

Kohlenstoffspeicherung in Grünlandökosystemen – eine Fallstudie aus dem österreichischen Berggebiet

Carbon storage in grassland ecosystems – A case study from a mountainous region of Austria

Andreas Böhner^{1*}, Cecilie Brigitte Foldal², Robert Jandl³

¹ Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt Raumberg-Gumpenstein, Raumberg 38, 8952 Irdning-Donnersbachtal, Österreich

² Universität für Bodenkultur, Institut für Bodenforschung, Peter Jordan Straße 82, 1190 Wien, Österreich

³ Bundesforschungszentrum für Wald, Seckendorff-Gudent-Weg 8, 1130 Wien, Österreich

* Korrespondierender Autor: andreas.boehner@raumberg-gumpenstein.at

Received: 6 June 2016, received in revised form: 28 November 2016, accepted: 30 November 2016

Zusammenfassung

Die Speicherung des Kohlenstoffs (C) in Grünlandökosystemen ist in Österreich unzureichend untersucht. An drei unterschiedlichen Dauergrünland-Standorten in der Steiermark wurden für sechs repräsentative Vegetationstypen die C-Gehalte in den verschiedenen Kompartimenten des Ökosystems ermittelt, um den gesamten C-Vorrat abschätzen zu können. Die C-Speicherung wird maßgeblich vom Vegetationstyp, von den Bodeneigenschaften (insbesondere Bodentemperatur, Wasser- und Nährstoffgehalt, amorphe Eisen- und Aluminium-Oxide) und von der Bewirtschaftungsintensität (Düngung, Nutzungshäufigkeit) determiniert. Der gesamte C-Vorrat beträgt in montanen und subalpinen Grünlandökosystemen 6–10 kg C m⁻². Durch Düngung kann der C-Vorrat erhöht und durch Überbeweidung oder Mahd ohne Düngung verringert werden. Die C-Speicherung im Grünlandökosystem ist bei mittlerer Bewirtschaftungsintensität am höchsten. Grünlandböden speichern deutlich mehr C als die Grünlandvegetation. Der C-Vorrat beträgt in montanen Dauergrünlandböden (0–50 cm) 5–10 kg C m⁻² und in skelettreichen Almböden (0–30 cm) 5–7 kg C m⁻². In montanen Grünlandböden werden beträchtliche C-Mengen (>40 %) im Unterboden (10–50 cm) gespeichert. In Almböden ist die C-Speicherung stärker auf den Oberboden konzentriert. Für die C-Speicherung im Unterboden haben amorphe Fe- und Al-Oxide eine große Bedeutung. Die Wurzelmasse bestimmt maßgeblich die C-Konzentration im Oberboden. Wurzel- und Stoppelmasse sind vor allem in Magerwiesen und Almweiden bedeutende C-Speicher und relevante Humusbildner. Bewirtschaftungsbedingte C-Vorratsänderungen treten vor allem im Oberboden auf.

Schlagworte: Grünlandbewirtschaftung, Grünlandböden, Almböden, Biomasseallokation, Kohlenstoff-Vorräte

Summary

There is a lack of information regarding carbon (C) storage in the Austrian grassland ecosystems. Therefore, C pools in six representative vegetation types on three different permanent grassland sites in Styria were quantified. C storage in grasslands mainly depends on the vegetation type, soil properties (particularly temperature, moisture and nutrient content, amorphous iron and aluminum oxides) and management intensity. The total C stock in montane and subalpine grassland ecosystems varies from 6 to 10 kg C m⁻². Manuring increases and mowing without manuring or overgrazing decreases the C stocks. Total C storage is highest at moderate management intensity. Soil C stocks are considerably higher than biomass C stocks. Montane grassland soils store 5–10 kg C m⁻² (0–50 cm). Subalpine grassland soils, rich in rock fragments, contain 5–7 kg C m⁻² (0–30 cm). In montane grassland soils, large amounts of C (> 40 %) are stored in subsoil (10–50 cm). In subalpine grassland soils, C storage is more concentrated in the topsoil. Amorphous Fe- and Al-oxides contribute substantially to C storage in the subsoil. C concentration in topsoil is strongly affected by the root biomass. Root and stubble biomass are important sources of soil organic matter, especially in unmanured meadows and mountain pastures.

Keywords: grassland management, grassland soils, mountain grassland soils, biomass allocation, carbon stocks

1. Einleitung

Für die Grünlandvegetation im österreichischen Berggebiet ist die niedrige Lufttemperatur der wachstumsbegrenzende klimatische Faktor. Durch den Klimawandel erhöht sich an vielen Standorten das Ertragspotential. Die mögliche Intensivierung der Grünlandbewirtschaftung bewirkt eine stärkere mechanische Belastung des Bodens, verändert die Artenzusammensetzung der Grünlandvegetation und damit die Biomasseallokation und Kohlenstoff (C)-Speicherung in verschiedenen Kompartimenten von Grünlandökosystemen. Diese Veränderungen haben weitreichende Konsequenzen für die Ökosystemdienstleistungen des Grünlandes.

Die Datenbasis für die C-Vorräte in verschiedenen Kompartimenten von österreichischen Grünlandökosystemen, die Lagerungsdichte (LD) des Bodens und den Effekt von Bewirtschaftungsänderungen ist schmal, obwohl diese Daten für die Kalibrierung und Validierung von C- und Ökosystemmodellen, für die Erstellung von Humusbilanzen und für die Beurteilung der Boden-C-Dynamik benötigt werden.

In terrestrischen Ökosystemen ist der Großteil des C in der organischen Substanz des Bodens gebunden, die zu einem wesentlichen Teil von Wurzeln gebildet wird (Sala et al., 1996; Rasse et al., 2005). Eine große Wurzelmasse und ein rascher Wurzelumsatz sind daher eine wesentliche Voraussetzung für einen hohen C-Vorrat im Grünlandboden (Herold et al., 2014). Generell wird das Wurzelwachstum durch einen hohen mechanischen Eindringwiderstand und mangelhafte Bodendurchlüftung behindert (Mohr, 1980). Ein hoher Informationsbedarf besteht auch über die C-Vorräte in österreichischen Alm- und Grünlandböden (Gerzabek et al., 2005), da im Rahmen der routinemäßigen Bodenuntersuchung nur die C-Konzentration in 0-10 cm Tiefe gemessen wird. Für die Erfüllung der internationalen Klima-Berichtspflichten sind aber genaue Informationen über C-Vorräte in Alm- und Grünlandböden, über ihr C-Sequestrierungspotential und über mögliche C-Vorratsänderungen durch Intensivierung der Grünlandbewirtschaftung erforderlich. Durch Intensivierung verändert sich die Biomasseallokation innerhalb der Vegetation. Es ist nicht bekannt, welchen Einfluss diese Veränderung auf den Boden-C-Vorrat hat (Schmidt et al., 2011).

Bei der Abschätzung von C-Vorräten in Grünlandböden wird zwischen Dauer- und Wechselgrünland unterschieden. Das Dauergrünland wird mindestens zehn Jahre als Wiese, Weide oder Mähweide genutzt. Außerdem sollten terrestrische und hydromorphe Grünlandböden separat beurteilt und bewertet werden.

Mit dieser Arbeit werden folgende Ziele verfolgt:

1. Bereitstellung von Daten über die gespeicherte C-Menge in verschiedenen Kompartimenten (Spross-, Stoppel- und Wurzelmasse, Boden) von unterschiedlichen terrestrischen Grünlandökosystemen und
2. Beurteilung und Bewertung der Einflüsse von Bodeneigenschaften, Vegetation und Bewirtschaftungsintensität auf die C-Speicherung in terrestrischen Grünlandökosystemen.

2. Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

Die Untersuchungen wurden im Bezirk Liezen (Steiermark) durchgeführt. Das kontinental beeinflusste Klima ist relativ kühl, niederschlag- und schneereich. An der Wetterstation in Irdning (700 m Seehöhe) beträgt die durchschnittliche Jahresmittel-Temperatur (1971-2000) +7.0 °C und der Jahres-Niederschlag macht 1014 mm aus. In der Vegetationsperiode (April bis Oktober) fallen 69 % des Jahres-Niederschlags.

2.2 Untersuchungsflächen

An drei unterschiedlichen Standorten wurden Probeflächenpaare mit gleichen Geländefaktoren (Mesoklima, Relief, geologischer Untergrund, Bodentyp) untersucht. Die Bewirtschaftungsform (Mahd oder Beweidung), Nutzungsintensität (Anzahl der Schnitte oder Weidegänge pro Jahr) und Düngung haben sich auf den Untersuchungsflächen in den letzten 30 Jahren nicht geändert.

Der Standort ‚Putterersee‘ (47°31′ N, 14°07′ E; Seehöhe 675 m; Hangneigung/Exposition 16 °S) repräsentiert eine Fettwiese (*Alchemillo monticolae-Arrhenatheretum elatioris*) und eine kräuterreiche Magerwiese (*Mesobrometum erecti*) in der untermontanen Höhenstufe. Die Böden sind tiefgründige (> 100 cm), karbonathaltige Braunerden. Der geologische Untergrund besteht aus altpaläozoischem Bänderkalk. Der Bodenwasserhaushalt ist mäßig halbtrocken. Die Fettwiese wird jährlich mit Stallmist (13 m³ ha⁻¹) und Rindergülle (12 m³ ha⁻¹) gedüngt, dreimal pro Jahr gemäht und im Herbst mit Rindern nachbeweidet. Die Magerwiese wird einmal pro Jahr im Juli mit dem Motormäher gemäht und nicht gedüngt.

Der Standort ‚Kienach‘ (47°29′ N, 14°05′ E; Seehöhe 825 m; Hangneigung/Exposition 10 °NNO) repräsentiert

eine Fettwiese (*Cardaminopsido halleri-Trisetetum flavescens*) und eine grasreiche Kulturweide (*Alchemillo monticolae-Cynosuretum cristati*) in der obermontanen Höhenstufe. Die Böden sind tiefgründige (> 100 cm), karbonatfreie, krumen-pseudovergleyte Braunerden aus Phyllit. Der Bodenwasserhaushalt ist krumen-wechselfeucht. Die Fettwiese wird dreimal pro Jahr gemäht und im Herbst mit Rindern nachbeweidet. In der Kulturweide (Koppelweide) wird entweder der erste Aufwuchs gemäht und die drei Folgeaufwüchse werden tagsüber mit Milchkühen beweidet oder alle vier Aufwüchse werden beweidet. Die Besatzstärke in der Weidekoppel beträgt 2,5 GVE pro Hektar während der Weidezeit. Beide Flächen werden jährlich mit Stallmist (20 m³ ha⁻¹) und Rinderjauche (15 m³ ha⁻¹) gedüngt. In der Koppelweide erfolgt eine zusätzliche Düngung über Weideexkrementen. Die Weide wird zur Düngerausbringung und Durchführung von Reinigungsschnitten befahren. Die Anzahl der Überfahrten pro Jahr ist geringer als in der Fettwiese.

Der Standort ‚Planneralm‘ (47°24′ N, 14°11′ E; Seehöhe 1555 m; Hangneigung/Exposition 15 °S) repräsentiert eine extensiv (*Homogyno alpinae-Nardetum*) und intensiv (*Alchemillo-Poetum supinae*) genutzte Almweide (Standweide) in der subalpinen Höhenstufe. Die Böden sind mittelgründige (70 cm), skelettreiche, karbonatfreie, krumen-pseudovergleyte Braunerden aus Glimmerschiefer. Der Bodenwasserhaushalt ist krumen-wechselfeucht. Beide Flächen werden mit Weideexkrementen gedüngt. Die intensiv genutzte Almweide ist überbeweidet; die Trittbelastung durch Rinder und die Nährstoffzufuhr durch Kot und Harn sind höher als auf der extensiv genutzten Almweide. Die Besatzstärke auf den Untersuchungsflächen konnte nicht festgestellt werden.

2.3 Bodenanalysen

Bodenproben wurden im Oktober 2013 auf jeder Untersuchungsfläche horizontweise entnommen. Zehn Einzelproben pro Horizont wurden zu einer Mischprobe vereinigt. Die Bodenproben wurden luftgetrocknet und bei 2 mm Maschenweite gesiebt. Die Bodenanalyse umfasste den pH-Wert in einer 0,01 M CaCl₂-Lösung (ÖNORM L 1083), den Karbonat-Gehalt (ÖNORM L 1084), den Gehalt an organischem Kohlenstoff (C) und Gesamt-Stickstoff (N) durch trockene Verbrennung (ÖNORM L 1080, 1095) und die Korngrößenverteilung des Feinbodens (ÖNORM L 1061-2). Oxalateextrahierbares Aluminium (Al_{ox}) und Eisen (Fe_{ox}) wurden nach Schwertmann (1964) analysiert. Die Bestimmung der LD erfolgte mit 100 cm³-Stechzylindern

(n = 6; ÖNORM L 1068). Der Skelettgehalt des Bodens (Grobanteil, Partikel > 2 mm) wurde geschätzt. Der Vorrat an organischem C im Boden wurde berechnet als: $C\text{-Vorrat} (kg\ m^{-2}) = [C_{org} (g\ kg^{-1}) \times LD (g\ cm^{-3}) \times \text{Horizontmächtigkeit} (cm) \times (1 - \%Grobanteil)] / 100$.

2.4 Phytomassebestimmungen

Die Wurzelmasse umfasst lebende und abgestorbene Wurzeln sowie unterirdische Sprossmasse. Die Proben für die Wurzelmassebestimmungen wurden an den Standorten Putterersee und Kienach mit einem Probenbohrer (Ø 7,5 cm) in 5-cm-Tiefenstufen-Intervallen (n = 6) verteilt über die gesamte Untersuchungsfläche entnommen. Die Untersuchungstiefe betrug 50 cm. Von den skelettreichen Böden der Planneralm wurden jeweils sechs Bodenmonolithe (12 × 13 × 30 cm) mittels Spaten entnommen. Alle Proben wurden unmittelbar nach der Entnahme (Oktober 2013) tiefgefroren. Die Wurzelmasse wurde mit einer hydropneumatischen Wurzelwaschmaschine (Siebmaschenweite 500 µm) vom Boden getrennt (Smucker et al., 1982), 12 Stunden bei 70 °C getrocknet und gewogen.

Die Sprossmasse repräsentiert in dieser Arbeit den landwirtschaftlich nutzbaren Anteil der oberirdischen Phytomasse. Sie wurde im Jahr 2013 durch Mahd der einzelnen Aufwüchse zu den praxisüblichen Schnittterminen bzw. unmittelbar vor der Weidenutzung bestimmt. Dazu wurde die Vegetation 4 cm über der Bodenoberfläche abgeschnitten. Die Erntefläche betrug an den einzelnen Untersuchungsflächen 3 × 1 m². Auf der Planneralm wurden zur Ertragsfeststellung pro Untersuchungsfläche drei Weidekörbe (1 × 1 m²) aufgestellt.

Die Stoppelmasse repräsentiert in dieser Arbeit die nach dem letzten Schnitt oder nach dem letzten Weidegang auf der Fläche verbliebene Phytomasse. Für ihre Bestimmung wurde im Oktober 2013 die Vegetation auf den einzelnen Untersuchungsflächen bis zur Bodenoberfläche abgeschnitten. Die Erntefläche betrug jeweils 1 m². Alle Daten der Phytomasse beziehen sich auf aschefreie Trockenmasse.

2.5 Pflanzenanalysen

C und N in der Phytomasse wurden mittels Elementaranalyse (VarioMAX CNS, Elementar Analysensysteme GmbH) bestimmt. Der gespeicherte C wurde aus der C-Konzentration im Pflanzenmaterial und der aschefreien Trockenmasse errechnet.

2.6 Statistische Analysen

Alle Parameter wurden mit dem Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung geprüft. Der Mittelwert und die Standardabweichung wurden berechnet. Unterschiede in den Mittelwerten wurden mittels Kruskal-Wallis-Test und Zusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern mittels Spearman-Rangkorrelation geprüft. Das Signifikanzniveau lag bei 5 % ($p = 0.05$). Die statistische Auswertung der Daten erfolgte mit RStudio, Version 0.98.1091 (<https://www.rstudio.com/>).

3. Ergebnisse

3.1 Bodeneigenschaften

Die Bodenart war in allen untersuchten Böden lehmiger Sand. Der Skelettgehalt war relativ hoch; vor allem die Almböden waren sehr skelettreich (Tabelle 1). Die LD war in allen Böden in der Tiefenstufe 0-5 cm auf Grund der intensiven Durchwurzelung (Abbildung 1) am geringsten (Tabelle 2). Mit Ausnahme der Kulturweide wurde eine tiefenabhängige Zunahme der LD für die Bodentie-

fe 0-25 cm festgestellt. Am Putterersee war die LD in der Fettwiese in allen untersuchten Tiefenstufen durch das regelmäßige Befahren mit landwirtschaftlichen Maschinen höher als in der mit dem Motormäher gemähten Magerwiese. In Kienach war die LD unter der Kulturweide in 5-10 cm Bodentiefe infolge von Viehtritt signifikant höher als in der Fettwiese. In der Tiefenstufe 15-20 und 20-25 cm war die LD in der Fettwiese durch häufigeres Befahren signifikant höher. Rostrohren und die plattige Struktur des A-Horizonts zeigen eine Oberbodenverdichtung und Krumen-Wechselfeuchtigkeit an. Im oberflächlich stärker verdichteten Weideboden war die Krumen-Pseudovergleyung (Staunässebildung) deutlicher als im Wiesenboden. In den skelettreichen Almböden auf der Planneralm war die LD gering. Sie war in der intensiv genutzten Almweide in der Tiefenstufe 0-5 cm auf Grund der stärkeren Durchwurzelung (Abbildung 1) niedriger als in der extensiv genutzten Almweide. In der Tiefenstufe 5-10 cm hingegen war die LD in der intensiv genutzten Almweide infolge stärkerer Trittbelastung höher und die plattige Struktur im A-Horizont deutlicher ausgebildet. Die C-Konzentration im Boden korrelierte signifikant negativ mit dem Sandgehalt ($r^2 = -0.5$, $p < 0.05$) und der LD ($r^2 = -0.8$, $p < 0.05$) im Boden. Im Unterboden (ab 10 cm) gab es eine signi-

Tabelle 1. Ausgewählte Bodenkennwerte
Table 1. Selected soil properties

Standort	Nutzung	Horizont	Mächtigkeit [cm]	Grobanteil [%]	Sand	Schluff [g kg ⁻¹]	Ton	Al _{ox} [mg kg ⁻¹]	Fe _{ox} [mg kg ⁻¹]	pH	Karbonat [%]	C _{org} [g kg ⁻¹]	C:N
Putterersee	FW	A	0-12	10	590	370	40	1530	4082	6,9	1,4	37	8,4
		AB	12-35	40	470	450	80	1558	3264	7,3	2,1	12	7,5
		B	>35	60	450	440	110	986	1979	7,5	2,4	6	7,1
Putterersee	MW	A	0-12	10	540	410	50	1340	3229	5,8	0,0	24	9,0
		AB	12-40	40	470	460	70	1142	2843	6,1	0,0	11	8,6
		B	>40	60	440	460	100	1518	3135	7,5	2,4	6	7,0
Kienach	KW	AP1	0-4	5	360	530	110	2992	8449	4,6	0,0	51	8,9
		AP2	4-7	10	450	480	70	3593	8250	4,5	0,0	23	8,7
		B1	7-50	40	400	530	70	3624	8018	4,7	0,0	19	9,0
Kienach	FW	A	0-2	5	300	590	110	2858	7858	5,3	0,0	106	12,4
		AP	2-7	20	350	550	100	3478	9042	4,8	0,0	62	10,0
		B1	7-50	40	390	500	110	3082	7701	4,8	0,0	14	9,0
Planneralm	IW	AP	0-13	20	360	500	140	2826	5254	4,3	0,0	79	8,3
		B1	13-30	70	550	350	100	5635	17245	4,6	0,0	24	10,0
Planneralm	EW	AP	0-12	20	260	560	180	2635	13165	4,1	0,0	89	9,1
		BP	12-30	70	510	400	90	3063	13227	4,4	0,0	19	13,1

FW = Fettwiese, MW = Magerwiese, KW = Kulturweide, IW = Intensivweide, EW = Extensivweide, Al_{ox} und Fe_{ox} = oxalatrextrahierbares Aluminium und Eisen, pH in CaCl₂.

Tabelle 2. Lagerungsdichte der untersuchten Böden [g cm^{-3}] in verschiedenen Tiefenstufen
Table 2. Bulk density of the investigated soils [g cm^{-3}] at various depths

Boden- tiefe [cm]	Putterersee					Kienach					Planneralm				
	FW		MW			KW		FW			IW		EW		
	aM	(SD)	aM	(SD)		aM	(SD)	aM	(SD)		aM	(SD)	aM	(SD)	
0-5	0,98	(0,05)	0,81	(0,07)	*	0,95	(0,03)	0,93	(0,04)	n.s.	0,49	(0,09)	0,58	(0,10)	n.s.
5-10	1,07	(0,04)	1,03	(0,04)	n.s.	1,42	(0,05)	1,34	(0,06)	*	1,14	(0,10)	0,93	(0,13)	n.s.
10-15	1,38	(0,04)	1,34	(0,04)	n.s.	1,43	(0,03)	1,45	(0,04)	n.s.	1,21	(0,06)	1,22	(0,06)	n.s.
15-20	1,46	(0,02)	1,35	(0,07)	*	1,37	(0,03)	1,46	(0,05)	*	1,22	(0,11)	1,27	(0,19)	n.s.
20-25	1,56	(0,05)	1,48	(0,04)	*	1,37	(0,05)	1,52	(0,04)	*	1,22	(0,05)	n.b.		
25-30	1,56	(0,06)	1,42	(0,06)	*	1,37	(0,07)	1,40	(0,04)	n.s.	1,17	(0,10)	n.b.		

FW = Fettwiese, MW = Magerwiese, KW = Kulturweide, IW = Intensivweide, EW = Extensivweide, aM = arithmetischer Mittelwert, (SD) = Standardabweichung, * = signifikanter Unterschied ($p < 0,05$, $n = 6$), n.s. = kein signifikanter Unterschied ($p > 0,05$, $n = 6$), n.b. = nicht bestimmt

fikant positive Korrelation mit der Konzentration an Al_{ox} ($r^2 = 0,95$, $p < 0,05$) und Fe_{ox} ($r^2 = 0,89$, $p < 0,05$).

3.2 Oberirdische Phytomasse

Aus klimatischen Gründen waren die Ernteerträge im Jahr 2013 im Untersuchungsgebiet auf den meisten Grünlandstandorten unter dem langjährigen Durchschnitt (persönliche Mitteilung mehrerer Landwirte). Die Sprossmasse war in der Magerwiese deutlich niedriger als in den Fettwiesen und in der Kulturweide (Tabelle 3). In den Fettwiesen war der Ernteertrag auf dem krumen-wechselfeuchten Standort Kienach höher als auf dem mäßig halbtrockenen Standort Putterersee. Auf der Planneralm war die Sprossmasse in der Intensivweide deutlich niedriger als in der

Extensivweide. Die Stoppelmasse war in den Almweiden und in der Magerwiese am höchsten. Dort wurden auch die niedrigsten Quotienten (< 1) von Spross- zu Stoppel-, Spross- zu Wurzel- und oberirdischer zu unterirdischer Phytomasse festgestellt. In den Fettwiesen waren die Quotienten zwischen Spross- und Wurzel- sowie zwischen ober- und unterirdischer Phytomasse auf dem krumen-wechselfeuchten Standort Kienach deutlich höher als auf dem mäßig halbtrockenen Standort Putterersee.

3.3 Unterirdische Phytomasse

In allen untersuchten Böden war der Großteil der Wurzelmasse ($> 75\%$) in einer Tiefe von 0-10 cm enthalten (Tabelle 4). Die Wurzelmasse und C-Konzentration im

Tabelle 3. Ober- und unterirdische Phytomasse (aschefreie Trockenmasse)
Table 3. Above- and below-ground phytomass (ash-free dry matter)

Kompartiment	Putterersee		Kienach		Planneralm	
	FW	MW	KW	FW	IW	EW
	g m^{-2}		g m^{-2}		g m^{-2}	
Sprossmasse	615	215	563	698	169	314
Stoppelmasse	99	282	83	137	360	445
Wurzelmasse	492	818	248	281	2097	1744
Gesamtphytomasse	1206	1315	894	1116	2626	2503
Sprossmasse:Stoppelmasse	6,2	0,8	6,8	5,1	0,5	0,7
Sprossmasse:Wurzelmasse	1,2	0,3	2,3	2,5	0,1	0,2
Oberirdisch:Unterirdisch	1,5	0,6	2,6	3,0	0,3	0,4

FW = Fettwiese, MW = Magerwiese, KW = Kulturweide, IW = Intensivweide, EW = Extensivweide. Untersuchungstiefe Wurzelmasse: Putterersee und Kienach: 50 cm, Planneralm: 30 cm

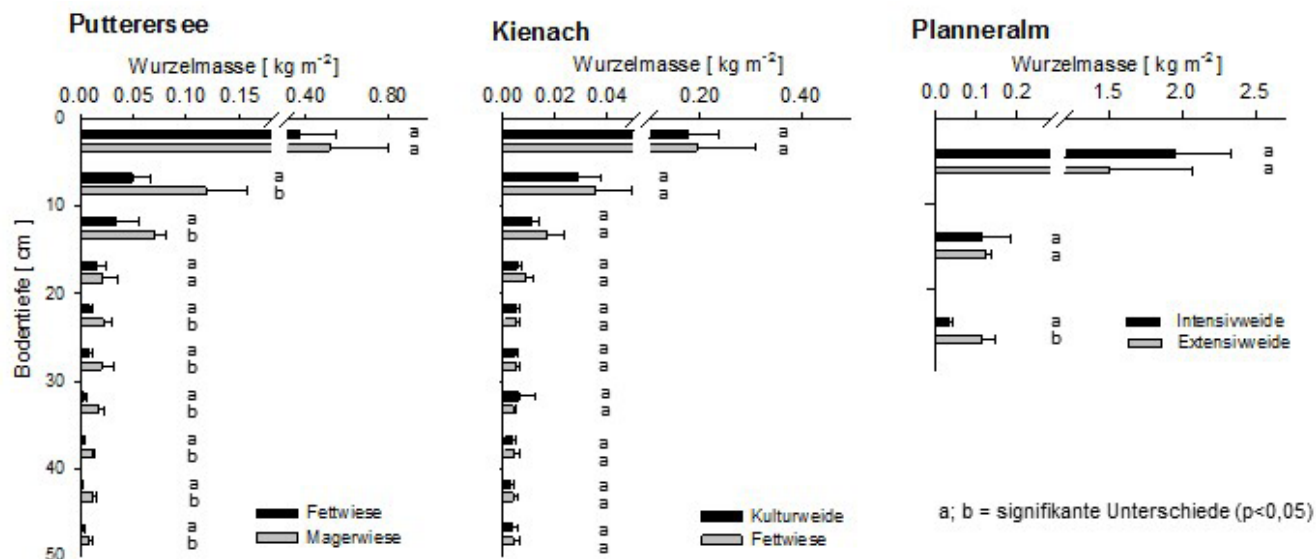


Abbildung 1. Verteilung der aschefreien Wurzeltrockenmasse in verschiedenen Bodentiefen
Figure 1. Distribution of ash-free root biomass in various soil depths

Böden hatten einen ähnlichen Tiefenverlauf; sie nahmen mit der Bodentiefe stark ab. Die Wurzelmasse war stärker auf den Oberboden konzentriert als der Boden-C-Vorrat. Am Putterersee war die Wurzelmasse in der Magerwiese beträchtlich höher als in der Fettwiese; vor allem der Unterboden war wesentlich stärker durchwurzelt (Tabelle 3 und Abbildung 1). In Kienach war die Wurzelmasse in der Fettwiese höher als in der Kulturwiese; die Bodenschicht 0-20 cm war stärker durchwurzelt. Keinen Unterschied gab es in der Bodentiefe 20-50 cm. In den Almböden auf der Planneralm wurden die höchsten Wurzelmassen und ein Wurzelfilz in den obersten 2-3 cm festgestellt. In der Intensivweide war die Wurzelmasse in 0-10 cm Bodentiefe höher als in der Extensivweide und relativ stärker auf

diese Bodenschicht konzentriert. In 20-30 cm hingegen war die Wurzelmasse in der Extensivweide signifikant höher. In der Intensivweide war *Poa supina* (Läger-Rispe) die dominierende Pflanzenart. Es handelt sich dabei um eine niedrigwüchsige und flachwurzelnde Trittpflanze. Sie zeigt bei gehäuftem Vorkommen übernutzte Almbeweidungen an. In der Extensivweide war *Nardus stricta* (Bürling) dominant. Der Bürling ist eine Zeigerpflanze für nährstoffarme, saure Böden und extensive Almbewirtschaftung. Die Wurzelmasse korrelierte signifikant negativ mit der LD im Boden ($r^2 = -0.7$, $p < 0.05$) und signifikant positiv mit der C-Konzentration im Oberboden ($r^2 = 0.7$, $p < 0.05$). Die Gesamtphytomasse war in der Magerwiese auf Grund einer größeren Wurzelmasse höher als in den Fettwiesen

Tabelle 4. Prozentualer Anteil der Wurzelmasse und des C_{org}-Vorrats im Ober- und Unterboden
Table 4. Percentage root biomass and organic C stock in the topsoil and subsoil

Boden- tiefe [cm]	Parameter	Putterersee		Kienach		Planneralm	
		FW	MW	KW	FW	IW	EW
		[%]		[%]		[%]	
0-10	Wurzelmasse	84	76	83	82	93	86
0-10	Boden-C-Vorrat	49	38	36	58	67	79
>10	Wurzelmasse	16	24	17	18	7	14
>10	Boden-C-Vorrat	51	62	64	42	33	21

FW = Fettwiese, MW = Magerwiese, KW = Kulturwiese, IW = Intensivweide, EW = Extensivweide. Untersuchungstiefe: Putterersee und Kienach 50: cm, Planneralm 30: cm

Tabelle 5. C-Konzentrationen und C:N-Verhältnisse in der Spross-, Stoppel- und Wurzelmasse (aschefreie Trockenmasse)
Table 5. C concentrations and C:N ratios in the shoot, stubble and root biomass (ash-free dry matter)

Standort	Bewirtschaftung	Sprossmasse		Stoppelmasse		Wurzelmasse	
		C	C:N	C	C:N	C	C:N
		[g kg ⁻¹]		[g kg ⁻¹]		[g kg ⁻¹]	
Putterersee	FW	430	24	390	16	300	19
	MW	430	28	400	26	320	29
Kienach	KW	480	19	380	15	360	19
	FW	430	18	380	16	330	18
Planneralm	IW	440	25	430	25	350	27
	EW	440	27	430	25	390	44

FW = Fettwiese, MW = Magerwiese, KW = Kulturweide, IW = Intensivweide, EW = Extensivweide

(Tabelle 3). Sie war in der Kulturweide am niedrigsten und in den Almweiden am höchsten.

3.4 C-Konzentration und C:N-Verhältnis in der Phytomasse

Die C-Konzentration war in der Spross-, Stoppel- und Wurzelmasse deutlich höher als im Boden (Tabelle 5 und 1). In allen untersuchten Grünlandökosystemen war die C-Konzentration in den Wurzeln (ca. 340 g kg⁻¹) am niedrigsten und im Spross (ca. 440 g kg⁻¹) am höchsten. Die Stoppeln (ca. 400 g kg⁻¹) nahmen eine Mittelstellung ein. Das C:N-Verhältnis in der Phytomasse variierte zwischen 15 und 44 und war somit weiter als im Boden (7–13). In der Stoppelmasse war das C:N-Verhältnis niedriger als in der Spross- und Wurzelmasse. Ein hoher Anteil an Blättern vom Weißklee (*Trifolium repens*) war für das enge C:N-Verhältnis in der Stoppelmasse der Fettwiesen und Kulturweide verantwortlich.

3.5 C-Speicherung in Grünlandökosystemen

In regelmäßig bewirtschafteten Grünlandökosystemen wird die Pflanzenstreu rasch abgebaut. Die gespeicherte C-Menge in der Streuschicht ist daher gering. Im Jahr 2013 wurde den Grünlandökosystemen durch Mahd oder Beweidung 74 bis 300 g C m⁻² entzogen (Tabelle 6). In der Kulturweide und in den Fettwiesen waren die C-Exporte deutlich höher als in der Magerwiese. In der Intensivweide auf der Planneralm war in der Sprossmasse durch langjährige Überbeweidung viel weniger C gespeichert

als in der Extensivweide. Im Oktober 2013 waren in der Wurzelmasse 89 bis 734 und in der Stoppelmasse 32 bis 191 g C m⁻² gespeichert. Wurzel- und Stoppelmasse waren vor allem in Magerwiesen und Almweiden bedeutende C-Speicher. In allen untersuchten Grünlandökosystemen war der C-Vorrat im Boden (5228–9625 g C m⁻²) am höchsten; mehr als 85 % vom gesamten C-Vorrat entfielen auf den Boden. Am Putterersee war der Boden-C-Vorrat in der Magerwiese niedriger als in der Fettwiese. Eine regelmäßige Mahd ohne Düngung führt bei Entfernung des Mähgutes langfristig zu einer Humusverarmung im Oberboden (Abbildung 2). In Kienach war der Boden-C-Vorrat in der Kulturweide geringfügig höher als in der Fettwiese. Allerdings muss zwischen Ober- und Unterboden differenziert werden. Im Oberboden war der C-Vorrat in der Kulturweide niedriger als in der Fettwiese (Abbildung 2). Ein geringerer C-Eintrag infolge geringerer Wurzelmasse und eine verstärkte C-Mineralisierung auf Grund höherer Bodentemperaturen sind dafür verantwortlich. Im Unterboden war der C-Vorrat in der Kulturweide höher als in der Fettwiese, sodass der Gesamt-vorrat in der Kulturweide geringfügig höher war. Der Weideboden speicherte trotz ähnlicher Wurzelmasse mehr C im Unterboden als der Wiesenboden, vermutlich wegen der höheren Konzentration an Al_{ox} und Fe_{ox} im B-Horizont. Die Untersuchungstiefe beeinflusst somit das Ergebnis. In den Almböden war infolge der temperaturbedingten niedrigen mikrobiellen Aktivität und des hohen C-Eintrags aus der Wurzelmasse viel C im Oberboden gespeichert (Tabelle 4). Im Unterboden wurde auf Grund des hohen Skelettgehaltes relativ wenig C gespeichert. Der Boden-C-Vorrat war in der Intensivweide niedriger als in der Extensivweide. Eine intensive

Tabelle 6. C-Speicherung in verschiedenen Kompartimenten von unterschiedlichen Grünlandökosystemen
 Table 6. C storage in various compartments of different grassland ecosystems

Kompartiment	Putterersee		Kienach		Planneralm	
	FW	MW	KW	FW	IW	EW
	[g m ⁻²]					
Sprossmasse	264	92	270	300	74	138
Stoppelmasse	39	113	32	52	155	191
Wurzelmasse	148	268	89	93	734	680
Phytomasse	451	473	391	445	963	1009
Boden	6880	5228	9625	9378	5290	6679
Ökosystem	7331	5701	10016	9823	6253	7688

FW = Fettwiese, MW = Magerwiese, KW = Kulturweide, IW = Intensivweide, EW = Extensivweide. C-Speicherung Wurzelmasse: Putterersee und Kienach: 0-50 cm, Planneralm: 0-30 cm. C_{org}-Vorrat Boden: Putterersee und Kienach: 0-50 cm, Planneralm: 0-30 cm

Almbeweidung fördert einen Humusabbau im Oberboden (Abbildung 2). Der gesamte C-Vorrat war in der Kulturweide und in den Fettwiesen beträchtlich höher als in der Magerwiese und auf dem krumen-wechselfeuchten Standort höher als auf dem mäßig halbtrockenen Standort. Auf der Planneralm war der gesamte C-Vorrat in der Extensivweide deutlich höher als in der Intensivweide.

4. Diskussion

4.1 Bodeneigenschaften

Die LD und Struktur im Oberboden werden in Alm- und Grünlandböden maßgeblich von der Nutzungsintensität beeinflusst. Bei geringer Nutzungsintensität (ein bis zwei Nutzungen pro Jahr) sind die Oberböden locker gelagert und krümelig. Das Wurzelwachstum, die Bodendurchlüftung und die Infiltration von Wasser werden dadurch gefördert. Bei hoher Nutzungsintensität (vier und mehr Nutzungen pro Jahr) ist der Oberboden dicht gelagert, plattig und meist krumen-pseudovergleyt. Das Wurzelwachstum wird beeinträchtigt, die Staunässebildung und der Oberflächenabfluss werden gefördert. Regelmäßige Düngung und eine hohe Schnittfrequenz bedingen zahlreiche Feldüberfahrten pro Jahr (bei 5-6 Schnittnutzungen pro Jahr sind mehr als 30 Traktorüberfahrten möglich). Dies führt zu einer Bodenverdichtung bis etwa 25 cm Tiefe. Durch Viehtritt wird der Boden vor allem in 5-10 cm Tiefe verdichtet (Mulholland und Fullen, 1991). Die LD der Alm- und Grünlandböden wird daher sowohl vom Humusgehalt als auch von der Nutzungsintensität bestimmt.

4.2 Oberirdische Phytomasse

Düngung erhöht die Sprossmasse und vermindert die Wurzelmasse vor allem durch Änderungen in der Artenzusammensetzung der Grünlandvegetation. Magerwiesenpflanzen mit geringer oberirdischer Biomasseproduktion und hoher Wurzelmasse werden durch Fettwiesenpflanzen mit hoher oberirdischer Biomasseproduktion und niedriger Wurzelmasse ersetzt (Gass und Oertli, 1980). Überbeweidung vermindert die Sprossmasse, weil niedrigwüchsige, weideverträgliche Pflanzen zu Lasten von höherwüchsigen, weideempfindlichen Arten gefördert werden.

Die Stoppelmasse schwankte in den Fettwiesen und in der Kulturweide zwischen 13 und 16 % der oberirdischen Phytomasse, das ist innerhalb des Bereichs bei Gisi (1990). Sie war in der grasreichen Kulturweide niedriger als in den Fettwiesen. Normalerweise ist die Stoppelmasse in Weiden höher als in Wiesen (Mestdag et al., 2006). In der Magerwiese, die nur einmal pro Jahr im Juli gemäht wird, und in den Almweiden wurde eine Stoppelmasse von mehr als 50 % der oberirdischen Phytomasse gemessen. Eine hohe Stoppelmasse (400 g m⁻²) und einen sehr hohen Stoppelmasse-Anteil an der oberirdischen Phytomasse (65 %) als Charakteristikum der Almvegetation hat auch Bohner (1998) in einem schwach beweideten Bürstlingsrasen in 1890 m Seehöhe festgestellt. Magerwiesen haben ebenfalls eine hohe Stoppelmasse, vor allem weil bei vielen Magerwiesenpflanzen die Blätter in Bodennähe konzentriert sind. Bei den höherwüchsigen Fettwiesenpflanzen hingegen sind wegen der Anpassung an den periodischen Lichtmangel in den untersten Bestandesschichten die Blätter meist gleichmäßiger über den Spross verteilt (Aerts,

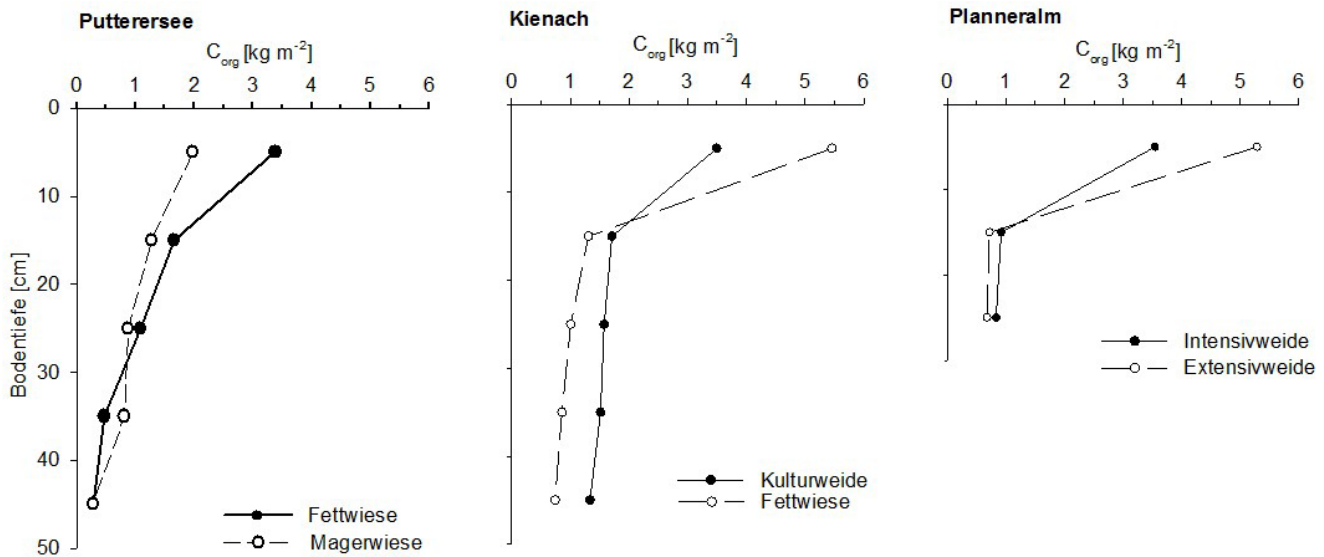


Abbildung 2. Verteilung des organischen C in verschiedenen Bodentiefen
Figure 2. Distribution of organic C in various soil depths

1999). Die Stoppelmasse ist somit in Magerwiesen und Almweiden ein bedeutender Humusbildner.

4.3 Unterirdische Phytomasse

In den montanen Grünlandböden variierte die aschefreie Wurzelmasse von 250 bis 820 g m⁻². Dies entspricht 25-41 % (Fettwiesen und Kulturweide) bzw. 62% (Magerwiese) der Gesamtphytomasse. Nach Gisi (1990) beträgt der Anteil der Wurzelmasse an der Gesamtphytomasse in extensiv genutzten Wiesen 70-90 % und in Fettwiesen weniger als 50 %. In den subalpinen Almböden wurde eine Wurzelmasse von 1745 und 2100 g m⁻² gemessen. Dies entspricht 70-80 % der Gesamtphytomasse. Böhner (1998) stellte in einem schwach beweideten Bürstlingsrasen in 1890 m Seehöhe einen Wurzelmasse-Anteil von 75 % fest. In der subalpinen und alpinen Höhenstufe haben Hitz et al. (2001) eine zwei- bis fünfmal höhere unterirdische als oberirdische Phytomasse gemessen. Die Wurzelmasse ist somit vor allem in Magerwiesen und Almweiden ein bedeutender Humusbildner. Nach Klapp (1971) beträgt die unveraschte Wurzelmasse unter Wirtschaftsgrünland 400-800 g m⁻². Speidel und Weiß (1972) stellten unter einer intensiv genutzten Weide eine unveraschte Wurzelmasse von 260 g m⁻² und unter einer Goldhaferwiese eine von 830 g m⁻² fest. In der subalpinen und alpinen Höhenstufe wurden Werte

von 1880-2470 g m⁻² (Hitz et al., 2001) und 1270-3600 g m⁻² (Böhner, 1998) gemessen. In den Alm- und Grünlandböden war der Großteil der Wurzelmasse (> 75 %) auf den Oberboden (0-10 cm) konzentriert. Unterhalb von 50 cm Bodentiefe kamen in der montanen Höhenstufe nur mehr wenige Pflanzenwurzeln vor. Nach Kmoch (1952) sind im Grünland 80-90 % der Wurzelmasse in 0-10 cm Tiefe enthalten. In der montanen Höhenstufe dringen Graswurzeln ungefähr bis 50 cm und Kräuter bis 1 m in den Boden (Lichtenegger, 1997). Die Pflanzenwurzeln reichern somit den montanen Grünlandboden zumindest bis zu einer Tiefe von 50 cm mit C an. Die Magerwiese hatte eine deutlich höhere Wurzelmasse als die Fettwiesen und Kulturweide. Vor allem der Unterboden war wesentlich stärker durchwurzelt. Eine große Wurzelmasse, ein weites Verhältnis von Wurzel- zu Sprossmasse und eine gute Durchwurzlung des Unterbodens sind charakteristisch für Magerwiesen (Gisi, 1990). Dies ist eine Anpassung der Magerwiesenpflanzen an die Nährstoffarmut im Boden. Die Nährstoffvorräte können dadurch besser ausgenutzt werden. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass in nährstoffreichen Böden die abgestorbenen Wurzeln rascher zersetzt werden als in nährstoffarmen Böden (Kmoch, 1952). Dies führt ebenfalls zu niedrigeren Wurzelmassen in regelmäßig gedüngten Böden. Auf Grund großer Wurzelmassen können einschnittige Magerwiesen auf halbtrockenen Standorten sogar eine

höhere Gesamtphytomasse als mehrschnittige Fettwiesen aufweisen (Hartmann und Oertli, 1984). Am Standort Kienach war die Wurzelmasse in der Kulturweide niedriger als in der Fettwiese. Eine intensive Beweidung vermindert in der Regel die Wurzelmasse (Schuster, 1964). Bei gleicher Nutzungshäufigkeit war in der Fettwiese auf dem halbtrockenen Standort die Wurzelmasse deutlich höher und das Spross:Wurzel-Verhältnis niedriger als in der Fettwiese auf dem krumen-wechselfeuchten Standort. Pflanzenarten von trockenen Standorten haben in der Regel eine höhere Wurzelmasse und ein niedrigeres Spross:Wurzel-Verhältnis als Arten von frischen oder feuchten Standorten (Monk, 1966). Eine große Wurzelmasse ist auf halbtrockenen Standorten von Vorteil, weil ein größeres Wasserreservoir ausgenutzt werden kann (Gisi, 1990). Die Almböden hatten eine große Wurzelmasse insbesondere im Oberboden. Ein wesentlicher Grund hierfür dürfte die gehemmte Zersetzung der abgestorbenen Wurzeln infolge niedriger Bodentemperaturen sein (Sala et al., 1996). Außerdem nimmt die Durchwurzelungstiefe des Bodens von der planaren bis in die alpine Höhenstufe ständig ab und die Durchwurzelung des Oberbodens zu (Kutschera, 1981). Deshalb ist in den Almböden in der obersten Bodenschicht häufig ein Wurzelfilz ausgebildet (Böhner, 1998). Eine Überbeweidung der Almstandorte bewirkt eine noch stärkere Konzentration der Wurzelmasse auf die oberste Bodenschicht und eine schlechtere Durchwurzelung des Unterbodens, vor allem weil flachwurzeln Pflanzenarten wie beispielsweise Läger-Rispe (*Poa supina*) stark gefördert werden. Die Magerwiese auf dem halbtrockenen Standort und die Almvegetation waren durch ein niedriges Spross:Wurzel-Verhältnis (< 1) charakterisiert. Generell bewirken Wasser- und Nährstoffmangel sowie niedrige Bodentemperaturen eine Verengung (Werger, 1983) und Düngung eine Erweiterung (Speidel und Weiß, 1972) dieses Quotienten. Die Wurzelmasse in Alm- und Grünlandböden wird somit vom Vegetationstyp, von den abiotischen Standortbedingungen (Bodentemperatur, Verfügbarkeit von Wasser und Nährstoffen im Boden) und von der Bewirtschaftungsintensität determiniert. Düngung und Nutzungsintensivierung vermindern die Wurzelmasse primär durch Änderungen in der Artenzusammensetzung der Grünlandvegetation.

4.4 Qualität der Pflanzenstreu

Der Vegetationstyp und die Bewirtschaftungsintensität bestimmen die Menge und Qualität der Streustoffe und

beeinflussen damit sehr wesentlich die Humusmenge und -qualität im Boden. Durch Düngung und Nutzungsintensivierung werden die C:N-Verhältnisse in der Spross-, Stoppel- und Wurzelmasse auf Grund höherer N-Konzentrationen enger. Die Qualität der Pflanzenstreu und ihre Abbaugeschwindigkeit steigen dadurch (Herold et al., 2014). N-reiche Streustoffe mit niedrigem C:N-Verhältnis begünstigen die Bildung von N-reichem Humus mit engem C:N-Verhältnis.

4.5 C-Speicherung in Grünlandökosystemen

Die C-Speicherung in der Gesamtphytomasse betrug in den montanen und subalpinen Pflanzengesellschaften $0.4\text{--}1.0\text{ kg C m}^{-2}$. In Magerwiesen und Almweiden war die Wurzelmasse und in Fettwiesen und Kulturweiden die Sprossmasse der wichtigste C-Speicher innerhalb der Vegetation. Durch Düngung und Überbeweidung kann die C-Speicherung in der Gesamtphytomasse verringert werden.

Der gesamte C-Vorrat betrug in den montanen und subalpinen Grünlandökosystemen $6\text{--}10\text{ kg C m}^{-2}$. Durch Düngung kann der Ökosystem-C-Vorrat erhöht und durch Überbeweidung verringert werden. Düngung erhöht den jährlichen C-Export mit der Ernte und verringert den C-Import in den Boden durch eine geringere Wurzelmasse. Die C-Zufuhr mit Wirtschaftsdünger gleicht das Defizit aus. Die humussteigernde Wirkung einer Düngung resultiert im Grünlandboden ausschließlich aus der C-Zufuhr mit dem Wirtschaftsdünger und nicht aus einer größeren Menge an Streustoffen. Eine regelmäßige Düngung insbesondere mit Stallmist ist notwendig, um den C-Vorrat in Grünlandböden zu erhalten oder zu erhöhen (Soussana et al., 2004). Allerdings finden C-Vorratsänderungen nur sehr langsam statt, weil die C-Zufuhr mit Wirtschaftsdünger im Vergleich zum C-Vorrat im Grünlandboden sehr gering ist. Eine Rindermistgabe von 10 t ha^{-1} (praxisübliche Mistausbringungsmenge) bedeutet eine C-Zufuhr von ca. 130 g C m^{-2} . Dies entspricht weniger als 2 % der C-Vorräte in Grünlandböden. Der Humuskoeffizient für Stallmist beträgt 0.25 (Gisi, 1990), somit können ca. 33 g C m^{-2} (weniger als 0.5 % der C-Vorräte in Grünlandböden) in Dauerhumus umgewandelt werden. Die Düngung hat daher im Grünland eine viel geringere Bedeutung für die C-Sequestrierung als im Ackerland (Paustian et al., 2016). Eine jährliche Mahd ohne Düngung führt über den Biomasse-Export zu einem Humusabbau im Oberboden. Auch eine intensive Beweidung vermindert den C-Vorrat im Oberboden. Intensiv genutzte Weide- und

Almböden haben im A-Horizont häufig relativ niedrige C-Konzentrationen (Bohner und Tomanova, 2006; Bohner, 1998). Durch Flächenstilllegung von Grünlandflächen (Grünlandbrache) hingegen kann die C-Konzentration im Oberboden erhöht werden (Bohner et al., 2006).

Der C-Vorrat betrug in den montanen Dauergrünlandböden (0-50 cm) 5-10 kg C m⁻² und in den skelettreichen Almböden (0-30 cm) 5-7 kg C m⁻². Gerzabek et al. (2005) haben für österreichische Grünlandböden (0-50 cm) einen durchschnittlichen C-Vorrat von 8.1 kg C m⁻² festgestellt. In Baden-Württemberg, Bayern und in Frankreich wurden 9.5 (0-30 cm), 11.8 (0-100 cm) und 7.0 (0-30 cm) kg C m⁻² gemessen (Neufeldt, 2005; Wiesmeier et al., 2012; Soussana et al., 2004). Für schweizerische Grünlandböden wurden C-Vorräte von 6.3-9.2 (0-100 cm), 9.3-9.8 (0-30 cm, < 1300 m Seehöhe) und 5.3-11.6 (0-30 cm, > 1300 m Seehöhe) festgestellt (Leifeld et al., 2005 und 2009). Der Grünlandboden speichert somit deutlich mehr C als die Grünlandvegetation. Die große Wurzelmasse in 0-10 cm Bodentiefe ist hauptverantwortlich für die hohe C-Konzentration im A-Horizont von Dauergrünlandböden. Im Unterboden haben amorphe Fe- und Al-Oxide eine große Bedeutung für die C-Akkumulation (Kleber et al., 2005). Die C-Speicherkapazität des Bodens wird durch einen hohen Skelettgehalt vermindert. Skelettreiche, sandige und sesquioxidarme Grünlandböden weisen deshalb eine relativ geringe C-Speicherkapazität auf. Auch der Bodenwasserhaushalt beeinflusst den C-Vorrat in Grünlandböden. Krumen-wechselfeuchte Standorte haben höhere Boden-C-Vorräte als mäßig halbtrockene Standorte. Montane Dauergrünlandböden speichern beträchtliche C-Mengen (> 40 %) im Unterboden (10-50 cm). Darauf haben bereits Wiesmeier et al. (2012) hingewiesen. In Almböden hingegen wird besonders viel C (> 65 %) im Oberboden gespeichert. Die starke Konzentrierung der Wurzelmasse auf die oberste Bodenschicht ist hierfür hauptverantwortlich. In montanen und subalpinen Grünlandökosystemen ist die Wurzelmasse stärker auf den Oberboden konzentriert als der Boden-C; dieser ist gleichmäßiger im Bodenprofil verteilt. Ein wesentlicher Grund hierfür dürfte die stabilisierende Wirkung der amorphen Fe- und Al-Oxide für organischen C im Unterboden sein. Diese Stabilisierungskapazität ist allerdings begrenzt (Kleber et al., 2005).

5. Schlussfolgerungen

Eine langjährige intensive Beweidung mit Rindern führt zu einer Trittverdichtung insbesondere in 5-10 cm Boden-

tiefe. Die Verdichtungswirkung von landwirtschaftlichen Maschinen reicht zumindest bis 25 cm Tiefe. Eine große Wurzelmasse und ein hoher Humusgehalt im Oberboden verhindern eine stärkere Bodenverdichtung und erhöhen somit die mechanische Belastbarkeit der Alm- und Grünlandböden.

Tiefgründige, skelettarme, sesquioxidreiche, montane Dauergrünlandböden sind bedeutende C-Speicher. Die C-Vorräte sollten für das gesamte Solum, zumindest aber für 0-50 cm Bodentiefe berechnet werden, weil bis in diese Tiefe Pflanzenwurzeln vorkommen. Nachdem die LD im Grünlandboden sehr stark von der Befahrungs- und/oder Tritthäufigkeit beeinflusst wird, muss für die genaue Abschätzung von Boden-C-Vorräten die LD zumindest bis 25 cm Bodentiefe gemessen werden. Außerdem sollten bei der Bewertung der Boden-C-Vorräte die ehemalige und derzeitige Bewirtschaftungsintensität (Düngung, Nutzungshäufigkeit) und der Bodenwasserhaushalt berücksichtigt werden.

Die C-Speicherung in Grünlandökosystemen wird maßgeblich vom Vegetationstyp, von den Bodeneigenschaften und von der Bewirtschaftungsintensität determiniert. Eine Intensivierung der Grünlandbewirtschaftung kann die C-Speicherung erhöhen oder verringern. Eine standortangepasste Düngung und Nutzung wirkt im Vergleich zur Mahd ohne Düngung erhöhend auf den gesamten C-Vorrat im Grünlandökosystem. Eine Überbeweidung hingegen bewirkt eine C-Vorratsabnahme und sollte daher auch aus Klimaschutzgründen vermieden werden. Die C-Speicherung ist bei mittlerer Bewirtschaftungsintensität (regelmäßige Düngung insbesondere mit Stallmist, zwei bis vier Nutzungen pro Jahr) am höchsten. Die C-Speicherung kann im regelmäßig bewirtschafteten Dauergrünland nur durch eine größere C-Zufuhr mit Wirtschaftsdünger erhöht werden. Das C-Sequestrierungspotential ist allerdings auf Grund der hohen C-Vorräte im Ober- und Unterboden und wegen der begrenzten Stabilisierungskapazität der amorphen Fe- und Al-Oxide für organischen C relativ gering.

Die Wurzelmasse bestimmt maßgeblich die C-Konzentration im Oberboden. Eine Veränderung der Wurzelmasse im Oberboden hat deshalb Auswirkungen auf den Boden-C-Vorrat im Hauptwurzelraum. Im Unterboden haben amorphe Fe- und Al-Oxide eine große Bedeutung für die C-Speicherung; der Einfluss der Pflanzenwurzeln ist geringer. Nachdem in Grünlandökosystemen bewirtschaftungsbedingte C-Vorratsänderungen vor allem im Oberboden stattfinden, muss bei der Interpretation von Untersu-

chungsergebnissen die Untersuchungstiefe berücksichtigt werden.

Die in dieser Fallstudie unter Praxisbedingungen gewonnenen Daten und Informationen können für die Bewertung unterschiedlicher Landnutzungstypen und -intensitäten hinsichtlich C-Speicherkapazität und für die Erfüllung der verschiedenen internationalen Klima-Berichtspflichten verwendet werden. Die Übertragung der Ergebnisse dieser Fallstudie auf andere Naturräume ist aus klimatischen, mineralogischen und pedologischen Gründen nur beschränkt möglich. Eine Verallgemeinerung der Ergebnisse bedarf zahlreicher weiterer ähnlicher Studien auf verschiedenen Standorten in unterschiedlichen Naturräumen.

Danksagung

Die Arbeit wurde vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft gefördert.

Literatur

- Aerts, R. (1999): Interspecific competition in natural plant communities: mechanisms, trade-offs and plant-soil feedbacks. *Journal of Experimental Botany* 50, 29–37.
- Bohner, A. (1998): Almwirtschaft und Gebirgs-Ökosysteme. Dissertation Universität für Bodenkultur Wien, 169 und 215 S.
- Bohner, A. und O. Tomanova (2006): Effects of cattle grazing on selected soil chemical and soil physical properties. *Grassland Science in Europe* 11, 89–91.
- Bohner, A., Öhlinger, R. und O. Tomanova (2006): Auswirkungen der Grünlandbewirtschaftung und Flächenstilllegung auf Vegetation, Boden, mikrobielle Biomasse und Futterqualität. *Die Bodenkultur* 57, 33–45.
- Gass, P. und J.J. Oertli (1980): Durchwurzelungsvergleich zwischen Fettwiese und angrenzender Brachwiese. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 143, 208–214.
- Gerzabek, M.H., Strebl, F., Tulipan, M. und S. Schwarz (2005): Quantification of organic carbon pools for Austria's agricultural soils using a soil information system. *Canadian Journal of Soil Science* 85, 491–498.
- Gisi, U. (1990): Bodenökologie. Thieme Verlag, Stuttgart, 304 S.
- Hartmann, J. und J.J. Oertli (1984): Produktivität und Produktionsdynamik von Mähwiesen und Brachen des Nordwestschweizer Jura. *Ecologia Plantarum* 5, 255–264.
- Herold, N., Schöning, I., Michalzik, B., Trumbore, S. und M. Schrumpf (2014): Controls on soil carbon storage and turnover in German landscapes. *Biogeochemistry* 119, 435–451.
- Hitz, C., Egli, M. und P. Fitze (2001): Below-ground and above-ground production of vegetational organic matter along a climosequence in alpine grasslands. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 164, 389–397.
- Klapp, E. (1971): Wiesen und Weiden. Parey Verlag, Berlin/Hamburg, 620 S.
- Kleber, M., Mikutta, R., Torn, M.S. und R. Jahn (2005): Poorly crystalline mineral phases protect organic matter in acid subsoil horizons. *European Journal of Soil Science* 56, 717–725.
- Kmoch, H.G. (1952): Über den Umfang und einige Gesetzmäßigkeiten der Wurzelmassenbildung unter Grasnarben. *Zeitschrift Acker- und Pflanzenbau* 95, 363–380.
- Kutschera, L. (1981): Tiefe der Bodendurchwurzelung in Abhängigkeit von Klima und Boden. 3. Sonderheft der Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft, 45–52.
- Leifeld, J., Bassin, S. und J. Fuhrer (2005): Carbon stocks in Swiss agricultural soils predicted by land-use, soil characteristics, and altitude. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 105, 255–266.
- Leifeld, J., Zimmermann, M., Fuhrer, J. und F. Conen (2009): Storage and turnover of carbon in grassland soils along an elevation gradient in the Swiss Alps. *Global Change Biology* 15, 668–679.
- Lichtenegger, E. (1997): Wurzeln. Bewurzelung von Pflanzen in verschiedenen Lebensräumen. *Stapfia* 49, 55–331.
- Mestdagh, I., Lootens, P., Van Cleemput, O. und L. Carlier (2006): Variation in organic-carbon concentration and bulk density in Flemish grassland soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169, 616–622.
- Mohr, H.D. (1980): Einfluss der Bodeneigenschaft auf das Wurzelwachstum. *Kali-Briefe* 15, 305–316.
- Monk, C. (1966): Ecological importance of root/shoot ratios. *Bulletin of the Torrey Botanical Club* 93, 402–406.
- Mulholland, B. und M.A. Fullen (1991): Cattle trampling and soil compaction on loamy sands. *Soil Use and Management* 7, 189–193.
- Neufeldt, H. (2005): Carbon stocks and sequestration potentials of agricultural soils in the federal state of Baden-

- Württemberg, SW Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168, 202–211.
- Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G.P. und P. Smith (2016): Climate – smart soils. *Nature* 532, 49–57.
- Rasse, D.P., Rumpel, C. und M.-F. Dignac (2005): Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and Soil* 269, 341–356.
- Sala, O.E., Lauenroth, W.K. und I.C. Burke (1996): Carbon budgets of temperate grasslands and the effects of global change. In: Breymeyer, A.I., Hall, D.O., Melillo, J.M. und G.I. Agren (Hrsg.): *Global Change: Effects on coniferous forests and grasslands*. Willey, London, 101–119.
- Schmidt, M.W.I., Torn, M.S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I.A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D.A.C., Nannipieri, P., Rasse, D.P., Weiner, S. und S.E. Trumbore (2011): Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature* 478, 49–56.
- Schwertmann, U. (1964): Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde* 105, 194–202.
- Schuster, J.L. (1964): Root development of native plants under three grazing intensities. *Ecology* 45, 63–70.
- Smucker, A.J.M., McBurney, S.L. und A.K. Srivastana (1982): Quantitative separation of roots from compacted soil profiles by the hydropneumatic elutriation system. *Agronomy Journal* 74, 500–503.
- Soussana, J.-F., Loiseau, P., Vuichard, N., Ceschia, E., Balesdent, J., Chevallier, T. und D. Arrouays (2004): Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. *Soil Use and Management* 20, 219–230.
- Speidel, B. und A. Weiß (1972): Zur ober- und unterirdischen Stoffproduktion einer Goldhaferwiese bei verschiedener Düngung. *Angewandte Botanik* 46, 75–93.
- Werger, M.J.A. (1983): Wurzel/Spross-Verhältnis als Merkmal der Pflanzenstrategie. In: Böhm, W., L. Kutschera und E. Lichtenegger (Hrsg.), *Wurzelökologie und ihre Nutzenanwendung*. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft, 323–334.
- Wiesmeier, M., Spörlein, P., Geuß, U., Hangen, E., Haug, S., Reischl, A., Schilling, B., von Lützow, M. und I. Kögel-Knabner (2012): Soil organic carbon stocks in southeast Germany (Bavaria) as affected by land use, soil type and sampling depth. *Global Change Biology* 18, 2233–2245.