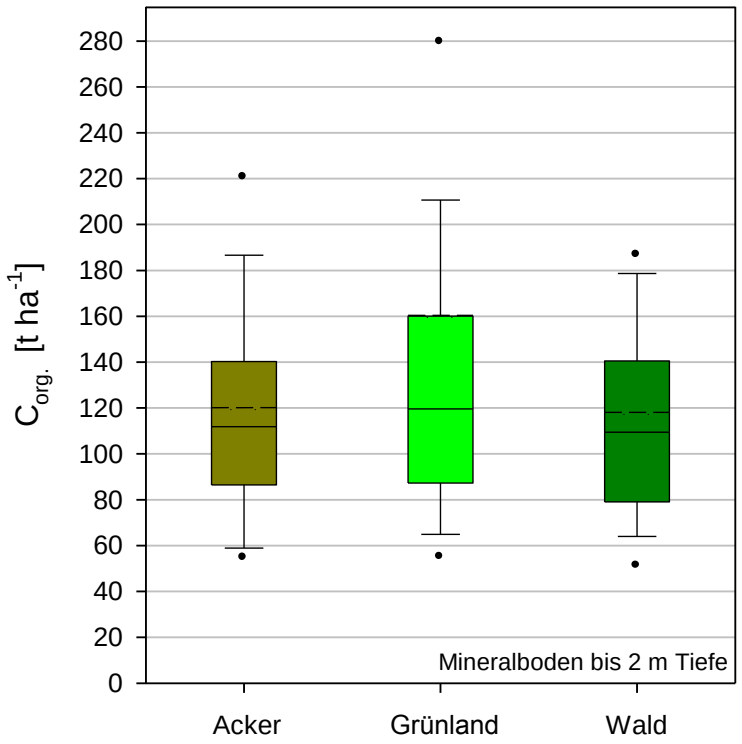

Abb. 3.7: Gesamtkohlenstoffvorräte der drei Landnutzungen.

In Abb. 3.8 sind die Kohlenstoffvorräte nach Bodentypengruppen der BÜK200N zusammengestellt. In Klammern steht die Anzahl an unterschiedlichen Leitbodenformen der Bodentypengruppe. Sind mehr als 12 Leitbodenformen vertreten, ist die Verteilung der Kohlenstoffvorräte als Boxplot dargestellt, sonst ist lediglich der Median verzeichnet. In den Niedermooren sind mit knapp über 900 t ha^{-1} die größten Kohlenstoffmengen gespeichert. Mit großem Abstand folgen die Auenböden mit knapp 200 t ha^{-1}. Die geringsten Kohlenstoffmengen mit weniger als 50 t ha^{-1} sind in Rendzinen, Rankern und Syrosemen gespeichert. Aus der Abbildung wird auch deutlich, welchen Flächenanteil die Bodentypengruppen auf der BÜK200N einnehmen. Die größte Verbreitung haben Braunerden und Regosole mit mittleren Kohlenstoffvorräten von 60 und 90 t ha^{-1}.

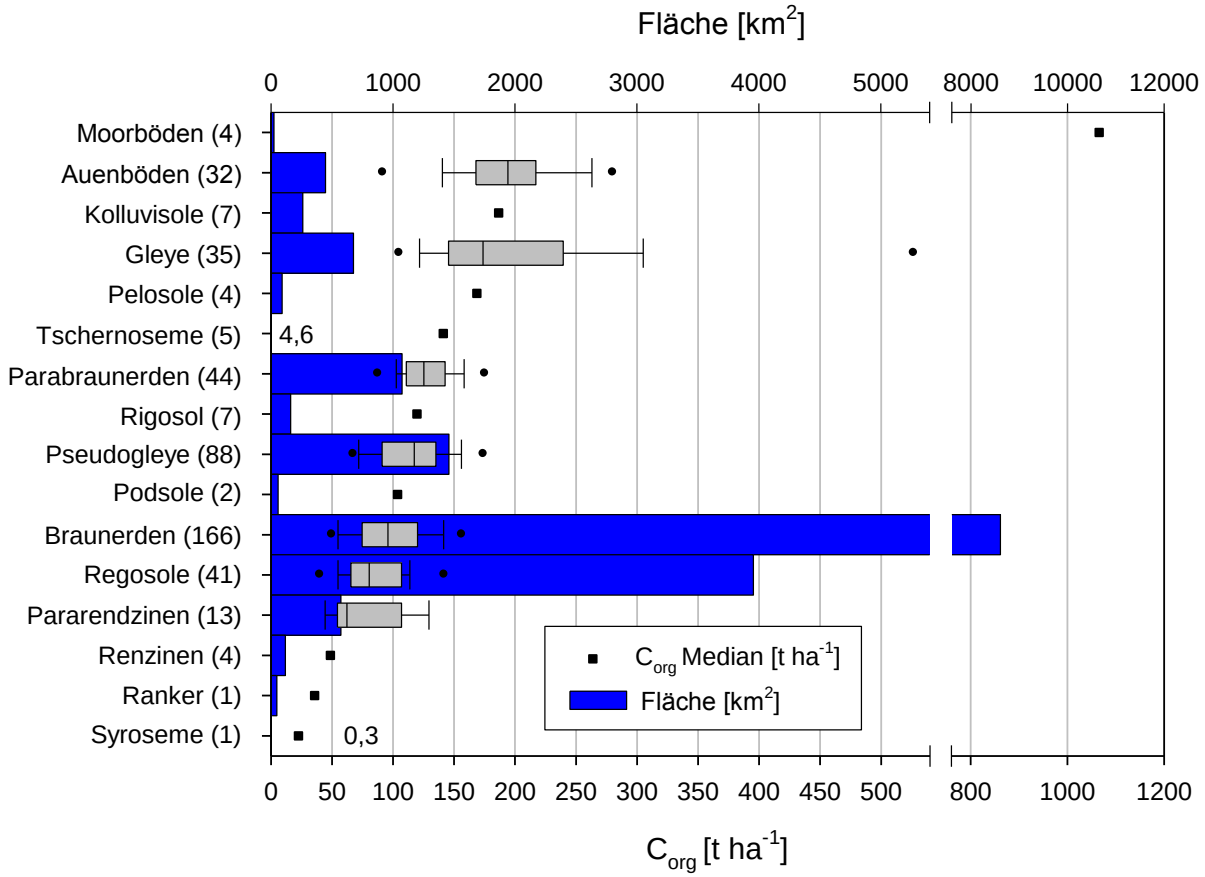

Abb. 3.8: Kohlenstoffvorräte der Leitprofile der BÜK200N nach verschieden Bodentypen. In ( ) die Anzahl der Bodenformengesellschaften der BÜK200N.

Abb. 3.9 zeigt in ähnlicher Darstellung wie Abb. 3.8 die Kohlenstoffvorräte (t ha^{-1}) und die Kohlenstoffmengen (Mio. t) der Bodentypengruppen. Aufgrund ihrer großen Verbreitung ist der meiste Kohlenstoff in Rheinland-Pfalz in Braunerden und Regosolen gespeichert. Durch die differenzierte Darstellung nach den oberen 30 cm und dem Unterboden/Untergrund bis 200 cm wird auch die Bedeutung des Unterbodens/Untergrunds für die Kohlenstoffspeicherung deutlich. In den Moorböden, Auenböden, Kolluvisolen, Gleyen, Pelosolen und Tschernosemen ist sogar mehr Kohlenstoff unterhalb von 30 cm gespeichert.

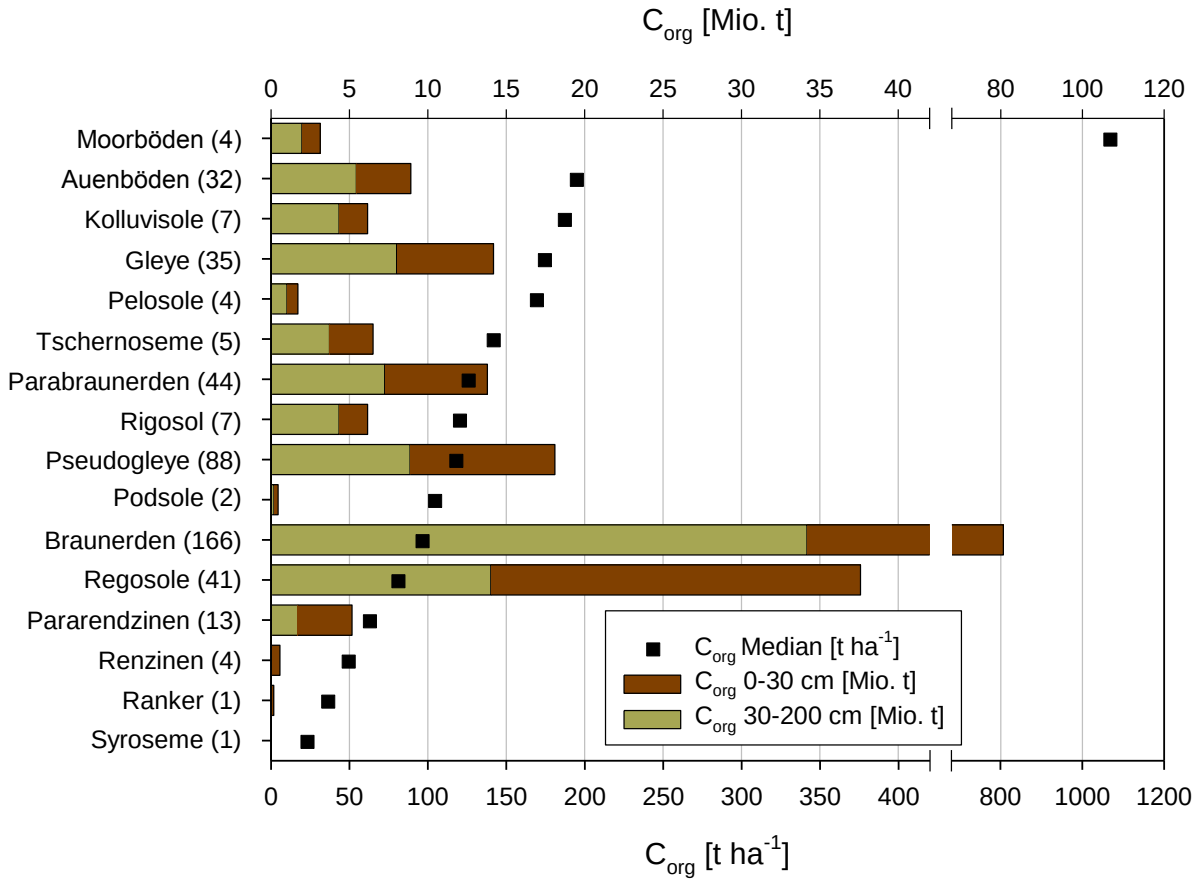

Abb. 3.9: Kohlenstoffvorräte der Leitprofile der BÜK200N nach verschieden Bodentypen. In ( ) die Anzahl der Bodenformengesellschaften der BÜK200N.

3.3 Regionalisierung der Bodenkohlenstoffvorräte

Die Übertragung der Punktdaten in die Fläche ermöglicht eine flächenhafte Auswertung der Kohlenstoffvorräte. Die Abbildungen Abb. 3.11, Abb. 3.12 und Abb. 3.13 zeigen auf Basis der BÜK200N eine flächendifferenzierte Darstellung der Bodenkohlenstoffvorräte. Die Gesamtfläche von Rheinland-Pfalz beträgt etwa 1.985.495 ha. Nach der Verschneidung mit CORINE Landcover entfallen 138.703 ha (7%) auf Siedlungsflächen, 12.774 ha (0,6%) auf Wasserflächen. Diese werden bei der Berechnung der Kohlenstoffvorräte nicht weiter berücksichtigt. Die resultierende Fläche von 1.834.018 ha (92,4%) wurde den Nutzungen Acker, Grünland und Wald zugewiesen. Davon konnte für 1.802.204 ha (90,8%) (Acker 755.655 ha[1], Grünland 232.494 ha, Wald 814.055 ha) Kohlenstoffvorräte berechnet werden. Insgesamt wurden für 458 Leitbodenformen (Acker 197, Grünland 105, Wald 158) Kohlenstoffvorräte bestimmt. Bei der flächenhaften Auswertung ist zu berücksichtigen, dass die

[1] Unter der Landnutzung „Acker“ werden alle anderen Nutzungsformen aggregiert, die nicht in die Kategorien Grünland-, Wald-, Siedlungs- oder Wasserflächen fallen, da die Bodenflächendaten BFD200 nur Acker, Grünland und Wald unterscheiden. Daher kommt es bei der Flächengröße zu einer Abweichung im Vergleich zu den Angaben des Statistischen Landesamts Rheinland-Pfalz, die für die Bodennutzung Ackerland rund 470.000 ha (inklusive Rebflächen und Obstanlagen) ausweisen.

Leitbodenformen einen unterschiedlich großen Anteil an der Gesamtfläche aufweisen. Wobei die Flächen pro Leitbodenform sehr unterschiedliche Größen von 1 bis 162.766 ha aufweisen.

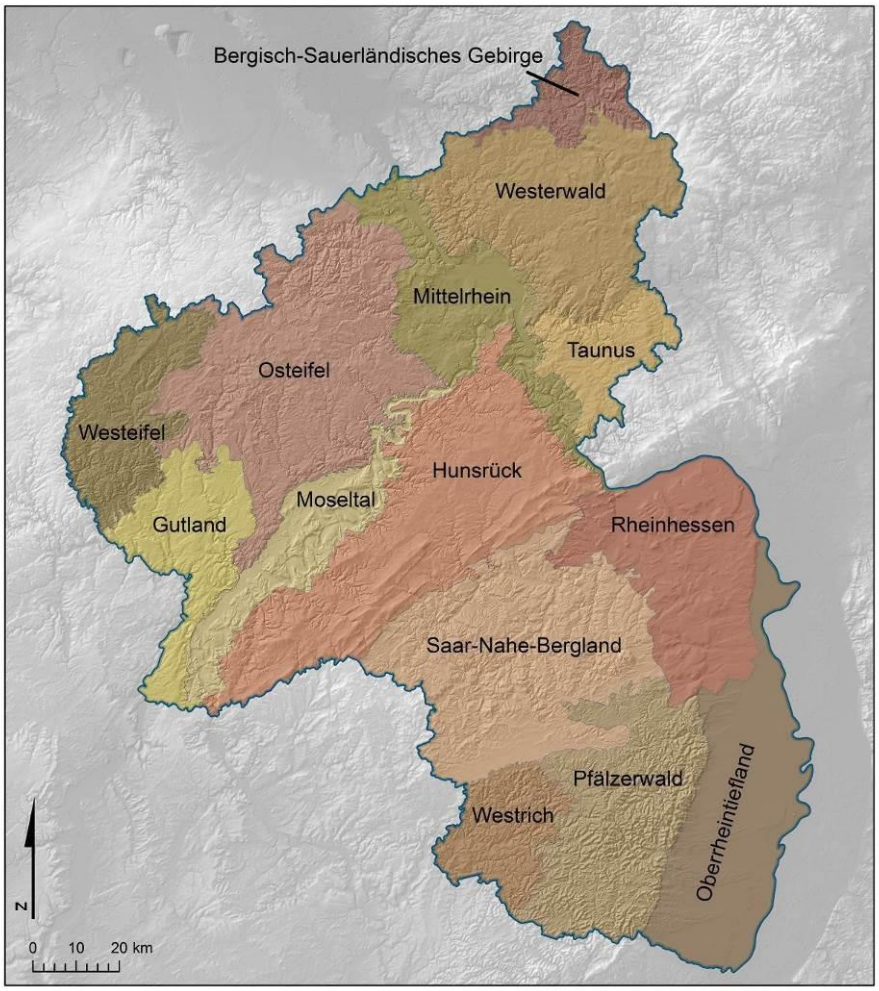

Abb. 3.10: Naturräume in Rheinland-Pfalz (teilweise zusammengefasst).

Die Kohlenstoffvorräte sind in den nachfolgenden Karten für die Tiefenbereiche 0-30 cm, 30-200 cm und 0-200 cm dargestellt. Neben der Kartendarstellung sind die mittleren Kohlenstoffvorräte für Naturräume (Abb. 3.10) in Rheinland-Pfalz in Tabellen zusammengefast. In Abb. 3.11 ist der Kohlenstoffvorrat für den Bereich von 0-30 cm dargestellt. Hohe Kohlenstoffvorräte zeigen Regionen mit Grünlandnutzung im Westerwald und der Westeifel und die Auengebiete und Altläufe des Oberrheintieflandes. Auch andere Auenbereiche sind erkennbar, sofern die Auflösung der BÜK200N diese Flächen ausweist. Die höchsten Kohlenstoffvorräte weist die Karte für die Niedermoorbereiche des Landstuhler Bruchs westlich von Kaiserslautern auf. Auf Basis der Naturräume haben das Saar-Nahe-Bergland, das Oberrheintiefland und der Pfälzerwald mit > 65 t ha^{-1} die höchsten Kohlenstoffvorräte in der Tiefenstufe 0 bis 30 cm. Die geringsten Vorräte weisen das Mittelrheingebiet, das Bergisch-Sauerländische Gebirge und das Moseltal mit weniger als 59 t ha^{-1} auf.

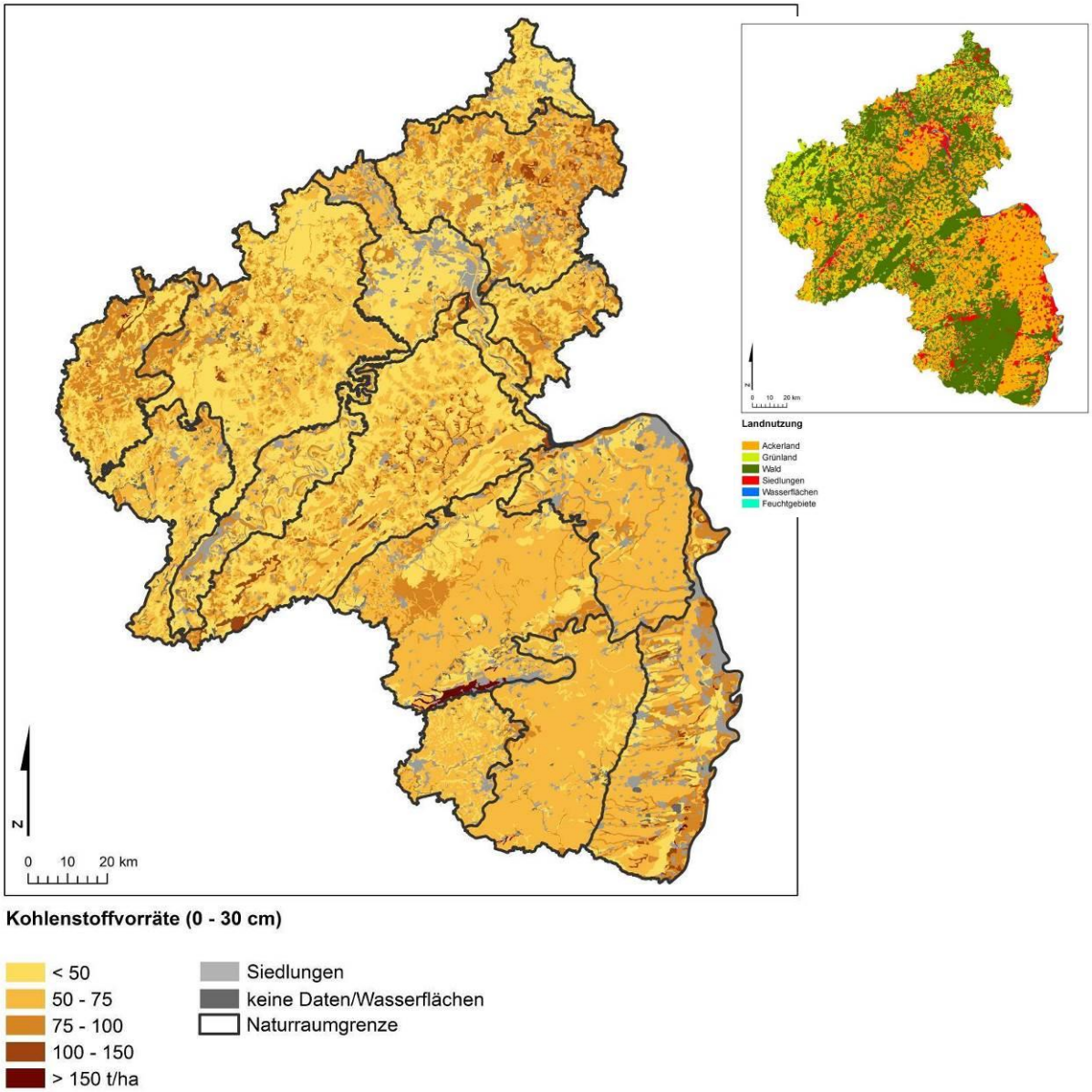

Abb. 3.11: Kohlenstoffvorräte rheinland-pfälzischer Böden bis in eine Tiefe von 30 cm (LGB 2009).

Tab. 3.1: Kohlenstoffvorräte rheinland-pfälzischer Böden bis in eine Tiefe von 30 cm nach Naturräumen.

Nr.	Naturraum	Größe [Hektar]	Kohlenstoffvorrat [t ha^{-1}]	Standardabweichung [t ha^{-1}]
19	Saar-Nahe-Bergland	241.689	67	62
22	Oberrheintiefland	171.529	66	22
17	Pfälzerwald	162.056	65	21
32	Westerwald	183.919	63	22
22	Rheinhessen	156.005	62	14
30	Taunus	58.367	61	17
24	Hünsrück	260.762	59	19
28	Westeifel	93.469	58	20
18	Westrich	63.286	56	14
27	Osteifel	259.449	51	18
26	Gutland	91.655	50	17
29	Mittelrheingebiet	114.417	49	18
33	Bergisch-Sauerländisches Gebirge	43.550	49	17
25	Moseltal	86.311	48	20

Im Tiefenbereich 30-200 cm (Abb. 3.12) haben neben den Niedermoorbereichen des Landstuhler Bruchs, Tschernoseme und Kolluvisole in Rheinhessen die höchsten Kohlenstoffvorräte. Noch deutlicher als im Tiefenbereich 0-30 cm sind die hohen Kohlenstoffvorräte der Auenböden zu erkennen. Im südöstlichen Bereich des Hunsrücks treten Pseudogleye mit höheren Vorräten hervor. Daneben weisen im südöstlichen Bereich des Saar-Nahe-Berglandes Pelosole höhere Kohlenstoffvorräte im Unterboden auf und im westlichen Bereich der Osteifel sind Grund- und Stauwasser beeinflusste Böden mit hohen Vorräten flächenhaft verbreitet.

Bei der Betrachtung der Naturräume sind in Rheinhessen und im Oberrheintiefland mit 80 t ha^{-1} die höchsten Kohlenstoffvorräte gespeichert. Die geringsten Vorräte haben die Böden im Gutland mit nur 17 t ha^{-1}.

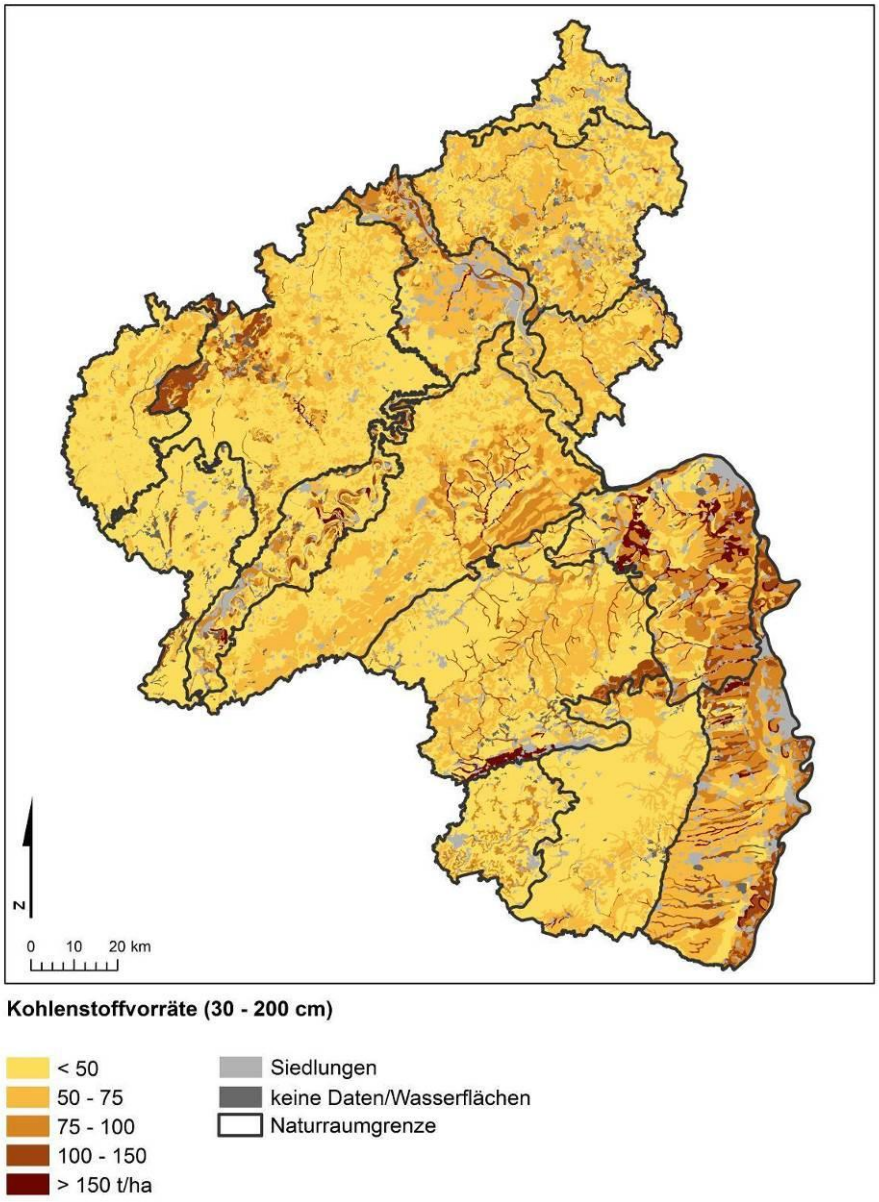

Abb. 3.12: Kohlenstoffvorräte rheinland-pfälzischer Böden bis in eine Tiefe von 30 bis 200 cm (LGB 2009).

Tab. 3.2: Kohlenstoffvorräte rheinland-pfälzischer Böden bis in eine Tiefe von 30 bis 200 cm nach Naturräumen.

Nr.	Naturraum	Größe [Hektar]	Kohlenstoffvorrat [t ha^{-1}]	Standardabweichung [t ha^{-1}]
22	Oberrheintiefland	171.529	80	50
22	Rheinhessen	156.005	80	65
29	Mittelrheingebiet	114.417	59	30
30	Taunus	58.367	52	25
19	Saar-Nahe-Bergland	241.689	51	58
32	Westerwald	183.919	49	22
18	Westrich	63.286	49	21
17	Pfälzerwald	162.056	46	21
24	Hünsrück	260.762	46	24
25	Moseltal	86.311	46	36
27	Osteifel	259.449	42	30
33	Bergisch-Sauerländisches Gebirge	43.550	39	23
28	Westeifel	93.469	34	20
26	Gutland	91.655	17	24

In Abb. 3.13 sind die Gesamtkohlenstoffvorräte bis in eine Tiefe von maximal zwei Metern dargestellt. Bei der Betrachtung des gesamten Bodenprofils sind das Oberrheintiefland und Rheinhessen mit mehr als 140 t ha^{-1} die bedeutendsten Regionen für die Kohlenstoffspeicherung. Mit deutlichem Abstand folgen die Mittelgebirgsregionen mit weniger als 120 t ha^{-1}. Die geringsten Vorräte sind in den Böden des Gutlandes im Westen von Rheinland-Pfalz gespeichert. Insgesamt zeigt sich in den Karten das Zusammenspiel von Landnutzung und Bodentyp bei der Kohlenstoffspeicherung. In den oberen 30 cm wird der Kohlenstoffvorrat neben dem Bodentyp auch von der Landnutzung bestimmt. Im Unterboden sind die bodentypologischen Ausprägungen dominierend. Von besonderer Bedeutung für die Speicherung von Kohlenstoff sind Moorböden und Grund- oder Stauwasser beeinflusste Böden. In der Oberrheintiefebene sind neben den Auenböden die gering verbreiteten Tschernoseme wichtige Kohlenstoffspeicher, in Rheinhessen sind es die verbreiteten Kolluvisole.

Damit wären auch die Standorte genannt, die in Zukunft besonders geschützt werden müssen, um den Kohlenstoffspeicher zu erhalten. Mit Rheinhessen und dem Oberrheintiefland weisen grade die Regionen viele Böden mit hohen Kohlenstoffvorräten auf, wo der Siedlungsdruck und damit der Flächenverbrauch besonders hoch sind. Hier besteht mit Blick auf den Klimaschutz ein besonderes Konfliktpotential bei der Landnutzung.

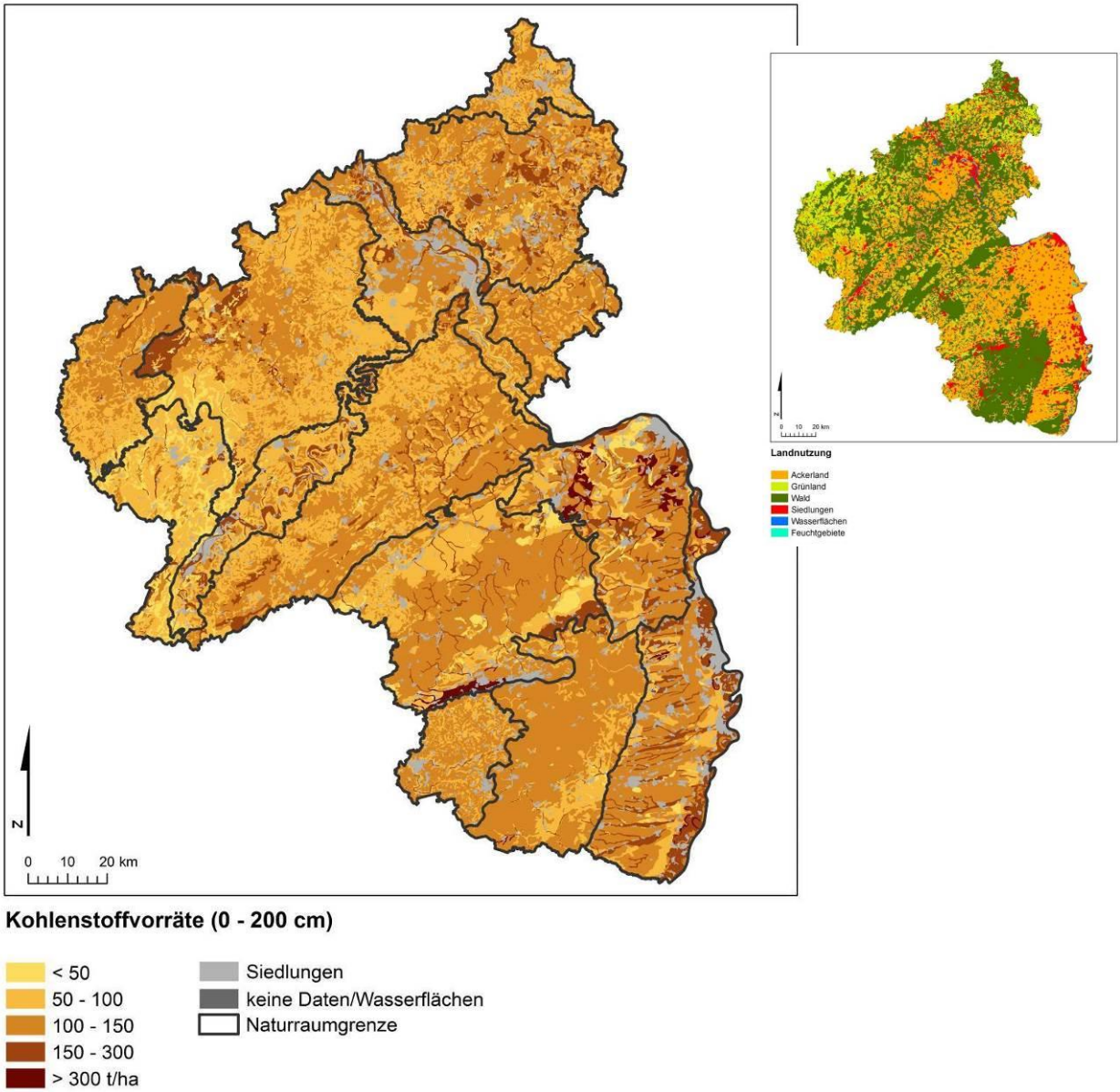

Abb. 3.13: Kohlenstoffvorräte rheinland-pfälzischer Böden bis in eine Tiefe von zwei Metern. (LGB 2009).

Tab. 3.3: Kohlenstoffvorräte rheinland-pfälzischer Böden bis in eine Tiefe von zwei Metern nach Naturräumen.

Nr.	Naturraum	Größe [Hektar]	Kohlenstoffvorrat [t ha^{-1}]	Standardabweichung [t ha^{-1}]
22	Oberrheintiefland	171.529	146	66
22	Rheinhessen	156.005	142	73
19	Saar-Nahe-Bergland	241.689	117	110
30	Taunus	58.367	112	36
32	Westerwald	183.919	112	37
17	Pfälzerwald	162.056	111	38
29	Mittelrheingebiet	114.417	107	39
18	Westrich	63.286	105	31
24	Hünsrück	260.762	105	34
25	Moseltal	86.311	93	49
27	Osteifel	259.449	93	43
28	Westeifel	93.469	92	30
33	Bergisch-Sauerländisches Gebirge	43.550	88	34
26	Gutland	91.655	67	34

Auf Grundlage der oben beschriebenen Berechnungsmethode betragen die Kohlenstoffvorräte der Leitbodenformen der BÜK200N für eine Bilanztiefe von maximal zwei Metern 115 t ha^{-1} für Ackerböden und 128 t ha^{-1} für Grünlandböden. Der Mineralboden der Waldstandorte hat im Mittel einen Kohlenstoffvorrat von 101 t ha^{-1}. Grünlandböden haben in den oberen 30 cm mit 76 t ha^{-1} die größten Kohlenstoffvorräte. Es folgen mit 60 t ha^{-1} die Ackerböden und 55 t ha^{-1} die Waldböden. Im Unterboden/Untergrund sind bei den Ackerböden 55 t ha^{-1}, in den Grünlandböden 52 t ha^{-1} und in den Waldböden 45 t ha^{-1} Kohlenstoff gespeichert (Abb. 3.14). Die organische Auflage der Waldböden bleibt auch hier unberücksichtigt.

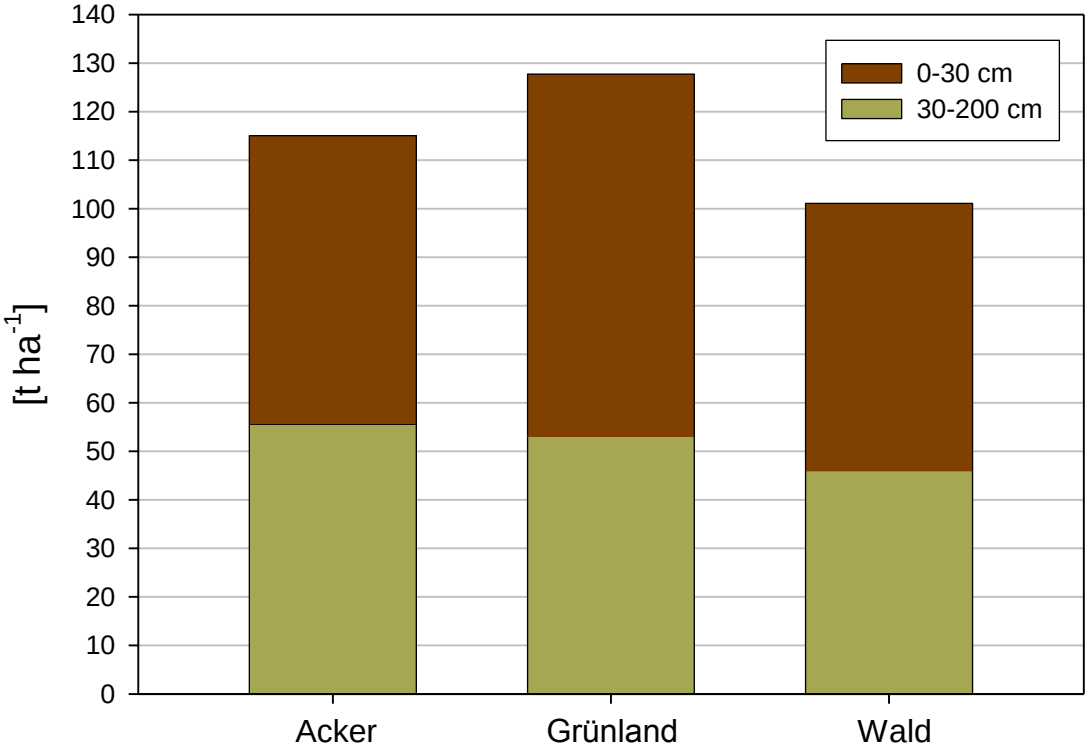

Abb. 3.14: Kohlenstoffvorräte der Landnutzungen Acker, Grünland und Wald auf der BÜK200N.

Nach den Anteilen der jeweiligen Landnutzung an der Gesamtfläche berechnen sich für Ackerböden 88 Mio. t Kohlenstoff, für Waldböden 82 Mio. t und für Grünlandböden knapp 30 Mio. t Kohlenstoff. Davon sind in Ackerböden 42 Mio. t, bei Waldböden 38 Mio. t und in Grünlandböden 12 Mio. t unterhalb von 30 cm gespeichert (Abb. 3.15). Die organische Auflage der Waldböden bleibt weiterhin unberücksichtigt. Insgesamt sind nach dieser Berechnungsmethode etwa 200 Mio. t Kohlenstoff in rheinland-pfälzischen Böden gespeichert.

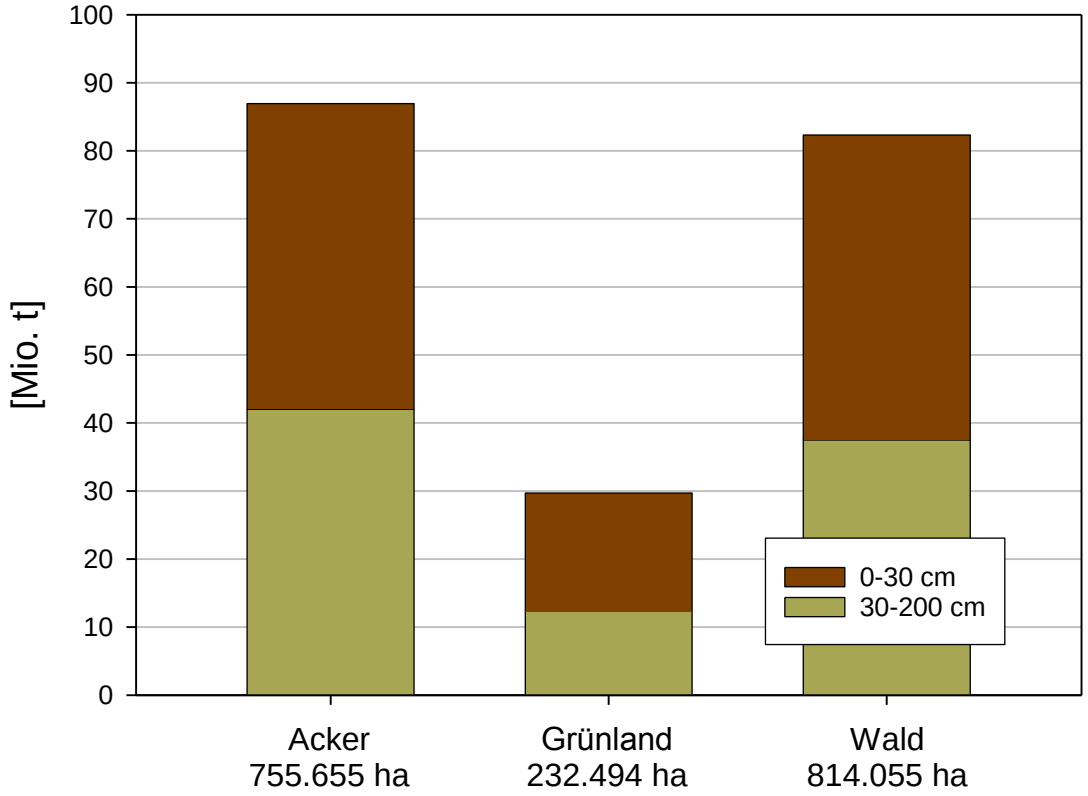

Abb. 3.15: Kohlenstoffvorräte der Landnutzungen Acker[2], Grünland und Wald der BÜK200N.

3.4 Bodenkohlenstoffvorräte der Bodenzustandserhebung Wald (BZE)

Die Bodenzustandserhebung Wald bietet die Möglichkeit, neben den oberen 30 cm und dem Unterboden/Untergrund auch die Auflagehorizonte (humose Auflage) zu betrachten. In Abb. 3.16 sind die Kohlenstoffvorräte der Untersuchungen der BZE I und BZE II gegenübergestellt. Die Datenerhebung der BZE I ergab für die organische Auflage im Mittel etwa 16 t ha^{-1} Kohlenstoff. In den oberen 30 cm des Mineralbodens sind um die 52 t ha^{-1} Kohlenstoff gespeichert und unterhalb von 30 cm etwas mehr als 23 t ha^{-1}. Der Unterschied zwischen Median und Mittelwert zeigt eine deutlich linksschiefe Verteilung der Werte an. Die Wiederholungsmessungen der BZE II zeigen keine signifikant höheren oder geringeren Werte.

[2] Siehe Fußnote 1 auf Seite 22.

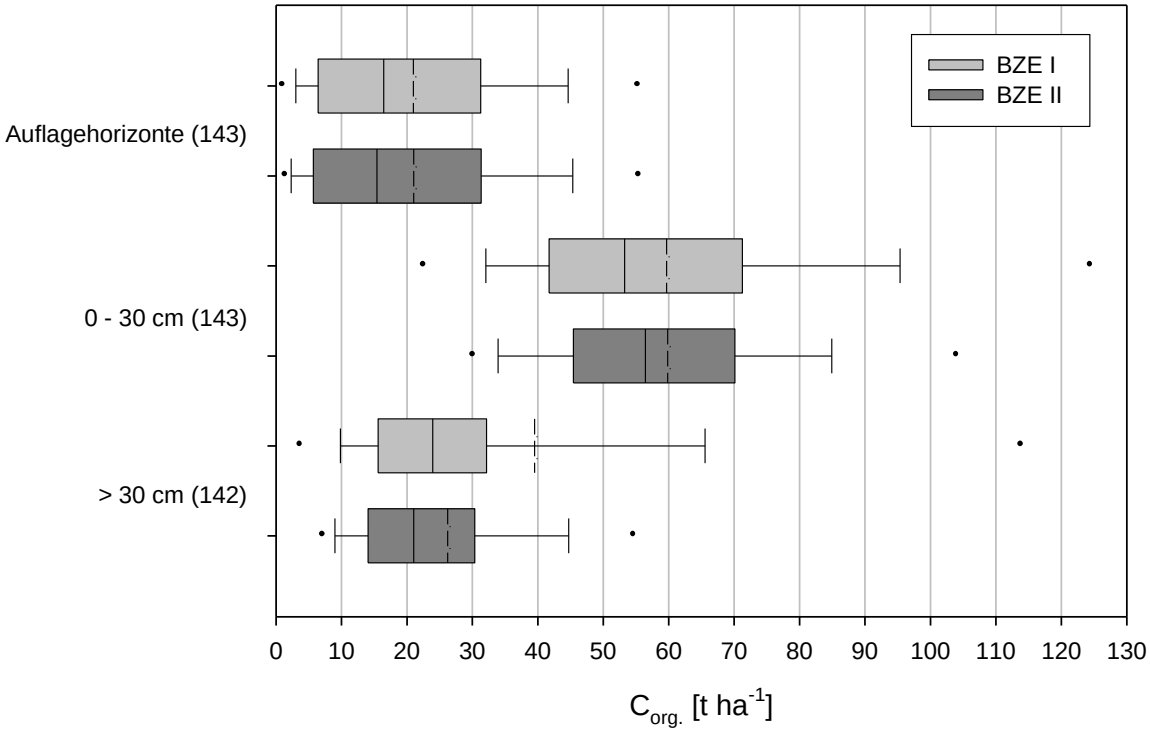

Abb. 3.16: Kohlenstoffvorräte verschiedener Speichertiefen (BZE I und BZE II).

Die Gesamtvorräte beider Erhebungen sind in Abb. 3.17 zusammengestellt. Sowohl für die BZE I, wie auch für die BZE II wird für den Mineralboden im Median knapp 80 t ha^{-1} berechnet und für den Mineralboden und die Auflagehorizonte ein Wert von knapp 100 t ha^{-1}. Auffällig ist, dass die Mittelwerte der BZE I Daten deutlich von den Medianen abweichen und die Daten eine größere Streuung aufweisen.

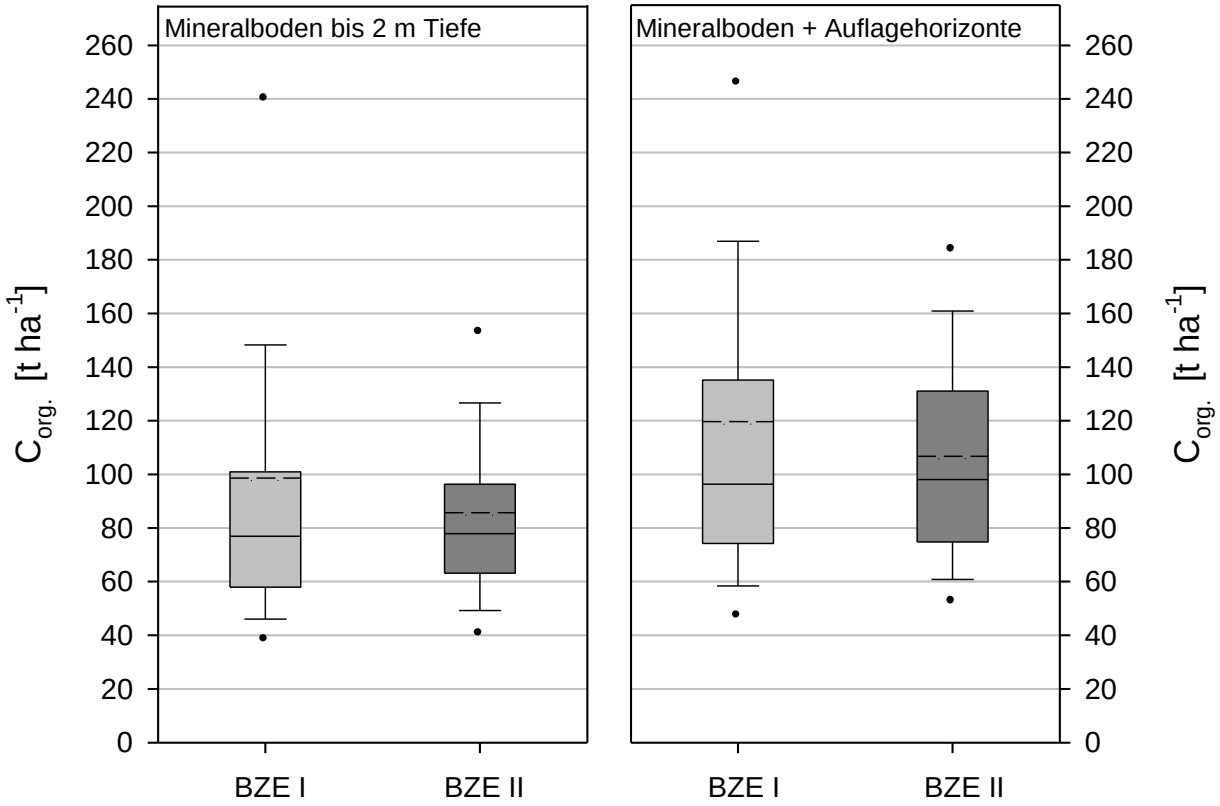

Abb. 3.17: Kohlenstoffvorräte im Mineralboden bis 2 m Tiefe (links) und zusätzlich mit Auflagehorizonte (rechts).

Einfluss von Boden- und Standorteigenschaften auf die Kohlenstoffvorräte

Am Beispiel des BZE II Datensatzes wurde versucht, standörtliche Einflussfaktoren auf den Kohlenstoffvorrat über statistische Verfahren zu erkennen. Der Datensatz wurde ausgewählt, da neben dem Kohlenstoffvorrat als Zielvariable umfangreiche Standortdaten für die 164 Punkte erhoben wurden. In einem ersten Schritt wurde der Kohlenstoffvorrat von verschiedenen Speicherorten (Humusauflage, Oberboden, Oberboden und Humusauflage, Unterboden, Gesamtprofil) mit den verschiedenen Parametern bivariat korreliert. Dafür wurde für die metrisch skalierten Variablen der Korrelationskoeffizient nach Pearson berechnet und für die nominalskalierten Variablen der Korrelationskoeffizient nach Kendall bestimmt. Die 75 Variablen sind in Tab. 3.4, getrennt nach den Speicherräumen, aufgelistet. In einem zweiten Schritt wurde eine multivariate Auswertung mit ausgewählten Variablen durchgeführt.

Die Variablen können in verschiedene Gruppen eingeteilt werden. Zum einen 19 metrisch skalierte Variablen. Zum anderen nominal skalierte Variablen der Vegetation (8), der Lage des Standorts im Relief (12), die Reliefform (15), die Exposition (8) und die Wasserhaushaltsstufe (13).

In der Tabelle sind die Regressionskoeffizienten eingetragen, die auf dem 0,05% Signifikanzniveau mit dem Kohlenstoffvorrat korrelieren. Insgesamt korrelieren die Variablen gering mit den Kohlenstoffvorräten der einzelnen Speicher; die Regressionskoeffizienten liegen zwischen 0,64 und 0,13.

Tab. 3.4: Standortvariablen mit den Regressionskoeffizienten der statistischen Analyse.

	Nr.	Variable	Bezeichnung	Einheit	Bemerkung	Humusauflage	Oberboden	Auflage und Oberboden	Unterboden	Gesamtprofil
metrische Variablen	1	C_{org}	Kohlenstoffvorrat	t ha^{-1}	Zielvariable					
	2	Ton	Tongehalt	%	für jeden Bodenraum	-				
	3	Schluff	Schluffgehalt	%	für jeden Bodenraum	-				
	4	T+U	Ton- und Schluffgehalt	%	für jeden Bodenraum	-				
	5	FK	Feldkapazität	mm	für jeden Bodenraum	(0,64)*	0,35	0,55	0,36	0,32
	6	nFK	nutzbare Feldkapazität	mm	für jeden Bodenraum	(0,64)*	0,43	0,55	0,35	0,39
	7	TW	Totwasser	mm	für jeden Bodenraum	(0,64)*	0,19		0,30	0,17
	8	TW_%	Totwasseranteil an FK	%	für jeden Bodenraum					-0,17
	9	TRD	Trockenrohdichte	g cm^{-3}	für jeden Bodenraum	-				0,16
	10	Wurzel	Durchwurzelungstiefe	cm		-				
	11	N_Jahr	Jahresniederschlag	mm			0,28	0,26		0,17
	12	T_Jahr	Jahresmitteltemperatur	°C						
	13	KWB	Klimatische Wasserbilanz	mm			0,22	0,18		
	14	Feuchte	Wasserhaushaltsstufe als Zahl	-	als metrische Variable verwendet	0,26	0,32	0,39	0,36	0,49
	15	Hangn	Hangneigung	Grad		-0,26	-0,36	-0,41	-0,22	-0,42
	16	Höhe	Höhe über NN	m						
	17	Auf	Auflage	cm	Organische Auflage (L, Of, Oh)	0,64	-	0,39	-	0,22
	18	Fi_%	Fichtenanteil	%		0,19				
	19	Ki_%	Kiefernanteil	%		0,31		0,21		
	20	Fi_Ki_%	Fichten- und Kiefernanteil	%		0,37		0,23		
Vegetation	21	Nadel	Nadelwald	ja/nein				0,21		0,17
	22	Do	Douglasie	ja/nein						
	23	Fi	Fichte	ja/nein		0,25				0,14
	24	Ki	Kiefer	ja/nein		0,20		0,20		
	25	NH	weiteres Nadelholz	ja/nein		0,35		0,21		
	26	Bu	Buche	ja/nein		0,20		0,20		0,15
	27	Ei	Eiche	ja/nein		0,16				0,15
	28	LH	weiteres Laubholz	ja/nein		-0,22	0,28		0,28	
Lage im Reief	29	Z	Zentrallage	ja/nein				0,27	0,24	0,18
	30	A	Hangschulter	ja/nein						
	31	F	Hangfuß	ja/nein						
	32	G	Grenzlage	ja/nein						
	33	K	Kulminationsbereich	ja/nein						
	34	M	Mittelhang	ja/nein			0,18			
	35	O	Oberhang	ja/nein						
	36	R	Randlage	ja/nein						
	37	S	Sattelpunkt	ja/nein						
	38	T	Tiefenlage	ja/nein						
	39	U	Unterhang	ja/nein						

	40	Oben	Oberer Hangbereich	ja/nein	Einteilung in Oben und Unten		0,18		0,22	
Reliefform	41	HH	Hanghalde	ja/nein					0,26	-0,23
	42	KS	ebener Kulminationsbereich	ja/nein						
	43	KH	hängiger Kulminationsbereich	ja/nein						
	44	KHR	hängiger Kulminationsbereich	ja/nein	gerundet					
	45	KVR	Kulminationssattelbereich	ja/nein	konkav schwach gewölbt					
	46	KSR	ebener Kulminationsbereich	ja/nein	schwach bis stark gewölbt					
	47	KHF	hängiger Kulminationsbereich	ja/nein	sehr schwach gewölbt bis gestreckt					
	48	KSF	ebener Kulminationsbereich	ja/nein	schwach bis stark gewölbt					
	49	HF	Hangverflachung	ja/nein	vorher. gestreckte Vertikalwölbung					0,14
	50	HR	muldenförmige Hangrinne	ja/nein	mit konkaver, gerundeter Wölbung					
	51	HS	Hangversteilung	ja/nein	gestreckte Vertikalwölbung					
	52	TH	geneigter Tiefenbereich	ja/nein	Neigung N1-N2		0,28			
	53	TS	ebener Tiefenbereich	ja/nein	Senkenbereich N0		0,26	0,35	0,41	0,27
	54	TSM	ebener Tiefenbereich	ja/nein	schwach bis stark gewölbt				0,29	0,13
	55	TSS	ebener Tiefenbereich	ja/nein	N0, gestreckt, Hangkehle begrenzt	-0,13				
Exposition	56	NN	Nord	ja/nein						
	57	EE	Ost	ja/nein						
	58	SE	Südost	ja/nein						
	59	SS	Süd	ja/nein						
	60	SW	Südwest	ja/nein						0,16
	71	WW	West	ja/nein						
	62	NW	Nordwest	ja/nein						
	63	Expo	Sonnhang/Schatthang	ja/nein	Einteilung in Sonn- und Schatthang					
Wasserhaushaltsstufen	64	nass	nass	ja/nein		0,15		0,16		
	65	vnä	vernässt	ja/nein						
	66	feu	feucht	ja/nein			0,25	0,36		0,16
	67	äfr	äußerst frisch	ja/nein			0,43	0,26	0,44	0,27
	68	sfr	sehr frisch	ja/nein						
	69	fr	frisch	ja/nein						
	70	zfr	ziemlich frisch	ja/nein			0,15			
	71	n	normal	ja/nein						
	72	mtr	mäßig trocken	ja/nein				-0,18		-0,17
	73	tr	trocken	ja/nein						
	74	str	sehr trocken	ja/nein						-0,24
	75	Feucht	Feucht	ja/nein	nass, vnä, feu, äfr, sfr, fr, zfr			0,19	0,21	

* Feldkapazität, nutzbare Feldkapazität und Totwasseranteil wurden für die Humusauflage nicht gemessen, sondern nur über die Mächtigkeit der Humsauflage berechnet.

Um die Unterschiede in den Kohlenstoffvorräten der BZE-Standorte zu erklären, wurde mit der Statistiksoftware SPSS eine multivariate Regressionsanalyse durchgeführt. Die Auswahl der Parameter erfolgte sowohl als automatisierte, schrittweise Selektion (Kriterien: Wahrscheinlichkeit von F-Wert für Aufnahme <= 0,05, Wahrscheinlichkeit von F-Wert für Ausschluss 0 >= 100), als auch durch eine manuelle Auswahl der Parameter auf Grundlage der Ergebnisse der bivariaten Korrelationsanalyse. Die Ergebnisse sind in den folgenden Tabellen (Tab. 3.6 und Tab. 3.5.) zusammengestellt. Die Regressionskoeffizienten liegen bei dem automatisierten Verfahren zwischen 0,44 (Unterboden) und 0,60 (Humusauflage) und bei dem manuellen Auswahlverfahren bei 0,28 (Gesamtprofil) und 0,52 (Humusauflage und Humusauflage und Oberboden). Eine manuelle Auswahl der Variablen führt zu keiner Verbes-

serung der Ergebnisse. Es bleibt zu untersuchen, ob eine größere Stichprobe (Anzahl der Standorte) das Bestimmtheitsmaß und damit die erklärte Varianz verbessern würde.

Tab. 3.5: Bestimmtheitsmaße und Standortvariablen der manuellen Auswahl.

	Humusauflage	**Oberboden**	**Auflage und Oberboden**	**Unterboden**	**Gesamtprofil**
R^2	0,523	0,365	0,517	0,298	0,283
Aufgenommene Variablen	Wasserhaushaltsstufe als Zahl	Tongehalt	nutzbare Feldkapazität	Totwasser	Feldkapazität
	Auflage	nutzbare Feldkapazität	Jahresniederschlag	Trockenrohdichte	Jahresniederschlag
	Fichten- und Kiefern-anteil	Totwasser	Hangneigung	Wasserhaushaltsstufe als Zahl	Wasserhaushaltsstufe als Zahl
	ebener Tiefenbereich	Jahresniederschlag	Auflage	ebener Tiefenbereich	
	Südwest	geneigter Tiefenbe-reich	Fichten- und Kiefern-anteil		
		äußerst frisch	ebener Tiefenbereich		
			Südwest		
			nass		
			feucht		
			äußerst frisch		

Tab. 3.6: Bestimmtheitsmaße und Standortvariablen der automatisierten Analyse.

	Humusauflage	**Oberboden**	**Auflage und Oberboden**	**Unterboden**	**Gesamtprofil**
R^2	0,600	0,457	0,554	0,439	0,568
Aufgenommene Variablen	Totwasser	Tongehalt	nutzbare Feldkapazität	Tongehalt	Schluffgehalt
	Nadelwald	Jahresniederschlag	Trockenrohdichte	Totwasser	Wasserhaushaltsstufe als Zahl
	Fichte	Klimatische Wasserbi-lanz	Hangneigung	Trockenrohdichte	Höhe über NN
	Randlage	Höhe über NN	Buche	Kiefer	Auflage
	muldenförmige Hang-rinne	geneigter Tiefenbe-reich	Randlage	Randlage	Buche
	ebener Tiefenbereich	äußerst frisch	Oberer Hangbereich	ebener Tiefenbereich	Randlage
	Südwest	feucht	geneigter Tiefenbe-reich	ebener Tiefenbereich	muldenförmige Hang-rinne
	nass		Südwest	äußerst frisch	ebener Tiefenbereich (TS)
	feucht		nass	sehr frisch	ebener Tiefenbereich (TSM)
			feucht	normal	Südwest
			äußerst frisch	trocken	äußerst frisch
					frisch

4 Zusammenführung und Diskussion der Ergebnisse

4.1 Vergleich der einzelnen Auswertungen

In Abb. 4.1 sind die Kohlenstoffmengen zusammen mit den für die Berechnung notwendigen Daten (Kohlenstoffgehalt, Trockenrohdichte, Skelettgehalt), getrennt nach den Landnutzungen Acker, Grünland und Wald, für den Speicherraum 0-30 cm, dargestellt. Für die Analyse wurden die Landnutzungen Acker, Weinbau, Obstbau der Punktdaten der BZB aggregiert, gleiches gilt für die Landnutzungen Laub-, Nadel- und Mischwald.

Die Abbildung zeigt, dass die Unterschiede bei den Kohlenstoffmengen für die drei Landnutzungen bei den Leitbodenformen der BÜK200N geringer als bei den Punktdaten der BZB sind. Die Bodenformen mit Ackernutzung der BÜK200N zeigen höhere Kohlenstoffmengen als die Punktdaten der BZB. Dies kann auf die höheren „gemessenen“ Trockenrohdichten (TRD) der Eingangsdaten für die BÜK200N bei gleichzeitig geringeren Skelettgehalten (Steine) zurückgeführt werden. Bei den Grünlandböden sind die Unterschiede dagegen gering. Der Vergleich der Leitprofile der BÜK200N für Waldstandorte mit der Punktdaten des LGB (insgesamt 971 Standorte, Laub-, Nadel- und Mischwald zusammengefasst) zeigt im Median für beide Datensätze eine Kohlenstoffmenge von etwa 60 t ha^{-1}, bei einer größeren Streuung der Werte der BZB Punktdaten.

Für Waldstandorte bieten die BZE Daten eine weitere Vergleichsmöglichkeit mit den Kohlenstoffmengen der Leitbodenformen der BÜK200N. Im Mittel werden hier bei einer geringeren Streuung der Werte ebenfalls knapp unter 60 t ha^{-1} Kohlenstoff berechnet. Auffällig sind bei diesem Datenkollektiv die geringeren Trockenrohdichten im Vergleich zu den Leitbodenformen der BÜK200N und den Klassenmitteln der TRD der BZB-Daten. Dagegen sind die ermittelten Kohlenstoffgehalte der Leitbodenformen der BÜK200N geringer als die gemessenen Kohlenstoffgehalte der BZB- und BZE-Daten. Die verschiedenen Datensätze zeigen bei der Landnutzung Wald zwar in etwa die gleichen mittleren Kohlenstoffmengen, aber auf Basis unterschiedlicher Werte bei den bestimmenden Faktoren Kohlenstoffgehalt und Trockenrohdichte. Hier spielen möglicherweise methodische Unterschiede eine Rolle. Bei der Erhebung der Daten für die BZE werden die Bodenprofile schichtweise beprobt und nicht horizontweise.

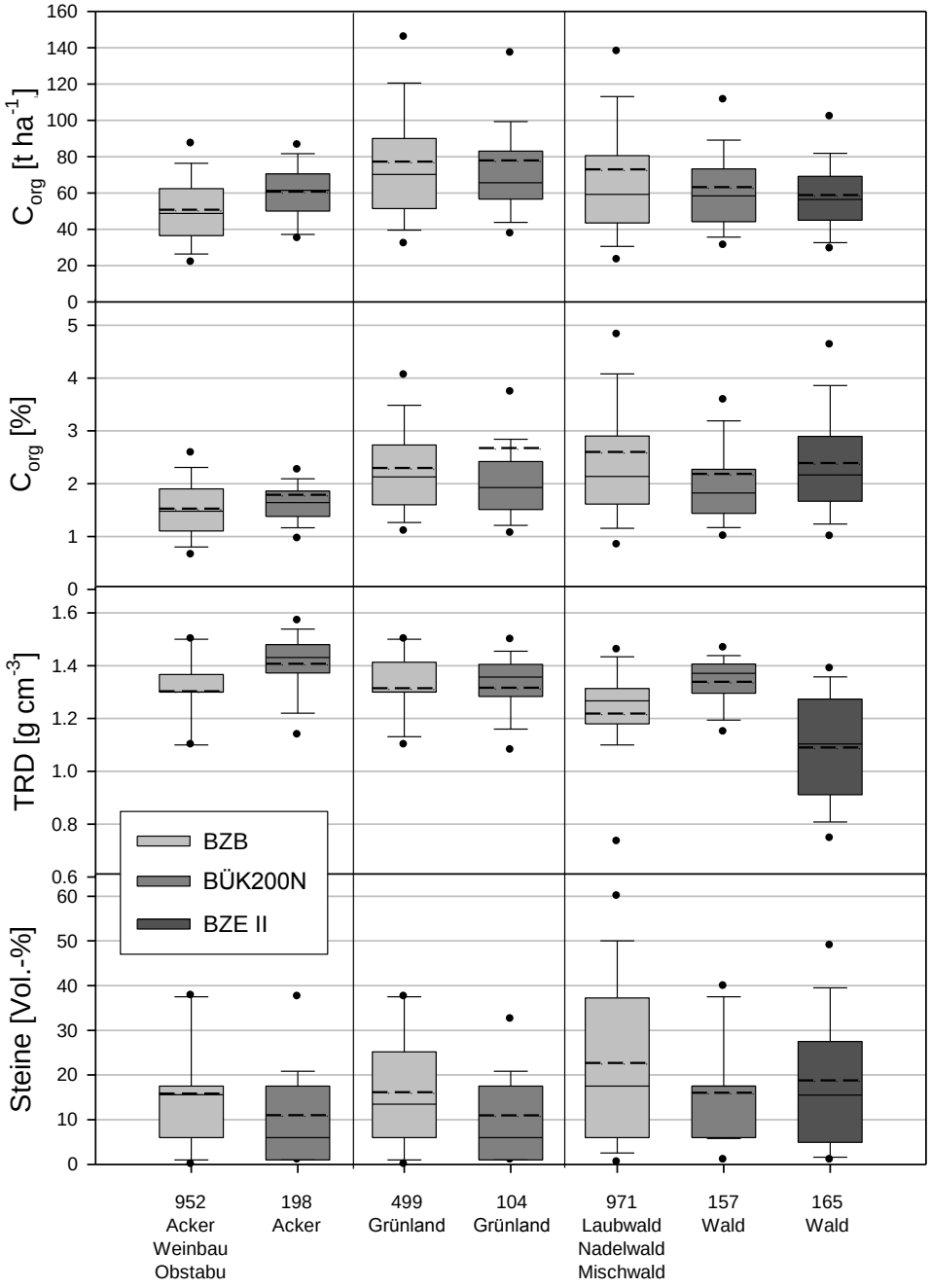

Abb. 4.1: Kohlenstoffvorräte der oberen 30 cm im Vergleich der verschiedenen Datengrundlagen.

Bei der Landnutzung Wald besteht beim Vergleich der Leitprofile der BÜK200N mit den BZE Profilen auch ein bedeutender Unterschied in den berechneten Kohlenstoffvorräten im Unterboden/Untergrund (vgl. Kap. 3.4). Dies lässt sich auf die geringeren gemessenen Trockenrohdichten und eine geringere Gründigkeit der BZE II Profile zurückführen. In Abb. 4.2 sind die Gründigkeiten der Profile der beiden Datensätze in Klassen gegenübergestellt. Sie

liegt bei den Leitbodenformen der BÜK200N im Mittel bei 160 cm und bei den BZE II Profilen bei ca. 140 cm (arithmetisches Mittel). Mehr als die Hälfte der Leitprofile der BÜK200N reicht bis in eine Tiefe von 200 cm. Aufgrund des geringeren Speicherraums und der geringeren Trockenrohdichte der BZE Profile berechnet sich bei diesen Standorten ein geringerer Kohlenstoffvorrat im Unterboden/Untergrund, als bei den Leitbodenformen der BÜK200N. Hier zeigt sich ein prinzipieller Unterschied bei den Datenkollektiven. Die Profile der BÜK200N wurden gezielt als Leitprofile für die Bodenübersichtskarte ausgewählt und sollen einen landnutzungsabhängigen Bodentyp einer mehr oder weniger großen Fläche repräsentieren. Das Raster der BZE führt dazu, dass die Auswahl der Profile zufällig ist und sie keine festgelegten Flächen repräsentieren. Daher finden sich in diesem Datensatz deutlich mehr Profile mit einer geringeren Gründigkeit. Im Ergebnis führt dies, trotz der guten Übereinstimmung der Kohlenstoffvorräte im Oberboden, bei der Berechnung der Gesamtvorräte des Mineralbodens zu einem Unterschied von im Mittel erheblichen 30 t ha^{-1}. Die Ergebnisse der Kohlenstoffvorräte der BÜK200N sind daher – zumindest für die Waldflächen – kritisch zu hinterfragen.

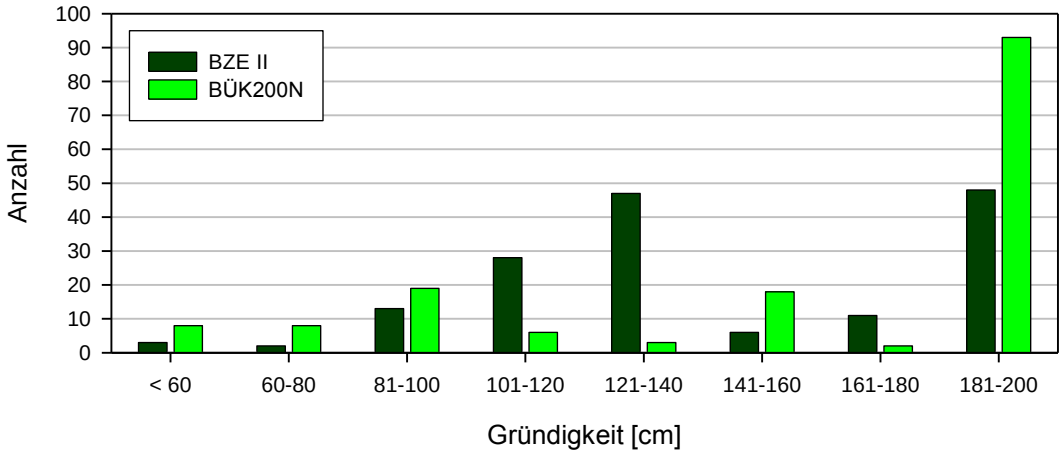

Abb. 4.2: Vergleich der Gründigkeit der Leitprofile der BÜK200N und der BZE II Bodenprofile.

4.2 Vulnerable Regionen in Rheinland-Pfalz und mögliche Veränderungen der Bodenkohlenstoffvorräte

Insgesamt berechnen sich die Kohlenstoffvorräte rheinland-pfälzischer Böden auf Grundlage der Leitbodenformen der BÜK200N und der CorineLandcover-Flächendaten für Acker, Grünland und Wald auf etwa 200 Mio. Tonnen. Dazu kommen noch etwa 16 Mio. Tonnen Kohlenstoff aus den Auflagehorizonten (auf Basis der BZE-Daten). Moorböden, Auenböden und Grund- oder Stauwasser beeinflusste Böden sind von besonderer Bedeutung für die Speicherung von Kohlenstoff und stellen somit vulnerable Standorte dar. Bei einer Betrachtung auf Basis der Naturräume sind die Oberrheintiefebene und Rheinhessen vulnerable Regionen mit wichtigen Kohlenstoffspeichern. In diesen Naturräumen sind großflächig Böden ver-

breitet, die in Zukunft besonders geschützt werden müssen, um den Kohlenstoffspeicher zu erhalten. Mit Rheinhessen und dem Oberrheintiefland weisen jedoch vor allem die Regionen in Rheinland-Pfalz viele Böden mit großen Vorräten auf, in denen der Siedlungsdruck und damit der Flächenverbrauch besonders hoch ist. Hier besteht mit Blick auf den Klimaschutz ein Konfliktpotential bei der (zukünftigen) Landnutzung.

Ob der Abbau organischer Substanz in Böden durch einen Temperaturanstieg beschleunigt wird hängt davon ab, ob ausreichend Bodenfeuchte vorhanden ist und die mikrobiellen Prozesse tatsächlich temperaturlimitiert sind (Reichstein et al., 2003). Untersuchungen in England haben gezeigt, das hohe Kohlenstoff-Verluste in kohlenstoffreichen Böden im Zusammenhang mit Klimavariabilität stehen könnten (Bellamy et al., 2005). Für den deutschen Raum fehlen solche Untersuchungen bislang. Eine zukünftige Häufung von Extremereignissen könnte die Produktivität der Ökosysteme und damit auch die Kohlenstoff-Zufuhr in Böden beeinträchtigen. Untersuchungen der direkten Folgen der Hitze- und Dürrewelle 2003 zeigen für deutsche Ökosysteme zumindest eine drastisch reduzierte Kohlenstoff-Aufnahme (Ciais et al. 2005).

Der Gehalt der Böden an organischer Substanz nimmt in bestimmten Regionen und unter bestimmten Nutzungen derzeit ab[3]. Eine Ursache wird im Anstieg der durchschnittlichen Jahrestemperaturen sowie in veränderten Niederschlagsverteilungen vermutet. Erhöhte Temperaturen beschleunigen den Kohlenstoffumsatz im Boden und es kommt zu einer CO_2-Freisetzung. Kohlenstoffmobilisierung wird durch eine hohe mikrobielle Aktivität gefördert, die durch den Klimawandel oder anthropogene Eingriffe wie Pflügen weiter gesteigert werden kann. Für Deutschland fehlen bisher noch die nötigen Basisdaten, um die Entwicklung der Bodenkohlenstoff-Vorräte belastbar abzuschätzen.

Waldböden gelten in Deutschland als Kohlenstoff-neutral oder zeigen nach Jannssens et al., (2005) eine leichte Kohlenstoff-Zunahme. Bisher ungeklärt sind die vergleichsweise niedrigen Kohlenstoff-Gehalte in unseren Wäldern, die deutlich unter den typischerweise in Modellen als Gleichgewichtsvorräte ermittelten Werten liegen. Ein Entfernen der Streuschicht in der Vergangenheit durch Streunutzung und eine geringere Produktivität durch Degradation könnten mögliche Erklärungen sein. Die starke Mechanisierung des Waldbaus zusammen mit der intensiveren Erschließung kann zu Verdichtungsproblemen führen, die die biologische Aktivität, Durchwurzelung und damit die Kohlenstoff-Zufuhr in Teilen des Waldbodens vermindern können. Das Ausmaß dieser möglichen C-Verluste ist unklar, hier besteht weiterer Forschungsbedarf (Freibauer & Schrumpf, 2005).

Auch Böden unter Dauergrünland gelten als Kohlenstoff-neutral oder verzeichnen in Gegenden, in denen vormals ackerbaulich genutzte Standorte in Dauergrünland umgewandelt wurden, eine leichte Kohlenstoffzunahme. Dies trifft besonders für die deutschen Mittelgebirgsregionen zu. Allerdings sind in der jährlichen Kohlenstoff-Bilanz große Schwankungen zu verzeichnen, die durch wechselnde Nutzung als Wiese mit hoher Biomasseabfuhr oder Wei-

[3] Ergebnisse aus der EU-Konferenz: Klimawandel – Kann der Boden etwas ändern? am 12. Juni 2008 in Brüssel http://ec.europa.eu/environment/soil/index_en.htm.

de mit höheren Rückständen sowie die unregelmäßige C-Rückführung durch tierische Exkremente oder organischen Dünger zurückzuführen sind (Janssens et al. 2005).

Ackerflächen stellen wahrscheinlich Kohlenstoff-Quellen dar (Janssens et al. 2005). Untersuchungen zeigen Kohlenstoff-Verluste in Äckern als Folge von Änderungen im Management und Grünlandumbruch, die zu durchschnittlichen Kohlenstoff-Verlusten von 0,25-0,5 t C ha^{-1} a^{-1} führen. Besondere Bedeutung hat dabei der flächige Rückgang und die Konzentration und Intensivierung der Viehhaltung. Dadurch verschwinden temporäres Grünland und Futterbau aus den Fruchtfolgen. Insgesamt haben sich Fruchtfolgen in den letzten Jahrzehnten tendenziell von intensiv und tief wurzelnden Fruchtarten entfernt. Dies konnte auch durch die Einführung von Winterzwischenfrüchten nicht komplett kompensiert werden (Freibauer & Schrumpf, 2005).

Gedränte Moore unter landwirtschaftlicher Nutzung stellen Hotspots für Kohlenstoff-Verluste dar. Über 90 % der deutschen Moore sind gedränt. Wegen des günstigen Klimas und des Vorherrschens von Niedermooren liegen die Emissionen in Deutschland über dem europaweiten Durchschnitt bei etwa 3,1 t C ha^{-1} a^{-1} (Byrne et al. 2004). Spezielle Untersuchungen für Rheinland-Pfalz liegen bislang nicht vor.

5 Literaturverzeichnis

Bellamy, P. H., Loveland, P. J. Bradley, R. I. Lark, R. M., Kirk, G. J. D. (2005) Carbon losses from all soils across England 1978-2003. Nature, 437, 245-248.

Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) [Hrsg.] (2006): Arbeitsanleitung für die zweite bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II)

Byrne, K.A., Chojnicki, B., Christensen, T.R., Drösler, M., Freibauer, A. et al. (2004). EU peatlands: Current carbon stocks and trace gas fluxes. CarboEurope-GHG Concencerted Action – Synthesis of the European Greenhouse Gas Budget, Report 4/2004.

Ciais, P., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Ogée, J., Allard V., Buchmann N., Aubinet, M., Bernhofer C. Carrara, A., Chevallier F., Noblet, N. D., Friend A. , Friedlingstein, P., Grünwald, T., Heinesch B., Keronen, P., Knohl, A., Krinner, G., Loustau, D., Manca, G., Matteucci, G., Miglietta, F., Ourcival, J. M., Papale D., Pilegaard, K., Rambal, S., Seufert, G., Soussana, J. F., Sanz, M.,J., Schulze, E. D., Vesala, T. & Valentini, R. (2005): Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. Nature 437, 529-533.

Dehner, U., Hartmann, K.-J., Gehrt, E. & Krug, D. (2001): Zur Hinterlegung der Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK 200) mit bodenkundlichen Flächendatensätzen. Zeitschrift der angewandten Geologie 47(2): 121-126.

Freibauer A & Schrumpf M. (2005): Ergebnisse aus dem EU-Projekt CarboEurope zu Fragen der standortgerechten Bodennutzung und des Klimaschutzes. In: Mathews J; Marahrens S; Schmidt S (Hrsg.): UBA-Workshop: Klimaänderungen - Herausforderungen für den Bodenschutz am 28. und 29. September 2005, S. 137-147.

Janssens, I.A., Freibauer, A., Schlamadinger, B., Ceulemans, R., Ciais, P., Dolman, A.J., Heimann, M., Nabuurs, G.J., Smith, P., Valentini, R. & Schulze, E.D. (2005): The carbon budget of terrestrial ecosystems at country-scale - a European case study. - Biogeosciences, 2: 15-26.

Ministerium für Umwelt, Forsten (MUF) [Hrsg.] (2005): Schutzwürdige Böden in Rheinland-Pfalz, Mainz.

Moldenhauer, K.-M. (2005): Der Kohlenstoffgehalt Hessischer Böden - Studie im Auftrag des HLUG.

Reichstein, M., Rey, A., Freibauer, A., Tenhunen, J., Valentini, R., Banza, J., Casals, P., Cheng, Y., Grünzweig, J., Irvine, J., Joffre, R., Law, B., Loustau, D., Miglietta, F., Oechel, W., Ourcival, J.-M., Pereira, J., Peressotti, A., Ponti, F., Qi, Y., Rambal, S., Rayment, M., Romanya, J., Rossi, F., Tedeschi, V., Tirone, G., Xu, M.& Yakir, D. (2003) Modelling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices. Global Biogeochemical Cycles, 17, 1104

Weigel, H. J., Pacholski, A., Waloszczyk, K., Frühauf, C., Manderscheid, R., Anderson, T. H., Heinemeyer, O., Kleikamp, B. Helal, M., Burkart, S,, Schrader, S., Sticht, C. & Giesemann, A. (2005): Spurenstoffaustausch zwischen der bodennahen Atmosphäre und ackerbaulich genutzten Flächen: Erfahrungen aus dem braunschweiger Kohlenstoffprojekt. In: Mathews J; Marahrens S; Schmidt S (Hrsg.): UBA-Workshop: Klimaänderungen - Herausforderungen für den Bodenschutz am 28. und 29. September 2005, S. 137-147

Zentralstelle der Forstverwaltung. Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft [Hrsg.] (2012): Waldbodenzustand in Rheinland-Pfalz. Ergebnisse der zweiten Landesweiten Bodenzustandserhebung BZE II.