

# Auswirkungen von erhöhtem CO<sub>2</sub> auf die Vegetation eines Grünlandes



Inaugural-Dissertation  
Zur Erlangung des Doktorgrades  
An den Naturwissenschaften (Fachrichtung Biologie)  
Der Justus-Liebig-Universität

Vorgelegt von Sibylle Janze

Dekan: Prof. Dr. Peter R. Schreiner  
Erster Gutachter: Prof. Dr. Hans-Jürgen Jäger  
Zweiter Gutachter: Prof. Dr. Andreas Fangmeier

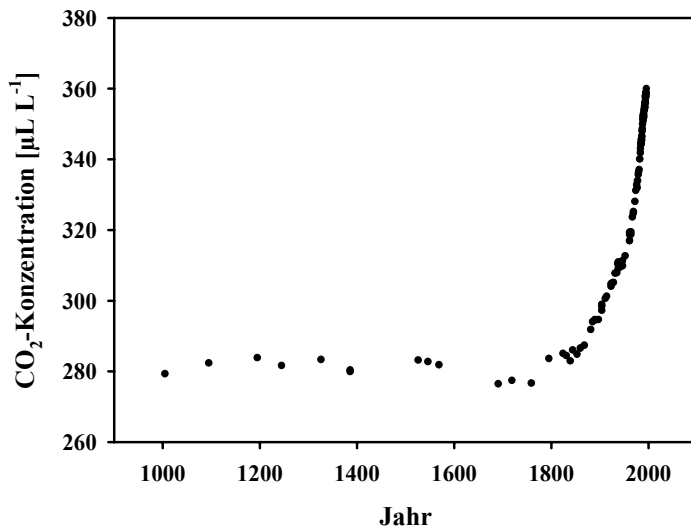
Tag der mündlichen Prüfung:

## Inhalt

1	Einleitung .....	2
1.1	CO <sub>2</sub> -Reaktionen der Pflanzengemeinschaft .....	3
1.2	CO <sub>2</sub> -Reaktionen des Wurzelraums .....	14
1.3	Der Einfluss von Feuchte und Zeit auf die CO <sub>2</sub> -Reaktion .....	21
1.4	Gegenstand der Arbeit .....	25
2	Material und Methoden .....	26
2.1	Beschreibung der Versuchsflächen .....	26
2.2	Das Experiment .....	28
2.3	Die Untersuchung der Pflanzengemeinschaft .....	29
2.3.1	Probenahmen .....	29
2.3.2	Berechnungen .....	29
2.4	Die Untersuchung des Wurzelraums .....	37
2.4.1	Probenahmen .....	37
2.4.2	Berechnungen .....	39
3	Ergebnisse .....	40
3.1	Die Pflanzengemeinschaft .....	40
3.1.1	Biomasse .....	40
3.1.2	Artenzahl, Diversität und Evenness .....	41
3.1.3	Summe der Einzel-Deckungen, Deckungen der PFTs .....	43
3.1.4	Einzel-Deckungen ausgewählter Arten .....	46
3.1.5	Die um die Feuchte- und Zeiteinflüsse bereinigten CO <sub>2</sub> -Effekte .....	51
3.1.6	Der konstante CO <sub>2</sub> -Effekt .....	55
3.1.7	Die <i>a posteriori</i> PFTs zur Ermittlung der Gründe für CO <sub>2</sub> -Reaktionen .....	59
3.1.8	Der zeitabhängige CO <sub>2</sub> -Effekt .....	62
3.2	Der Wurzelraum .....	66
3.2.1	Wurzelbiomasse .....	66
3.2.2	Wurzellänge .....	68
3.2.3	Wurzeldicke .....	73
4	Diskussion .....	75
4.1	Die Pflanzengemeinschaft .....	75
4.2	Wachstum und Entwicklung im Wurzelraum .....	93
5	Zusammenfassung .....	104
6	Danksagung .....	107
7	Literatur .....	108
8	Anhang .....	120
8.1	Versuchsparameter .....	120
8.2	Applikationssysteme .....	122
8.3	Pflanzennamen .....	124
8.4	Pflanzensoziologische Zuordnung zu Klassen .....	129
8.5	Pflanzensoziologische Zuordnung zu Wiesen und Weiden .....	132
8.6	Verzeichnisse .....	134

# 1 Einleitung

Seit Beginn der Industrialisierung ist die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre von 280 ppm auf 375 ppm gestiegen, und es ist von einer weiteren Erhöhung in den nächsten Jahren und Jahrzehnten auszugehen (IPCC, 2001).



**Abbildung 1: Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre**

Der steile Abschnitt der Kurve (ca. 1900) markiert den Beginn der Industrialisierung (Francey et al. 1999).

Die Auswirkungen von erhöhtem CO<sub>2</sub> auf Vegetation und Ökosysteme sind Gegenstand vieler Untersuchungen. Die meisten Experimente wurden mit Einzelpflanzen und auf agrarisch genutzten Flächen durchgeführt (Körner 2000, Norby & Luo 2004). CO<sub>2</sub>-Reaktionen einzelner Pflanzen können aber nur sehr bedingt auf Ökosysteme extrapoliert werden (Ackerly & Bazzaz 1995). Im Gegensatz zu Wäldern wurden vergleichsweise wenig Grasländer untersucht, obwohl diese weltweit einen Anteil von ca. 40 % der Landfläche einnehmen (LeCain et al. 2002).

Bazzaz & Garbutt zeigten bereits 1988, dass unter erhöhtem CO<sub>2</sub> Konkurrenzverschiebungen in natürlichen Pflanzengesellschaften zu erwarten sind. Verschiebungen der Pflanzenzusammensetzung sind viel seltener untersucht worden als physiologische Parameter (Photosynthese, Wasserverfügbarkeit, etc.). Dies hängt z.T. mit der Versuchsdauer der Experimente zusammen: Viele Versuche erstreckten sich nur über einen für die Beobachtung von Artenverschiebungen sehr kurzen Zeitraum von wenigen Jahren (Tabelle 2). Kurzzeit-Reaktionen auf erhöhtes CO<sub>2</sub> unterscheiden sich jedoch von Langzeit-Effekten, wie sie durch

die steigenden CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Atmosphäre entstehen (Newton et al. 2001b, Klironomos et al. 2005). Auch der experimentell bedingte plötzliche Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration kann artifizielle CO<sub>2</sub>-Reaktionen verursachen (step increase, z.B. bei Verdopplung auf 700 ppm und mehr, Ackerly & Bazzaz 1995).

Die Auswirkungen von erhöhtem CO<sub>2</sub> auf die oberirdische Biomasse, die Deckungen von Pflanzenarten und die Wurzelbiomasse, -länge sowie -dicke wurden überwiegend in Gewächshäusern und an Einzelpflanzen sowie artenarmen Ansaaten untersucht. Die Übertragbarkeit dieser Versuche auf Freilandverhältnisse muss kritisch überprüft werden, denn Einzelpflanzen oder Ansaaten in Töpfen oder im Freiland stellen eine unter natürlichen Bedingungen für Graslandarten eher selten vorkommende Bewurzelungs- und Pioniersituation dar. Da die Erkenntnisse und Zusammenhänge aus diesen Untersuchungen jedoch ebenfalls sehr wertvoll sind, werden sie in die Darstellung der bekannten Ergebnisse einbezogen und die Rahmenbedingungen zu den Versuchen kurz erwähnt. Zusätzlich sind alle Experimente, die in dieser Einleitung zu Vergleichen herangezogen wurden, mit ihren wichtigsten Versuchsparametern im Anhang in Tabelle 31 aufgelistet.

Im Anschluss an diese Auflistung im Anhang befindet sich eine kurze Erklärung der Applikationssysteme (Kap. 8.2), das Verzeichnis der Abkürzungen steht auf der letzten Seite.

## **1.1 CO<sub>2</sub>-Reaktionen der Pflanzengemeinschaft**

### ***Artenzahl, Diversität und Evenness***

Artenzahlen und Diversitäten beschreiben die Vielfalt einer Fläche: je mehr Arten auf einer Fläche anzutreffen sind und je unterschiedlicher die Deckungen der Arten auf den Flächen sind, desto heterogener ist die Fläche. Die Evenness ist dagegen ein Maß für die Gleichverteilung der Deckungen einzelner Pflanzenarten auf einer Fläche (für detailliertere Beschreibung der Parameter siehe Material und Methoden). Der CO<sub>2</sub>-Effekt auf Artenzahl, Diversität und Evenness kann nur unter Konkurrenz auf intakten Flächen untersucht werden. Daher liegen zu diesen Parametern für Grasland in der Literatur nur wenige Ergebnisse vor, nämlich von zwei Wiesen (davon einer Obstbaumwiese), einer Ansaatfläche und 7 Weideflächen.

Artenzahl und Evenness nahmen unter erhöhtem CO<sub>2</sub> in den meisten Versuchen zu oder blieben gleich, die Diversität variierte stark.

In Tabelle 1 sind die Auswirkung von erhöhtem CO<sub>2</sub> auf die Artenzahl, Diversität und Evenness aus den 10 genannten Untersuchungen dargestellt. Die Versuchsbedingungen für die in Tabelle 1 genannten Versuche sind im Anhang in Tabelle 31 aufgelistet.

**Tabelle 1: Auswirkung von erhöhtem CO<sub>2</sub> auf die Artenzahl, Diversität und Evenness**

Versuch	Artenzahl	Diversität	Evenness	Quelle
Jasper Ridge FACE	0/- (ns)	-	*	Zavaleta et al. 2003a; Zavaleta et al. 2003b
MEGARICH Solardome Bangor UK	+/- (ns)	0 (ns)	0 (ns)	Harmens et al. 2004
MEGARICH MiniFACE Irland	*	+ (ns)	*	Byrne & Jones 2002
MEGARICH MiniFACE Frankreich	+/- (ns)	- (ns)	*	Teyssonneyre et al. 2002a
Gewächshaus, Monolithe v. Obstbaumw.	0	*	*	Navas et al. 1995
OTC Uppsala	*	-/+	*	Marissink & Hansson 2002
OTC Farnham	(+)	*	+	Potvin & Vasseur 1997
SACC Schweiz Ansaat	(+)	*	+	Niklaus et al. 2001b
SACC Schweiz	0	0	+	Niklaus & Körner 2004
Bulls FACE	+ (ns)	*	*	Edwards et al. 2001

Die Zusammenfassung zeigt die Zunahme (+), fehlende Wirkung (0) oder Abnahme (-) der Parameter unter erhöhtem CO<sub>2</sub>, ggf. mit einer Größenangabe. Der Asterisk\* steht für nicht untersuchte Parameter, „ns“ für nicht signifikant. Erklärung zu FACE, OTC, SACC siehe Kap. 8.2 Applikationssysteme.

Auf den Wiesenflächen des Jasper Ridge FACE war die **Diversität** nach 3 Jahren unter erhöhtem CO<sub>2</sub> um 8% reduziert, wobei die Diversität der Kräuter abnahm und die der Gräser zunahm (Zavaleta et al. 2003a). Die **Artenzahlen** waren auf diesen Flächen in den ersten beiden Jahren unverändert, im dritten Jahr gab es eine Tendenz zur Abnahme (Zavaleta et al. 2003b). In den Weideland-Monolithen des MEGARICH Solardome in UK/Bangor nahm die **Artenzahl der Gräser** ab, die **Gesamt-Artenzahl** dagegen zu (nicht signifikant) und **Diversität** und **Evenness** blieben unverändert (Harmens et al. 2004). In den Weideland-Monolithen des MEGARICH MiniFACE in Irland/Dublin nahm nach 1 Jahr die **Diversität** (ns) zu (Byrne & Jones 2002). In den Weideland-Monolithen des MEGARICH MiniFACE in Frankreich/Clermont-Ferrand nahm die **Diversität** nach 3 Jahren ab (nicht signifikant) und die **Artenzahl** unterlag starken Schwankungen (Teyssonneyre et al. 2002a). Navas et al. (1995) berichteten von einer unveränderten **Artenzahl** in Monolithen aus einer Obstbaumwiese nach 6 Monaten unter 700 ppm CO<sub>2</sub> im Gewächshaus. Im 6-jährigen OTC-Versuch auf einer ehemaligen Weide in Uppsala war die **Diversität** unter erhöhtem CO<sub>2</sub> im Frühjahr geringer und im Sommer erhöht (Marissink & Hansson 2002). In einem OTC-Versuch auf einer ehemaligen Weide in Farnham nahm die **Evenness** nach 3 Jahren zu und die **Artenzahl** auf begasten Flächen weniger stark ab (Potvin & Vasseur 1997). Im Ansaat-Versuch des SACC Schweiz nahm die **Evenness** nach 6 Jahren zu (produktive Arten wurden durch an nährstoffarme Standorte angepasste Arten ersetzt) und die **Artenzahl** nahm auf den begasten Flächen weniger stark ab (Niklaus et al. 2001b). Im SACC auf alpinem Grasland

war die **Evenness** nach 6 Jahren erhöht (Niklaus & Körner 2004). Im Bulls FACE auf Weideland war die **Artenzahl** nach 4 Jahren unter nur 475 ppm erhöht (Edwards et al. 2001).

Die unterschiedlichen Reaktionen der drei Parameter sind, soweit der kleine Datensatz eine solche Aussage zulässt, nicht in der Verschiedenheit der Versuchsbedingungen begründet. So wurde z.B. eine Zunahme der Artenzahl sowohl unter 700 ppm (Potvin & Vasseur 1997) als auch unter 475 ppm CO<sub>2</sub> (Edwards et al. 2001) nachgewiesen. Unter 600 ppm CO<sub>2</sub> resultierten positive, negative und indifferente Artenzahl-Reaktionen. Ebenso wenig Einfluss auf das Ergebnis schienen Versuchsdauer und Größe der begasten Fläche zu nehmen. Der Einfluss unterschiedlicher Artenzusammensetzungen und Nutzungen auf die CO<sub>2</sub>-Reaktionen von Artenzahl, Diversität und Evenness konnte aufgrund des geringen Datensatzes nicht überprüft werden.

### ***CO<sub>2</sub>-Reaktionen der Deckung***

Auch für die CO<sub>2</sub>-Reaktionen der Deckung von Grasland-Arten steht nur ein sehr begrenzter Datenumfang zur Verfügung. Die CO<sub>2</sub>-Reaktion der Deckung war entweder nicht signifikant oder für einzelne Arten unterschiedlich. Beispielsweise wirkte sich erhöhtes CO<sub>2</sub> in einem OTC-Versuch auf einer ehemaligen Weide in Farnham auf die Deckung von *Plantago major* und *Taraxacum officinale* positiv, auf *Agropyron repens* negativ aus (Potvin & Vasseur 1997); in einem Gewächshausversuch mit 14 Graslandarten nahm die Deckung und oberirdische Biomasse von *Brachypodium pinnatum* ab, die von *Centaurea nigra* und den Leguminosen *Anthyllis vulneraria* und *Lotus corniculatus* zu (Hanley et al. 2004). In Grasland-Monolithen im Gewächshaus (Navas et al. 1995) und im OTC-Versuch auf der Langgras-Prärie in Kansas (Owensby et al. 1993) veränderten sich die Deckungen nicht.

Jede dieser Arten wurde nur in je *einem* Versuchsansatz auf ihre CO<sub>2</sub>-Reaktion der Deckung untersucht. Um die Verschiebungen von Pflanzensammensetzungen unter erhöhtem CO<sub>2</sub> vergleichen zu können, muss deshalb auf Biomasse-Ergebnisse zurückgegriffen werden.

## CO<sub>2</sub>-Reaktionen der oberirdischen Biomasse von Grasland-Arten

Aus der Literatur über CO<sub>2</sub>-Versuche mit Grasland-Arten bzw. Grasland-Ökosystemen ergaben sich die in Tabelle 2 zusammengefassten CO<sub>2</sub>-Reaktionen der oberirdischen Biomasse. In dieser nicht standardisierten, einfachen Übersicht zeigte die Biomasse sowohl in Ansaat-Versuchen als auch auf natürlichen Flächen in jeweils ca. der Hälfte der Versuche eine positive oder eine nicht signifikante Reaktion auf erhöhtes CO<sub>2</sub>.

**Tabelle 2: CO<sub>2</sub>-Reaktion der oberirdischen Biomasse**

Versuch	Versuchsdauer und CO <sub>2</sub> -Reaktion der gesamten oberirdischen Biomasse	Quelle
<b>Ansaaten</b>		
<i>Plantago lanceolata</i> , Töpfe, Gewächshaus	80 Tage +	Hui et al. 2002
<i>Trifolium repens</i> , Töpfe, Gewächshaus	58 Tage +	Jongen et al. 1996
<i>Holcus lanatus</i> , Töpfe, Gewächshaus	2 Monate +44%	Barnard et al. 2005
2 Arten, Töpfe, Gewächshaus	43 Tage +17%+29%	Schenk et al. 1995
2 Arten, Töpfe, Gewächshaus	56 Tage +/-	Wilsey 2001
2 Arten, Töpfe, Gewächshaus	112 Tage +/-	Carter & Peterson 1983
2 Arten, Töpfe, Gewächshaus	8 Wochen +57% (ns)	Derner et al. 2001
4 Arten, Töpfe, OTC	3 Jahre +/-	Jones & Jongen 1996
4 Arten, Töpfe, OTC Irland	3 Monate 3 Arten + 1 Art 0	Jongen & Jones 1997
4 Arten, Töpfe, OTC Irland	8 Monate +12,4% -+40,9% (Ø +26%)	Jongen & Jones 1998
4 Arten, Töpfe, Gewächshaus	100 Tage +/-	Ferris & Taylor 1993
4 Arten, Töpfe, Gewächshaus	99 Tage +	Naem et al. 1999
<i>Agrostis curtisii</i> , Solardome Bangor	2 Jahre +/- (ns)	Norton et al. 1999b
8 Arten, Töpfe, Solardome Bangor UK	125-140 Tage +/-	Stirling et al. 1997
9 Arten, Töpfe, Gewächshaus	6 Monate +/-	Farnsworth & Bazzaz 1995
6 Arten, Töpfe, Gewächshaus	124-128 Tage +/-	Leadley & Stöcklin 1996
6-14 Arten, Töpfe, Gewächshaus	4 Monate +14% (ns)	Stöcklin et al. 1997
14 Arten, Töpfe, Gewächshaus	2 Jahre 0-46%	Stöcklin & Körner 1999
14 Arten, Töpfe, Gewächshaus	1 Jahr ns	Hanley et al. 2004
14 Arten, Töpfe, Gewächshaus	20 Wochen ns	Johnson et al. 2003
32 Arten, Töpfe, Gewächshaus	4 Mon. +7% (440ppm), +17 % (600ppm)	Grünzweig & Körner 2001
<i>Festuca p.</i> , Freiland , OTC Jokioinen	1. Jahr +10% 2. Jahr ns	Hakala & Mela 1996
<i>Festuca p.</i> , Freiland , OTC Jokioinen	2 Jahre ns	Hakala & Mela 1996
<i>Plantago</i> -Pflanzung, nat. CO <sub>2</sub> -Quelle	246 Tage ns	Edwards et al. 2003
<i>Lolium</i> , Töpfe, Tunnel	2 Jahre +19%+14%	Casella et al. 1996
3 Arten, Ansaat, Tunnel	1 Jahr +	Teyssonneyre et al. 2002b
2 Arten, Ansaat, Tunnel	1 Jahr +19%, +34%	Lilley et al. 2001
31 Arten, Ansaat, SACC Schweiz	5 Jahre geringere Abnahme unter +CO <sub>2</sub>	Niklaus et al. 2001b
61 Arten, Ansaat, SACC Schweiz	9 Wochen ns	Rötzel et al. 1997
16 Arten, Ansaat, BioCON FACE,	2. Jahr +8%	Reich et al. 2001a
2 Arten, Ansaat, Swiss FACE	2 Jahre +2% (ns), +28%-73%	Hebeisen et al. 1997a
2 Arten, Ansaat, Swiss FACE	3 Jahre +7% (ns), +11%-20%	Hebeisen et al. 1997b
2 Arten, Ansaat, Swiss FACE	4 Jahre +100% (ns)	van Kessel et al. 2000
6 Arten, Ansaat, Swiss FACE	Nach 3 Mon. +25%, nach 15 Mon. +15%	Norton et al. 1999a
2 Arten, Ansaat, Swiss FACE	In allen 4 Jahren: ns, +80%	Hartwig et al. 2002
7 Arten, Ansaat, Swiss FACE	2. Jahr +33%	Warwick et al. 1998
12 Arten Pflanzung in <i>Lolium</i> -Rasen, Swiss FACE	in allen 3 Jahren +	Lüscher et al. 1998
2 Arten Pflanzung in Monolithe, Gew.	1. Jahr leicht signifikant +, 2. Jahr ns	Roumet et al. 2002
Grasland-Mikrokosmen, Gewächshaus	3 Monate ns	Diaz et al. 1993
<b>Natürlich gewachsene Vegetation</b>		
Grasland-Monolithe, Gewächshaus	217 Tage ns	Newton et al. 1994
Grasland-Monolithe, Gewächshaus	261 Tage +2% (525ppm), +10% (700ppm)	Newton et al. 1995

Grasland-Monolithe, Gewächshaus	6 Monate +25% (ns)	Navas et al. 1995
FACE-Grasland-Monolithe Gewächshaus	Nach 3 Jahren FACE: 6 Mon. Gew. +26%	Niklaus et al. 2001a
OTC auf Grasland, Dublin	1.-4. Jahr +20%, +28%, +21%, +8%	Tuba et al. 1998
Grasland-Monolithe, OTC, Gödöllö	335 Tage +15%	Tuba et al. 1998
Solardome UK, Grasland-M. Lancaster	2 Jahre ns	Wolfenden & Diggle 1995
Solardome UK, Grasland-M. Lancaster	2 Jahre ns	Fitter et al. 1997
MEGARICH MiniFACE, Irland	1 Jahr ns	Byrne & Jones 2002
MEGARICH MiniFACE, Frankreich	2. Jahr +26%, 3. Jahr +41%	Picon-Cochard et al. 2004
MEGARICH MiniFACE, Italien	2 Jahre unverändert	Marchi et al. 2004
MEGARICH MiniFACE, Ungarn	unverändert	Nagy et al. 2002
MEGARICH MiniFACE, Deutschland	3. und 4. Jahr fast +20%	Winkler & Herbst 2004
Tunnel Texas, C <sub>3</sub> /C <sub>4</sub> -Grasland	4 Jahre +	Polley et al. 2003
OTC Chesapeake Bay, Marschland	4 Jahre C <sub>4</sub> : -, C <sub>3</sub> : > +100%	Drake, 1992
OTC Chesapeake Bay, Marschland	8 Jahre ns	Matamala & Drake 1999
OTC Chesapeake Bay, Marschland	17 Jahre +	Rasse et al. 2005
OTC Colorado, Kurzgras-Steppe	1. Jahr +26%, 2. Jahr +47%	Morgan et al. 2001
OTC Colorado, Kurzgras-Steppe	5. Jahr +41%	Morgan et al. 2004a
OTC Kansas, Langgras-Steppe	8 Jahre +/-ns	Owensby et al. 1999
OTC Schweiz, Alpines Grasland	2. Jahr ns	Körner et al. 1996
OTC Schweiz, Alpines Grasland	3. Jahr ns	Schäppi & Körner 1996
OTC Schweiz, Alpines Grasland	4. Jahr ns	Körner et al. 1997
OTC Schweiz, Alpines Grasland	4. Jahr ns	Diemer & Körner 1998
OTC Uppsala, Ehemalige Weide	1.-4. Jahr +30, +45, +60, +3% (ns)	Marissink et al. 2002
OTC Uppsala, Ehemalige Weide	1.-5.J. +51, +67, +3 (ns), +8 (ns), +5%(ns)	Sindhøj et al. 2004
Jasper Ridge FACE, Grasland	1. und 2. Jahr 0, 3. Jahr +	Shaw et al. 2002
Jasper Ridge FACE, Grasland	3 Jahre ns	Zavaleta et al. 2003b
Jasper Ridge FACE, Grasland	5 Jahre ns	Dukes et al. 2005
SACC Schweiz, Alpines Grasland	1.-4. J.+5 (ns) +20, +21, +29%	Leadley et al. 1999
SACC Schweiz, Alpines Grasland	1.-6. J.+5 (ns) +20,+ 21, +29, +31, +18%	Niklaus & Körner 2004
Giessen FACE, Wiese	1.-5.J ns, ns, +10, +8%, +11%	Kammann et al. 2005
Bulls FACE, Weide	3. Jahr +/0	Edwards et al. 2001
Bulls FACE, Weide	4. Jahr ns	Allard et al. 2005
Bulls FACE, Weide	5. Jahr ns	Ross et al. 2004

Dargestellt sind Zunahme (+), fehlende Wirkung (0), Abnahme (-) der Biomasse in 74 Experimenten unter erhöhtem CO<sub>2</sub>, ggf. mit Größenangabe, „ns“ steht für nicht signifikant. Unterschiedliche (+/-) oder indifferente (0, ns) CO<sub>2</sub>-Antworten sind blau markiert, positive rot und positive aber nicht signifikante schwarz. Erklärung zu FACE, OTC, SACC, Tunnel siehe Kap. 8.2 Applikationssysteme.

Die oberirdische Biomasse reagierte in 36 Versuchen nicht oder unterschiedlich, in 31 positiv und in 7 mit einer nicht-signifikante Zunahme auf erhöhtes CO<sub>2</sub>. Es gab keine rein negative CO<sub>2</sub>-Reaktion der oberirdischen Gesamt-Biomasse (wohl aber einzelner Fraktionen, vgl. folgende Anschnitte).

Von 39 *Ansaat-Versuchen* ergaben 17 keine, 16 eine positive CO<sub>2</sub>-Reaktion und 6 eine nicht-signifikante Zunahme.

Auf 35 *intakten Flächen* (Monolithe, Wiesen, etc.) gab es in 19 Versuchen keine eindeutige Zunahme der oberirdischen Biomasse unter CO<sub>2</sub>, in 15 eine signifikante und in einem Versuch eine nicht-signifikante Zunahme. Hier ist zu berücksichtigen, dass einige Ergebnisse mehrmals veröffentlicht wurden.



Im Widerspruch zu den häufig in der Literatur zitierten Unterschieden der CO<sub>2</sub>-Reaktionen zwischen Ansaat-Flächen und intakten Flächen lassen sich aus der o.g. Auflistung kaum Unterschiede in den CO<sub>2</sub>-Reaktionen der oberirdischen Biomasse erkennen. Auch Höhe der CO<sub>2</sub>-Begasung, Applikationssystem und Nutzungsform scheinen die CO<sub>2</sub>-Reaktion der oberirdischen Biomasse nicht zu beeinflussen (eine kurze Auflistung einiger Versuchsparameter befindet sich in Tabelle 31 im Anhang, gefolgt von einer kurzen Beschreibung der Applikationssysteme).

Der indifferenten CO<sub>2</sub>-Reaktionen der *gesamten* oberirdischen Biomasse können unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Reaktionen *einzelner Arten* zu Grunde liegen.

### CO<sub>2</sub>-Reaktionen einzelner Grasland-Arten

Unter Konkurrenz im Freiland fielen die CO<sub>2</sub>-Reaktionen einzelner Grasland-Arten meist nicht signifikant aus. Negative CO<sub>2</sub>-Reaktionen waren sehr selten. Tabelle 3 zeigt eine Zusammenstellung der artspezifischen CO<sub>2</sub>-Reaktionen auf intakten Flächen (Versuche 1-12) und auf Ansaatflächen (Versuche 13-17).

**Tabelle 3: CO<sub>2</sub>-Reaktionen einzelner Pflanzenarten**

Versuch Wissenschaftlicher Artnamen	OTC Colorado	OTC Kansas	OTC Farnham	OTC Schweiz	MEGARICH F	MEGARICH Ir.	MEGARICH UK	Jasper Ridge FACE	Bulls FACE	SACC Schweiz	SACC Schweiz	SACC CH Ansaat	Swiss FACE 6	Swiss FACE 7	Swiss FACE 12	BioCON FACE
Quelle Nr.	1	2	3	4	5,*6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
<i>Acer negundo</i>			ns													
<i>Achillea millefolium</i>					+		ns									+
<i>Agropyron repens</i>			-		ns*											ns
<i>Agrostis tenuis</i>						ns			0							
<i>Agrostis stolonifera</i>					+											
<i>Alopecurus pratensis</i>					-*											
<i>Amorpha canescens</i>																ns
<i>Andropogon gerardii</i>																ns
<i>Anemone cylindrica</i>																ns
<i>Anthoxanthum odorat.</i>				ns	ns*	ns	ns		+	ns	0	ns				
<i>Anthyllis vulneraria</i>												ns		+		
<i>Arrhenatherum elatius</i>					ns*										+/-	
<i>Asclepias tuberosa</i>																ns
<i>Avena barbata</i>								0								
<i>Avena fatua</i>								0								
<i>Bellis perennis</i>												ns				
<i>Betonica officinalis</i>										ns						
<i>Briza media</i>										ns	0	ns		ns		
<i>Bouteloua gracilis</i>																ns
<i>Bromopsis erecta</i>														ns		
<i>Bromus diandrus</i>								0								

<i>Bromus erectus</i>								+	0	ns							
<i>Bromus hordeaceus</i>				ns*				0									
<i>Bromus inermis</i>																	+
<i>Campanula glomerata</i>											ns						
<i>Capsella bursa-pastor.</i>			ns														
<i>Cardamine pratensis</i>				ns*													
<i>Carex caryophylla</i>								ns	+								
<i>Carex curvula</i>			ns														
<i>Carex flacca</i>								+	+	+							
<i>Centaurea jacea</i>											ns						
<i>Cerastium caespit.</i>				ns*													
<i>Cerastium fontanum</i>						ns											
<i>Cerastium holosteoid.</i>												ns					
<i>Chamaespartium sag.</i>									ns								
<i>Cirsium acaule</i>									ns								
<i>Cirsium arvense</i>				ns*		ns											
<i>Convolvulus arvensis</i>				ns*													
<i>Crepis capillaris</i>						ns											
<i>Cynosurus cristatus</i>									ns		ns						
<i>Dactylis glomerata</i>				ns*	ns	ns			ns		ns	ns					+/-
<i>Danthonia decumbens</i>									ns								
<i>Epilobium montanum</i>						ns											
<i>Erigeron canadensis</i>				ns*													
<i>Festuca arundinacea</i>				ns*													
<i>Festuca ovina</i>									ns		ns				-		
<i>Festuca pratensis</i>									ns								+
<i>Festuca rubra</i>			ns	ns	ns	ns											
<i>Gentianella cruciata</i>											ns						
<i>Gentianella germanica</i>											ns						
<i>Heracleum sphondyl.</i>				ns*													
<i>Hieracium pilosella</i>									ns		+						
<i>Holcus lanatus</i>				ns	ns	ns											+/-
<i>Homogyne alpina</i>			ns														
<i>Hypericum perforatum</i>									ns								
<i>Hypochoeris radicata</i>						ns		+									
<i>Knautia arvensis</i>									ns		ns						
<i>Koeleria cristata</i>																	ns
<i>Koeleria pyramidata</i>											ns						
<i>Lathyrus pratensis</i>				ns*													
<i>Leontodon autumnalis</i>			ns														
<i>Leontodon helveticus</i>			ns														
<i>Leontodon saxatilis</i>								+									
<i>Lespedeza capitata</i>																	ns
<i>Leucanthemum alpina</i>			ns						ns								
<i>Leucanthemum vulg.</i>											ns						
<i>Ligusticum mutellina</i>			ns														
<i>Lolium multiflorum</i>								0									+/-
<i>Lolium perenne</i>				ns*	ns	ns		+					-				ns
<i>Lotus corniculatus</i>						ns			+		ns			+			
<i>Lupinus perennis</i>																	+
<i>Luzula campestris</i>						ns											
<i>Luzula lutea</i>			ns														
<i>Medicago lupulina</i>				ns*							ns						
<i>Nardus stricta</i>			ns														
<i>Petalostemum villos.</i>																	ns
<i>Pimpinella saxifraga</i>											ns						
<i>Phleum pratense</i>			ns	ns*								ns					
<i>Phyteuma globularif.</i>			ns														
<i>Plantago lanceolata</i>				ns*	ns	ns					ns	ns					
<i>Plantago major</i>			+														
<i>Plantago media</i>									ns		ns						- ns
<i>Poa alpina</i>				+													

<i>Poa angustifolia</i>					ns*																			
<i>Poa pratensis</i>		-	ns		ns*			0									ns							
<i>Poa trivialis</i>					ns*							ns												
<i>Polygonum bistorta</i>					-*																			
<i>Potentilla anserina</i>						+																		
<i>Potentilla aurea</i>				ns																				
<i>Prunella grandiflora</i>												ns												
<i>Prunella vulgaris</i>												ns												
<i>Ranunculus acris</i>						ns	ns																	
<i>Ranunculus bulbosus</i>						ns						ns												
<i>R. friesianus</i>																+								
<i>Ranunculus repens</i>					ns*		ns																	
<i>Rumex acetosa</i>						ns	ns									+								
<i>Rumex acetosella</i>								0																
<i>Rumex crispus</i>					-*																			
<i>Rumex obtusifolia</i>																+								
<i>Salvia pratensis</i>									ns		ns													
<i>Sanguisorba minor</i>									ns	0	+			+ ns										
<i>Scabiosa columbaria</i>												ns												
<i>Schizachyrium scopar.</i>																	ns							
<i>Solidago rigida</i>																	ns							
<i>Sonchus oleracea</i>							ns																	
<i>Sorghastrum nutans</i>																	ns							
<i>Stellaria graminea</i>					ns*																			
<i>Stipa comata</i>	+																							
<i>Taraxacum officinale</i>			+		ns*																			
<i>Trifolium alpinum</i>				ns																				
<i>Trifolium medium</i>					ns*				ns															
<i>Trifolium montanum</i>													ns											
<i>Trifolium pratense</i>					ns*		ns					ns				+								
<i>Trifolium repens</i>			ns		+	ns	ns		+			ns				+								
<i>T. subterraneum</i>									+															
<i>Trisetum flavescens</i>					+*												+/-							
<i>Veronica chamaedrys</i>					ns*																			
<i>Veronica persica</i>					ns*																			
<i>Vicia cracca</i>					ns*		ns																	
<i>Vicia sativa</i>					ns*																			
<i>Vicia sepium</i>					ns*																			
<i>Vicia tetraspermae</i>					ns*																			
Σ 122 Arten	(1)	(1)	9	13	40	12	21	(5)	9	22	(6)	31	6	7	12	16								
+	1		2	1	4	1			6	3	2	3		2	7	3								
ns oder 0 oder +/-			6	12	33	11	21	5	3	19	4	28	5	4	5	13								
-		1	1		3								1	1										
Gräser + Cyperaceen CO <sub>2</sub> -Reaktion	1	1	1	2	1	5	2	13	1	6	5	2	2	2	9	2	3	1	7	1	3	1	7	ns
Kräuter CO <sub>2</sub> -Reaktion			2	3	6	1	12	2	1	4	11		2	1	9	1	2	15	2	2	3	1	3	ns
Leguminosen CO <sub>2</sub> -Reaktion			1	1	1	8	1	5		2	1	1		6				2	2	1	3			ns
Quelle Nr.	1	2	3	4	5,*6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17								

Dargestellt sind Zunahme (+), fehlende Wirkung (0), Abnahme (-) der Parameter unter erhöhtem CO<sub>2</sub>, „ns“ steht für nicht signifikant. Der Asterisk\* bezeichnet die Ergänzungen, die zu Quelle 5 aus Quelle 6 hinzugefügt wurden. Am Ende der Tabelle ist die Artenzahl aufgeführt, die den Ergebnissen zu Grunde liegt. Bei unvollständigen Artenlisten zu den Versuchsflächen ist die Anzahl der ausgewerteten Arten in Klammern angegeben. Danach sind alle positiven, negativen und indifferenten CO<sub>2</sub>-Reaktionen sowie die CO<sub>2</sub>-Reaktionen der PFTs zusammengefasst. Eine Auflistung der Quellen und der wichtigsten Versuchsparameter befindet sich in Tabelle 4.

**Tabelle 4: Quellen zu den Versuchen über CO<sub>2</sub>-Reaktionen einzelner Pflanzenarten**

	Versuch	Vegetation	Versuchsdauer	CO <sub>2</sub> (ppm)	Quelle
1	OTC Colorado, Kurzgras-Steppe	Grasland	5 Jahre	720	Morgan et al. 2004a
2	OTC Kansas, Langgras-Prärie	Grasland	8 Jahre	700	Owensby et al. 1999
3	OTC Farnham	Ehemalige Weide	3 Jahre	625	Potvin & Vasseur 1997
4	OTC Schweiz	Alpines Grasland	3 Jahre	680	Schäppi & Körner 1996
5	MEGARICH MiniFACE, Frankreich	Monolithe	3 Jahre	600	Picon-Cochard et al. 2004
6	MEGARICH MiniFACE, Frankreich	Monolithe	3 Jahre	600	Teyssonneyre et al. 2002a
7	MEGARICH MiniFACE, Irland	Monolithe	1 Jahr	600	Byrne & Jones 2002
8	MEGARICH MiniFACE, UK Bangor	Monolithe	2 Jahre	600	Harmens et al. 2004
9	Jasper Ridge FACE	Grasland	3 Jahre	680	Zavaleta et al. 2003b
10	Bulls FACE	Weide	3 Jahre	475	Edwards et al. 2001
11	SACC Schweiz	Alpines Grasland	4 Jahre	600	Leadley et al. 1999
12	SACC Schweiz	Alpines Grasland	6 Jahre	600	Niklaus & Körner 2004
13	SACC Schweiz, Ansaat	31-Arten-Ansaat	5 Jahre	600	Niklaus et al. 2001b
14	Swiss FACE 6	6-Arten-Ansaat	15 Monate	600	Norton et al. 1999a
15	Swiss FACE 7	7-Arten-Ansaat	2 Jahre	600	Warwick et al. 1998
16	Swiss FACE 12	12-Arten-Ansaat	3 Jahre	600	Lüscher et al. 1998
17	BioCON FACE	16-Arten-Ansaat	2 Jahre	560	Reich et al. 2001a

In 12 Versuchen auf gewachsenen Flächen (Monolithen und Freilandflächen) und 5 Ansaat-Versuchen im Freiland/FACE wurden insgesamt 122 Pflanzenarten auf ihre CO<sub>2</sub>-Reaktion getestet. Es traten 34 x positive CO<sub>2</sub>-Reaktionen, 170 x indifferente (+/- und 0) oder nicht signifikante und 7 x negative CO<sub>2</sub>-Reaktionen auf. Negativ auf erhöhtes CO<sub>2</sub> reagierten die 7 Arten *Agropyron repens*, *Alopecurus pratensis*, *Festuca ovina*, *Lolium perenne*, *Poa pratensis*, *Polygonum bistorta* und *Rumex crispus*. *Alopecurus*, *Polygonum* und *Rumex* wurden jeweils nur einmal untersucht, die anderen 4 Arten reagierten in einem Versuch negativ, in anderen Versuchen jedoch sowohl indifferent als auch positiv. Ausschließlich positiv reagierten 12 Arten (jedoch lediglich *Carex flacca* in mehr als einem Versuch) und 103 Arten reagierten gar nicht, nicht signifikant oder unterschiedlich auf erhöhtes CO<sub>2</sub>.

Sowohl die negativen als auch die positiven artspezifischen CO<sub>2</sub>-Reaktionen waren auf alle 17 Versuche relativ gleichmäßig verteilt. Die meisten negativen CO<sub>2</sub>-Reaktionen (3 Arten) wurden im OTC Farnham (Potvin & Vasseur 1997) und die meisten positiven (6 Arten) im Bulls FACE (Edwards et al. 2001) und in der 12-Arten-Ansaat des Swiss FACE (Lüscher et al. 1998) beobachtet. In den meisten Versuchen reagierte die Mehrzahl der Arten nicht signifikant auf erhöhtes CO<sub>2</sub>. In einigen Versuchen wurde allerdings nur die CO<sub>2</sub>-Reaktion einiger markanter Arten ausgewertet, in OTCs Colorado und Kansas sogar nur die einer dominanten Art.

Die negativen CO<sub>2</sub>-Reaktionen der Gräser wurden aus den OTCs in Kansas und Farnham (Quelle 2 und 3), dem MEGARICH in Frankreich (Quelle 5 und 6) und dem Swiss FACE

(Quelle 14 und 15) berichtet. Sie traten auf Prärie, Weide, ehemaliger Weide und in Ansaaten nach 15 Monaten und 3, 5 und 8 Jahren unter 600, 625 und 700 ppm auf.

Die positiven CO<sub>2</sub>-Reaktionen der Gräser wurden aus dem OTC in Colorado (Quelle 1), dem MEGARICH in Frankreich (Quelle 5 und 6), dem Bulls FACE (Quelle 10), dem SACC Schweiz (Quelle 11 und 12), dem Swiss FACE (Quelle 13 und 13) und dem BioCON (Quelle 17) berichtet. Sie traten auf Steppe, Weide, ehemaliger Weide, alpinem Grasland und in Ansaaten nach 2, 3, 4, 5 und 6 Jahren unter 475, 560, 600 und 720 ppm auf.

Die positiven CO<sub>2</sub>-Reaktionen von Kräutern und Leguminosen waren ähnlich gleich verteilt (Tabelle 3), wurden allerdings nicht in allen Versuchen untersucht.

Die Übersicht zeigt eine zumeist nicht signifikante, darüber hinaus relativ gleich verteilte artspezifische CO<sub>2</sub>-Reaktion ohne erkennbare Einflüsse der Vegetationsform, des Applikationssystems, der Versuchsdauer, der Höhe der CO<sub>2</sub>-Konzentration (Tabelle 31) oder Unterschiede zwischen Ansaat- und intakten Flächen. Absolutreaktionen dominanter Arten werden in dieser einfachen Gegenüberstellung ohne standardisierte CO<sub>2</sub>-Effekte (Curtis et al. 2003) überbewertet.

### ***CO<sub>2</sub>-Reaktionen funktioneller Pflanzentypen von Grasland-Arten***

Die Einteilung der 122 aufgelisteten Arten (Tabelle 3) in die Funktionellen Pflanzentypen (Plant Functional Types, PFTs) Gräser, Kräuter und Leguminosen ergab eine positive CO<sub>2</sub>-Reaktion in der Abfolge Leguminosen > Kräuter > Gräser.

In keinem der 17 Experimente wirkte sich die erhöhte CO<sub>2</sub> Konzentration negativ auf eine der 19 Leguminosen-Arten aus. Leguminosen reagierten 26 x indifferent oder unterschiedlich und 9 x positiv. In 3 von 12 Versuchen, in denen Leguminosen-Arten ausgewertet wurden, reagierten diese ausschließlich positiv, meistens jedoch nicht signifikant auf erhöhtes CO<sub>2</sub>. Die 59 Kraut-Arten reagierten in den 17 Versuchen 69 x nicht signifikant oder unterschiedlich und 22 x positiv auf erhöhtes CO<sub>2</sub>. Zwei Kraut-Arten (*Polygonum bistorta* und *Rumex crispus*) reagierten negativ (OTC Farnham, Potvin & Vasseur 1997). Von den 44 untersuchten Gras-Arten reagierten 5 Arten negativ auf erhöhtes CO<sub>2</sub>. Keine der negativen CO<sub>2</sub>-Reaktionen wurde in mehr als einem Experiment nachgewiesen. Insgesamt reagierten Gräser 5 x negativ, 13 x positiv und 75 x indifferent bzw. nicht signifikant auf erhöhtes CO<sub>2</sub>.

Die CO<sub>2</sub>-Reaktion der oberirdischen Biomasse von Grasland-Versuchen ist innerhalb der PFTs Gräser, Kräuter und Leguminosen demnach nur bedingt homogen. Leguminosen reagierten etwa gleich häufig positiv wie indifferent (9 : 13), Kräuter (12 : 69) und Gräser (13 : 75) eher indifferent auf erhöhtes CO<sub>2</sub>. Negative Reaktionen kamen insgesamt selten (7 x), etwas häufiger bei Gras (5)- als bei Kraut (2)-Arten vor.

Tabelle 5 zeigt eine Auflistung von Ergebnissen der in der Literatur beschriebenen CO<sub>2</sub>-Reaktionen von Versuchen, in denen die PFTs Gräser, Kräuter und Leguminosen als Gruppen untersucht wurden.

**Tabelle 5: CO<sub>2</sub>-Reaktionen der Grasland-PFTs Gräser, Kräuter, Leguminosen**

Versuch	Gräser	Kräuter	Leguminosen	Quelle
<b>Biomassen</b>				
Tunnel Texas	-	+	*	Polley et al. 2003
MEGARICH MiniFACE, IR	-	+	*	Byrne & Jones 2002
MEGARICH MiniFACE, HU	-	+	*	Tuba et al. 1998
MEGARICH MiniFACE, D	-	+	+	Winkler & Herbst 2004
MEGARICH MiniFACE, F	-	+	+	Teyssonneyre et al. 2002a
MEGARICH MiniFACE, F	1. Jahr 0 2. Jahr ns 3. Jahr +36%	+	+	Picon-Cochard et al. 2004
SACC Schweiz	+ 16%	+25%	+38% (ns)	Niklaus & Körner 2004
Monolithe vom SACC Schweiz	+ 29%	ns	ns	Niklaus et al. 2001a
Swiss FACE, Ansaat	1. Jahr +27 %, 2. Jahr +2 %, 3. Jahr -6 %	1. Jahr +34 %, 2. Jahr +24 %, 3. Jahr +64 %	1. Jahr +159 % 2. Jahr +73 %, 3. Jahr +71 %	Lüscher et al. 1998
BioCON FACE, Ansaat	C <sub>3</sub> : +9, C <sub>4</sub> : -3%	+ 31%	+ 18%	Reich et al. 2001b
Monolithe aus Bulls FACE	C <sub>4</sub> : -		*	Newton et al. 1995
Bulls FACE		*	*	Newton et al. 2001a
Jasper Ridge FACE	ns, 3. Jahr - (ns)	ns	*	Zavaleta et al. 2003b
Giessen FACE	1. Jahr +3,5 %, 2. Jahr -3,5 %, 3. Jahr +12 % 4. Jahr +14,5% 5. Jahr +24%	1. Jahr +3,5 %, 2. Jahr +16 %, 3. Jahr +18 % 4. Jahr -25% 5. Jahr -21%	unverändert	Kammann et al. 2001
OTC Uppsala	+ (ns)	- (ns)	0	Marissink & Hansson 2002
<b>Deckungen</b>				
OTC Uppsala	+ (ns)	- (ns)	+	Marissink & Hansson 2002
OTC Kansas, Langgras-Prärie	C <sub>3</sub> : ns, C <sub>4</sub> : +	+	*	Owensby et al. 1993
OTC Kansas, Langgras-Prärie	C <sub>3</sub> : -, C <sub>4</sub> : ns	+	*	Owensby et al. 1999
MEGAR. Solardome UK, Bangor	unverändert	unverändert	+ (ns)	Harmens et al. 2004

Dargestellt sind Zunahme (+), fehlende Wirkung (0), Abnahme (-, rot markiert) der oberirdischen Biomasse und Deckungen von Grasland-PFTs unter erhöhtem CO<sub>2</sub>, ggf. mit Größenangabe, „ns“ steht für nicht signifikant, der Asterisk\* für keine Angaben. Angaben zu den Versuchsbedingungen in Tabelle 31.

Die Grasland-Versuche (Tabelle 5) bestätigen weitgehend den durch die Aufstellung der CO<sub>2</sub>-Reaktion einzelner Arten gewonnenen Eindruck. Im *Einzelnen* decken sich Darstellungen der CO<sub>2</sub>-Reaktionen von einzelnen Arten (Tabelle 3) und denen der PFTs (Tabelle 5) nur bei **Leguminosen**: sie reagierten hier wie dort weitgehend positiv und in keinem Versuch negativ

auf erhöhtes CO<sub>2</sub>. Der PFT **Kräuter** reagierte überwiegend positiv (Tabelle 5); Untersuchungen einzelner Arten (Tabelle 3) ergaben jedoch vor allem indifferente CO<sub>2</sub>-Reaktionen. Abweichend von allen anderen Versuchen reagierte der PFT der Kräuter ab dem 4. Jahr im Giessen FACE (Kammann et al. 2005) signifikant und in den OTCs in Uppsala (Marissink & Hansson 2002) nicht signifikant negativ. Der PFT **Gräser** zeigte ein inhomogenes Bild, mit mehr negativen CO<sub>2</sub>-Reaktionen als in der Darstellung der Einzelpflanzen-Reaktionen (Tabelle 3).

Aufgrund der Inhomogenitäten der CO<sub>2</sub>-Reaktion innerhalb der PFTs wurde in der vorliegenden Arbeit einer Untersuchung auf Artebene der Vorzug gegeben.

## 1.2 CO<sub>2</sub>-Reaktionen des Wurzelraums

### *CO<sub>2</sub>-Reaktionen der Wurzelbiomasse von Grasland-Arten*

Rogers et al. (1994) stellten in einem Review über CO<sub>2</sub>-Reaktionen in 87 % der 167 bearbeiteten Studien eine erhöhte Wurzelbiomasse fest. Als Mitte der 90er Jahre die Begasungsexperimente von etablierten Grasländern begannen, wurden die Ergebnisse von Wurzeluntersuchungen entscheidend von der Konkurrenzsituation im Wurzelraum und der längeren Versuchsdauer mitbestimmt. In diese langzeit-begasteten Flächen wurden in einigen Versuchen Meshbags (vgl. Material und Methoden) eingegraben, die nach einer Zeit von Wochen bis Monaten wieder ausgegraben und auf Wurzel-Biomasse und andere Wurzelparametern untersucht wurden. Die Ergebnisse der Literaturrecherche zu Wurzel-Biomassen sind in Tabelle 6 (mit Zylinderproben gewonnene Biomassen aus intakten Bodenkernen und Beobachtungen mit Rhizotronen in etablierten Systemen) und Tabelle 7 (Bewurzelungsexperimente) in einer nicht standardisierten, einfachen Übersicht dargestellt

**Tabelle 6: CO<sub>2</sub>-Reaktion der Wurzelbiomasse aus Zylinderproben**

Versuch	Versuchsdauer und CO <sub>2</sub> -Reaktion der Wurzelbiomasse	Quelle
<b>Ansaaten</b>		
<i>Festuca p.</i> , Freiland, OTC Jokioinen	1. Jahr +67%, 2. Jahr +38%	Hakala & Mela 1996
<i>Festuca p.</i> , Freiland, OTC Jokioinen	2 Jahre +30%	Hakala & Mela 1996
<i>Plantago</i> -Pflanzung, nat. CO <sub>2</sub> -Quelle	246 Tage ns	Edwards et al. 2003
<i>Lolium</i> , Töpfe, Tunnel	2 Jahre +45-52%	Soussana et al. 1996
2 Arten, Ansaat, Tunnel	1 Jahr +35%	Lilley et al. 2001
2 Arten, Ansaat, Swiss FACE	2 Jahre +22%, +14%	Hebeisen et al. 1997a
2 Arten, Ansaat, Swiss FACE	3 Jahre +45-108%, +26-40%	Hebeisen et al. 1997b
2 Arten, Ansaat, Swiss FACE	4 Jahre ns, +100%	van Kessel et al. 2000

2 Arten, Ansaat, Swiss FACE	10 Jahre +	Staddon et al. 2004
16 Arten, Ansaat, BioCON FACE	16 Arten: 2. Jahr +14%	Reich et al. 2001a
31 Arten, Ansaat, SACC Schweiz	5 Jahre ns	Niklaus et al. 2001b
<b>Natürlich gewachsene Vegetation</b>		
Grasland-Monolithe Gewächshaus	217 Tage +50%	Newton et al. 1994
Grasland-Monolithe Gewächshaus	261 Tage +25% (525ppm) +33% (700ppm)	Newton et al. 1995
FACE-Grasland-Monolithe Gewächshaus	Nach 3 Jahren FACE: 6 Mon. Gew. ns	Niklaus et al. 2001a
Grasland-Monolithe Gewächshaus	6 Monate ns	Navas et al. 1995
Grasland-Monolithe Solardome UK Bangor	2 Jahre Moorboden +41%, Kalk +/0	Fitter et al. 1997
MEGARICH MiniFACE, Italien	2 Jahre +, (in 15-30cm signifikant)	Marchi et al. 2004
OTC auf Marschland	8 Jahre ns	Matamala & Drake 1999
OTC Kansas, Langgras-Prärie	8. Jahr +40-46%	Jastrow et al. 2000
OTC Colorado, Kurzgras-Steppe	5 Jahre +23%	Pendall et al. 2004
OTC Colorado, Kurzgras-Steppe	5 Jahre ns	LeCain et al. 2006
OTC Schweiz, Alpines Grasland	3. Jahr ns	Schäppi & Körner 1996
OTC Schweiz, Alpines Grasland	4. Jahr +12% ns	Körner et al. 1997
OTC Uppsala, Ehemalige Weide	1. Jahr +28%, 5. Jahr +78% ( $\Sigma$ +50%)	Sindhøj et al. 2004
OTC Jasper Ridge (Minirhizotron)	3. Jahr + ns	Higgins et al. 2002
OTC Jasper Ridge	6. Jahr +49% (Serpentin)	Rillig et al. 1999b
FACE Jasper Ridge	5. Jahr ns	Dukes et al. 2005
SACC Schweiz, ehemalige Weide	1.-2. Jahr ns	Arnone et al. 2000
SACC Schweiz, ehemalige Weide	4 Jahre +26% (ns)	Leadley et al. 1999
SACC Schweiz, ehemalige Weide	6 Jahre 2. J. +48%, 6. J. +13%, sonst ns	Niklaus & Körner 2004
Bulls FACE, Weide	5. Jahr ns	Ross et al. 2004
Bulls FACE, Weide	4. Jahr -	Allard et al. 2005

Dargestellt sind Zunahme (+), fehlende Wirkung (0), Abnahme (-) der Parameter von 31 Versuchen unter erhöhtem CO<sub>2</sub>, ggf. mit einer Größenangabe, „ns“ steht für nicht signifikant. Unterschiedliche (+/-) oder indifferente (0, ns) CO<sub>2</sub>-Reaktionen sind blau markiert, negative grün, positive rot, positive nicht-signifikante schwarz.

Die Wurzelbiomasse reagierte in 11 Experimenten nicht signifikant oder unterschiedlich, in 14 positiv und in 6 mit einer nicht-signifikanten Zunahme auf erhöhtes CO<sub>2</sub>.

Von 11 *Ansaat*-Versuchen ergaben 2 keine signifikante CO<sub>2</sub>-Reaktion, 8 eine signifikante und einer eine nicht-signifikante Zunahme.

Auf 21 *natürlichen Flächen* (Monolithe, Wiesen, etc.) erfolgte in 9 Experimenten keine eindeutige Zunahme der Wurzelbiomasse unter erhöhtem CO<sub>2</sub>, in 6 eine signifikant positive und in 5 eine nicht-signifikant positive Zunahme. In einem Versuch (Bulls FACE, Allard et al. 2005) fiel die CO<sub>2</sub>-Reaktion der Wurzelbiomasse negativ aus.

In Ansaaten, die in der Anfangszeit der Experimente zu den Bewurzelungsexperimenten gezählt werden müssen, die hier jedoch aufgrund der Methode (Beprobung mit dem Zylinder) und der längeren Versuchsdauer von den Topfexperimenten unterschieden wurden, erfolgte eine sehr viel stärker positive Reaktion auf erhöhtes CO<sub>2</sub> als in den natürlichen Flächen. Offensichtlich fielen die Biomassezuwächse in bereits bewurzelten Räumen unter CO<sub>2</sub> nicht so hoch aus. Die Unterschiede in der CO<sub>2</sub>-Reaktion sind auch hier nicht auf eine längere Versuchsdauer, Unterschiede in der Höhe der CO<sub>2</sub>-Konzentration, des Applikationssystems oder der Nutzungsform der Fläche zurückzuführen (Versuchsbedingungen: Tabelle 31).



Tabelle 7 zeigt die CO<sub>2</sub>-Reaktionen von Wurzel-Biomassen aus Topfexperimenten, die am Ende der Untersuchung komplett beerntet wurden und aus Meshbags. Meshbags nehmen eine Sonderstellung ein, weil hier zwischen der Begasungszeit des Experiments und der Expositionszeit, über die das Bodenmaterial in den Meshbags der erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration ausgesetzt war, unterschieden werden muss. Der Zeitpunkt der ersten Insertion der Meshbags wurde in Klammern vermerkt.

**Tabelle 7: CO<sub>2</sub>-Reaktion in Bewurzelungsexperimenten**

Versuch	(Zeitpunkt), Expositionsdauer und CO <sub>2</sub> -Reaktion der Wurzel- Biomasse	Quelle
<b>Topfexperimente</b>		
<i>Trifolium repens</i> , Töpfe, Gewächshaus	58 Tage +	Jongen et al. 1996
<i>Plantago lanceolata</i> ., Töpfe, Gewächshaus	80 Tage +	Hui et al. 2002
<i>Prunella vulgaris</i> ., Töpfe, Gewächshaus	18 Wochen +100%	Sanders et al. 1998
<i>Lolium perenne</i> , Töpfe, Gewächshaus	26-66 Tage +49%	Nijs & Impens 1997
<i>Lolium perenne</i> , Töpfe, Swiss FACE	2,4,8 Wochen +109%	Suter et al. 2002
<i>Bromus h.</i> , Töpfe, OTC Jasper Ridge	4 Monate ns	Rillig et al. 1998
<i>Holcus lanatus</i> , Töpfe, Gewächshaus	2 Monate +135%	Barnard et al. 2005
2 Arten, Töpfe, Swiss FACE	4 Jahre +30%, +94%	Hartwig et al. 2002
2 Arten, Töpfe, Gewächshaus	8 Wochen +27%	Derner et al. 2001
2 Arten, Töpfe, Gewächshaus	43 Tage Lol.: -4 bis +107%, Trifol.: +66%	Schenk et al. 1995
2 Arten, Töpfe, Gewächshaus	56 Tage +/-ns	Wilsey, 2001
2 Arten, Töpfe, Gewächshaus	3 Monate 0	Volk et al. 2000
2 Arten, Töpfe, Gewächshaus	112 Tage +/-	Carter & Peterson 1983
3 Arten, Töpfe, Gewächshaus	+/-	Farnsworth & Bazzaz 1995
3 Arten, Töpfe, Gewächshaus	C <sub>3</sub> : +, C <sub>4</sub> : ns	Yoder et al. 2000
4 Arten, Töpfe, Gewächshaus	100 Tage +/-	Ferris & Taylor 1993
4 Arten, Töpfe, Gewächshaus	99 Tage +	Naeem et al. 1999
6 Arten, Töpfe, Gewächshaus	124-128 Tage +/-	Leadley & Stöcklin 1996
6 Arten, Töpfe, Gewächshaus	4-8 Monate +	Arp et al. 1998
8 Arten, Töpfe, Gewächshaus	118-172 Tage +	Thomas et al. 1999
10 Arten, Töpfe, Gewächshaus	4 Monate +	Staddon et al. 1999
14 Arten, Töpfe, Gewächshaus	2 Jahre +20-36%	Stöcklin & Körner 1999
32 Arten, Töpfe, Gewächshaus	4 Monate +22% (440), +12 % (600)	Grünzweig & Körner 2001
<b>Meshbags</b>		
2-Arten-Ansaat Swiss FACE	(Im 1. Jahr des Exp.) 2 Monate +	Jongen et al. 1995
7 Arten, Ansaat Swiss FACE	(Im 2. Jahr) 62 Tage +89%	Warwick et al. 1998
31 Arten, Ansaat, SACC Schweiz	(Im 2.+ 3. Jahr) 3-4 Mon. ns	Niklaus et al. 2001b
Grasland-Monolithe Gewächshaus Schweiz	(Im 3. Jahr) 4 Wochen ns	Niklaus et al. 2001a
OTC auf Marschland, 3 Arten untersucht	(Im 1.-4. Jahr) C <sub>3</sub> : bis zu +83%, C <sub>4</sub> : ns	Drake, 1992
OTC auf Marschland, 3 Arten untersucht	(Im 1.-8. Jahr) C <sub>3</sub> : +44%: 83 bis 0% (7. J)	Drake et al. 1996
OTC Kansas, Langgras-Prärie	(Im 2. Jahr) 5 Mon. +50%, 8 Mon. +17%	Owensby et al. 1993
OTC Kansas, Langgras-Prärie	(Im 2. Jahr) 5 Mon. +50%, 8 Mon. +17%	Owensby et al. 1994
OTC Kansas, Langgras-Prärie	(Im 2.-7. Jahr) 8 Mon. +41%*	Owensby et al. 1999
OTC Colorado, Kurzgras-Steppe	(Im 1.-5. Jahr) 12 Mon. +60%, (4. Jahr ns)	Milchunas et al. 2005
OTC Schweiz, Alpines Grasland	(Im 1.+ 2. Jahr) 12 Mon. +63%, +25%	Körner et al. 1996
OTC Schweiz, Alpines Grasland	(Im 2.+ 3. Jahr) 12 Mon. +43%	Schäppi & Körner 1996
OTC Jasper Ridge	(Im 3. Jahr) 1-4 Monate +	Higgins et al. 2002
OTC Uppsala, Ehemalige Weide	(Im 4. Jahr) 4 Monate +98%	Sindhøj et al. 2004
Bulls FACE, Weide	(Im 4. Jahr) 2 Wo-2 Mon. +10 bis +57%	Allard et al. 2005

Dargestellt sind Zunahme (+), fehlende Wirkung (0), Abnahme (-) der Parameter unter erhöhtem CO<sub>2</sub>, ggf. mit einer Größenangabe, „ns“ steht für nicht signifikant. Unterschiedliche (+/-) oder indifferente (0, ns) CO<sub>2</sub>-Reaktionen sind blau markiert, negative grün, positive rot, positive nicht-signifikante schwarz.

\* die Angabe +41% stammt aus (Jastrow et al. 2000), er zitiert dafür (Owensby et al. 1999).

In 9 von 23 Topfexperimenten reagierte die Wurzel-Biomasse unterschiedlich, nicht oder indifferent auf erhöhtes CO<sub>2</sub> und in 14 positiv. Die meisten der unterschiedlichen (+/-) CO<sub>2</sub>-Reaktionen traten in 2- bis 4-Artengemischen mit sowohl positiv als auch negativ reagierenden Arten auf. Einige Autoren (Carter & Peterson 1983, Farnsworth & Bazzaz 1995, Ferris & Taylor 1993) wiesen auf die artspezifische CO<sub>2</sub>-Reaktion der Wurzelbiomasse hin. Wurzel-Biomassen von Einzelpflanzen und von Gemischen von 6 oder mehr Arten reagierten dagegen überwiegend positiv. Bei Naeem et al. (1999) nahm die Wurzelbiomasse von 4-Arten-Ansaaten nach 99 Tagen unter 450 ppm stärker zu als von 1-, 2- und 3-Art-Gemischen. Die größte Zunahme der Wurzelbiomasse wurde bei Gemischen aus unterschiedlichen PFTs beobachtet (Naeem et al. 1999).

Die CO<sub>2</sub>-Reaktionen aus Bewurzelungsexperimenten mit Meshbags waren fast ausschließlich positiv, und zwar auch auf Versuchsfeldern, auf denen die CO<sub>2</sub>-Reaktion der etablierten Wurzel-Biomasse (Tabelle 6) indifferent bzw. negativ ausfiel, z.B. in den OTC in der Schweiz (Schäppi & Körner 1996) und im Bulls FACE (Allard et al. 2005).

Die Ergebnisse zur CO<sub>2</sub>-Reaktion der Wurzelbiomasse hingen demzufolge also stark von der Art der Probenahme ab. Zylinderproben von natürlichen Flächen zeigten nur in 30 % der Versuche eine signifikant erhöhte Wurzelbiomasse unter erhöhtem CO<sub>2</sub>, Topfexperimente in ca. 40 % der Versuche, Ansaaten und Meshbags ergaben unter erhöhtem CO<sub>2</sub> in ca. 80 % der Versuche eine Zunahme der Wurzelbiomasse. Die Wurzelbiomasse eines intakten Systems reagierte demzufolge dann stark positiv auf erhöhtes CO<sub>2</sub>, wenn freie Wurzelräume angeboten wurden (Meshbags). Ähnlich groß war der Unterschied in der Besiedlung der Wurzelräume zwischen den begasten und unbegasten Flächen in *Ansaaten* mit längerer Versuchsdauer und Beprobung mit Zylindern. In Topfversuchen, deren Wurzelbiomasse nach einigen Tagen bis Monaten Versuchsdauer komplett geerntet wurde, waren die Unterschiede zwischen unbegasten und begasten Flächen gering. In bereits bewurzelten Räumen war die Zunahme der Wurzelbiomasse unter erhöhtem CO<sub>2</sub> ebenfalls nicht sehr groß.

## *CO<sub>2</sub>-Reaktionen der Wurzellänge*

CO<sub>2</sub>-Reaktionen der Wurzellängen, Wurzeldicken und Beobachtungen zu Wurzeltiefen von Grasland-Arten oder Grasländern sind in der Literatur nur sehr spärlich zu finden. Erhöhtes CO<sub>2</sub> bewirkte meistens eine Verlängerung der Wurzeln, oft schon nach kurzer Zeit.

## *CO<sub>2</sub>-Reaktionen der Bestandswurzellänge*

Die Bestandswurzellänge (root length density = RLD) ist die Wurzellänge bezogen auf das Bodengewicht. Sie wird durch erhöhtes CO<sub>2</sub> üblicherweise gefördert (Tabelle 8).

**Tabelle 8: CO<sub>2</sub>-Reaktion der RLD**

Versuch	(Zeitpunkt), Expositionsdauer und CO <sub>2</sub> -Reaktion der RLD	Quelle
<i>Bromus hord.</i> , Töpfe, OTC Jasper Ridge	4 Monate ns	Rillig et al. 1998
<i>Bromus</i> , <i>Lotus</i> Töpfe, OTC Jasper Ridge	4 Jahre <i>Lotus</i> +, <i>Bromus</i> 0-15cm +, 15-45 ns	Rillig & Field 2003
<i>Holcus lanatus</i> , Töpfe, Gewächshaus	2 Monate +	Barnard et al. 2005
<i>Plantago lanceolata</i> , Töpfe, Gewächshaus	104 Tage +	Rouhier & Read 1998
<i>Schizachyrium</i> , <i>Andropogon</i> , Töpfe, Gew.	8 Wochen + 39-52%	Derner et al. 2001
4 Arten, Töpfe, Gewächshaus	100 Tage +/-	Ferris & Taylor 1993
10 Arten, Töpfe, Gewächshaus	4 Monate +	Staddon et al. 1999
<i>Larrea tridentata</i> , Töpfe, Gewächshaus	6 Monate +20%	Obrist & Arnone 2003
OTC Jasper Ridge	3 Jahre ns, 6 J.: <i>Serpentin</i> +78, <i>Sandstein</i> ns	Rillig et al. 1999b
OTC Jasper Ridge	3 Jahre ns	Higgins et al. 2002
MEGARICH MiniFACE, Italien	2 Jahre +, (in 15-30cm signifikant)	Marchi et al. 2004
OTC Colorado, Kurzgras-Steppe	5 Jahre +/-ns	LeCain et al. 2006
2-Arten-Ansaat Swiss FACE (Meshbags)	(Im 1. Jahr des Exp.) 2 Monate +	Jongen et al. 1995
7 Arten, Ansaat Swiss FACE (Meshbags)	(Im 2. Jahr) 62 Tage +77%	Warwick et al. 1998
OTC Jasper Ridge (Meshbags)	(Im 3. Jahr) 1-4 Monate ns	Higgins et al. 2002
OTC Jasper Ridge (Minirhizotron)	3. Jahr + ns	Higgins et al. 2002
SACC Schweiz, ehemalige Weide (Minirh)	1.-2. Jahr ns	Arnone et al. 2000
OTC Jasper Ridge (Minirhizotron)	6. Jahr ns ( <i>Sandstein</i> )	Rillig et al. 1999b
Grasland-Monolithe Gewächshaus (Glas)	217 Tage +	Newton et al. 1996

Dargestellt sind Zunahme (+), fehlende Wirkung (0), Abnahme (-) der RLD unter erhöhtem CO<sub>2</sub>, ggf. mit einer Größenangabe, „ns“ steht für nicht signifikant. Unterschiedliche (+/-) oder indifferente (0, ns) CO<sub>2</sub>-Reaktionen sind blau markiert, negative grün, positive rot, positive nicht-signifikante schwarz.

Die RLD zeigte in Zylinderproben aus natürlichen Flächen sowohl Zunahmen (Marchi et al. 2004, Staddon et al. 2004) als auch unveränderte Werte (Higgins et al. 2002). Gleiches gilt für Meshbags (Zunahmen bei Sindhøj et al. 2004 und Jongen et al. 1995, unveränderte Werte bei Higgins et al. 2002), Topfexperimente (Zunahmen bei Derner et al. 2001 und Rouhier & Read 1998, unveränderte Werte bei Rillig et al. 1998) und Mini-Rhizotrone (Zunahmen bei Sindhøj et al. 2000, unveränderte Werte bei Higgins et al. 2002 und Arnone et al. 2000).

Die Methode der Probenahme hat, im Gegensatz zur Wurzelbiomasse, bei der RLD offensichtlich keinen großen Einfluss auf das Ergebnis, ebenso wie die Höhe der CO<sub>2</sub>-Begasung, die Nutzung und das Applikationssystem (Tabelle 31).

### ***CO<sub>2</sub>-Reaktionen der Spezifischen Wurzellänge***

Die spezifische Wurzellänge (specific root length = SRL) ist die Wurzellänge bezogen auf das Gewicht der Wurzel. Eine Verlängerung der Wurzel führt nur dann zu einer steigenden SRL, wenn dabei die Dicke der Wurzel nicht ebenso zunimmt. Ryser (1998) beschrieb in einem Versuch mit *Dactylis glomerata* und *Brachypodium pinnatum*, dass *Dactylis* unter Nährstoffentzug mehr Feinwurzeln produzierte und die SRL anstieg, *Brachypodium* dagegen sowohl mehr feine als auch mehr grobe Wurzeln produzierte und die SRL demzufolge gleich blieb. Unter erhöhtem CO<sub>2</sub> wird meist von fehlender Reaktion oder Abnahme der SRL berichtet (Tabelle 9).

**Tabelle 9: CO<sub>2</sub>-Reaktion der SRL**

Versuch	(Zeitpunkt), Expositionsdauer und CO <sub>2</sub> -Reaktion der SRL	Quelle
<i>Carex, Bromus</i> , Töpfe, Gewächshaus	ns	Volk & Körner 2001
4 Arten, Töpfe, Gewächshaus	100 Tage: 3 Arten ns, <i>Plantago lanceolata</i> +	Ferris & Taylor 1993
10 Arten, Töpfe, Gewächshaus	4 Monate – (ns)	Staddon et al. 1999
<i>Trifolium repens</i> Töpfe, Gewächshaus	58 Tage –	Jongen et al. 1996
<i>Lolium, Trifolium</i> Ansaat Swiss FACE	10 Jahre ns	Staddon et al. 2004
OTC Jasper Ridge (Grasland)	6 Jahre: Serpentin +, Sandstein –	Rillig et al. 1999b
SACC Schweiz (Grasland)	4 Jahre ns	Leadley et al. 1999
<i>Lolium, Trifolium</i> Swiss FACE (Meshb.)	(Im 1. Jahr des Exp.) 2 Monate ns (Trif.)	Jongen et al. 1995
OTC Uppsala (Meshbags)	(Im 4.+5. Jahr) 4 Monate ns	Sindhøj et al. 2004
OTC Jasper Ridge (Minirhizotron)	3. Jahr ns	Higgins et al. 2002
SACC Schweiz, ehemalige Weide (Minirh)	1.-2. Jahr ns	Arnone et al. 2000
OTC Jasper Ridge (Minirhizotron)	6. Jahr ns (Sandstein)	Rillig et al. 1999b

Dargestellt sind Zunahme (+), fehlende Wirkung (0), Abnahme (–) der RLD unter erhöhtem CO<sub>2</sub>, ggf. mit einer Größenangabe, „ns“ steht für nicht signifikant. Unterschiedliche (+/-) oder indifferente (0, ns) CO<sub>2</sub>-Reaktionen sind blau markiert, negative grün, positive rot, positive nicht-signifikante schwarz.

Eine Zunahme der SRL wurde nur in zwei Versuchen auf Grasland unter erhöhtem CO<sub>2</sub> beobachtet: in Zylinderproben aus OTCs auf Grünland über Serpentin nach 6 Jahren unter 680 ppm (Rillig et al. 1999b) und bei einer Art eines 4-Arten-Gemisches in Töpfen nach 100 Tagen im Gewächshaus (Ferris & Taylor 1993). In Meshbags wurden keine signifikanten Veränderungen der SRL gefunden. Unveränderte Werte wurden jedoch bei allen Probemethoden, Applikationssystemen, CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und Nutzungsformen beobachtet.

## ***CO<sub>2</sub>-Reaktionen der Wurzel Dicke***

Untersuchungen der Wurzel Dicke unter erhöhtem CO<sub>2</sub> sind selten durchgeführt worden. Rogers et al. (1997) resümierten eine meist positive CO<sub>2</sub>-Reaktion der Wurzel Dicke. Ferris & Taylor (1993) beobachteten nach 100 Tagen unter 590 ppm bei *Plantago lanceolata* längere und dünnere Wurzeln. Im OTC-Versuch in Uppsala auf einer ehemaligen Weide war die Wurzel Dicke unter 700 ppm nach 4 Monaten unverändert (Sindhøj et al. 2004). In Zylinderproben aus natürlichen Flächen wurden Zunahmen (Rillig et al. 1999b, auf Sandstein, Higgins et al. 2002), unveränderte Werte (LeCain et al. 2006, Staddon et al. 2004) oder Abnahmen (Rillig et al. 1999b, auf Serpentin) beobachtet. Auch Meshbags und Topfexperimente ergaben unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Reaktionen. Die Methode der Probenahme hat für die Wurzel Dicke - ebenso wie die RLD, jedoch im Gegensatz zur Wurzelbiomasse - offensichtlich keinen großen Einfluss auf das Ergebnis. Gleiches gilt für die Höhe der CO<sub>2</sub>-Begasung, die Nutzung und das Applikationssystem (Tabelle 31).

## ***Wurzeltiefe***

Die vertikale Verteilung der Wurzeln wurde durch erhöhtes CO<sub>2</sub> in vielen Versuchen nicht signifikant verändert (Wechsung et al. 1995, Suter et al. 2002 und Pendall et al. 2004). Dennoch reagierten in anderen Versuchen (Tabelle 10) die Wurzeln in unterschiedlichen Wurzeltiefen verschieden stark auf erhöhtes CO<sub>2</sub>.

**Tabelle 10: CO<sub>2</sub>-Reaktion in unterschiedlichen Tiefen**

Versuch	CO <sub>2</sub> -Reaktion in unterschiedlichen Tiefen	Quelle
OTC Colorado, Kurzgras-Steppe	5-10cm +23%, darüber und darunter geringer	Pendall et al. 2004
<i>Bromus</i> , <i>Lotus</i> Töpfe, OTC Jasper Ridge	0-15cm +, 15-45cm ns	Rillig & Field 2003
MEGARICH MiniFACE, Italien	15-30cm +, 0-15cm + (ns)	Marchi et al. 2004
Grasland-Monolithe Solardome UK	10-15cm +, 0-10 sowie 15-20cm ns	Fitter et al. 1997
SACC Schweiz, ehemalige Weide	0-6cm +, darunter weniger	Arnone et al. 2000

Dargestellt sind Zunahme (+), fehlende Wirkung (0), Abnahme (-) der RLD unter erhöhtem CO<sub>2</sub>, ggf. mit einer Größenangabe, „ns“ steht für nicht signifikant. Unterschiedliche (+/-) oder indifferente (0, ns) CO<sub>2</sub>-Reaktionen sind blau markiert, negative grün, positive rot, positive nicht-signifikante schwarz.

In einigen Experimenten reagierte die Wurzelbiomasse (bei Rillig & Field: RLD) der obersten 10 cm stärker als die der unteren Schichten, in anderen Versuchen war es umgekehrt. Dobrowolski et al. (1990) wiesen darauf hin, dass die Wurzeltiefe und die laterale Ausbreitung der Wurzeln stark von den jeweiligen Bodenverhältnissen abhängt, die demnach bei Vergleichen berücksichtigt werden müssen.

### 1.3 Der Einfluss von Feuchte und Zeit auf die CO<sub>2</sub>-Reaktion

#### *Feuchte*

Die Wasserverhältnisse (Klima, Niederschlag) eines Ökosystems können die CO<sub>2</sub>-Reaktion beeinflussen. So berichteten Owensby et al. (1999) von einer Zunahme der oberirdischen Biomasse unter erhöhtem CO<sub>2</sub> in trockenen Jahren. Auch in den OTCs in Uppsala (Sindhøj et al. 2000) erhöhte sich die oberirdische Biomasse unter 700 ppm CO<sub>2</sub> im trockenen Jahr um 65 %, im darauf folgenden feuchten Jahr gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen begasten und unbegasten Flächen.

Ein Vergleich von Freiland-Versuchen unterschiedlicher Wasserhaushalte von (Morgan et al. 2004b) ergab unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Reaktionen; in den Grasländern der OTC-Versuche auf der Langgras-Prärie in Kansas und der Kurzgras-Steppe in Colorado sowie des SACC in der Schweiz war die Zunahme der oberirdischen Biomasse unter erhöhtem CO<sub>2</sub> in trockenen Jahren größer, im Tunnel-Experiment in Texas und im FACE der Weide in Neuseeland unterschieden sich die oberirdischen Biomassen feuchter und trockener Jahre nicht und im FACE der Mojave Desert war der Effekt von erhöhtem CO<sub>2</sub> in feuchten Jahren größer als in trockenen Jahren. Im trockenen Jahr 1999 erfolgte im Mojave Desert FACE keine Förderung der Biomasse unter 537 ppm CO<sub>2</sub>, im feuchten Jahr 1998 nahm die Gesamtbiomasse um 40 % zu (Smith et al. 2000). Volk & Körner (2001) fanden nach 15 bzw. 24 Tagen unter 600 ppm einen ca. 4-fachen, aber nicht signifikanten, nach 60 Tagen einen signifikanten Zuwachs der Biomasse von *Carex* (+35 %) und *Bromus* (+28 %). Volk et al. (2000) schlossen aus einem Vergleich der Ergebnisse mit Leadley et al. (1999), die für *Carex* und *Bromus* im Feuchten einen Zuwachs der oberirdischen Biomasse um +249 % und +33 % beschrieben und eigenen Ergebnissen (im Trocken für *Carex* +102 % und für *Bromus* +42 %), dass der CO<sub>2</sub>-Effekt von einem CO<sub>2</sub>-induzierten Wasserspar-Effekt überlagert wurde.

Durch erhöhtes CO<sub>2</sub> können wiederum die Wasserverhältnisse beeinflusst werden. Die geringere Transpiration durch weniger weit geöffnete Stomata unter erhöhtem CO<sub>2</sub> (Riedo et al. 1999) und die damit verbundene Erhöhung der Bodenfeuchte ist in der Literatur an vielen Stellen beschrieben worden (Niklaus et al. 1998, Nelson et al. 2004, Morgan et al. 2004b). In der vorliegenden Arbeit wurde die Bodenfeuchte in der Auswertung berücksichtigt.

## **Zeit**

Die Zeit spielt eine wichtige Rolle bei der Bewertung der CO<sub>2</sub>-Reaktionen, und zwar sowohl als Einflussgröße über einen Untersuchungszeitraum als auch als saisonale Einflussgröße. Zunächst fällt die sehr unterschiedliche Versuchsdauer der CO<sub>2</sub>-Experimente auf.

### ***Kurzzeit versus Langzeit-Untersuchungen***

Newton et al. (2001b) stellten ein Modell vor, das zeigt, dass Kurzzeit-Reaktionen auf erhöhtes CO<sub>2</sub> von den realen CO<sub>2</sub>-Reaktionen nach Einstellen eines Gleichgewichts abweichen. Sie verglichen die positiven CO<sub>2</sub>-Reaktionen in Langzeit-Untersuchungen (einige Dekaden, mdl. Mitteilung Newton 2005) mit weniger positiven bzw. teilweise negativen Effekten in Kurzzeit-Experimenten (147 Tage, mdl. Mitteilung Newton 2005). Schimel (1995) berichtete dagegen von geringeren CO<sub>2</sub>-Reaktionen in Langzeit-Experimenten im Vergleich zu Kurzzeit-Experimenten. Auch Versuche von Suter et al. (2001) ergaben eine um 46 % erhöhte Wurzelbiomasse nach 2 Wochen unter 600 ppm im Swiss FACE; nach 4 Wochen war die Biomasse auf den begasten Flächen gegenüber den unbegasten jedoch nur noch um 20 % erhöht und nach 8 Wochen, am Ende des Versuchs, gab es keine Unterschiede mehr. In einem Gewächshausversuch mit 14 Graslandarten nahm die oberirdische Biomasse innerhalb des ersten Monats nach Beginn der Begasung (600 ppm) zu, innerhalb eines Jahres ging dieser Effekt jedoch auf Null zurück (Hanley et al. 2004). Auch bei Norton et al. (1999b) nahm die Biomasse einer *Agrostis curtisii*-Ansaat im ersten Jahr unter +340 ppm im Solardome in Bangor, UK, zu. Nach 7 Jahren ging dieser Zuwachs jedoch bis auf Null zurück. In einem Tunnel-Experiment mit CO<sub>2</sub>-Gradienten von 200 bis 560 ppm erhöhte sich die oberirdische Biomasse in den ersten beiden Jahren stark, danach war sie weniger stark erhöht (Polley et al. 2003). Stock et al. (2005) berichteten von Beobachtungen in der Nähe einer natürlichen CO<sub>2</sub>-Quelle mit ca. 610 ppm CO<sub>2</sub> auf tropischem Grasland, dass nach 5 Jahren keine Förderung von C<sub>3</sub>-Gräsern gegenüber C<sub>4</sub>-Gräsern zu verzeichnen war und folgerten daraus, dass die häufig zitierte Förderung von C<sub>3</sub>-Gräsern gegenüber C<sub>4</sub>-Gräsern unter erhöhen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ein Artefakt sei, der unter Langzeit-CO<sub>2</sub>-Begasung verschwindet.

Im Gegensatz zu den häufig beschriebenen Abnahmen des CO<sub>2</sub>-Effekts mit fortschreitender Versuchsdauer wird jedoch auch von einigen (wenigen) gegenteiligen Beobachtungen

berichtet: im Jasper Ridge FACE hatten erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in den ersten beiden Jahren keinen signifikanten Einfluss auf die Biomasse, im dritten Jahr erhöhte sich die Biomasse auf den CO<sub>2</sub>-Flächen (Shaw et al. 2002); in den OTCs in Uppsala beobachteten (Sindhøj et al. 2004) einen Anstieg der Wurzelbiomasse von +28 % im ersten auf +78 % im 5. Jahr des Experiments.

Die Biomasse-Ergebnisse der Tabelle 6 und Tabelle 7 zeigen keine von der Dauer des Experiments abhängige CO<sub>2</sub>-Reaktion; für 1-jährige bis 5-jährige Versuche überwog durchgehend und gleichmäßig eine positive CO<sub>2</sub>-Reaktion der Wurzelbiomasse gegenüber einer nicht-signifikanten. Gleiches gilt für Versuche mit weniger als ein Jahr Laufzeit. Versuche mit einer Versuchsdauer über 5 Jahren zeigten unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Reaktionen, die von nicht signifikant verändert (Matamala & Drake 1999, 8 Jahre Zylinderproben), Abnahme der CO<sub>2</sub>-Reaktion von 83 % auf 0 % (Drake et al. 1996, 8 Jahre Meshbags), Zunahme um 40-46 % (Jastrow et al. 2000, im 8. Jahr, Zylinderproben), durchschnittlich +41 % jedoch 4. und 5. Jahr nicht signifikant (Owensby et al. 1999, 2. bis 7. Jahr Meshbags) bis +49 % (Rillig et al. 1999b, im 6. Jahr Zylinderproben) variierten.

Möglicherweise reicht auch die Zeit von 5 Jahren für das Einstellen eines neuen Gleichgewichts unter erhöhtem CO<sub>2</sub> noch nicht aus. So schlossen Rasse et al. (2005) aus einem 17-jährigen CO<sub>2</sub>-Experiment auf Marschland, das eine Versuchsdauer von 3-7 Jahren nicht ausreicht, um einen Langzeit-Trend abschätzen zu können. Da viele Experimente nach drei Jahren (oder eher) abgeschlossen werden, ergibt sich eventuell ein zu positives Bild von der Biomassezunahme unter erhöhtem CO<sub>2</sub>. Nur weitere Langzeituntersuchungen können hier mehr Klarheit schaffen.

### ***Saisonalität***

Wurzeldichten variieren nicht nur räumlich, sondern auch zeitlich, wie Casper & Jackson (1997) in einem Review darstellten. Gamper et al. (2004) wiesen auf mögliche Unterschiede in den Entwicklungsphasen zum Erntezeitpunkt hin. Mortensen & Sæbø (1996) verzeichneten keine veränderte oberirdische Biomasse an *Phleum pratense* nach 28 Tagen unter 650 ppm CO<sub>2</sub> im Mai und im September, die 28 Tage alten Pflanzen in den Monaten Juni bis August erhöhten ihre Biomasse dagegen um 14-51 %. Auch die Wurzelbiomasse des natürlichen



Graslandes im OTC-Versuch in Uppsala (Sindhøj et al. 2000) zeigte eine klare Saisonalität mit einem Höchststand im frühen Sommer, der über Spätsommer und Winter wieder abnahm.

Die Zu- und Abnahmen der Biomassen unter erhöhtem CO<sub>2</sub> im Verlauf der Jahre sind von zusätzlichen Parametern, z.B. von der Pflanzenart, dem Bodentyp, der Ernährung, dem Licht, dem Wasser und dem Alter der Pflanze (Körner 2003) abhängig. Die Effekte dieser Parameter sind oft gegenläufig, so dass keine CO<sub>2</sub>-Reaktion gefunden wird wenn Parameter gemittelt oder zu wenig differenziert untersucht werden (Tabelle 6 und Tabelle 7).

Zeitabhängige Entwicklungen der *einzelnen* Flächen unter erhöhtem CO<sub>2</sub> sind oft so prägnant, dass sich Ergebnisse aus einzelnen Experimenten nicht auf mehrere Jahre extrapolieren lassen. Deswegen muss der Einfluss der Jahre bei den Analysen berücksichtigt werden. Um saisonbedingte Einflüsse der CO<sub>2</sub>-Reaktion zu erfassen, sollten die Flächen mehrmals im Jahr, möglichst zu gleichen Zeitpunkten beprobt werden. Weniger sicher sind dagegen einmalige Biomasse-Bestimmungen am Ende eines Experiments.

In der vorliegenden Arbeit wurden die Wurzeluntersuchungen über mehrere Jahre jeweils zu gleichen Zeitpunkten im Jahr durchgeführt, um saisonale Schwankungen erfassen und gegen Trends abgrenzen zu können.

## 1.4 Gegenstand der Arbeit

Die vorliegende Arbeit weist folgende Schwerpunkte auf:

1. Die Veränderungen der Pflanzengemeinschaft in einem CO<sub>2</sub>-Anreicherungsversuch von acht Jahren Dauer werden beschrieben und ausgewertet.

Zu diesem Zweck wurde die Biomasse der funktionellen Pflanzentypen (PFTs) Gräser, Kräuter und Leguminosen bestimmt, die Deckungen der Arten geschätzt und die Flächen unter CO<sub>2</sub> mit Kontrollflächen hinsichtlich dieser Parameter sowie Artenzahl, Evenness und Diversität verglichen.

2. Es wird ein Ansatz vorgestellt, der es möglich macht, *Gründe* für die artspezifischen CO<sub>2</sub>-Reaktionen herauszuarbeiten.

Arten ähnlicher CO<sub>2</sub>-Reaktion wurden zu *a posteriori*-PFTs zusammengefasst, um auf ein der CO<sub>2</sub>-Reaktion zugrunde liegendes Muster schließen zu können.

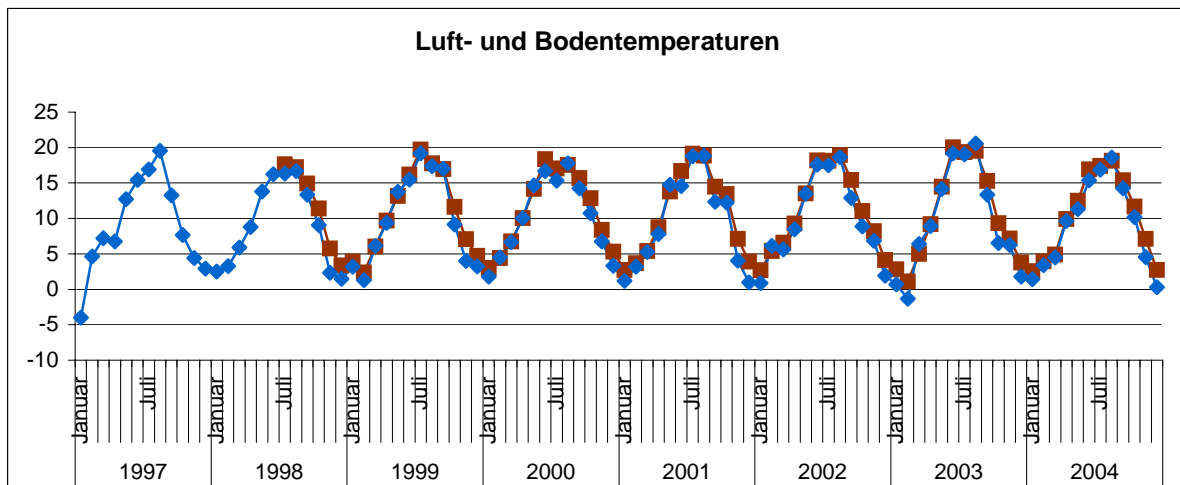
3. Die CO<sub>2</sub>-Reaktion des intakten Wurzelraumes (aus mit Zylindern gezogenen Proben) und einem Bewurzelungsexperiment (aus zuvor eingegrabenen, mit gesiebttem Boden gefüllten Meshbags) werden miteinander verglichen.

Dazu wurden die Wurzelbiomasse sowie die Parameter Wurzellänge (RLD und SRL) und Wurzeldicke aus unterschiedlichen Bodentiefen ermittelt.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Beschreibung der Versuchsfächen

Die Versuchsfäche Linden liegt südlich des Giessener Stadtwaldes in einer Talau des Lückebacks, auf 50°32' Nord und 8°41,3' Ost und einer Höhe von 172 m ü. NN. Sie gehört dem Naturraum Großen Lindener Hügelland und damit dem Marburg-Gießener Lahntal und dem Westhessischen Berg- und Senkenland an (Klausing 1988). Der Bodentyp ist ein Auenboden-Pseudogley aus holozänen Auensedimenten über miozänen Tonen (Grünhage et al. 1996). Die Temperaturen für die Jahre 1997-2004 sind in Abbildung 2 dargestellt.

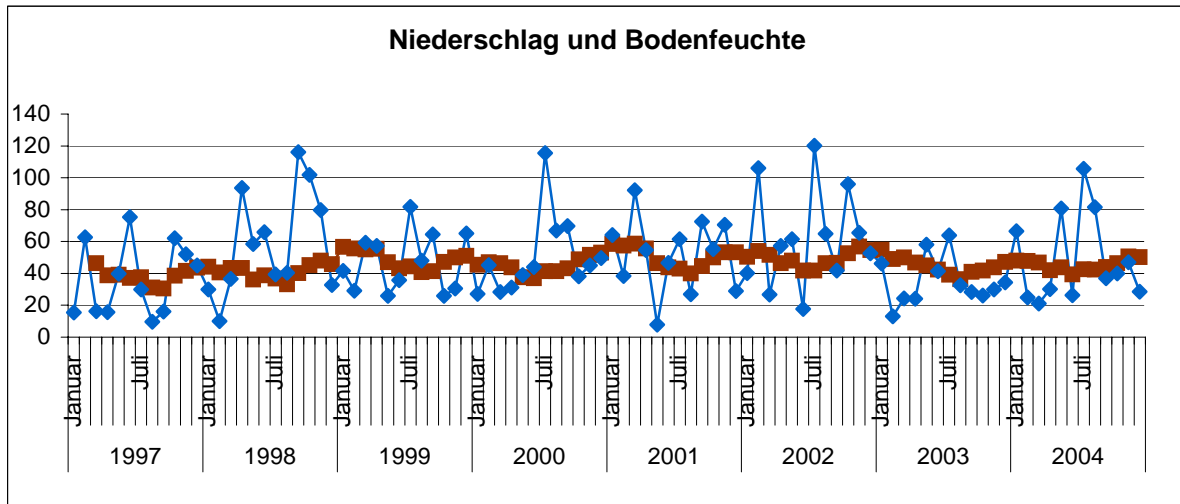


**Abbildung 2: Luft- und Bodentemperaturen im Giessen FACE in den Jahren 1997-2004**

Dargestellt sind die Monatsmittelwerte der Lufttemperaturen (blaue Rauten) und der Bodentemperaturen (Mittelwerte aller Flächen, aus 10 cm Tiefe, braune Kästchen).

Die Boden- und Lufttemperaturen für die Jahre 1997-2004 lagen nahezu deckungsgleich übereinander. Als markante Werte fallen die niedrigen Wintertemperaturen 1997 und 2003 sowie weniger hohe Sommertemperaturen 1998, 2000 und 2004 auf.

Die Niederschläge unterlagen dagegen wesentlich größeren Schwankungen als die Bodenfeuchten für die Jahre 1997-2004 (Abbildung 3). Hier fallen der extrem trockene Sommer 2003 sowie die relativ trockenen Sommer 1997 und 1999 auf. Für die Auswertungen wurden die Bodenfeuchten verwendet.



**Abbildung 3: Niederschlag und Bodenfeuchte im Giessen FACE in den Jahren 1997-2004**

Dargestellt sind die Monatsmittelwerte der Niederschläge (blaue Rauten) und der Bodenfeuchten (Mittelwerte aller Flächen, aus 0-15 cm Tiefe, braune Kästchen).

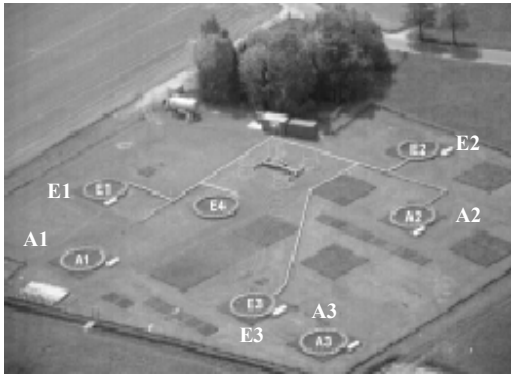
Die Pflanzengemeinschaft der Fläche kann als frische bis feuchte Glatthaferwiese, *Arrhenatheretum elatioris*, *Filipendula ulmaria*-Untereinheit (Rodwell et al. 1992) bezeichnet werden. Die Arten *Arrhenatherum elatius* (Glatthafer), *Holcus lanatus* (Wolliges Honiggras) und *Galium mollugo* (Wiesenlabkraut) dominieren den Bestand. Tabelle 11 zeigt die Artenliste der untersuchten Versuchsfelder für den Zeitraum von 1997 bis 2005.

**Tabelle 11: Artenliste der Versuchsfelder, Werte für die Jahre 1997-2005**

Wissenschaftlicher Artname	Deckung (%)	Stetigkeit (%)	Wissenschaftlicher Artname	Deckung (%)	Stetigkeit (%)
<b>Gräser</b>			<b>Kräuter</b>		
<i>Arrhenatherum elatius</i>	39,71	100,00	<i>Galium mollugo</i>	30,98	100,00
<i>Holcus lanatus</i>	16,23	99,07	<i>Sanguisorba officinalis</i>	1,85	87,50
<i>Trisetum flavescens</i>	6,56	98,15	<i>Plantago lanceolata</i>	1,06	70,83
<i>Dactylis glomerata</i>	4,26	96,30	<i>Rumex acetosa</i>	0,43	58,33
<i>Festuca rubra</i> agg.	2,14	95,37	<i>Geranium pratense</i>	3,35	53,24
<i>Poa trivialis</i>	2,92	84,26	<i>Ranunculus acris</i>	0,11	37,96
<i>Poa pratensis</i>	1,78	83,33	<i>Saxifraga granulata</i>	0,17	32,87
<i>Alopecurus pratensis</i>	4,17	81,02	<i>Cardamine pratensis</i>	0,19	27,78
<i>Lolium perenne</i>	0,23	30,09	<i>Glechoma hederacea</i>	0,41	27,31
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	0,16	22,22	<i>Filipendula ulmaria</i>	0,36	24,07
<i>Festuca pratensis</i>	0,07	19,91	<i>Galium verum</i>	0,03	7,87
<i>Agrostis tenuis</i>	0,06	17,59	<i>Taraxacum officinale</i> agg.	0,01	6,48
<i>Bromus hordeaceus</i>	0,07	8,33	<i>Ranunculus auricomus</i>	0,01	4,17
<i>Agropyron repens</i>	0,04	6,02	<i>Crepis biennis</i>	0,01	4,17
<i>Deschampsia cespitosa</i>	0,03	4,17	<i>Cerastium holosteoides</i>	0,02	3,70
<i>Phleum pratense</i>	0,01	3,24	<i>Achillea millefolium</i>	0,03	3,24
<i>Avenochloa pubescens</i>	0,03	2,78	<i>Leucanthemum vulgare</i>	0,03	3,24
<i>Agrostis stolonifera</i>	0,01	1,85	<i>Ajuga reptans</i>	0,02	2,78
<b>Leguminosen</b>					
<i>Lathyrus pratensis</i>	2,66	64,81			
<i>Lotus corniculatus</i>	0,01	1,85			

## 2.2 Das Experiment

In einem Vorversuch wurden 1993-1995 auf 16 Flächen von 100 m<sup>2</sup> Größe Vegetationsaufnahmen, Ernten und Bodenfeuchtemessungen durchgeführt, um 1997 die 2 x 3 Versuchsflächen mit den paarweise ähnlichsten Pflanzensammensetzungen, Biomasseerträgen und Bodenfeuchten für jeweils FACE-Versuchs- und Kontrollfläche einrichten zu können. Die leichte Neigung des Versuchsgeländes nach Norden bewirkt einen Feuchtegradienten, so dass ein trockeneres, ein feuchteres und ein mittelfeuchtes Flächenpaar für die CO<sub>2</sub>-Begasung ausgesucht wurde. Alle Flächen wurden von 1993 bis 1995 mit 80 kg N ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> und ab 1996 mit 40 kg N ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> in jedem Frühjahr gedüngt (granuläres CaNH<sub>4</sub>(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>, und 600 kg ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> 10 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + 15 % K<sub>2</sub>O + 3 % MgO; 33 % CaO + MgO).



Die Installation der CO<sub>2</sub>-Ringe erfolgte 1997. 6 Ringe mit je 8 m Durchmesser wurden installiert; die drei Kontrollringe (A1, A2, A3 für trocken, feucht, mittel) erhielten denselben Aufbau wie die CO<sub>2</sub>-Ringe (E1, E2, E3 für trocken, feucht, mittel). Die Aufteilung der CO<sub>2</sub>-Ringe und Kontrollen sind in Bild 1 dargestellt.

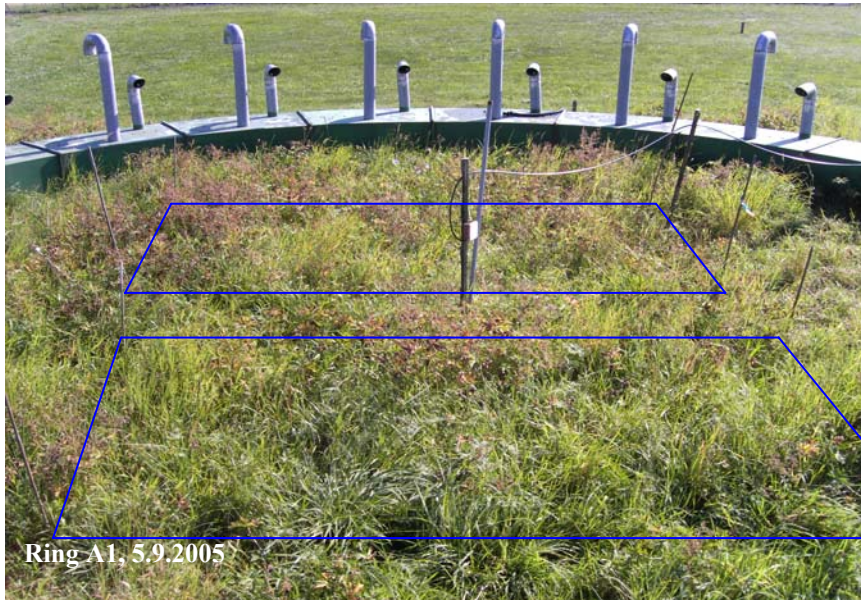
**Bild 1: Lage der CO<sub>2</sub>-Ringe und Kontrollen**

Der Hauptversuch begann im Mai 1998. Die CO<sub>2</sub>-Flächen erhalten eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von 20 % über der Umgebungsluft. Das CO<sub>2</sub> tritt an der dem Wind zugewandten Seite des Ringes aus 12 Pfeifen aus und streicht mit der Windrichtung über die Versuchsfläche. Die Windrichtung und CO<sub>2</sub>-Konzentration wird in Abständen von 1 Sekunde reguliert. Weitere Details zum Versuchsaufbau sind in Jäger et al. (2003) beschrieben. Die Begasung erfolgt das gesamte Jahr hindurch, von zwei Stunden nach Sonnenaufgang bis zwei Stunden vor Sonnenuntergang, denn nachts bildet sich in der Senke der Talau ein CO<sub>2</sub>-Gradient über der Vegetation mit einer in Bodennähe weit höheren CO<sub>2</sub>-Konzentration als in den E-Ringen appliziert wird. Die Luftbewegung bei der Begasung würde diesen natürlichen Gradienten zerstören (Pinter et al. 2000).

Die Bodenfeuchte wurde täglich in 0-15 cm Tiefe mit 4 TDR-Sensoren pro Ring gemessen (Abbildung 3).

## 2.3 Die Untersuchung der Pflanzengemeinschaft

### 2.3.1 Probenahmen



**Bild 2: Lage der Aufnahmeflächen in den Ringen**

Zweimal im Jahr, jeweils in der Woche vor Ernte der Biomasse, wurde auf zwei festgelegten, 4,5 m<sup>2</sup> großen Parzellen pro Ring (blaue Linien im Bild) eine Vegetations-Aufnahme nach Braun-Blanquet (1964) durchgeführt. Es ergeben sich insgesamt 12 Aufnahmen pro Aufnahmetermin (je 2 Flächen in 6 Ringen). Die Biomasse wurde nach Gräsern, Kräutern und Leguminosen getrennt, getrocknet und gewogen (Kammann et al. 2005).

### 2.3.2 Berechnungen

Für alle Berechnungen wurden die Ergebnisse der beiden Flächen pro Ring zusammengefasst und nach folgendem Schema in die Deckungsklassen nach Braun-Blanquet (1964) in %-Deckungen überführt:

Braun-Blanquet	r	+	2m	2a	2b	3	4	5
%-Deckungen	0,1	0,5	1	10	20	37,5	62,5	87,5

## Vergleichende Beobachtungen

### Artenzahl, Deckung, Diversität und Evenness

Für die Darstellung der Artenzahl, Deckung, Diversität und Evenness wurden die Sommer- und Herbstwerte zu Jahreswerten zusammengefasst. Die Artenzahlen ( $S$ ) und Deckungen wurden für die Berechnungen der Diversität ( $H$ ) und Evenness ( $E$ ) verwendet. Die Abfolge von  $S$  über  $H$  nach  $E$  stellt einen Gradienten mit abnehmender Gewichtung der Artenzahl dar.

Die **Artenzahl** einer Fläche ist die Anzahl der Arten, die innerhalb eines Jahres auf einer Versuchsfläche beobachtet worden ist.

Die **Deckung** einer Fläche ist der Anteil der Fläche, der bei senkrechter Projektion auf diese Fläche durch Pflanzenteile bedeckt ist. In der vorliegenden Arbeit wurden nicht Gesamtdeckungen einer Fläche, sondern Deckungen einzelner Arten oder funktioneller Gruppen (Gräsern, Kräutern, Leguminosen) verwendet. Die Summe dieser Einzeldeckungen übersteigt im Allgemeinen die Gesamtdeckung, weil sich die Pflanzenteile im Gelände überlappen.

Die **Diversität** beruht auf der Artenzahl einer bestimmten Fläche und der Verteilung der Deckungen der Arten. Die Diversität  $H$  der Deckungen der einzelnen Arten wurde mit dem SHANNON-WEAVER-Index ermittelt (nach ODUM 1983, verändert):

$$H = -\sum_{i=1}^S \left[ \left( \frac{n_i}{N} \right) \cdot \ln \left( \frac{n_i}{N} \right) \right] \quad \text{mit } n_i = \text{Deckung einer Art, } N = \text{Summe der Einzeldeckung und } S = \text{Artenzahl der Fläche.}$$

Der Index bezeichnet die Wahrscheinlichkeit, bei zufälliger Stichprobe einen bestimmten Deckungsanteil zu finden. Ein geringer Diversitätsindex weist auf eine ungleiche Verteilung der Artendeckung auf die Summe der Einzeldeckung hin.

Der Grad der Gleichverteilung der Deckungen der Arten kann mittels der **Evenness** bewertet werden. Sie ist eine Normierung der Diversität und dient dazu, verschiedene Flächen miteinander zu vergleichen. Die Evenness  $E$  wird aus der Diversität errechnet (ODUM 1983):

$$E = \left( \frac{H}{\ln S} \right) \quad \text{mit } H = \text{Diversität und } S = \text{Artenzahl der Fläche.}$$

Ein Evenness-Wert von 1 bedeutet größtmögliche Gleichverteilung, ein Wert von 0 bedeutet, dass der Pflanzenbestand von einer einzigen Art dominiert wird.

## ***Gradientenanalyse***

In der *direkten* Gradientenanalyse wird die Verteilung von Arten entlang von Umweltgradienten (z.B. Feuchte) untersucht. Die Umweltvariablen werden als Pfeile dargestellt, deren Länge der Stärke der Merkmale für die Vegetation des Standorts entsprechen (Lepš & Šmilauer 2003).

Bei der *indirekten* Gradientenanalyse wird nicht entlang von Umweltgradienten, sondern entlang von mathematisch definiert Gradienten, die nach Ähnlichkeit (oder Unähnlichkeit) der Aufnahmen einer Vegetationstabelle berechnet werden, untersucht. Eine der indirekten Gradientenanalysen, die Korrespondenzanalyse (DCA, Detrended Correspondence Analysis), entscheidet über die Auswahl des darauf folgenden Analysetyps: Ähnliche Vegetations-Aufnahmen ergeben einen geringen Gradienten, der eine lineare Analyse, die RDA-Ordination (Redundancy Analysis), erlaubt.

Die Gradientenanalyse wurde mit der Software CANOCO 4.5/CANODRAW for WINDOWS (ter Braak & Šmilauer 2002) für die Jahre 1997 bis 2004 durchgeführt. Es wurden nur die Pflanzenarten einbezogen, die mehr als 5 % Stetigkeit auf den Versuchsflächen erreichten (Tabelle 11).

### ***Auswahl des Analysetyps***

Eine DCA ergab eine Gradientenlänge von 1.264. Aufgrund dieser geringen Länge, also einer großen Ähnlichkeit der Vegetations-Aufnahmen, wurde für die weitere, direkte Gradientenanalyse die RDA-Ordination (RDA, Redundancy Analysis) gewählt. Die Deckungswerte der Arten wurden log-transformiert (Lepš & Šmilauer 2003) und auf die Standardabweichung bezogen (divide by standard deviation).

### ***Untersuchung der Erklärungsanteile und Signifikanzen der Variablen***

Mit der RDA wurde

1. der Erklärungsanteil einzelner Variablen an der Varianz (= die „konditionalen Effekte“, Lepš & Šmilauer 2003) berechnet und



2. in einem multivariaten Test der Variablen die signifikanten Effekte der Variablen auf die Deckung der Pflanzengesellschaft nachgewiesen (full model, main effects, interactions, Lepš & Šmilauer 2003).

Das Design der Analyse basiert auf folgenden Annahmen:

- Da Vegetationsaufnahmen sowohl aus der Zeit vor Beginn der Begasung (1997) als auch während der Begasung (1998-2005) und sowohl unter erhöhtem CO<sub>2</sub> als auch von Kontrollflächen vorliegen, wurde das BACI-Design (Before-After-Control-Impact) verwendet. Die CO<sub>2</sub>-Variable wurde für alle Flächen vor Beginn der Begasung sowie alle Kontrollen auf „0“ gesetzt, für alle begasten Flächen auf „1“. Diese Analyseform erlaubt eine voneinander unabhängige Untersuchung der CO<sub>2</sub>-Effekte und der CO<sub>2</sub> x Zeit-Effekte.
- Die Bodenfeuchte (im Folgenden nur „Feuchte“) wurde als zeitabhängige Variable behandelt: Der Feuchtwert für eine Vegetationsaufnahme ergab sich aus dem Mittelwert der Feuchtemessungen (täglich/werktags) vom Zeitpunkt der davor liegenden Aufnahme bis zum Datum der aktuellen Aufnahme. Das hat zur Folge, dass Zeit-Effekte keine Feuchte-Effekte beinhalten und die Interaktion CO<sub>2</sub> x Feuchte keine durch die Begasung eingesparte Bodenfeuchte beinhalten kann. In der vorliegenden Untersuchung war die Feuchte der oberen Bodenschicht auf dem Versuchsgelände nicht durch CO<sub>2</sub> beeinflusst (Kammann et al. 2005).
- Es wurde eine Abhängigkeit der Vegetationsaufnahmen von den Jahreszeiten angenommen, deswegen wurden die Aufnahmen sowohl auf den Effekt „Jahre“ als auch auf den Effekt „Jahreszeiten“ untersucht (split plot design mit „Anzahl der split plots in einem whole plot“ = Jahre x Jahreszeiten).

In der statistischen Analyse wurden Monte-Carlo-Permutationen nur für die whole plots (freely exchangeable), nicht für die split plots erlaubt (P I: design based permutation test: whole plots freely exchangeable, no permutations of split plots). Alle Effekte wurden zusätzlich einem abgeschwächten Permutationstest unterzogen, die Monte-Carlo-Permutationen also zusätzlich auch für die split plots zugelassen, um die Schärfe des Tests zu verstärken (P II: alleviated permutation test: whole plots freely exchangeable, cyclic shifts of split plots (time series or linear transect), dependent across whole plots, (Verdonschot & ter Braak 1994; ter Braak & Šmilauer 2002)). In diesem Fall sind beide Werte angegeben.

### ***Berechnung der artspezifischen CO<sub>2</sub>-Reaktion***

Die CO<sub>2</sub>-Reaktion jeder einzelnen Pflanzenart wurde mit einer partiellen RDA, mit CO<sub>2</sub> als einziger Variablen und allen anderen Faktoren (Feuchte, Jahre, Jahreszeiten) als Covariablen, berechnet. Die Analyse erfolgte mit der Einstellung „species centered and standardized“, um die Artreaktion unabhängig von der initialen Abundanz der Art zu machen. Die resultierenden Verhältniswerte (species scores) der ersten Ordinationsachse aus der Analyse der Deckungen der Arten (samples not standardized by norm, Lepš & Šmilauer 2003) zeigen die standardisierten CO<sub>2</sub>-Reaktion der Pflanzenarten, also weder die absoluten Werte, die immer sehr stark von den dominierenden Arten geprägt sind, noch die relativen Werte, die meist eine übermäßige Reaktion der selteneren Arten darstellen.

### ***Die Suche nach der Ursache für eine CO<sub>2</sub>-Reaktion einer Pflanzenart***

*A priori* PFTs sind funktionelle Pflanzentypen, die *vor* Beginn des Versuchs aufgestellt werden, um ein Zusammenfassen von Artreaktionen zu ermöglichen. Am häufigsten verwendet wurde hierbei die Einteilung in Gräser, Kräuter und Leguminosen (Lüscher et al. 1998, Marissink and Hansson 2002, Teyssonneyre 2002a, Niklaus & Körner 3318).

*A posteriori* PFTs werden *nach* dem Experiment gemäß der artspezifischen Reaktionen gebildet (Chapin et al. 2000, Diaz et al. 2002, Lavorel & Garnier 2002), um die Arteigenschaften, die den Reaktionen zugrunde liegen, herauszuarbeiten (Lavorel & Garnier 2002, Chapin et al. 2002).

In der vorliegenden Arbeit erfolgte die Einteilung in die CO<sub>2</sub>-Reaktionsgruppen gemäß der positiven und negativen bzw. stark negativen CO<sub>2</sub>-Reaktion der Arten, die Untersuchung der Interaktion CO<sub>2</sub> x Zeit erfolgte analog.

Die Eigenschaften jeder untersuchten Art wurden aus Online-Datenbanken (Kleyer 1995), elektronischen Veröffentlichungen (Hodgson et al. 1995, Hodgson et al. 1999) und für die Eigenschaften SGR (seedling growth rate) und LeafN (leaf nitrogen concentration) aus Fitter & Peat (1994) zusammengestellt (Tabelle 12).

Tabelle 12: Auflistung der untersuchten Eigenschaften

Eigenschaften	Abk.	Eigenschaften (englisch)	Quelle	Kategorien	Skalenniveau, Variablentyp
<b>Eigenschaften der individuellen Reproduktion</b>					
Zeitpunkt der ersten Reproduktion	TRep	Time of 1st Reproduction	2	6 (von 10) Klassen, Monate und Jahre (3 und 1, 2, 3, 6, ND)	ordinal, numerisch
Blühbeginn	FlowS	Flowering Start	1	5 (von 12) Klassen, Monate (3, 4, 5, 6, 7)	ordinal, numerisch
Blühdauer	FlowP	Flowering Period	1	7 (von 12) Klassen, Monate (1, 2, 3, 4, 5, 8, 12)	ordinal, numerisch
Anzahl Diasporen oder Sprosse	NUM	No. of Diaspores/Shoot	1, 2	3 (von 4) Klassen, Anzahl (1000, 10000, ND)	ordinal, numerisch
<b>Eigenschaften der Bestäubung</b>					
Bestäubungstyp	POL	Pollination Type	2	4 (von 6) Klassen (I(nsect), W(ind), A(po), ND)	nominal, kategorisch
<b>Eigenschaften der Verbreitung</b>					
Gewicht der Verbreitungseinheit	DispW	Dispersule Weight	1	6 (von 7) Klassen [mg] (1(<0,2mg), 2, 3(05,-1mg), 4, 5, 6(>10mg))	ordinal, numerisch
Form der Verbreitungseinheit	DispS	Dispersule Shape	1	2 (von 4) Klassen, Verh. Länge/Breite (1, 2)	nominal, kategorisch
Mittel der Verbreitung	AD	Agency of Dispersal	2	4 (von 4) Klassen (A(nimal), W(ind), Q(Aqua), U(nspecific))	nominal, kategorisch
Langlebigkeit in der Samenbank	SeedB	Seed Bank Longevity	1	3 (von 4) Klassen (1, 2, 3=persistent)	ordinal, numerisch
<b>Eigenschaften der Keimung und des Keimlingswachstums</b>					
Jahreszeit der Keimung	GS	Seasonal Time of Germination	2	7 (von 10) Kl. (Sp(ing), E(arly)S, S(um), A(ut), Sh(ed), ND)	nominal, kategorisch
Keimlings-Wachstumsrate	SGR	Seedling Growth Rate - maximum	3	Artspezifische Werte [% d <sup>-1</sup> ]	ordinal, numerisch
<b>Eigenschaften der oberirdischen vertikalen Ausbreitung</b>					
Sproßhöhe	CanH	Shoot Height	1	5 (von 10) Kl. [mm] (1, 2, 3, 4, 5)	ordinal, numerisch
Bestandsstruktur	CanS	Canopy Structure	1	3 (von 5) Klassen (B, S, L)	nominal, kategorisch
Blattgröße	SIZE	Leaf Size	2	3 (von 8) Klassen [cm <sup>2</sup> ] (4, 5, ND)	ordinal, numerisch
Blatt-Phänologie	LeafP	Leaf Phenology	1	4 (von 5) Kl. (Sa, Sh, Ep, Ea)*	nominal, kategorisch
Blatt-Stickstoff-Konzentration	LeafN	Leaf N Concentration	3	4 Klassen [mg g <sup>-1</sup> ] (10, 20, 30, ND)	ordinal, numerisch
<b>Eigenschaften der unterirdischen Ausbreitung</b>					
Wurzeltyp	RT	Root Type	2	5 (von 10) Klassen (TB(Tube), TU(ss), S(tolon), E(lon), ND)	nominal, kategorisch
Wurzeltiefe	DEEP	Rooting Depth	2	3 (von 4) Kl. [m] (05, 1, ND)	ordinal, numerisch
Mykorrhiza-Typ	Myc	Mycorrhiza Type	1	4 (von 7) Kl. (VA, Pos, Neg, ND)	nominal, kategorisch
<b>Weitere Eigenschaften</b>					
Lebenszyklus	LifeH	Life History	1	3 (von 6) Klassen (As, summer annual; Aw, winter a.; P, perennial)	nominal, kategorisch
Laterale Ausbreitung	LatSp	Lateral Spread	1	5 (von 6) Kl. [mm] (1, 2, 3, 4, 5)	ordinal, numerisch
Verzweigungsform	BRA	Branching	2	4 (von 5) Kl. (NO (keine Verzweig.), AK(ropetal), BA(sal), ND)	nominal, kategorisch
Konkurrenzskraft	C*	Competitiveness	2, 4	4 (von 5) Kl. (-2, -1, 0, 1 = 0, 1, 2, 3)	ordinal, numerisch
Stress-Toleranz	S*	Stress-Tolerance	2, 4	3 (von 5) Kl. (-2, -1, 0 = 0, 1, 2)	ordinal, numerisch
Ruderalität	R*	Ruderality	2, 4	4 (von 5) Kl. (-2, -1, 0, 1 = 0, 1, 2, 3)	ordinal, numerisch

Quelle: 1 = Hodgson et al. (1995), 2 = Kleyer (1995), 3 = Fitter & Peat (1994), 4 = UCPE (2003), Kategorie ND = nicht definiert.

\* nähere Erklärung siehe im Anschluss an Tabelle 13

Mit diesen Eigenschaften als Datenbasis wurden die CO<sub>2</sub>-Pflanzenarten-Reaktionen mit der Software JMP 5.01 (SAS Institute Inc., NC, USA) in einem Entscheidungsbaum untersucht. Der entscheidende Vorteil der Software JMP war, dass an jedem Entscheidungsknoten ein Vorschlag für das beste Entscheidungskriterium erfolgt, dieses jedoch verworfen und einer

der nächstbesten Vorschläge für die Entscheidung gewählt werden kann. Der Datensatz wurde also Schritt für Schritt durch je ein (akzeptiertes oder von Hand gewähltes) Merkmal in zwei Teile geteilt, bis die CO<sub>2</sub>-Reaktionsgruppen voneinander getrennt waren.

So wurde im Entscheidungsbaum auf der ersten Ebene das beste Entscheidungskriterium verworfen: für die Jahreszeit der Keimung (GS) wird für 12 der 27 Arten in den o.g. Datenbanken keine Aussage gemacht (Tabelle 13). Diese Eigenschaft ist nur geeignet, um auf einer der letzten Ebenen zwischen Arten zu entscheiden, deren Keimungsverhalten bzw. Zeitpunkt der ersten Reproduktion in die Datenbanken aufgenommen wurden.

Die Ausprägungen der 25 Eigenschaften aus Tabelle 12 sind in Tabelle 13 für jede einzelne der 27 Arten aufgeführt, soweit aus den o.g. Datenquellen verfügbar.

**Tabelle 13: Ausprägung der Eigenschaften bei den 27 Arten der Untersuchung**

	TREP	Flows	FlowP	Num	Pol	DispW	DispF	AD	SeedB	GS	SGR	CanH	CanS	Size	LeafP	LeafN	RT	Deep	Myc	LifeH	LatSp	Bra	C-Radius	S-Radius	R-Radius
<i>Agropyron repens</i>	2	6	4	1	W	5	1	U	2		0,17	3	L	4	Ea			1	VA	P	5	BA	3	0	1
<i>Agrostis tenuis</i>		6	3		W	1	1	U	3	Sp	0,19	2	L	4	Ea	10		1	VA	P	4		2	2	2
<i>Alopecurus pratensis</i>	0,5	4	3	1	W	3	1	U	1		0,18	2	L	4	Ea		S	1	VA	P	3	BA	3	1	1
<i>Anthoxanthum odor.</i>	3	4	3	1	W	2	1	A	2		0,13	2	L	4	Ea	10	TU	1	VA	P	2	NO	1	2	2
<i>Arrhenatherum elat.</i>	1	6	2	2	W	5	1	A	1		0,19	5	L	4	Ep	20	TU	1,5	pos	P	4	BA	3	1	1
<i>Bromus hordeaceus</i>	1,5	5	3	1,1	W	5	1	A	1		0,21	3	L	4	Sh		TU	1	pos	Aw	1	BA	1	0	3
<i>Cardamine pratensis</i>	2	4	3	1	I	3	2	W	3		0,16	2	S	4	Ea			0,5	neg	P	2	NO	1	1	3
<i>Dactylis glomerata</i>	1,5	5	3	1	W	3	1	U	1	Sh	0,19	3	S	4	Ea	10	TU	1,5	VA	P	3	NO	3	1	1
<i>Festuca pratensis</i>		6	1	1	W	4	1	A	1	Sh		2	S	4	Ea		TU	1,5	VA	P	2	NO	2	2	2
<i>Festuca rubra</i>		5	3	1	W	3	1	A	1	A	0,17	2	S	4	Ea		E	0,75	VA	P	4	BA	2	2	2
<i>Filipendula ulmaria</i>		6	3	1	I	3	1	Q	1	Sp	0,14	5	S	5	Sa	20		0,5	pos	P	4		3	1	0
<i>Galium mollugo</i>	2,5	5	5	1,5	I	2	1	A	1			4	L		Sa			1,25		P	3				
<i>Galium verum</i>	2,75	7	2	1,5	I	2	1	U	1	Au	0,16	2	L		Ea	10	E	1	VA	P	4		2	2	1
<i>Geranium pratense</i>	3,75	5	4	1	I	5	2	U	1	Sp		3	L	5	Sa		TB	1		As	3				
<i>Glechoma hederacea</i>	2,5	3	3	1	I	3	1	U	2	EaS		2	S	4	Ea	30	S	0,5	pos	P	5	NO	2	2	2
<i>Holcus lanatus</i>	1,8	6	2	1	W	2	1	U	3	A	0,29	3	L	4	Ep	10		1	VA	P	3	BA	2	2	2
<i>Lathyrus pratensis</i>	2	5	4	1	I	6	2	U	1	S	0,10	4	L	4	Sa		E	1	VA	P	3		2	2	2
<i>Lolium perenne</i>	1,5	5	4	1	W	4	1	U	1		0,19	2	S	4	Ea		TU	1	VA	P	3	BA	2	1	2
<i>Plantago lanceolata</i>	3,5	4	5	1,75	W	4	2	A	3	A, S	0,24	2	B	4	Ea	10	TB	1	VA	P	2	NO	2	2	2
<i>Poa pratensis</i>	1,5	5	3	1		2	1	U	3		0,18	2	S	4	Ea	10	E	1	pos	P	3	BA	2	2	2
<i>Poa trivialis</i>	1	6	1	1,75	W	1	1	U	3	A	0,2	1	S	4	Ea		S	0,5	pos	P	2	NO	2	1	2
<i>Ranunculus acris</i>	2	5	3	1	I	4	1	A	2	A, S		2	S	4	Ea		TB	0,5	VA	P	2		2	2	2
<i>Rumex acetosa</i>	3	5	2	1,5	W	3	1	W	2		0,24	2	S	4	Ea		TB	1	neg	P	2	AK	2	2	2
<i>Sanguisorba officin.</i>		6	4		I	5	1	U	1			4	S	4	Sa			1		P	2				
<i>Saxifraga granulata</i>		5	2	1,5	I	1	1	U	2			2	S	4	Sa		TB	0,5		As	2				
<i>Taraxacum officinale</i>	2	3	8	2	A	3	1	W	2	Sh	0,17	3	B	5	Ea		TB	1,5	VA	P	2	NO	1	1	3
<i>Trisetum flavescens</i>	1	5	2	1	W	1	1	A	1	Sh		2	L	4	Ea		TU	0,5	VA	P	3	BA	2	2	2

Erklärung der Abkürzungen: siehe Tabelle 12 Kommazahlen ergeben sich aus der Zusammenfassung von Angaben (bei unterschiedlicher Ausprägung eines Merkmals wurden z.T. 50% der Art in eine Merkmalsklasse, 50% in eine andere eingeordnet). Quelle: Hodgson et al. (1995), Kleyer (1995), Fitter & Peat (1994), UCPE (2003).

Die im Entscheidungsbaum zur Verwendung gekommenen Eigenschaften waren:

TRep = Zeitpunkt der ersten Reproduktion

FlowP = Blühdauer in Monaten

DispW = Gewicht der Verbreitungseinheit:  $\text{DispW} < 3 \rightarrow < 1 \text{ mg}$ ,  $\text{DispW} \geq 3 \rightarrow \geq 1 \text{ mg}$ .

SGR = Keimlingswachstum in % pro Tag.

Size = Blattgröße,  $< 5 \rightarrow 50 \text{ mm}$ ,  $\geq 5 \rightarrow 51 \text{ mm}$  und breiter.

LeafP = Blatt-Phänologie: Sa = aestival (Sommer bis Herbst), Sh = hibernal (vor allem Herbst bis Frühjahr), Ea = stets immergrün, Ep = nicht in allen Habitaten bzw. nur in milden Wintern immergrün).

R-Radius = Grad der R-Strategie:  $R \geq 2 \rightarrow \text{CSR, RCSR oder SRCSR Strategie}$ ,  $R < 2 \rightarrow$  weniger R-Anteil.

Das Konzept der CSR (competitors = Konkurrenzstarken, stress-tolerators = Stresstoleranten und ruderals = Ruderalen) beschreibt die Strategien, die Pflanzen unter unterschiedlichen Einflüssen von Stress und Störung und unter Konkurrenz ausbilden (Grime 2002). Die CSR-Strategie wird in Kombinationen der C-, S- und R-Anteile ausgedrückt. Im Text wird diese Zahlenkombination zum besseren Verständnis „übersetzt“: 222-(CSR-) Strategen haben gleich starke Anteile an Konkurrenzkraft, Stresstoleranz und Ruderalität, 310-(CCR-) Strategen haben einen großen Anteil Konkurrenzkraft, weniger Anteil an Ruderalität und kaum Anteil an Stress-Toleranz, 122-(SRCSR-) Strategen haben mehr Anteile an Stress-Toleranz und Ruderalität als an Konkurrenzkraft usw.

## 2.4 Die Untersuchung des Wurzelraums

### 2.4.1 Probenahmen

#### *Zylinderproben*

Im November 2001, März, Mai, Juli und November 2002 und im März, Mai und Juli 2003 wurden mit Stechzylindern (5 cm hoch, 7,5 cm Ø; 250 m<sup>3</sup>, Bild 3) aus jedem Ring 6 Bodenproben mit einem Probenehmer (Ejkelkamp) gezogen. 3 Proben stammten aus 0-5 cm, die anderen 3 aus 7-12 cm Tiefe.

Die Zylinder wurden so tief ausgestochen, dass ca. 3-4 cm des dichtesten Wurzelfilzes und etwas tiefer gelegene Sprossanteile in der Regel über den



**Bild 3: Zylinderprobe**

oberen Rand des Zylinders überstanden und abgeschnitten und verworfen wurden.

Die Standorte der Probenahmen wurden notiert, um eine doppelte Beprobung derselben Stelle zu vermeiden. Die Löcher wurden mit Bodenmaterial aus der Nähe des Ringes aufgefüllt.

#### *Meshbags*

Im September/Oktober 2000 bzw. im März 2002 waren mit Boden gefüllte Meshbags (Bild 4) mit 1,4 mm Maschenweite und 5 x 5 x 15 cm Kantenlänge (375 m<sup>3</sup>) horizontal eingegraben worden. Das Bodenmaterial für alle Meshbags (E und A) stammt von einer Freifläche des Versuchsgeländes. Der Boden war zuvor gut durchgemischt und auf 5 mm gesiebt worden.



**Bild 4: Meshbag-Probe**

Die Meshbag-Proben wurden eingegraben und mit einer dünnen Rasensode überdeckt. Bei der Ernte der Meshbags wurde die Rasensode oberhalb des Meshbags wieder entfernt.

Im März und Juli 2002 sowie im März 2004 wurde je ein Meshbag der Meshbagpaare (Bild 4) ausgegraben, der Boden für die Untersuchungen entnommen, die Bags erneut mit gesiebttem Bodenmaterial gefüllt und in denselben Gruben wieder eingegraben. Pro Ring stammten zu einem Probezeitpunkt 4 Proben aus 0-5 cm, die anderen 4 aus 7-12 cm Tiefe befanden sich direkt darunter (2 Meshbags pro Ringviertel).

Alle Proben wurden zunächst im feuchten Zustand gewogen.

Aus einem intakten, abgebrochenen Stück jeder der Proben wurden die Wurzeln ausgewaschen, mit Pinzetten von Verunreinigungen getrennt (Böhm 1979), in 15 % Ethanol konserviert und innerhalb der nächsten 4 Tage mit dem Programm WinRhizo TM regular (WinRhizo, Regent Instruments Inc., Quebec City, Canada) im Wasserbad gescannt, um die Wurzellänge und -dicke zu erhalten. Danach wurden die Wurzeln getrocknet und gewogen.

Die restlichen Bodenproben wurden zur Bestimmung der Bodenfeuchte getrocknet. Später wurde aus dem größeren Anteil dieser Proben ebenfalls die Wurzeln ausgewaschen, jedoch nicht in Ethanol eingelegt, sondern sofort getrocknet und gewogen. Diese Wurzelproben standen für weitere Analysen (z.B. CN) zur Verfügung.

Eine Ausnahme bildeten die Meshbag-Proben vom März 2002: Hier wurden die Wurzeln der gesamten Probe gewaschen und gescannt. Die für die Bodenparameter wichtige Bezugsgröße „Bodentrockengewicht“ der Meshbag-Proben vom März 2002 wurde aus Bodenfeuchte-Daten einer zeitgleich auf dem Versuchsgelände an denselben Standorten durchgeführten Untersuchung errechnet.

Die Wurzelbiomasse-Werte ergeben sich aus der Summe der gescannten plus der nach dem Waschen sofort getrockneten Wurzeln, die Angaben zu Wurzellänge (RLD und SRL) und Wurzelstärke nur aus den Ergebnissen der gescannten Wurzeln.

## 2.4.2 Berechnungen

Aus den drei Parallelen pro Ring wurden Mittelwerte für jeden Ring (1, 2 und 3) berechnet. Aus diesen Mittelwerten wurden wiederum die gesamten E- und A-Mittelwerte und Standardfehler der einzelnen Jahre ermittelt. Diese Werte waren die Grundlagen für die Graphiken der Zu- bzw. Abnahmen unter erhöhtem CO<sub>2</sub> ( $A \times 100 \times E^{-1}$ ) und deren Werteschwankungen (Standardfehler  $\times 100 \times \text{Mittelwert}^{-1}$ ).

Der Einfluss von erhöhtem CO<sub>2</sub> auf die Wurzelbiomasse, die RLD (root length density; Bestandswurzellänge in cm Wurzel pro Bodengewicht des trockenen Bodens in mg) und die SRL (specific root length; spezifische Wurzellänge in cm Wurzel pro Wurzelgewicht in mg) sowie die Wurzeldicke wurde mit dem Software-Programm SPSS Version 11.x auf Signifikanz untersucht.

Die Normalverteilung der Daten wurde mit dem Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest überprüft. Die Werte der Wurzelbiomasse, der Wurzeldicke und der RLD mussten logarithmiert und die der SRL in Quadratwurzelwerte überführt werden, um eine Normalverteilung zu erreichen. Die Analyse wurde als Mixed Model Analyse, Typ III, Test auf feste Effekte, Covarianzstruktur Autoregressiv 1. Ordnung durchgeführt und alle Ergebnisse wurden auf normalverteilte Residuen überprüft. Die Analyse des vollen Modells (mit allen Interaktionen) wurde durch höhere Werte in den Informationskriterien als weniger aussagekräftig angezeigt, deswegen wurde das jeweils besser angepasste, reduzierte Modell (mit weniger Interaktionen) für die Darstellung der Arbeit gewählt.

Die Probestandorte (Ringe), die sich in erster Linie durch ihre Feuchte (je ein trockenes, feuchtes und mittelfeuchtes Ringpaar) unterscheiden, wurden in der statistischen Berechnung um den Faktor Feuchte bereinigt, indem die Bodenfeuchte jedes Probestandortes zu jedem Probetermin separat eingegeben und als Covariable verwendet wurde. So war es möglich, standortbedingte Einflüsse neben der Bodenfeuchte ggf. sichtbar zu machen. Alle Proben wurden mit dem Monat der Probenahme datiert, um den Zeiteinfluss als Covariable einbeziehen zu können.



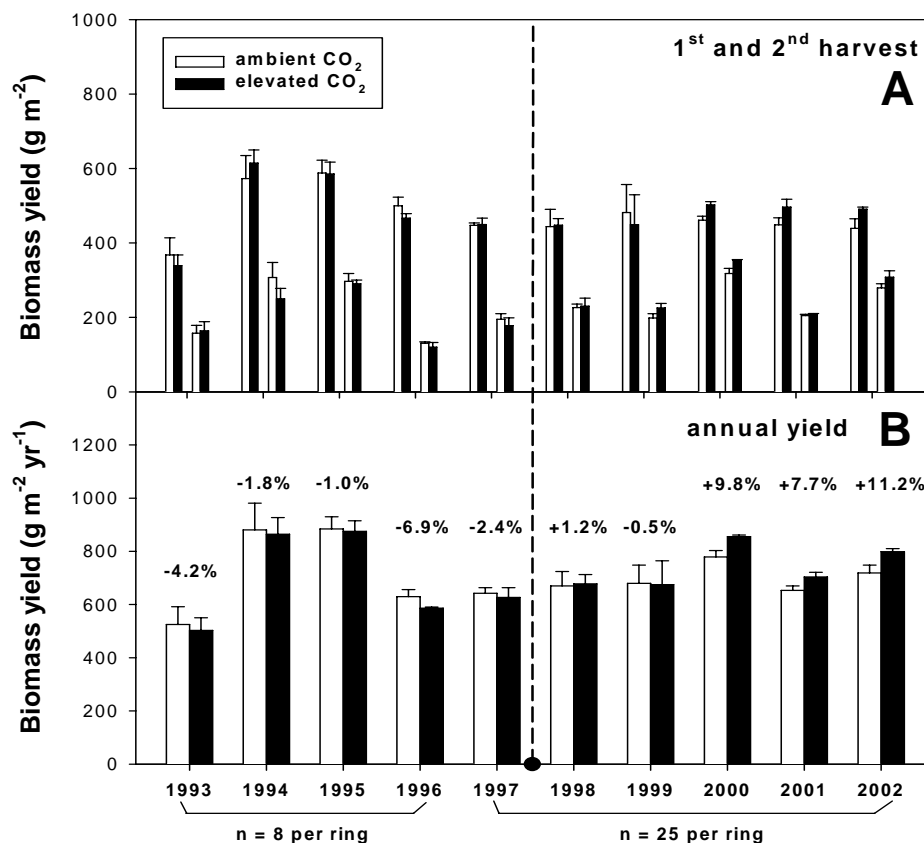
### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Die Pflanzengemeinschaft

In den Kapiteln 3.1.1 bis 3.1.4 werden die Ergebnisse der Biomasse, Artenzahl, Diversität, Evenness und Deckung in Vorphase und unter erhöhtem CO<sub>2</sub> dargestellt, dann folgen die Ergebnisse der Berechnungen zu den um die Faktoren Feuchte, Jahre und Jahreszeiten bereinigten CO<sub>2</sub>-Reaktionen auf die Deckung der Arten (Kapitel 3.1.5) und die bereinigte CO<sub>2</sub>-Reaktion der einzelnen Arten (Kapitel 3.1.6). Abschließend wird im Kapitel 3.1.7 eine Methode vorgestellt, mit der nach den Ursachen für eine artspezifische CO<sub>2</sub>-Reaktion gesucht werden kann.

##### 3.1.1 Biomasse

Die Biomasse nahm unter erhöhtem CO<sub>2</sub> in den Jahren 2000, 2001 und 2002 signifikant zu. Nach Jahreszeiten aufgetrennte Werte zeigen den Biomasse-Zuwachs unter erhöhtem CO<sub>2</sub> bereits in der Herbsterte 1999 (Abbildung 4: Gesamt-Biomasse).

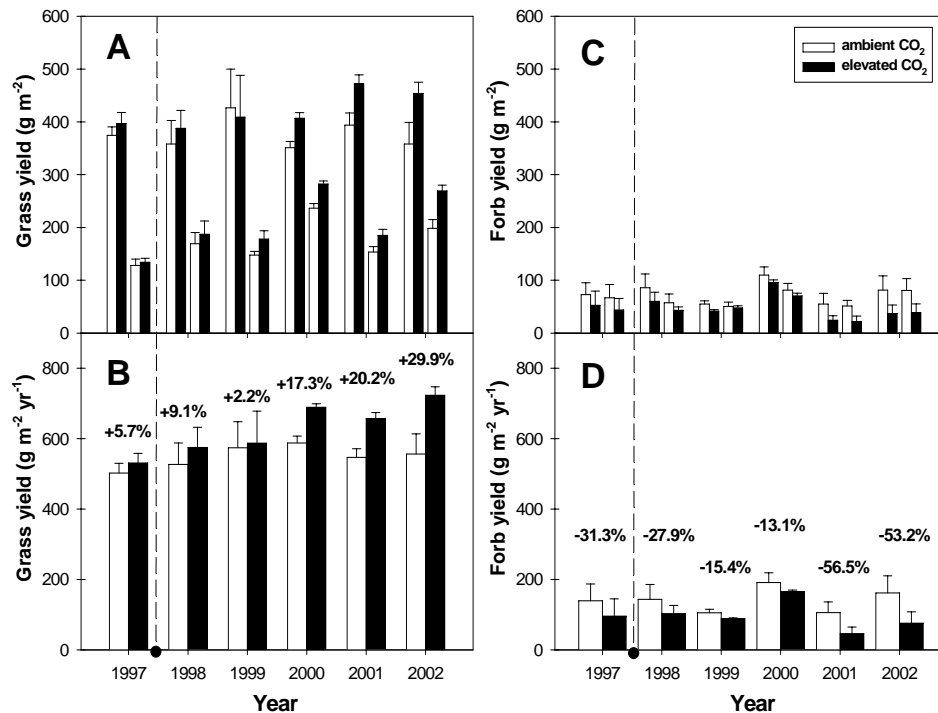


**Abbildung 4: Gesamt-Biomasse**

Biomasse der fünf Jahre vor Beginn des Experiments (im Mai 1998; gestrichelte Linie) und den fünf Jahren unter Anreicherung mit erhöhtem CO<sub>2</sub> (schwarze Balken = erhöhtes CO<sub>2</sub>, weiße Balken = Kontrolle), mit **A** = Frühjahres- und Herbsterten und **B** = Jahreserten. Standardfehler für n = 3. Die Werte über den Balken stehen für prozentuale Veränderungen unter erhöhtem CO<sub>2</sub> [(E-A)/A\*100]. Die Graphik ist der Publikation Kammann et al. (2005) entnommen, in der ich Co-Autorin bin.

Vor Beginn der Begasung lagen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Biomassen der späteren Anreicherungs- oder Kontrollflächen vor; nichtsignifikante Unterschiede wiesen auf etwas höhere Biomassen auf den späteren Kontrollflächen hin.

Die Biomasse der Gräser nahm unter erhöhtem CO<sub>2</sub> signifikant zu, die der Kräuter jedoch im vierten und fünften Jahr (2001 und 2002) stark ab (Abbildung 5).



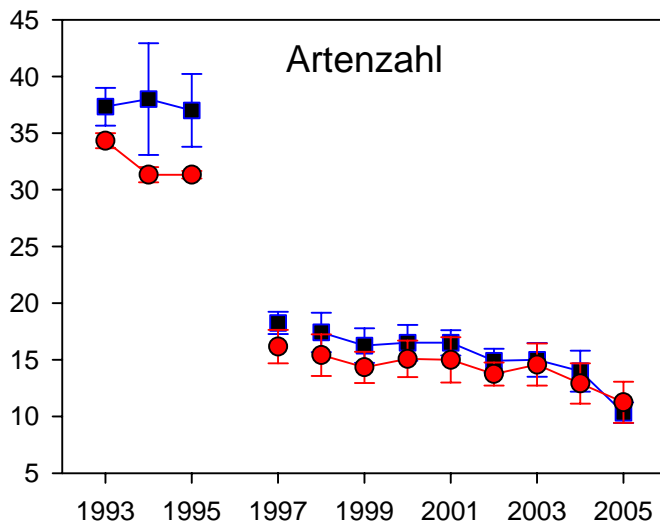
**Abbildung 5: Biomasse der Gräser und Kräuter**

Biomasse der Gräser (grass; A, B) und Kräuter (forb; C, D). Getrennte Frühjahrs- u. Sommerernten (A, C) und Jahresernten (B, D). Das Jahr 1997 vor Beginn der Begasung ist durch eine gestrichelte Linie abgetrennt. Standardfehler für n = 3. Die Werte über den Balken stehen für die prozentuale Veränderung unter erhöhtem CO<sub>2</sub> [(E-A)/A\*100]. Die Graphik ist der Publikation Kammann et al. (2005) entnommen, in der ich Co-Autorin bin.

### 3.1.2 Artenzahl, Diversität und Evenness

Die Artenzahl nahm im Verlauf des CO<sub>2</sub>-Experiments (1998 bis 2005) ab, sowohl unter Umgebungsluft (A-Flächen) als auch auf begasteten (E-) Flächen (Abbildung 6). Der Artenverlust war auf den E-Flächen geringer (von 16,2 auf 11,2 Arten) als auf den A-Flächen (von 18,2 auf 10,3 Arten).

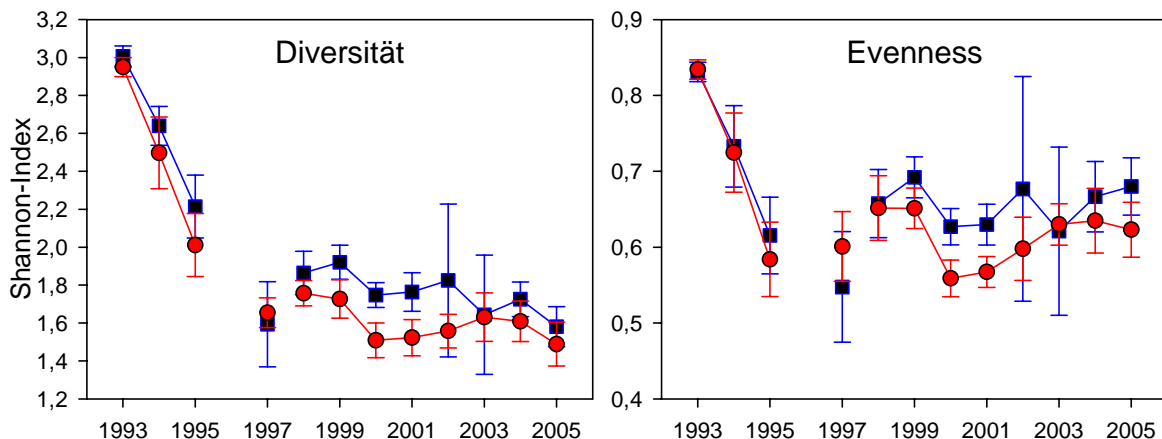
Vor Installation der Ringe im Jahr 1997 wuchsen auf den später für das Experiment ausgewählten Flächen durchschnittlich doppelt so viele Arten (auf den E-Flächen 32,3, auf den A-Flächen 37,4). Die Aufnahmeflächen hatten allerdings eine Größe von 100 m<sup>2</sup>, die in den Ringen eine Fläche von 2 x 4,5 m<sup>2</sup>.



**Abbildung 6: Artenzahl**

Dargestellt sind die Jahresmittelwerte (aus beiden Flächen in jedem der 3 Ringe sowie der Frühjahrs- und Herbstaufnahme) für die Flächen unter Umgebungsluft (A, blaue Kästchen) und unter erhöhtem CO<sub>2</sub> (E, rote Kreise) mit Standardfehlern.

**Diversität** und **Evenness** (Abbildung 7) waren in dem Jahr vor Beginn der Begasung (1997) auf den späteren Kontrollflächen geringer als auf den späteren CO<sub>2</sub>-Flächen, aber bereits im ersten Jahr der Begasung (1998) auf den mit CO<sub>2</sub> angereicherten Flächen niedriger. Gleichzeitig setzte eine höhere Gleichverteilung der Deckung der Arten auf begasten *und* unbegasteten Flächen ein, die im Jahr 2000 deutlich zurückging. Danach nahmen beide Werte bis zum Jahr 2002 wieder zu. 2003 fiel die Diversität und Evenness auf allen Kontrollflächen ab, so dass auf allen Flächen etwa gleiche Werte erreicht wurden.



**Abbildung 7: Diversität und Evenness**

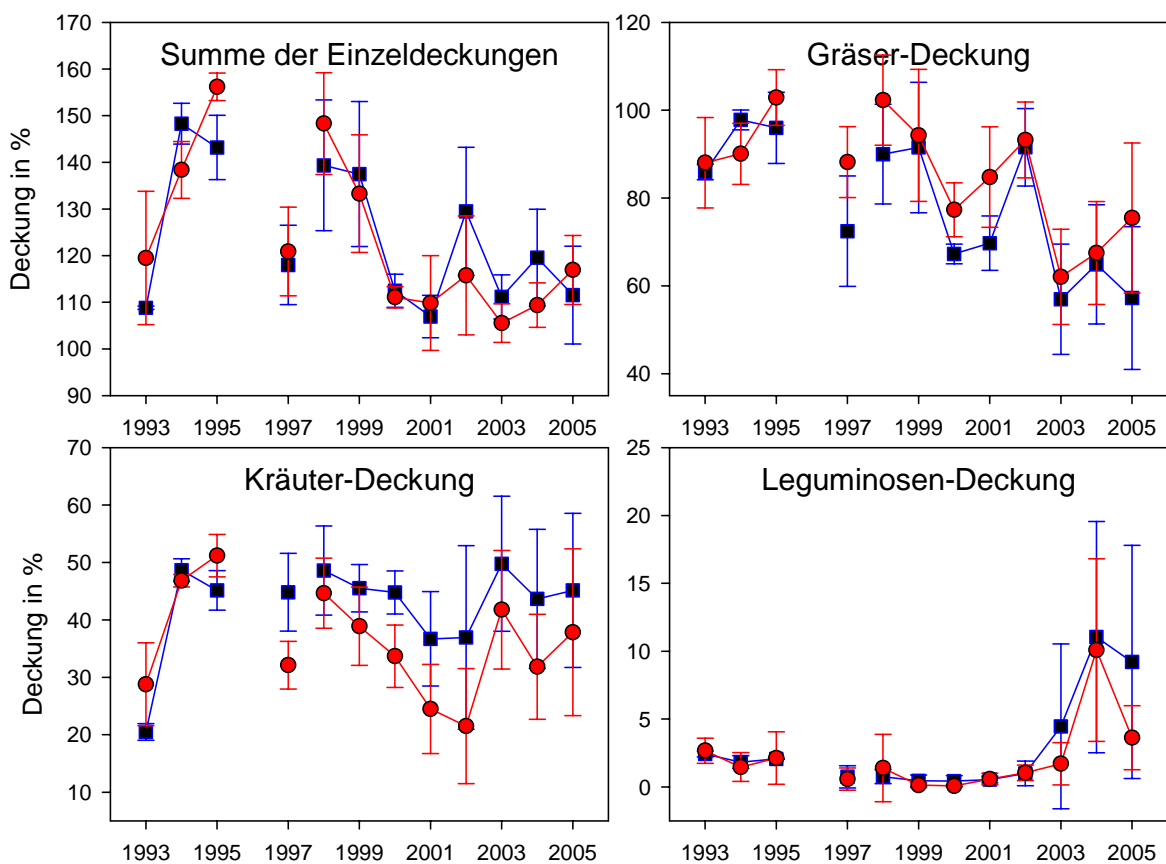
Dargestellt sind die Jahresmittelwerte (aus beiden Flächen in jedem der 3 Ringe sowie der Frühjahrs- und Herbstaufnahme) für die Flächen unter Umgebungsluft (A, blaue Kästchen) und unter erhöhtem CO<sub>2</sub> (E, rote Kreise) mit Standardfehlern.

Auf den CO<sub>2</sub>-Flächen erfolgte in den Jahren 2004 (Diversität) und 2005 (Evenness) eine Abnahme, so dass dort beide Werte bis zum Ende des Untersuchungszeitraum unter denen der

Kontrollflächen lagen. Insgesamt fiel die Diversität auf den E-Flächen von 1,65 auf 1,48, auf den A-Flächen blieb sie relativ konstant (1,59 bis 1,58). Die Evenness stieg auf den E-Flächen leicht (von 0,60 auf 0,62) und auf den A-Flächen deutlich von 0,54 auf 0,68 an.

In den Jahren vor Installation der Ringe (1993-1995) war die Diversität auf den späteren Kontrollflächen tendenziell höher als auf den späteren CO<sub>2</sub>-Flächen. Diversität und Evenness nahmen jedoch stark ab, im Jahr der Installation der Ringe auf den Kontrollflächen sogar stärker als auf den späteren CO<sub>2</sub>-Flächen. Unter erhöhtem CO<sub>2</sub> stellte sich dann das ursprüngliche Verhältnis wieder ein, allerdings auf einem anderen Niveau: beide Werte wiesen auf den kleineren 2 x 4,5 m<sup>2</sup>-Aufnahmeflächen in den Ringen geringere Werte auf als auf den 100 m<sup>2</sup>-Aufnahmeflächen. Die Evenness ist durch die Einbeziehung der Artenzahl (vgl. Kapitel 2) besser für den Vergleich der unterschiedlichen Flächengrößen geeignet.

### 3.1.3 Summe der Einzel-Deckungen, Deckungen der PFTs



**Abbildung 8: Summe der Einzeldeckungen, Deckungen der PFTs Gräser, Kräuter und Leguminosen**

Dargestellt sind die Jahresmittelwerte (aus beiden Flächen in jedem der 3 Ringe sowie der Frühjahrs- und Herbstaufnahme) für die Flächen unter Umgebungsluft (A, blaue Kästchen) und unter erhöhtem CO<sub>2</sub> (E, rote Kreise) mit Standardfehlern. Die Achsenskalierung der Y-Achsen ist an die Deckungen angepasst.

Die **Summe der Einzeldeckungen** (Abbildung 8) nahm zunächst auf allen Flächen zu, ging dann in den Jahren 2001 und 2002 stark zurück und erreichte 2003 etwa wieder den Ausgangswert. Der leichte Trend zu geringerer Deckung unter erhöhtem CO<sub>2</sub> ist mit einer starken Streuung der Werte behaftet (vgl. Standardfehler in Abbildung 8).

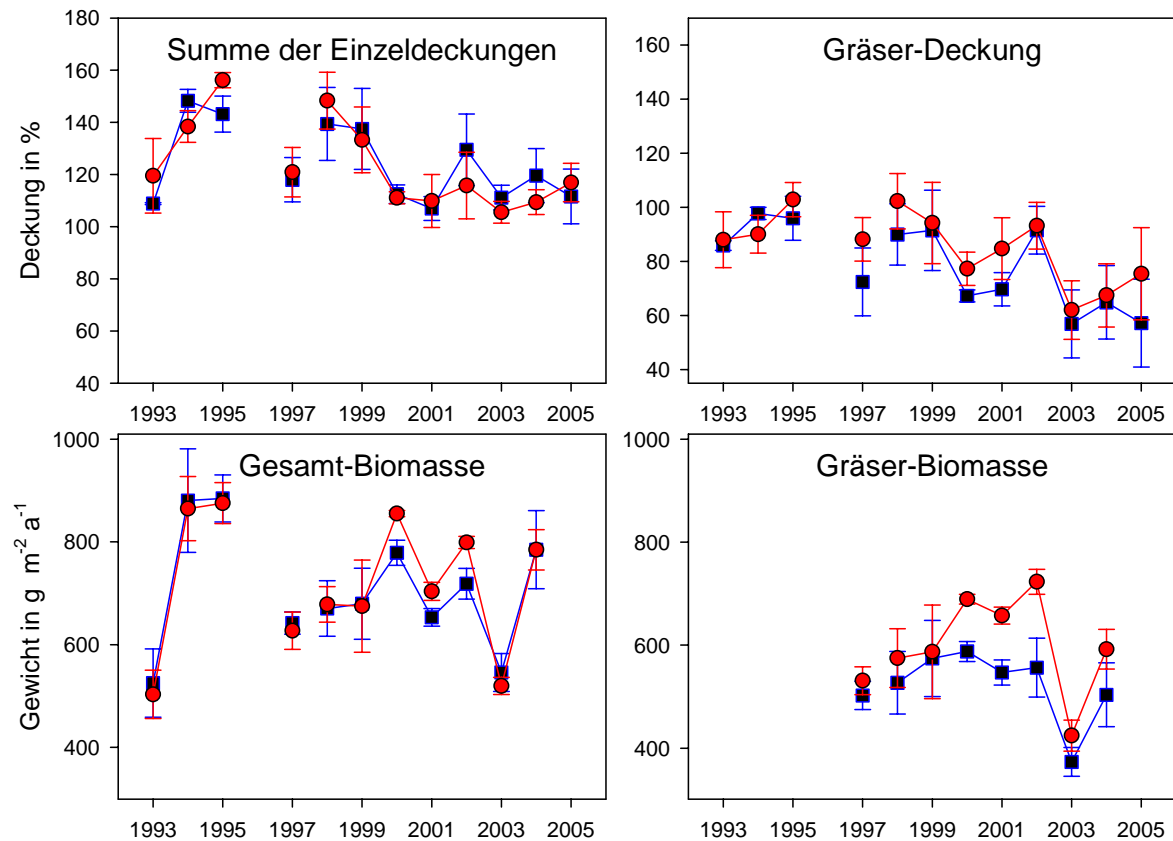
Der Rückgang der Einzeldeckungen wurde vor allem durch die **Deckung der Gräser**, die den größten Anteil an der Deckung hatten, hervorgerufen (unterschiedliche Skalierung der Deckungen in %!). Die Deckung der Gräser war auf den CO<sub>2</sub>-Flächen, allerdings bereits 1997, vor Beginn der Begasung, höher als auf den Kontrollflächen. Die Streuung der einzelnen Werte ist dabei relativ groß. Noch deutlicher ist die geringere **Kräuter-Deckung** unter erhöhtem CO<sub>2</sub>. Die Jahresmittelwerte der CO<sub>2</sub>-Varianten zeigen einen parallelen Verlauf, der die feuchtebedingten Schwankungen über die Jahre wiedergibt: die Jahre 2001 und 2002 zeichneten sich durch hohe Niederschläge, das Jahr 2003 durch große Trockenheit aus.

Die **Leguminosen** trugen nur zu einem sehr geringen Teil zur Summe der Einzeldeckungen bei. Sie nahmen sowohl unter Umgebungsluft als auch auf den begasten Flächen in den Jahren 2002-2004 zu, im letzten Jahr jedoch ab; die Deckungswerte streuten dabei sehr. Die Deckung der Leguminosen wird nahezu vollständig durch eine einzige Leguminose, *Lathyrus pratensis*, verursacht (Tabelle 11, Tabelle 14).

Die **Summe der Einzeldeckungen** (Abbildung 8) stieg in der Phase *vor Installation der Ringe* und nahm in den Jahren danach um denselben Betrag wieder ab. Die Deckungen der späteren CO<sub>2</sub>- und Kontrollflächen unterschieden sich nicht und unterlagen auch hier bereits starken Schwankungen. Die **Gräser-Deckung** war vor Installation der Ringe höher (E: 95,6 und A: 94,2 %) als während des Experiments (E: 82,7 und A: 73,4 %). Mit Installation der Ringe, vor Beginn der Begasung (1997) war die Deckung der Gräser auf den späteren CO<sub>2</sub>-Flächen höher als auf den Kontrollflächen. Die **Kräuter-Deckung** lag trotz einer großen Deckungszunahme vor der Installation der Ringe im gleichen Wertebereich wie danach, dabei nahm die Kräuter-Deckung vom ersten zum zweiten Jahr vor allem auf den späteren Kontrollflächen zu. Trotz höherer Kräuter-Deckung auf den späteren CO<sub>2</sub>-Flächen zum Zeitpunkt der Flächenauswahl (1995) waren die Deckungen 1997, vor Beginn der Begasung, bereits auf den Kontrollflächen höher. Die **Leguminosen-Deckung** war niedrig; in der Vorphase kamen neben *Lathyrus* auch *Trifolium repens*, *T. pratense* und *Lotus corniculatus* vor.

## Vergleich Biomasse - Deckung

Ein Vergleich der Deckungen mit Biomasse-Untersuchungen (Kammann et al. 2005) zeigte in den beiden ersten Jahren des CO<sub>2</sub>-Experiments weder bei der Deckungsschätzung noch bei den Biomassen einen signifikanten Einfluss von erhöhtem CO<sub>2</sub> (Abbildung 9, linke Spalte).



**Abbildung 9: Vergleich von Deckung & Biomasse - Gesamt & Gräser**

Dargestellt sind die Jahresmittelwerte. Deckungen (obere Zeile) zeigen Werte aus beiden Flächen der 3 Ringe sowie der Frühjahrs- und Herbstaufnahme, Biomassen (untere Zeile) die Werte der Frühjahrs- und Herbststernte für die Flächen unter Umgebungsluft (A, blaue Kästchen) und unter erhöhtem CO<sub>2</sub> (E, rote Kreise) mit Standardfehlern. Die linke Seite zeigt Gesamt-Deckung und -Biomasse, die rechte nur die der Gräser (Biomasse-Werte aus unveröffentlichten Daten mit freundlicher Genehmigung von Dr. Claudia Kammann, Institut für Pflanzenökologie)

Die CO<sub>2</sub>-Reaktion der Biomasse war nur in den Jahren 2000-2002 signifikant positiv (Tabelle 2). Im Jahr 2003 nahm die Biomasse auf allen Flächen ab, und zwar besonders stark auf den begasten Flächen. Die CO<sub>2</sub>-Reaktionen der Gräser (Abbildung 9, rechte Spalte) zeigen diese Entwicklung noch deutlicher als die Gesamt-Biomasse. Die Summe der Einzeldeckungen lassen in der unbereinigten Darstellung (mit Feuchte und Jahreseinfluss) kaum Unterschiede durch den CO<sub>2</sub>-Einfluss erkennen, die Gräser-Deckung deutet einen ähnlichen Trend wie die Ergebnisse aus den Biomasse-Daten an.

### 3.1.4 Einzel-Deckungen ausgewählter Arten

Im Folgenden werden Einzel-Deckungen von allen Arten mit über 1 % Deckung sowie die Einzel-Deckungen der Kräuter *Plantago lanceolata*, *Rumex acetosa*, *Filipendula ulmaria* und *Glechoma hederacea* dargestellt. Alle hier beschriebenen Reaktionen einzelner Arten streuen sehr stark (vgl. Fehlerbalken in Abbildung 10 und folgenden). In Tabelle 14 sind die durchschnittlichen Deckungen aller dargestellten Arten aufgelistet.

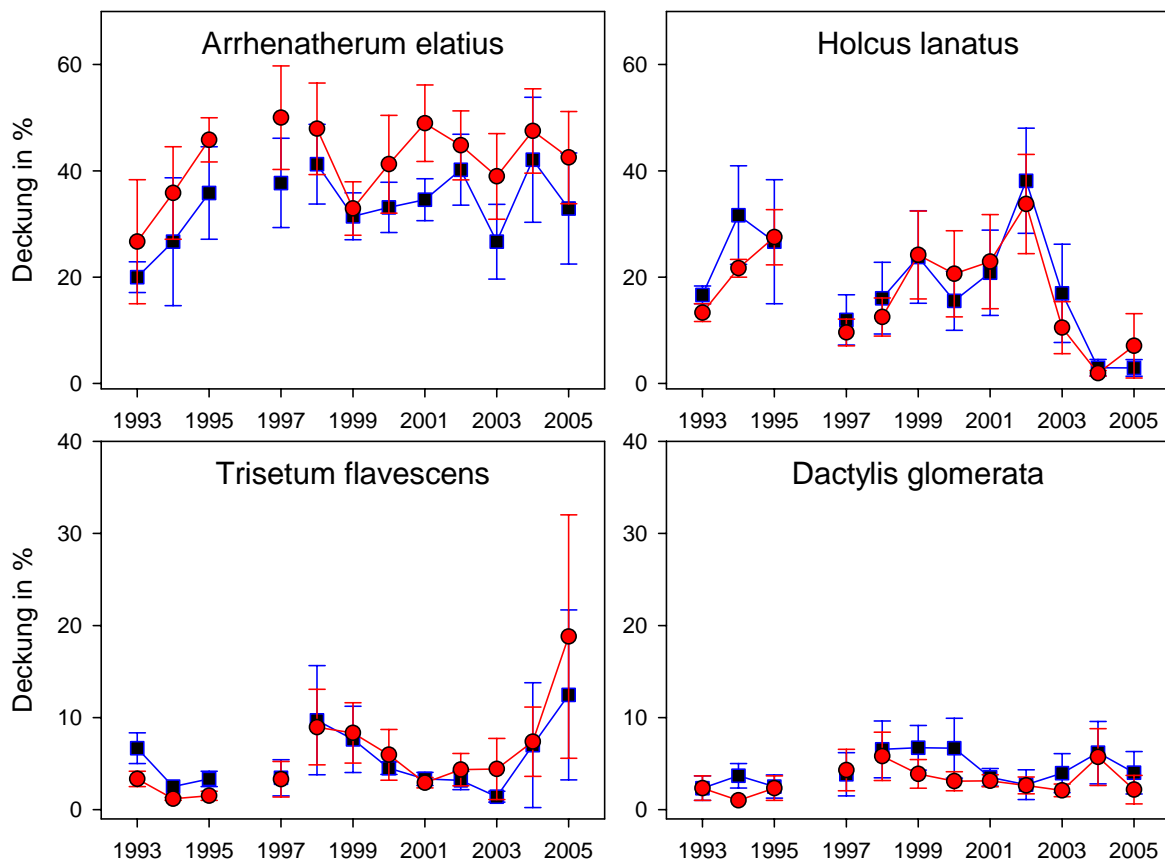
**Tabelle 14: Durchschnittliche Deckung der dargestellten Arten auf den E- und A-Flächen**

Wissenschaftlicher Artname	Deckung auf E-Flächen (%)	Deckung auf A-Flächen (%)	Wissenschaftlicher Artname	Deckung auf E-Flächen (%)	Deckung A-Flächen (%)
<i>Arrhenatherum elatius</i>	43,87	35,56	<i>Lathyrus pratensis</i>	2,11	3,21
<i>Holcus lanatus</i>	16,06	16,27	<i>Galium mollugo</i>	29,63	32,3
<i>Trisetum flavescens</i>	7,16	5,83	<i>Geranium pratense</i>	1,38	5,3
<i>Dactylis glomerata</i>	3,64	4,85	<i>Sanguisorba officinalis</i>	1,17	2,52
<i>Alopecurus pratensis</i>	5,03	3,21	<i>Plantago lanceolata</i>	0,09	0,13
<i>Poa trivialis</i>	2,71	3,10	<i>Rumex acetosa</i>	0,02	0,02
<i>Festuca rubra agg.</i>	2,12	2,17	<i>Filipendula ulmaria</i>	0,00	0,02
<i>Poa pratensis</i>	1,87	1,74	<i>Glechoma hederacea</i>	0,15	0,22
<b>Summe Gräser</b>	82,46	72,73	<b>Summe Kräuter</b>	34,55	43,75
<b>Summe insgesamt</b>	117,01	116,48			

E = unter erhöhtem CO<sub>2</sub>, A = unter Umgebungsluft, Durchschnittswerte für den Zeitraum 1997- 2005

*Arrhenatherum elatius* (Abbildung 10) hatte auf CO<sub>2</sub>-angereicherten Flächen deutlich mehr Deckung. Sowohl unter Umgebungsluft (durchschnittlich 35,56 %) als auch unter erhöhtem CO<sub>2</sub> (durchschnittlich 43,87 %) blieb seine Deckung über die Jahre mit leichten Schwankungen im gleichen Wertebereich; der oben beschriebene Rückgang der Gräser-Deckungen in den Jahren 2001 und 2002 wurde nicht durch die Deckung des dominanten Grases *Arrhenatherum elatius* hervorgerufen. *Arrhenatherum* deckte allerdings bereits vor Versuchsbeginn 1993-1995 auf den zukünftigen CO<sub>2</sub>-Flächen (durchschnittlich 36,1 %) stärker als auf den Kontrollflächen (durchschnittlich 27,5 %) und nahm in der Zeit der CO<sub>2</sub>-Anreicherung stark zu. *Holcus lanatus* (Abbildung 10) erfuhr im zweiten bis vierten Jahr der Begasung eine leichte Förderung unter CO<sub>2</sub>, nahm danach unter Umgebungsluft stärker zu als unter erhöhtem CO<sub>2</sub> und fiel in den letzten Jahren auf allen Flächen sehr stark ab, bis im Jahr 2005 die Deckung auf den unter erhöhtem CO<sub>2</sub> wieder über der Deckung auf den Kontrollflächen lagen. Die Deckung von *Holcus* variierte vor der Installation der Ringe stark und lag etwa im Wertebereich der späteren Ergebnisse. *Trisetum flavescens* (Abbildung 10) zeigte eine zunächst nur undeutliche, ab 2002

deutlichere leichte Förderung auf Flächen mit erhöhtem CO<sub>2</sub>. Es deckte in der Vorphase auf den Kontrollflächen etwas stärker als auf den zukünftigen CO<sub>2</sub>-Flächen.



**Abbildung 10: Einzel-Deckungen der dominanten Gras-Arten**

Dargestellt sind die Jahresmittelwerte (aus beiden Flächen in jedem der 3 Ringe sowie der Frühjahrs- und Herbstaufnahme) für die Flächen unter Umgebungsluft (A, blaue Kästchen) und unter erhöhtem CO<sub>2</sub> (E, rote Kreise) mit Standardfehler. Die Achsenskalierung der Y-Achsen ist an die Deckungen angepasst.

Alle übrigen Grasarten erfuhren in den Jahren 2001 und 2002 eine Abnahme der Deckung sowohl unter Umgebungsluft als auch auf den begasteten Flächen.

*Dactylis glomerata* (Abbildung 10) erreichte in allen Jahren nach Beginn der Begasung auf den Kontrollflächen eine höhere Deckung und deckte in der Vorphase insgesamt nur wenig Fläche.

*Alopecurus pratensis* (Abbildung 11) nahm bis zum dritten Jahr der Begasung sowohl unter Umgebungsluft als auch unter erhöhtem CO<sub>2</sub> zunächst zu und dann auf allen Flächen sehr stark ab. In den letzten drei Jahren lag die Deckung auf Kontrollflächen höher. In der Vorphase war die Deckung von *Alopecurus* auf den zukünftigen CO<sub>2</sub>-Flächen stärker, später nahm sie auf beiden CO<sub>2</sub>-Varianten ab.



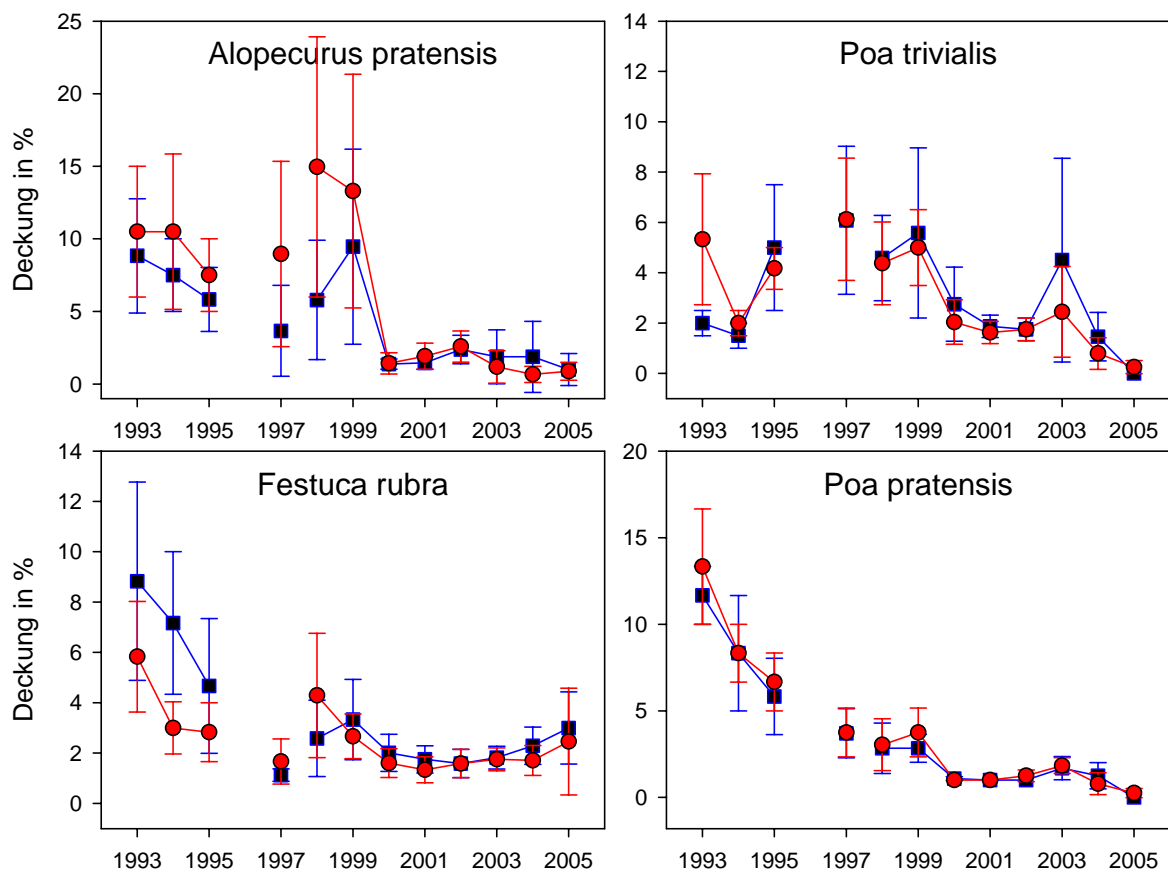
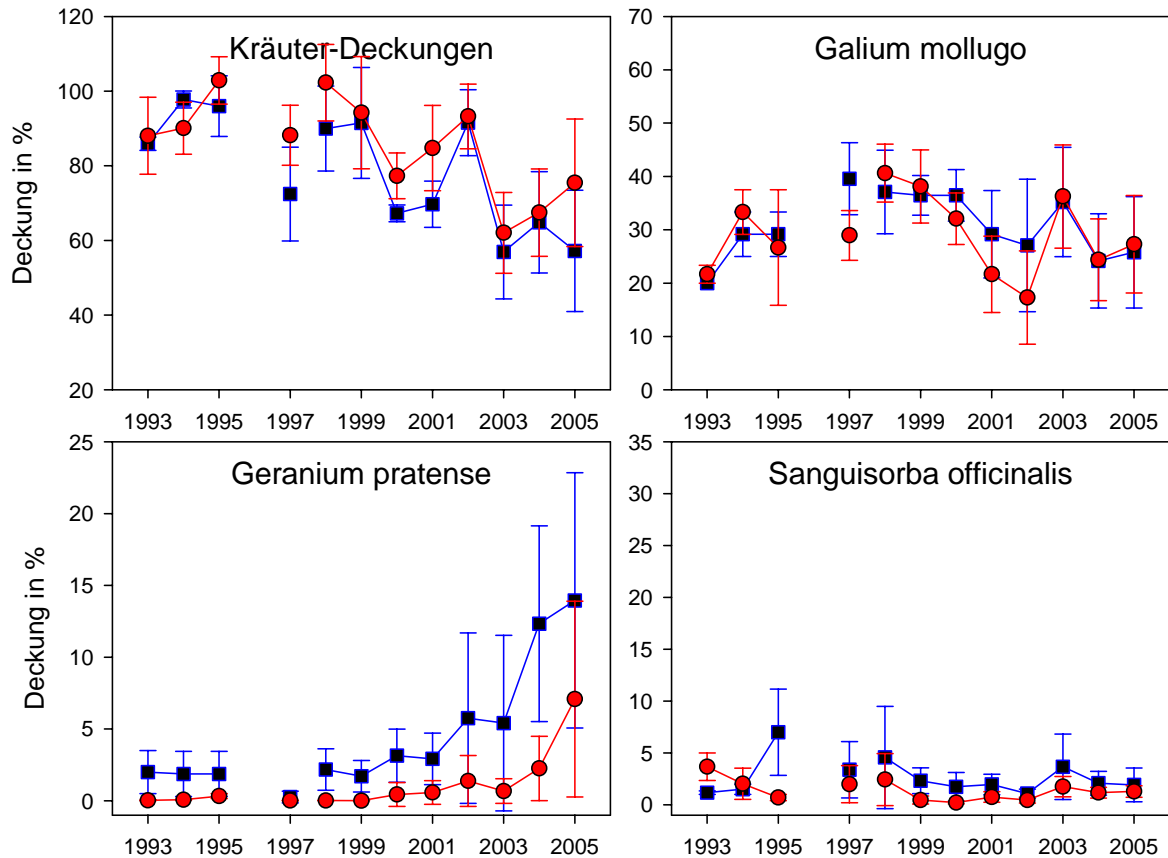


Abbildung 11: Einzel-Deckungen vier weiterer Gras-Arten

Dargestellt sind die Jahresmittelwerte (aus beiden Flächen in jedem der 3 Ringe sowie der Frühjahrs- und Herbstaufnahme) für die Flächen unter Umgebungsluft (A, blaue Kästchen) und unter erhöhtem CO<sub>2</sub> (E, rote Kreise) mit Standardfehler. Die Achsenskalierung der Y-Achsen ist an die Deckungen angepasst.

Die drei Gras-Arten *Poa trivialis*, *Poa pratensis* und *Festuca rubra* (Abbildung 11) hatten einen deutlich geringeren Anteil an der Deckung der Flächen. Die *Poa*-Arten nahmen im ersten Jahr der Begasung auf allen Flächen ab, *Festuca* dagegen zu. Dann erfolgte bei allen drei Arten eine Abnahme der Deckung bis zum Jahr 2002, gefolgt von einem Anstieg in 2003, der bei *Festuca* anhielt, bei den *Poa*-Arten jedoch wieder in eine Abnahme auf allen Flächen überging. Die *Poa*-Arten zeigten im letzten Jahr eine Zunahme unter erhöhtem CO<sub>2</sub>-Flächen, *Festuca* dagegen eine Abnahme. Vor der Installation der Ringe lagen die Deckungen von *Poa trivialis* im Bereich der späteren Werte (mit starken Schwankungen). *Festuca rubra* und *Poa pratensis* erfuhren von 1993 bis 1995 einen starken Rückgang auf allen Flächen, wobei *Poa pratensis* auf CO<sub>2</sub>-Flächen stärker vertreten war, *Festuca* dagegen auf den Kontrollflächen.



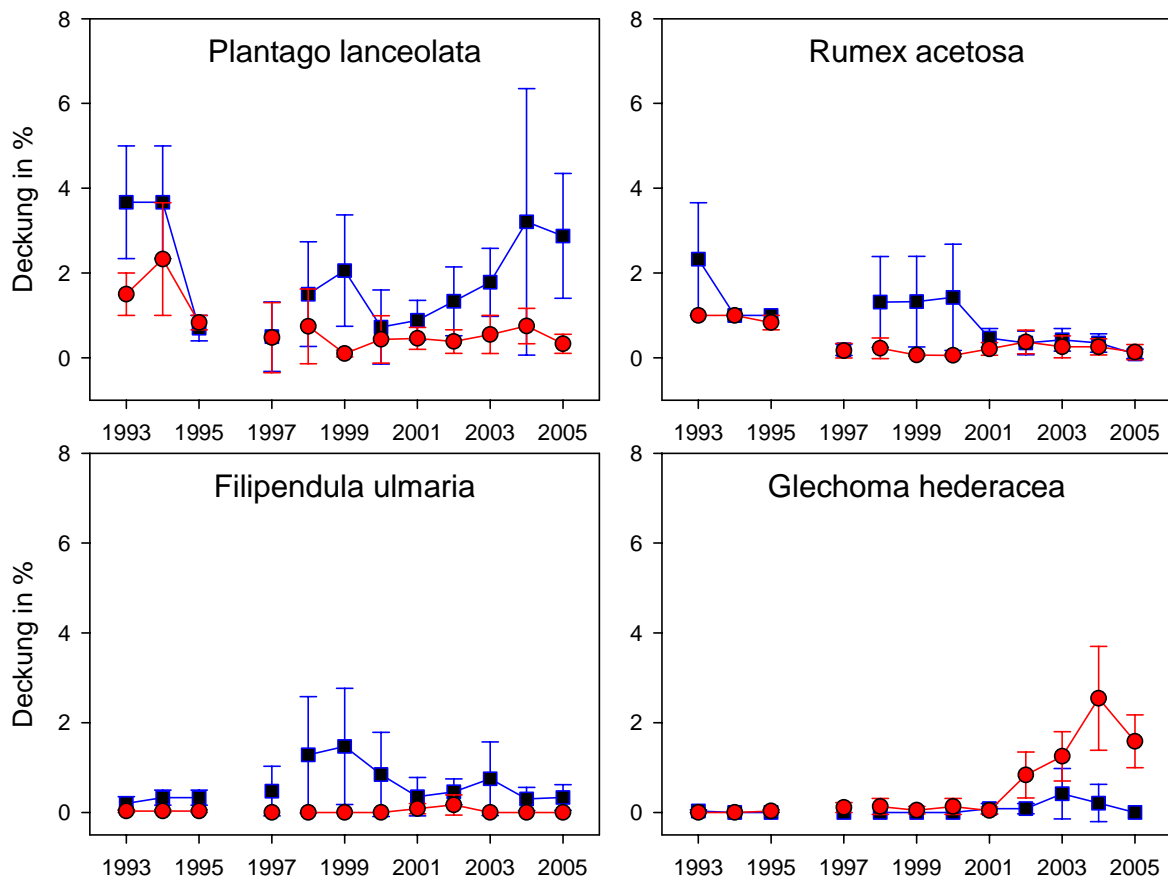
**Abbildung 12: Einzel-Deckungen der dominanten Kräuter-Arten**

Dargestellt sind die Jahresmittelwerte (aus beiden Flächen in jedem der 3 Ringe sowie der Frühjahrs- und Herbstaufnahme) für die Flächen unter Umgebungsluft (A, blaue Kästchen) und unter erhöhtem CO<sub>2</sub> (E, rote Kreise) mit Standardfehler. Die Achsenskalierung der Y-Achsen ist an die Deckungen angepasst.

Die **Kräuter-Deckung** ist in Abbildung 12 zum besseren Vergleich noch einmal dargestellt. Sie besteht zu 2/3 aus *Galium mollugo*. *Geranium pratense* erreichte in den letzten Jahren eine Deckung zwischen 10 und 20 % der Flächen, alle anderen Kräuter-Arten deckten deutlich weniger Fläche.

*Galium mollugo* deckte in den Jahren 2000 bis 2002 auf den CO<sub>2</sub>-Flächen deutlich *weniger*, in allen anderen Jahren seit Beginn der Begasung jedoch etwas *mehr* unter erhöhtem CO<sub>2</sub>. Es ergab sich insgesamt eine leicht negative CO<sub>2</sub>-Reaktion bei einer durchschnittlichen Gesamtdeckung von 29,36 % auf den E- und 32,3 % auf den A-Flächen (Tabelle 14). In den drei Jahren vor Einbau der Ringe lagen die durchschnittlichen Deckungen von *Galium mollugo* auf den späteren E-Flächen bei 32,2 % und auf den A-Flächen bei 26,1 %. *Geranium pratense* nahm auf allen Flächen bis zum Jahr 2003 leicht und danach stärker zu. Dabei übertraf die Deckung auf den Kontrollflächen diejenigen auf den CO<sub>2</sub>-Flächen um das Doppelte. Allerdings waren die Deckungen auch in der Vorphase bereits so auf die Flächen verteilt, wie später unter CO<sub>2</sub>-

Anreicherung. Die Einzeldaten streuen sehr (siehe Standardfehler!). *Sanguisorba officinalis* wies auf allen Flächen in allen Jahren relativ geringe und konstante Deckungen auf, mit etwas höheren Werten für die Deckung auf den Kontrollflächen. In der Vorphase war *Sanguisorba* zunächst auf den späteren CO<sub>2</sub>-Flächen stärker vertreten, 1995 jedoch bereits stärker als auf den späteren Kontrollflächen.



**Abbildung 13: Einzel-Deckungen vier weiterer Kräuter-Arten**

Dargestellt sind die Jahresmittelwerte (aus beiden Flächen in jedem der 3 Ringe sowie der Frühjahrs- und Herbstaufnahme) für die Flächen unter Umgebungsluft (A, blaue Kästchen) und unter erhöhtem CO<sub>2</sub> (E, rote Kreise) mit Standardfehler.

*Plantago lanceolata* (Abbildung 13) nahm auf den Kontrollflächen bis zum Jahr 1999 zu, im Jahr darauf ab und dann wieder stetig zu. Auf den begasten Flächen war die Deckung geringer, und es ergaben sich kaum Deckungsunterschiede im Verlauf des Untersuchungszeitraums. Auf den späteren Kontrollflächen deckte die Art in den ersten beiden Jahren der Vorphase doppelt so viel Fläche wie auf späteren CO<sub>2</sub>-Flächen. 1995 und 1997 waren die Werte auf allen Flächen jedoch fast gleich. *Rumex acetosa* und *Filipendula ulmaria* zeigten eine sehr ähnliche Verteilung der Deckungen. Beide Arten wiesen eine höhere Deckung auf den Flächen unter

Umgebungsluft in den ersten Jahren nach Beginn der Begasung auf, die Deckung war unter erhöhtem CO<sub>2</sub> geringer und zeigte kaum Unterschiede im Zeitverlauf. Ab 2001 nahm die Deckung auf den Kontrollflächen ab. *Filipendula* blieb auf begasteten Flächen etwas schwächer, bei *Rumex* war in den letzten vier Jahren fast gar keine Wirkung von erhöhtem CO<sub>2</sub> zu erkennen. Beide hatten in der Vorphase tendenziell höhere Deckungen auf den späteren Kontrollflächen, wobei die Werte von *Rumex* stärker schwankten als die von *Filipendula*. *Glechoma hederacea* erreichte in allen Jahren nach Beginn der Begasung auf unter erhöhtem CO<sub>2</sub> eine zunächst leicht höhere, ab 2002 deutlich höhere Deckung, die im letzten Jahr jedoch wieder abfiel. Auf den Kontrollflächen sowie allen Flächen in der Vorphase blieb die Deckung konstant und gering.

Zusammenfassend lassen die Beobachtungen eine Deckungszunahme der Arten *Arrhenatherum elatius*, *Trisetum flavescens*, *Alopecurus pratensis* und *Festuca pratensis* auf CO<sub>2</sub>-Flächen erkennen. Die Arten *Holcus lanatus*, *Dactylis glomerata*, *Poa trivialis*, *Poa pratensis*, sowie alle Kräuter und die einzige Leguminose *Lathyrus pratensis*, hatten auf den Flächen unter Umgebungsluft eine höhere Deckung.

### 3.1.5 Die um die Feuchte- und Zeiteinflüsse bereinigten CO<sub>2</sub>-Effekte

#### ***Erklärungsanteile einzelner Variablen auf die Varianz (konditionale Effekte)***

Tabelle 15 zeigt die konditionalen Effekte (Lepš & Šmilauer 2003) aller untersuchten Variablen für die Jahre 1997-1998, 1997-1999,... bis 1997-2005. Durch alle Variablen gemeinsam (Zeile 1) wurde in den Jahren 1997 und 1998 ein Anteil von 43,7 % an der Varianz erklärt (= der Erklärungsanteil betrug 43,7%), alle anderen Änderungen in der Deckung der Pflanzengesellschaft konnten nicht durch die untersuchten Variablen erklärt werden. In natürlichen Systemen ist ein Erklärungsanteil von über 30 % als gut einzustufen (mdl. Mitteilung Šmilauer 2003).

**Tabelle 15: Erklärungsanteile einzelner Variablen auf die Varianz**

Var. comp.	Variablen	Kovariablen	% var. expl. 1998	% var. expl. 1999	% var. expl. 2000	% var. expl. 2001	% var. expl. 2002	% var. expl. 2003	% var. expl. 2004	
1	Feuchte, Früh, Som, Jahre, CO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> x Feuchte, CO <sub>2</sub> x Jahre, CO <sub>2</sub> x Früh, CO <sub>2</sub> x Som		43.7	45.8	45.6	42.0	38.0	35.8	36.7	
2	Feuchte	Früh, Som, Jahre, CO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> x Feuchte, CO <sub>2</sub> x Jahre, CO <sub>2</sub> x Früh, CO <sub>2</sub> x Som	13.3	12.6	10.1	5.7	4.6	3.8	3.1	
3	Früh, Som	Feuchte, Jahre, CO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> x Feuchte, CO <sub>2</sub> x Jahre, CO <sub>2</sub> x Früh, CO <sub>2</sub> x Som	10.1	8.6	6.2	4.3	3.5	2.9	2.5	
4	Jahr 0	Feuchte, Früh, Som, CO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> x Feuchte, CO <sub>2</sub> x Jahre, CO <sub>2</sub> x Früh, CO <sub>2</sub> x Som	10.0	9.4	6.9	5.2	3.5	2.5	2.0	
5	Jahr 1		10.0	2.2	1.1	0.8	1.0	1.0	1.1	
6	Jahr 2		3.4	2.3	2.0	2.2	2.1	2.1		
7	Jahr 3		3.4	1.4	1.0	0.9	0.8	0.8		
8	Jahr 4		2.5	1.8	1.4	1.1	1.1	1.1		
9	Jahr 5		3.2	2.4	2.4	1.7	1.7	1.7		
10	Jahr 6		2.7	2.7	1.9	1.9	1.9	1.9		
11	Jahr 7		3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9		
12	CO <sub>2</sub> (errechnet aus 23–13-14-15-16-17-18-19-20-21-22)			7.4	9.1	9.8	8.4	0.7	-0.1	-1.4
13	CO <sub>2</sub> x Feuchte		Feuchte, Früh, Som, Jahre, CO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> x Jahre, CO <sub>2</sub> x Früh, CO <sub>2</sub> x Som	3.2	2.7	2.6	2.2	2.0	1.9	1.7
14	CO <sub>2</sub> x Jahr 0		Feuchte, Früh, Som, Jahre, CO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> x Feuchte, CO <sub>2</sub> x Früh, CO <sub>2</sub> x Som	-	-	-	-	-	-	-
15	CO <sub>2</sub> x Jahr 1	1.2		0.8	0.7	0.9	1.2	1.5		
16	CO <sub>2</sub> x Jahr 2	1.2		0.7	0.7	1.6	2.0	2.2		
17	CO <sub>2</sub> x Jahr 3	0.6		0.3	0.5	0.7	0.9	0.9		
18	CO <sub>2</sub> x Jahr 4	0.7		0.5	0.5	0.6	0.6	0.6		
19	CO <sub>2</sub> x Jahr 5	6.6		6.6	6.6	6.6	6.6	6.6		
20	CO <sub>2</sub> x Jahr 6	4.8		4.8	4.8	4.8	4.8	4.8		
21	CO <sub>2</sub> x Jahr 7	2.7		2.7	2.7	2.7	2.7	2.7		
22	CO <sub>2</sub> x Früh, CO <sub>2</sub> x Som	Feuchte, Früh, Som, Jahre, CO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> x Feuchte, CO <sub>2</sub> x Jahre		2.3	2.2	2.1	2.0	1.7	1.6	1.5
23	CO <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> x Feuchte, CO <sub>2</sub> x Jahre, CO <sub>2</sub> x Früh, CO <sub>2</sub> x Som	Feuchte, Früh, Som, Jahre		12.9	16.4	16.6	15.0	14.5	14.3	14.1

Die Aufstellung zeigt die Erklärungsanteile der Variablen (% var. expl.) für die Jahre bis 1998 (d.h. 1997 und 1998), bis 1999 (d.h. 1997 bis 1999) etc. CO<sub>2</sub> = CO<sub>2</sub>-Behandlung, Feuchte = Bodenfeuchte, Früh = Aufnahmen im Frühjahr, Som = Aufnahmen im Sommer.

Der alleinige Einfluss von CO<sub>2</sub> (Zeile 13) lässt sich nicht direkt berechnen, sondern muss durch Subtraktion des Einflusses der Interaktionen mit CO<sub>2</sub> (Addition der Zeilen 14-22) vom Einfluss aller Variablen gemeinsam (Zeile 23) ermittelt werden. Da die Effekte sich teilweise überschneiden, kann dieses Ergebnis auch Minuswerte annehmen (Legendre & Legendre 1998), wie es hier ab 2003 der Fall ist. Ein negativer Erklärungsanteil von CO<sub>2</sub> wird dann als sehr geringer Wert, der in den Interferenzen der anderen Einflüsse und ihrer Interaktionen verschwindet, interpretiert (Legendre & Legendre 1998). Neben CO<sub>2</sub> nahmen auch die Erklärungsanteile der Feuchte, Jahreszeiten und deren Interaktionen mit CO<sub>2</sub> über die Jahre

hinweg ab. Die Erklärungsanteile der *einzelnen* Jahre (Zeilen 4-11) nahmen ebenfalls überwiegend ab. Da jedoch die *Anzahl der Jahre* zunahm, machte die Summe der Jahre im Verlauf des Experiments einen immer höheren Erklärungsanteil am Einfluss auf die Varianz der Deckungen aus. Ähnliches galt, mit Ausnahmen, für die Interaktionen der Jahre mit CO<sub>2</sub> (Zeilen 14-21). An dieser Stelle sei bereits auf den besonders hohen Wert der Interaktion CO<sub>2</sub> x Jahr 5 für das Jahr 2002 (Zeile 19) hingewiesen: ab 2002 (Jahr 5) ist der reine Einfluss von CO<sub>2</sub> auf die Pflanzengemeinschaft nur noch sehr gering, die Interaktionen CO<sub>2</sub> x Jahre, die die jahresspezifischen CO<sub>2</sub>-Einflüsse beschreibt, dagegen höher.

### ***Signifikante Effekte der Variablen auf die Deckung der Pflanzengesellschaft***

Die Ergebnisse der Monte Carlo Permutation Tests in Tabelle 16 zeigen den Einfluss der Variablen auf die Deckung der Pflanzengesellschaft. In Tabelle 17 sind die Signifikanzen zu den Einflüssen aufgelistet.

**Tabelle 16: Einfluss der Variablen auf die Deckung der Pflanzengesellschaft**

Untersuchte Null Hypothese	Variablen	Kovariablen	% all can axes -1998	% all can axes -1999	% all can axes -2000	% all can axes -2001	% all can axes -2002	% all can axes -2003	% all can axes -2004
H <sub>0</sub> 1 Volles Model	CO <sub>2</sub> , Feuchte, Jahre, CO <sub>2</sub> x Feuchte, CO <sub>2</sub> x Jahre, CO <sub>2</sub> x Früh, CO <sub>2</sub> x Som	Früh, Som	32.1	34.3	35.0	31.5	30.5	30.1	31.7
H <sub>0</sub> 2 Haupteffekte	CO <sub>2</sub> , Feuchte, Jahre	Früh, Som	26.1	29.0	29.6	26.6	20.2	17.9	18.7
H <sub>0</sub> 2a	CO <sub>2</sub>	Feuchte, Jahre, Früh, Som	6.9	11.0	11.2	10.1	4.2	2.0	1.2
H <sub>0</sub> 2b	Feuchte	CO <sub>2</sub> , Jahre, Früh, Som	13.5	11.5	8.9	4.2	3.3	2.6	2.0
H <sub>0</sub> 2c	Jahre	CO <sub>2</sub> , Feuchte, Früh, Som	10.1	10.7	7.0	14.4	12.9	13.5	15.5
H <sub>0</sub> 3 Interaktionen	CO <sub>2</sub> x Feuchte, CO <sub>2</sub> x Jahre, CO <sub>2</sub> x Früh, CO <sub>2</sub> x Som	CO <sub>2</sub> , Feuchte, Jahre, Früh, Som	6.0	5.4	5.4	4.9	10.3	12.3	13.0
H <sub>0</sub> 3a	CO <sub>2</sub> x Feuchte	CO <sub>2</sub> , Feuchte, Jahre, Früh, Som, CO <sub>2</sub> x Jahre, CO <sub>2</sub> x Früh, CO <sub>2</sub> x Som	3.2	2.7	2.6	2.2	2.0	1.9	1.7
H <sub>0</sub> 3b	CO <sub>2</sub> x Jahre	CO <sub>2</sub> , Feuchte, Jahre, Früh, Som, CO <sub>2</sub> x Feuchte, CO <sub>2</sub> x Früh, CO <sub>2</sub> x Som	-	1.2	1.4	1.8	8.1	9.6	10.4
H <sub>0</sub> 3c	CO <sub>2</sub> x Früh, CO <sub>2</sub> x Som	CO <sub>2</sub> , Feuchte, Jahre, Früh, Som, CO <sub>2</sub> x Feuchte, CO <sub>2</sub> x Jahre	2.3	2.2	2.1	2.0	1.7	1.6	1.5

Die statistische Analyse mit Monte Carlo Permutations-Tests zeigt die Anteile der Variablen, die durch alle „canonical axes“ erklärt werden (% expl. all can. axes) für die Jahre bis 1998 (dh. 1997 und 1998), bis 1999 (d.h. 1997 bis 1999) etc. CO<sub>2</sub> = CO<sub>2</sub>-Behandlung, Feuchte = Bodenfeuchte, Standard-Covariablen: Früh = Aufnahmen im Frühjahr, Som = Aufnahmen im Sommer. Signifikante Einflüsse (p<0,05) sind rot (nur mit Permutation der split plots lila), Trends (P < 0,1) blau markiert, vgl. Tabelle 17.

Tabelle 17: Signifikanzen der Variablen aus den Monte-Carlo-Permutations-Tests

Untersuchte Null Hypothese	Variablen	Kovariablen	P I	P I	P I	P I	P I	P I	P I
			P II -1998	P II -1999	P II -2000	P II -2001	P II -2002	P II -2003	P II -2004
H <sub>01</sub> Volles Modell	CO <sub>2</sub> , Feuchte, Jahre, CO <sub>2</sub> x Feuchte, CO <sub>2</sub> x Jahre, CO <sub>2</sub> x Früh, CO <sub>2</sub> x Som	Früh, Som	0.394 0.213	0.014 0.020	0.042 0.025	0.196 0.124	0.088 0.105	0.102 0.076	0.117 0.053
H <sub>02</sub> Haupteffekte	CO <sub>2</sub> , Feuchte, Jahre	Früh, Som	0.115 0.039	0.002 0.002	0.012 0.002	0.072 0.025	0.278 0.386	0.727 0.726	0.774 0.589
H <sub>02a</sub>	CO <sub>2</sub>	Feuchte, Jahre, Früh, Som	0.390 0.207	0.095 0.025	0.132 0.034	0.190 0.055	0.197 0.234	0.697 0.731	0.788 0.835
H <sub>02b</sub>	Feuchte	CO <sub>2</sub> , Jahre, Früh, Som	0.048 0.053	0.016 0.015	0.045 0.047	0.199 0.235	0.190 0.287	0.220 0.307	0.257 0.356
H <sub>02c</sub>	Jahre	CO <sub>2</sub> , Feuchte, Früh, Som	0.169 0.103	0.121 0.071	0.205 0.142	0.270 0.108	0.252 0.311	0.341 0.213	0.443 0.161
H <sub>03</sub> Interaktionen	CO <sub>2</sub> x Feuchte, CO <sub>2</sub> x Jahre, CO <sub>2</sub> x Früh, CO <sub>2</sub> x Som	CO <sub>2</sub> , Feuchte, Jahre, Früh, Som	0.791 0.728	0.660 0.637	0.582 0.616	0.746 0.771	0.123 0.087	0.119 0.056	0.124 0.075
H <sub>03a</sub>	CO <sub>2</sub> x Feuchte	CO <sub>2</sub> , Feuchte, Jahre, Früh, Som, CO <sub>2</sub> x Jahre, CO <sub>2</sub> x Früh, CO <sub>2</sub> x Som	0.602 0.726	0.409 0.539	0.407 0.461	0.412 0.483	0.252 0.402	0.204 0.284	0.192 0.258
H <sub>03b</sub>	CO <sub>2</sub> x Jahre	CO <sub>2</sub> , Feuchte, Jahre, Früh, Som, CO <sub>2</sub> x Feuchte, CO <sub>2</sub> x Früh, CO <sub>2</sub> x Som	-	0.602 0.604	0.693 0.846	0.808 0.878	0.033 0.044	0.186 0.062	0.187 0.074
H <sub>03c</sub>	CO <sub>2</sub> x Früh, CO <sub>2</sub> x Som	CO <sub>2</sub> , Feuchte, Jahre, Früh, Som, CO <sub>2</sub> x Feuchte, CO <sub>2</sub> x Jahre	0.768 0.853	0.563 0.630	0.441 0.491	0.367 0.455	0.279 0.426	0.214 0.283	0.246 0.256

P I: Signifikanztest ohne Monte-Carlo-Permutation der split plots. P II: abgeschwächter Signifikanztest mit Monte-Carlo-Permutation der split plots. Werte für die Jahre bis 1998 (dh. 1997 und 1998), bis 1999 (d.h. 1997 bis 1999) etc. CO<sub>2</sub> = CO<sub>2</sub>-Behandlung, Feuchte = Bodenfeuchte, Standard-Kovariablen: Früh = Aufnahmen im Frühjahr, Som = Aufnahmen im Sommer. Signifikanzen sind rot, Trends blau markiert.

Für die Zeiträume 1997-1999 und 1997-2000 war die Pflanzengemeinschaft signifikant durch die Haupteffekte (H<sub>02</sub>) Feuchte und CO<sub>2</sub> (letzteres nur bei abgeschwächtem Permutationstest P II) beeinflusst. Der Einfluss von CO<sub>2</sub> blieb für 1997-2001 als Trend bestehen, durch den Wegfall der Feuchte als signifikanten Effekt wurde jedoch das volle Modell (H<sub>01</sub>) nicht mehr signifikant. CO<sub>2</sub> hatte also in den Zeiträumen 1997-1999, 1997-2000 und 1997-2001 einen konstanten Effekt auf die Zusammensetzung der Pflanzengemeinschaft, feuchte-, zeit- und jahreszeitlich abhängige CO<sub>2</sub>-Effekte (Interaktionen, H<sub>03</sub>) waren nicht signifikant. Ab dem Zeitraum 1997-2002 wurde die Interaktion von CO<sub>2</sub> x Jahre (H<sub>03b</sub>) signifikant (P I und P II), was zu einem Trend zur Signifikanz der Interaktionen (H<sub>03</sub>) führte (nur P II). Dieser Trend setzte sich durch die anschließenden Jahre hindurch schwächer werdend fort und verursachte einen Trend zur Signifikanz des vollen Modells (H<sub>01</sub>, nur P I oder P II), obwohl die ihn verursachende Interaktion CO<sub>2</sub> x Jahre (H<sub>03b</sub>) ab 2003 ihrerseits auch nur noch als Trend, und nur noch bei abgeschwächtem Permutationstest (PII), vorlag. Der konstante CO<sub>2</sub>-Effekt, der in den Zeiträumen bis 2001 auf die Pflanzengemeinschaft wirkte, wurde damit von CO<sub>2</sub>-Effekten, die

sich von Jahr zu Jahr grundsätzlich voneinander unterschieden (Interaktionen  $\text{CO}_2 \times \text{Jahre}$ ), abgelöst.

### ***Bereinigter $\text{CO}_2$ -Einfluss auf die Gesamt-Deckung der 27 Arten***

Für die Zeiträume 1997-1999, 1997-2000 und 1997-2001 lag im Giessen FACE ein signifikanter, konstanter Einfluss von  $\text{CO}_2$  auf die Deckung der 27 Arten mit über 5 % Stetigkeit auf den Flächen (Tabelle 11) vor. Für den Zeitraum 1997-2002 trat an die Stelle eines konstanten  $\text{CO}_2$ -Einflusses eine zeitabhängige Interaktion von  $\text{CO}_2 \times \text{Jahr 2}$  (=1997-1999) (nur P I) und von  $\text{CO}_2 \times \text{Jahr 5}$  (=1997-2002) (Tabelle 17). Für alle anderen Zeiträume lag kein signifikanter  $\text{CO}_2$ -Einfluss vor.

#### 3.1.6 Der konstante $\text{CO}_2$ -Effekt

Die Darstellungen der um die Faktoren Feuchte, Zeit und Jahreszeiten bereinigten, standardisierten  $\text{CO}_2$ -Reaktionen der 27 Arten beschränken sich auf die Zeiträume 1997-1999, 1997-2000 und 1997-2001, da der konstante  $\text{CO}_2$ -Einfluss in den anderen Jahren nicht signifikant getestet wurde (Tabelle 17) und nur marginale Werte ergab (Tabelle 15 und Tabelle 16). Die Abbildung 14, Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen die standardisierten Deckungszu- und abnahmen der Arten in diesen drei Jahren unter erhöhtem  $\text{CO}_2$ .

In allen drei Jahren, in denen  $\text{CO}_2$  einen signifikanten konstanten Einfluss auf die Deckung der Arten ausübte, resultierte eine überwiegend schwache Reaktion der Arten auf erhöhtes  $\text{CO}_2$  (Abbildung 14-16). Die  $\text{CO}_2$ -Reaktion dreier Arten (*Geranium pratense*, *Filipendula ulmaria* und *Rumex acetosa*) ist stark negativ, auch *Plantago* bildet noch eine relativ starker negative  $\text{CO}_2$ -Antwort aus. Alle anderen  $\text{CO}_2$ -Reaktionen werden im Folgenden als schwache Reaktionen bezeichnet.



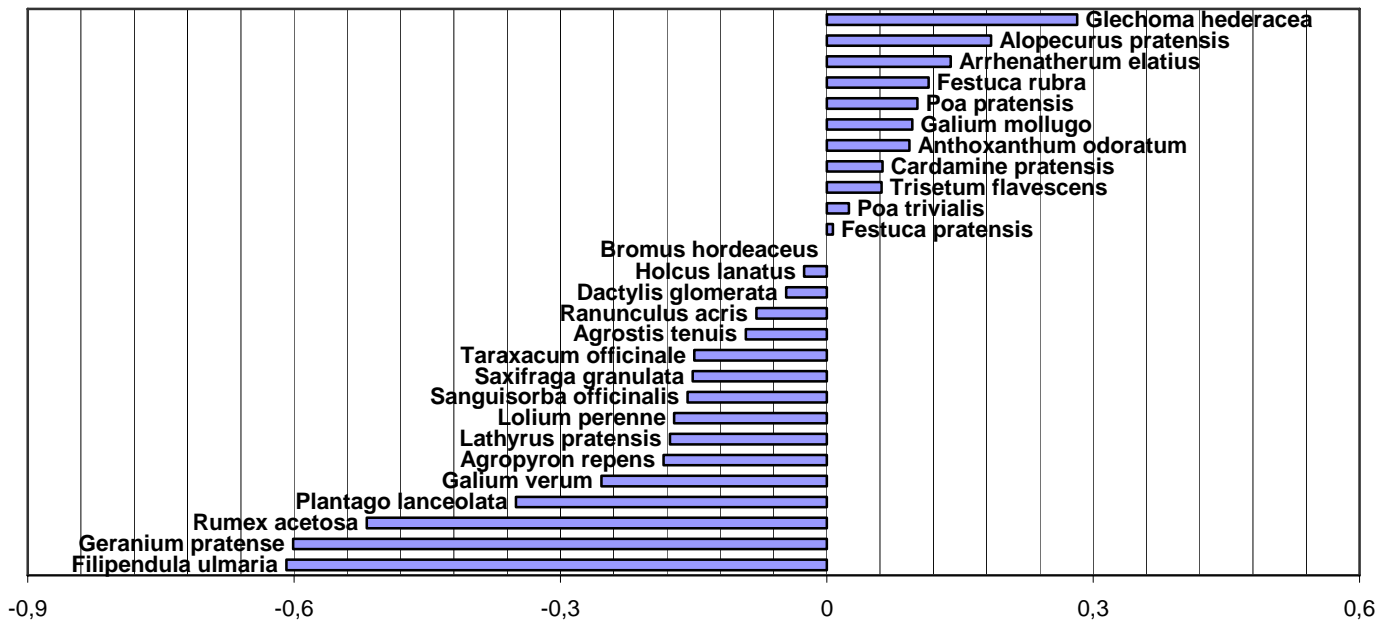
CO<sub>2</sub>-Antwort 1997-1999

Abbildung 14: Bereinigter CO<sub>2</sub>-Effekt auf die standardisierte Artreaktion der 27 Arten 1997-1999

Dargestellt ist die Abfolge der Arten mit der größten Deckungszunahme (oberste Zeile) bis zur größten Deckungsabnahme (unterste Zeile) unter erhöhtem CO<sub>2</sub>.

Im Zeitraum 1997-1999 reagierten *Glechoma hederacea*, *Alopecurus pratensis* und *Arrhenatherum elatius* mit der größten standardisierten Deckungszunahme. Insgesamt reagierten 11 Arten (9 Gräser und 2 Kräuter) positiv auf erhöhtes CO<sub>2</sub>, *Bromus* gar nicht und die anderen 15 Arten negativ. Es nahmen mehr Arten an Deckung ab als zu. Dennoch war die Biomasse unter erhöhtem CO<sub>2</sub> in diesen Jahren erhöht (Kammann et al. 2005), denn zwei der drei Hauptertragsbildner (*Arrhenatherum elatius* und *Galium mollugo*) lagen in der Gruppe der schwach positiv auf erhöhtes CO<sub>2</sub> reagierenden Arten. Der dritte, *Holcus lanatus*, reagierte 1997-1999 schwach negativ auf erhöhtes CO<sub>2</sub>. Stark negativ wirkte erhöhtes CO<sub>2</sub> auf *Geranium pratense* und *Filipendula ulmaria* sowie *Rumex acetosa*, deutlich weniger stark negativ auf *Plantago lanceolata*. Die vier letztgenannten Arten behielten ihre Position auch in den folgenden beiden Jahren bei.

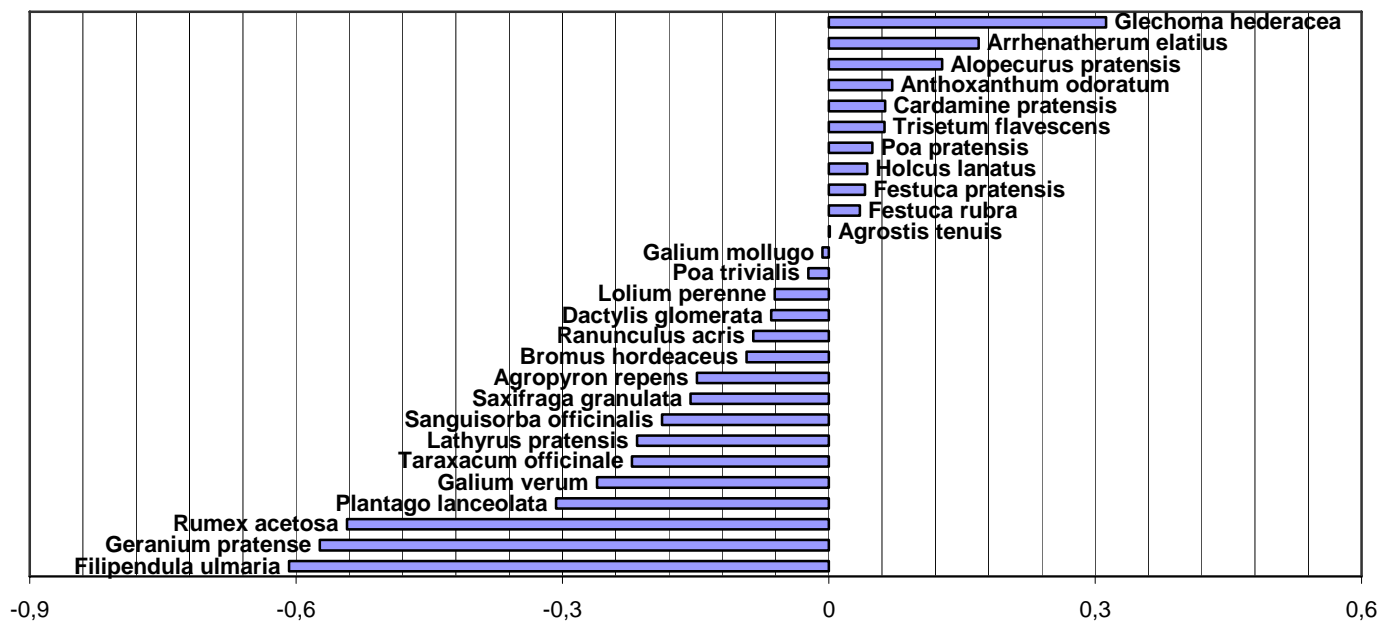
CO<sub>2</sub>-Antwort 1997-2000

Abbildung 15: Bereinigter CO<sub>2</sub>-Effekt auf die standardisierte Artreaktion der 27 Arten 1997-2000

Dargestellt ist die Abfolge der Arten mit der größten Deckungszunahme (oberste Zeile) bis zur größten Deckungsabnahme (unterste Zeile) unter erhöhtem CO<sub>2</sub>.

Auch im Zeitraum 1997-2000 reagierte *Glechoma hederacea* mit der größten standardisierten Deckungszunahme, der größte Hauptbestandsbildner, *Arrhenatherum elatius*, nahm den zweiten Platz dahinter ein (Abbildung 15). An dritter Position der positiv auf CO<sub>2</sub> reagierenden Arten stand *Alopecurus pratensis*. Die beiden Hauptbestandsbildner *Holcus lanatus* und *Galium mollugo* tauschten das Vorzeichen ihrer CO<sub>2</sub>-Reaktion, so dass zu den wiederum 11 positiv auf erhöhtes CO<sub>2</sub> reagierenden Arten nun 8 Gräser und 3 Kräuter zählten. Die anderen 16 Arten reagierten negativ. Die drei stark negativ auf erhöhtes CO<sub>2</sub> reagierenden Arten *Geranium pratense*, *Filipendula ulmaria*, *Rumex acetosa* sowie *Plantago lanceolata* behielten ihre Position bei.

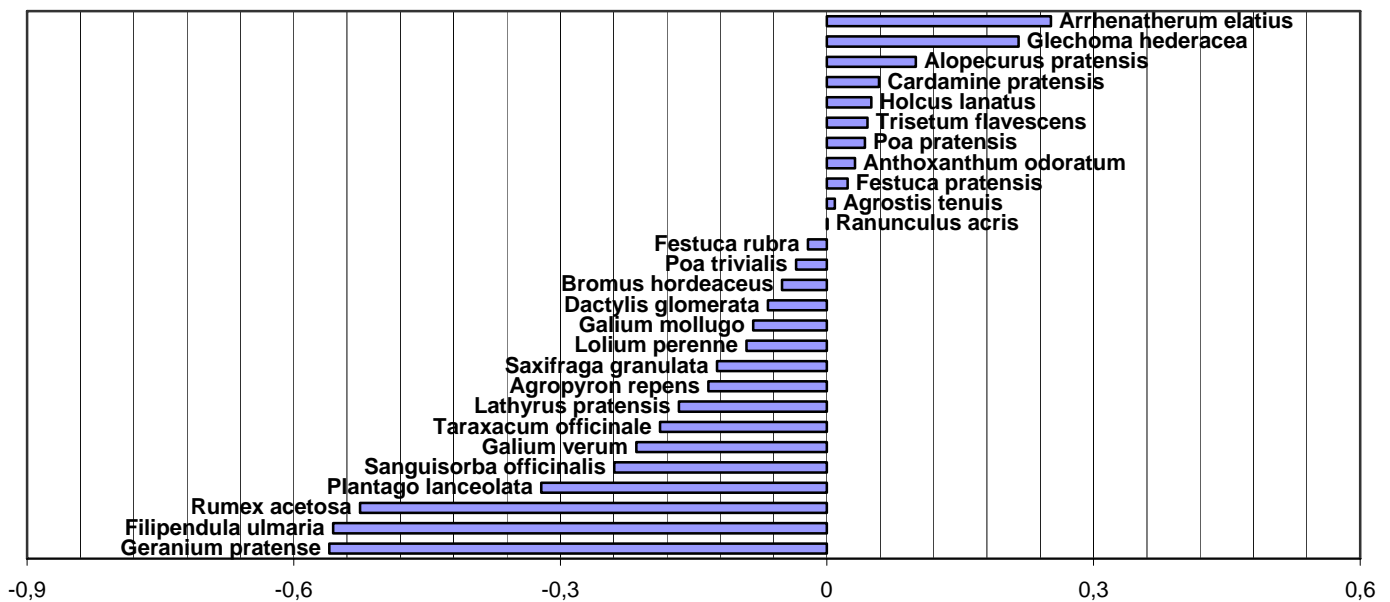
CO<sub>2</sub>-Antwort 1997-2001

Abbildung 16: Bereinigter CO<sub>2</sub>-Effekt auf die standardisierte Artreaktion der 27 Arten 1997-2001

Dargestellt ist die Reihenfolge der Arten mit der größten Deckungszunahme (oberste Zeile) bis zur größten Deckungsabnahme (unterste Zeile) unter erhöhtem CO<sub>2</sub>.

Im Zeitraum 1997-2001 zeigte der Hauptbestandbildner *Arrhenatherum elatius* die größte Deckungszunahme unter erhöhtem CO<sub>2</sub>, gefolgt von *Glechoma hederacea* und *Alopecurus pratensis*. *Galium mollugo* nahm einen Platz in der Mitte der schwach negativ auf erhöhtes CO<sub>2</sub> reagierenden Arten ein (Abbildung 16). Es reagierten 11 Arten (8 Gräser und 3 Kräuter) positiv auf erhöhtes CO<sub>2</sub>, die anderen 16 Arten (6 Gräser und 10 Kräuter, darunter die Leguminose *Lathyrus pratensis*) negativ. Die drei stark negativ auf erhöhtes CO<sub>2</sub> reagierenden Arten waren nach wie vor *Geranium pratense* und *Filipendula ulmaria* (die im Vergleich zu den Vorjahren den ersten und zweiten Platz gegeneinander austauschten) und *Rumex acetosa*.

In Tabelle 18 sind die artspezifischen CO<sub>2</sub>-Antworten aus den Jahren mit signifikantem CO<sub>2</sub>-Einfluss, in drei CO<sub>2</sub>-Rektionsgruppen und zwei Übergangsgruppen mit je drei Arten eingeteilt. In allen drei Jahren bildeten 11 Arten die positive Reaktionsgruppe, darunter jeweils drei Arten, die nur in einem oder zwei Jahren positiv, sonst aber schwach negativ auf erhöhtes CO<sub>2</sub> reagierten. Die stark negative Reaktionsgruppe blieb in allen drei Jahren gleich.

Tabelle 18: Vergleich der artspezifischen, konstanten CO<sub>2</sub>-Reaktionen

	1997-1999	1997-2000	1997-2001
<b>Positive CO<sub>2</sub>-Reaktionsgruppe</b>	<i>Glechoma hederacea</i>	<i>Glechoma hederacea</i>	<i>Arrhenatherum elatius</i>
	<i>Alopecurus pratensis</i>	<i>Arrhenatherum elatius</i>	<i>Glechoma hederacea</i>
	<i>Arrhenatherum elatius</i>	<i>Alopecurus pratensis</i>	<i>Alopecurus pratensis</i>
	<i>Festuca rubra</i> agg.	<i>Anthoxanthum odoratum</i>	<i>Cardamine pratensis</i>
	<i>Poa pratensis</i>	<i>Cardamine pratensis</i>	<i>Holcus lanatus</i>
	<i>Galium mollugo</i>	<i>Trisetum flavescens</i>	<i>Trisetum flavescens</i>
	<i>Anthoxanthum odoratum</i>	<i>Poa pratensis</i>	<i>Poa pratensis</i>
	<i>Cardamine pratensis</i>	<i>Holcus lanatus</i>	<i>Anthoxanthum odoratum</i>
	<i>Trisetum flavescens</i>	<i>Festuca pratensis</i>	<i>Festuca pratensis</i>
	<i>Poa trivialis</i>	<i>Festuca rubra</i> agg.	<i>Agrostis tenuis</i>
<i>Festuca pratensis</i>	<i>Agrostis tenuis</i>	<i>Ranunculus acris</i>	
<b>Überwiegend positiv</b>			
<b>Überwiegend schwach negativ</b>			
<b>Schwach negative CO<sub>2</sub>-Reaktionsgruppe</b>	<i>Bromus hordeaceus</i>	<i>Galium mollugo</i>	<i>Festuca rubra</i> agg.
	<i>Holcus lanatus</i>	<i>Poa trivialis</i>	<i>Poa trivialis</i>
	<i>Dactylis glomerata</i>	<i>Lolium perenne</i>	<i>Bromus hordeaceus</i>
	<i>Ranunculus acris</i>	<i>Dactylis glomerata</i>	<i>Dactylis glomerata</i>
	<i>Agrostis tenuis</i>	<i>Ranunculus acris</i>	<i>Galium mollugo</i>
	<i>Taraxacum officinale</i> agg.	<i>Bromus hordeaceus</i>	<i>Lolium perenne</i>
	<i>Saxifraga granulata</i>	<i>Agropyron repens</i>	<i>Saxifraga granulata</i>
	<i>Sanguisorba officinalis</i>	<i>Saxifraga granulata</i>	<i>Agropyron repens</i>
	<i>Lolium perenne</i>	<i>Sanguisorba officinalis</i>	<i>Lathyrus pratensis</i>
	<i>Lathyrus pratensis</i>	<i>Lathyrus pratensis</i>	<i>Taraxacum officinale</i> agg.
	<i>Agropyron repens</i>	<i>Taraxacum officinale</i> agg.	<i>Galium verum</i>
	<i>Galium verum</i>	<i>Galium verum</i>	<i>Sanguisorba officinalis</i>
	<i>Plantago lanceolata</i>	<i>Plantago lanceolata</i>	<i>Plantago lanceolata</i>
<b>Stark negative CO<sub>2</sub>-Reaktionsgruppe</b>	<i>Rumex acetosa</i>	<i>Rumex acetosa</i>	<i>Rumex acetosa</i>
	<i>Geranium pratense</i>	<i>Geranium pratense</i>	<i>Filipendula ulmaria</i>
	<i>Filipendula ulmaria</i>	<i>Filipendula ulmaria</i>	<i>Geranium pratense</i>

Die Arten wurden für jedes Jahr nach der Abfolge ihrer CO<sub>2</sub>-Reaktion aufgelistet und Zugehörigkeiten zu CO<sub>2</sub>-Reaktionsgruppen durch gleiche Farben gekennzeichnet.

Für die Zeiträume 1997-1999, 1997-2000 und 1997-2001 resultieren folgende CO<sub>2</sub>-Reaktionsgruppen: eine positive mit 8 Arten, eine zu 2/3 positive (in 2 Jahren positive, in einem Jahr negative) mit 3 Arten, eine zu 2/3 schwach negative mit 3 Arten, eine schwach negative mit 10 Arten und eine stark negative mit 3 Arten. Für die Analyse der Gründe für positive bzw. negative CO<sub>2</sub>-Reaktionen wurden fünf CO<sub>2</sub>-Reaktionsgruppen gebildet: positiv (8 Arten), überwiegend positiv reagierende (3), überwiegend schwach negativ reagierende (3), in allen drei Jahren schwach negativ reagierende (10) und stark negativ reagierende Arten (3).

### 3.1.7 Die *a posteriori* PFTs zur Ermittlung der Gründe für CO<sub>2</sub>-Reaktionen

Die CO<sub>2</sub>-Reaktionsgruppen, die *a posteriori* (= nach dem Experiment) gemäß ihrer CO<sub>2</sub>-Reaktion zusammengestellten PFTs, wurden in einem Entscheidungsbaum auf gemeinsame

Eigenschaften untersucht um so auf die Merkmale, die den CO<sub>2</sub>-Reaktionen zugrunde lagen, zu schließen.

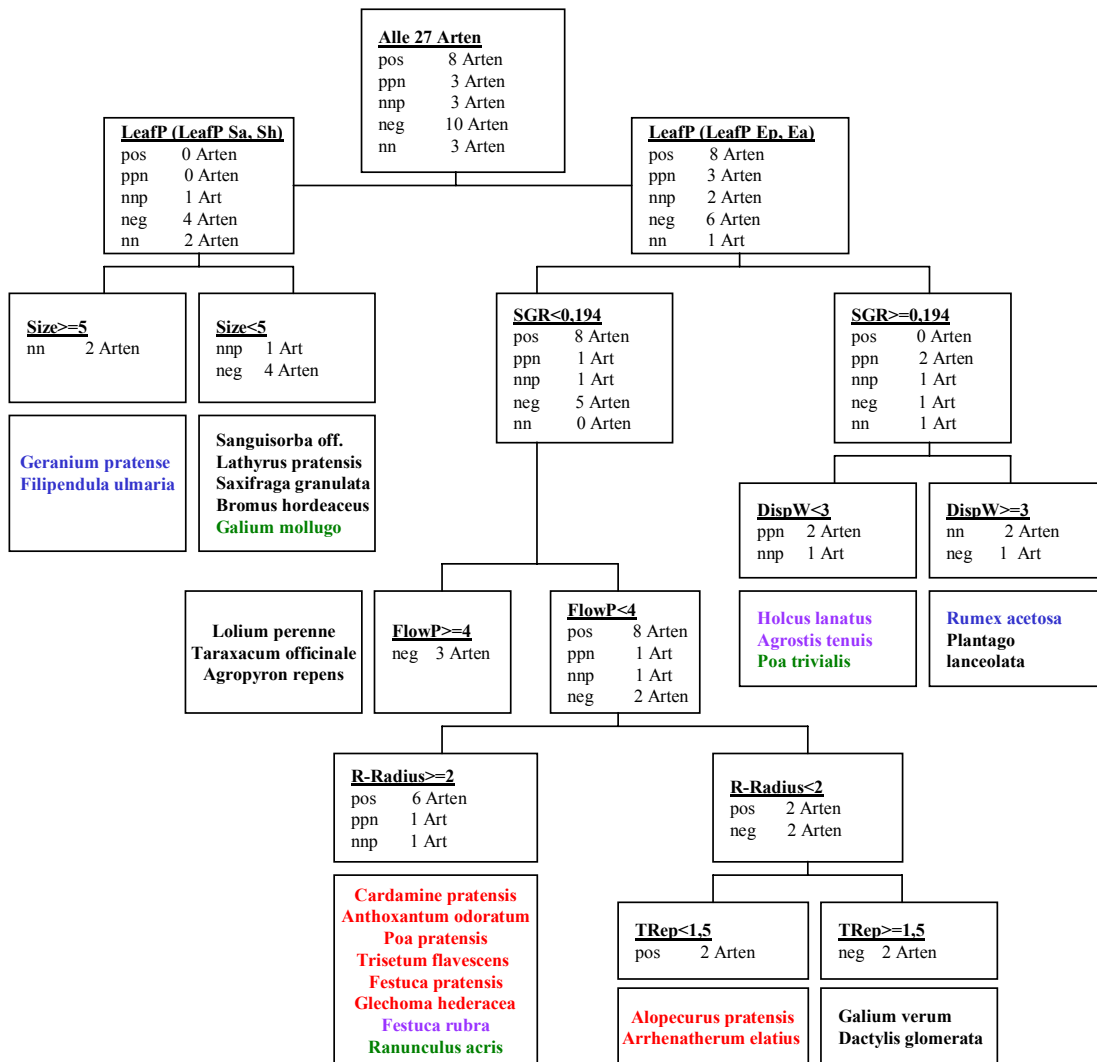


Abbildung 17: Entscheidungsbaum der a posteriori PFTs für die Jahre bis 2001

Die zur Verwendung gekommenen Eigenschaften (unterstrichene Titel in den Kästchen) sind:

LeafP = Blatt-Phänologie: Sa = aestival (Sommer bis Herbst), Sh = hibernal (vor allem Herbst bis Frühjahr), Ea = stets immergrün, Ep = nicht in allen Habitaten bzw. nur in milden Wintern immergrün).

Size = Blattgröße, < 5 → 50 mm, >= 5 → 51 mm und breiter.

DispW = Gewicht der Verbreitungseinheit: DispW < 3 → < 1 mg, DispW ≥ 3 → ≥ 1mg.

SGR = Keimlingswachstum in % pro Tag.

R-Radius = Grad der R-Strategie: R ≥ 2 → CSR, RCSR oder SRCSR Strategie, R < 2 → weniger R-Anteil. FlowP = Blühdauer in Monaten (vgl. auch Tabelle 12).

Angegeben ist die Anzahl der positiv (pos), zu 2/3 positiv (ppn), zu 2/3 schwach negativ (nnp), schwach negativ (neg) und stark negativ auf erhöhtes CO<sub>2</sub> Reaktionenenden Arten. Die farbigen Markierungen entsprechen derer in Tabelle 18.

Alle Sommergrünen reagierten negativ auf erhöhtes CO<sub>2</sub>. Stark negativ auf CO<sub>2</sub> reagierende Arten (blau markiert) waren entweder Sommergrüne mit großen Blättern (*Geranium pratense* und *Filipendula ulmaria*) oder Immergrüne mit schnellem Keimlingswachstum und großen Samen (*Rumex acetosa*). Hierher gelangte auch *Plantago lanceolata*, der in allen drei Jahren als vierte relativ stark negativ reagierende Art (jedoch in seiner Reaktion von den drei stark negativen abgesetzt) vertreten war (Abbildung 14 und folgende).

Immergrüne mit einem schnellen Keimlingswachstum und mit leichteren Samen gehörten zu den 2/3 schwach positiv (*Holcus lanatus*, *Agrostis tenuis*) oder zu 2/3 schwach negativ reagierenden (*Poa trivialis*) Arten.

Sommergrüne mit kleineren Blättern gehörten zu den schwach negativ (*Saxifraga granulata*, *Lathyrus pratensis*, *Saxifraga granulata* und *Bromus hordeaceus*) oder zu 2/3 schwach negativ reagierenden (*Galium mollugo*).

Positiv auf erhöhtes CO<sub>2</sub> (rot markiert) reagierten Immergrüne, deren Keimlinge langsam wuchsen, deren Blütezeit kürzer als 3 Monate dauerte und die entweder zu den (1) RCSR, SRCSR oder CSR-Strategen gehörten oder (2) zu den CCSR-Strategen, die sich bereits vor dem zweiten Jahr weiter vermehrten (Erklärung zu CSR-Strategen vgl. Text zu Tabelle 12 und Tabelle 13). In die erste der beiden Gruppen gehörten auch *Festuca rubra* und *Ranunculus acris*, die nicht in allen 3 Jahren positiv auf erhöhtes CO<sub>2</sub> reagierten.

CSR-Strategen mit weniger R-Anteil und späterer Reproduktionszeit gehörten in die Gruppe der schwach negativ auf erhöhtes CO<sub>2</sub> reagierenden Arten.

Die positive CO<sub>2</sub>-Reaktion war gekennzeichnet durch die Kombination der Merkmale:

- Immergrünes Wachstum, schnelles Keimlingswachstum und kleine Samen oder
- Immergrünes Wachstum, langsames Keimlingswachstum, kurze Blühdauer, ein nicht zu geringer R-Anteil, oder, bei geringerem R-Anteil ein frühes Einsetzen der Reproduktionszeit

Die stark negative CO<sub>2</sub>-Antwort war gekennzeichnet durch die Kombination der Merkmale:

- Sommergrünes Wachstum und große Blätter oder
- Immergrünes Wachstum, schnelles Keimlingswachstum und große Samen

### 3.1.8 Der zeitabhängige CO<sub>2</sub>-Effekt

Die Interaktionen von CO<sub>2</sub> mit den Jahren waren bis zum Zeitraum 1997-2001 nicht signifikant (Tabelle 16 und Tabelle 17). Für den Zeitraum 1997-2002 wurde der zeitabhängige CO<sub>2</sub>-Effekt signifikant und blieb für 1997-2003 und 1997-2004 als Trend bestehen. In Tabelle 19 ist der Einfluss der Interaktionen von CO<sub>2</sub> x Jahre für die Jahre bis 2002, bis 2003 und bis 2004 dargestellt.

**Tabelle 19: Einfluss des zeitabhängigen CO<sub>2</sub>-Effekts und seine Signifikanzen**

Interaktionen 2002 CO <sub>2</sub> x Jahr	CO <sub>2</sub> x Jahr 1	CO <sub>2</sub> x Jahr 2	CO <sub>2</sub> x Jahr 3	CO <sub>2</sub> x Jahr 4	CO <sub>2</sub> x Jahr 5	CO <sub>2</sub> x Jahr 6	CO <sub>2</sub> x Jahr 7
Einfluss der Variablen	0,9	1,6	0,5	0,5	6,6		
Signifikanzen P I	0,6085	0,0230	0,4750	0,8915	0,0235		
Signifikanzen P II	0,6160	0,1460	0,7415	0,8600	0,0025		
Interaktionen 2003 CO <sub>2</sub> x Jahr	CO <sub>2</sub> x Jahr 1	CO <sub>2</sub> x Jahr 2	CO <sub>2</sub> x Jahr 3	CO <sub>2</sub> x Jahr 4	CO <sub>2</sub> x Jahr 5	CO <sub>2</sub> x Jahr 6	CO <sub>2</sub> x Jahr 7
Einfluss der Variablen	1,2	2,0	0,7	0,5	4,8	2,7	
Signifikanzen P I	0,4430	0,3764	0,5295	0,6365	0,0305	0,2835	
Signifikanzen P II	0,3610	0,1040	0,5965	0,7765	0,0065	0,0830	
Interaktionen 2004 CO <sub>2</sub> x Jahr	CO <sub>2</sub> x Jahr 1	CO <sub>2</sub> x Jahr 2	CO <sub>2</sub> x Jahr 3	CO <sub>2</sub> x Jahr 4	CO <sub>2</sub> x Jahr 5	CO <sub>2</sub> x Jahr 6	CO <sub>2</sub> x Jahr 7
Einfluss der Variablen	1,5	2,2	0,9	0,6	3,0	1,4	2,7
Signifikanzen P I	0,0915	0,0095	0,3850	0,7160	0,0020	0,0900	0,0025
Signifikanzen P II	0,0770	0,0080	0,3895	0,7615	0,0015	0,0955	0,0025

P I: Signifikanztest ohne Monte-Carlo-Permutation der split plots. P II: abgeschwächter Signifikanztest mit Monte-Carlo-Permutation der split plots. CO<sub>2</sub>, Feuchte, Jahre, die Jahreszeiten (Früh, Som) und die Interaktionen von CO<sub>2</sub> mit der Feuchte und den Jahreszeiten (CO<sub>2</sub> x Feuchte, CO<sub>2</sub> x Früh, CO<sub>2</sub> x Som) sind analog zu Tabelle 16 und Tabelle 17 als Kovariablen gesetzt. Jahr 1 = 1998, ..., Jahr 7 = 2004.

Die signifikante Interaktion CO<sub>2</sub> x Jahre für die Jahre bis 2002 entstand durch die Interaktionen CO<sub>2</sub> x Jahr 2 und (nur für P I) durch die Interaktion CO<sub>2</sub> x Jahr 5. Der Wert der Einflussgröße (6,6) für die Interaktion CO<sub>2</sub> x Jahr 5 fiel bereits in Tabelle 15, Zeile 19, als markanter Wert auf. Auch für den Datensatz bis 2003 war die Interaktion CO<sub>2</sub> x Jahr 5 signifikant, und für CO<sub>2</sub> x Jahr 6 lag bei abgeschwächtem Permutationstest ein Trend vor. In den Jahren bis 2004 waren die Interaktionen CO<sub>2</sub> x Jahr 2, CO<sub>2</sub> x Jahr 5 und CO<sub>2</sub> x Jahr 7 signifikant und die Interaktionen CO<sub>2</sub> x Jahr 1 und CO<sub>2</sub> x Jahr 6 zeigten einen Trend.

Der Einfluss von CO<sub>2</sub> x Jahr 2 lag nicht in allen Jahresreihen vor und bewirkte weder Trend noch signifikante Interaktion für das gesamte Modell (H<sub>03</sub>, Tabelle 17). Er wird deswegen im weiteren nicht behandelt.

Der zeitabhängige CO<sub>2</sub>-Einfluss der Interaktion CO<sub>2</sub> x Jahr 5 der Datensätze bis 2002, 2003 und 2004 auf die Arten (Tabelle 19) wurde analog zum reinen CO<sub>2</sub>-Einfluss untersucht und ist in Tabelle 20 dargestellt.

**Tabelle 20: Vergleich der artspezifischen Reaktionen auf die Interaktion CO<sub>2</sub> x Jahr 5 bis 2004**

	1997-2002 CO <sub>2</sub> x Jahr 5	1997-2003 CO <sub>2</sub> x Jahr 5	1997-2004 CO <sub>2</sub> x Jahr 5
<b>Positive CO<sub>2</sub>-Reaktionsgruppe</b>	<i>Arrhenatherum elatius</i>	<i>Holcus lanatus</i>	<i>Ranunculus acris</i>
	<i>Glechoma hederacea</i>	<i>Alopecurus pratensis</i>	<i>Bromus hordeaceus</i>
	<i>Alopecurus pratensis</i>	<i>Ranunculus acris</i>	<i>Poa pratensis</i>
	<i>Holcus lanatus</i>	<i>Arrhenatherum elatius</i>	<i>Taraxacum officinale agg.</i>
	<i>Trisetum flavescens</i>	<i>Poa pratensis</i>	<i>Alopecurus pratensis</i>
	<i>Poa pratensis</i>	<i>Glechoma hederacea</i>	<i>Holcus lanatus</i>
	<i>Cardamine pratensis</i>	<i>Bromus hordeaceus</i>	<i>Poa trivialis</i>
	<i>Ranunculus acris</i>	<i>Cardamine pratensis</i>	<i>Glechoma hederacea</i>
	<i>Agrostis tenuis</i>	<i>Trisetum flavescens</i>	<i>Arrhenatherum elatius</i>
	<i>Festuca pratensis</i>	<i>Festuca pratensis</i>	<i>Galium mollugo</i>
	<i>Festuca rubra agg.</i>	<i>Poa trivialis</i>	<i>Festuca rubra agg.</i>
		<i>Agrostis tenuis</i>	<i>Cardamine pratensis</i>
		<i>Taraxacum officinale agg.</i>	<i>Saxifraga granulata</i>
		<i>Galium mollugo</i>	<i>Festuca pratensis</i>
	<i>Festuca rubra agg.</i>	<i>Agrostis tenuis</i>	
	<i>Dactylis glomerata</i>	<i>Galium verum</i>	
	<i>Saxifraga granulata</i>	<i>Trisetum flavescens</i>	
	<i>Galium verum</i>	<i>Lathyrus pratensis</i>	
<b>Überwiegend positiv</b>			
<b>Überwiegend schwach negativ</b>			
<b>Schwach negative CO<sub>2</sub>-Reaktionsgruppe</b>	<i>Poa trivialis</i>		
	<i>Dactylis glomerata</i>		
	<i>Anthoxanthum odoratum</i>		
	<i>Bromus hordeaceus</i>		
	<i>Lolium perenne</i>		
	<i>Agropyron repens</i>		
	<i>Galium mollugo</i>		
	<i>Lathyrus pratensis</i>	<i>Agropyron repens</i>	<i>Anthoxanthum odoratum</i>
	<i>Saxifraga granulata</i>	<i>Anthoxanthum odoratum</i>	<i>Plantago lanceolata</i>
	<i>Taraxacum officinale agg.</i>	<i>Lathyrus pratensis</i>	<i>Sanguisorba officinalis</i>
	<i>Galium verum</i>	<i>Lolium perenne</i>	<i>Dactylis glomerata</i>
<i>Sanguisorba officinalis</i>	<i>Sanguisorba officinalis</i>	<i>Agropyron repens</i>	
<i>Plantago lanceolata</i>	<i>Plantago lanceolata</i>	<i>Filipendula ulmaria</i>	
<b>Stark negative CO<sub>2</sub>-Reaktionsgruppe</b>	<i>Rumex acetosa</i>	<i>Filipendula ulmaria</i>	<i>Lolium perenne</i>
	<i>Geranium pratense</i>	<i>Geranium pratense</i>	<i>Geranium pratense</i>
	<i>Filipendula ulmaria</i>	<i>Rumex acetosa</i>	<i>Rumex acetosa</i>

Die Arten wurden für jedes Jahr nach der Abfolge ihrer zeitabhängigen CO<sub>2</sub>-Reaktion aufgelistet und Zugehörigkeiten zu CO<sub>2</sub> x Jahre-Reaktionsgruppen durch gleiche Farben gekennzeichnet.

Die zeitabhängige CO<sub>2</sub>-Reaktion der Arten im Jahr 5 (= 2002, auf der Grundlage der Daten von den Zeiträumen 1997-2002, 1997-2003 und 1997-2004, Tabelle 19) war sehr unterschiedlich. Im Zeitraum 1997-2002 reagierten 11 Arten schwach positiv auf die Interaktion CO<sub>2</sub> x Jahre, in den Zeiträumen 1997-2003 und 1997-2004 dagegen 18 Arten. 9 Arten blieben konstant in der positiven Reaktionsgruppe (rot) und nur 5 Arten in der leicht negativen Reaktionsgruppe (schwarz), alle anderen schwach auf die Interaktion CO<sub>2</sub> x Jahre reagierenden Arten wechselten



die Gruppen über die drei Jahre. Die negative Reaktion der drei Arten *Rumex acetosa*, *Geranium pratense* und *Filipendula ulmaria* auf die Interaktion CO<sub>2</sub> x Jahre war für 1997-2002 und 1997-2003 stark, für 1997-2004 dagegen sehr viel schwächer (nicht mehr blau markiert).

Die Darstellung zeigt auf anschauliche Weise, dass kein konstanter CO<sub>2</sub>-Einfluss auf die Pflanzengemeinschaft mehr vorliegt, denn bei Hinzunahme eines neuen Jahres-Datensatzes in die Analyse wirkten sich die CO<sub>2</sub>-Einflüsse (CO<sub>2</sub> x Jahre-Interaktionen) so unterschiedlich aus, dass keine CO<sub>2</sub>-Reaktionsgruppen für den gesamten Zeitraum zusammengestellt werden konnten. So konnten keine zugrundeliegenden Merkmale gefunden werden. Entscheidungsbäume ergaben weder bei der Einteilung in 3 Reaktionsgruppen (positiv, negativ, stark negativ), noch in 4 (immer positiv, überwiegend positiv, überwiegend negativ, immer negativ), 5 oder mehr Reaktionsgruppen Merkmale, die die (auch nur mühsam gebildeten) Gruppen voneinander trennten.

Die Interaktionen CO<sub>2</sub> x Jahr 5, 6 und 7 (2002, 2003 und 2004, basierend auf dem Datensatz von 1997 bis 2004, Tabelle 19) wurden ebenfalls analog zum konstanten CO<sub>2</sub>-Einfluss untersucht und sind in Tabelle 21 dargestellt.

**Tabelle 21: Vergleich der artspezifischen Reaktionen auf die Interaktion CO<sub>2</sub> x Jahre 5, 6 und 7**

	1997-2004 CO <sub>2</sub> x Jahr 5	1997-2004 CO <sub>2</sub> x Jahr 6	1997-2004 CO <sub>2</sub> x Jahr 7
<b>Schwach positive CO<sub>2</sub> x Jahre- Reaktionsgruppe</b>	<i>Ranunculus acris</i>	<i>Anthoxanthum odoratum</i>	<i>Arrhenatherum elatius</i>
	<i>Bromus hordeaceus</i>	<i>Festuca rubra</i> agg.	<i>Holcus lanatus</i>
	<i>Poa pratensis</i>	<i>Galium mollugo</i>	<i>Cardamine pratensis</i>
	<i>Taraxacum officinale</i> agg.	<i>Arrhenatherum elatius</i>	<i>Alopecurus pratensis</i>
	<i>Alopecurus pratensis</i>	<i>Glechoma hederacea</i>	<i>Trisetum flavescens</i>
	<i>Holcus lanatus</i>	<i>Poa trivialis</i>	<i>Lolium perenne</i>
	<i>Poa trivialis</i>	<i>Saxifraga granulata</i>	<i>Festuca pratensis</i>
	<i>Glechoma hederacea</i>		<i>Dactylis glomerata</i>
	<i>Arrhenatherum elatius</i>		<i>Agrostis tenuis</i>
	<i>Galium mollugo</i>		<i>Glechoma hederacea</i>
	<i>Festuca rubra</i> agg.		<i>Anthoxanthum odoratum</i>
	<i>Cardamine pratensis</i>		<i>Agropyron repens</i>
	<i>Saxifraga granulata</i>		<i>Bromus hordeaceus</i>
	<i>Festuca pratensis</i>		
	<i>Agrostis tenuis</i>		
<i>Galium verum</i>			
<i>Trisetum flavescens</i>			
<i>Lathyrus pratensis</i>			
<b>Überwiegend schwach positiv</b>			
<b>Überwiegend schwach negativ</b>			
<b>Schwach negative CO<sub>2</sub> x Jahre- Reaktionsgruppe</b>	<i>Anthoxanthum odoratum</i>	<i>Agrostis tenuis</i>	<i>Rumex acetosa</i>
	<i>Plantago lanceolata</i>	<i>Poa pratensis</i>	<i>Galium mollugo</i>
	<i>Sanguisorba officinalis</i>	<i>Festuca pratensis</i>	<i>Poa trivialis</i>
	<i>Dactylis glomerata</i>	<i>Lathyrus pratensis</i>	<i>Ranunculus acris</i>
	<i>Agropyron repens</i>	<i>Lolium perenne</i>	<i>Poa pratensis</i>
	<i>Filipendula ulmaria</i>	<i>Taraxacum officinale</i> agg.	<i>Festuca rubra</i> agg.
	<i>Lolium perenne</i>	<i>Dactylis glomerata</i>	<i>Sanguisorba officinalis</i>

<i>Geranium pratense</i>	<i>Bromus hordeaceus</i>	<i>Saxifraga granulata</i>
<i>Rumex acetosa</i>	<i>Trisetum flavescens</i>	<i>Lathyrus pratensis</i>
	<i>Galium verum</i>	<i>Galium verum</i>
	<i>Agropyron repens</i>	<i>Geranium pratense</i>
	<i>Ranunculus acris</i>	<i>Taraxacum officinale agg.</i>
	<i>Plantago lanceolata</i>	<i>Plantago lanceolata</i>
	<i>Sanguisorba officinalis</i>	<i>Filipendula ulmaria</i>
	<i>Alopecurus pratensis</i>	
	<i>Cardamine pratensis</i>	
	<i>Holcus lanatus</i>	
	<i>Geranium pratense</i>	
	<i>Rumex acetosa</i>	
	<i>Filipendula ulmaria</i>	

Die Arten wurden für jedes Jahr nach der Reihenfolge ihrer zeitabhängigen CO<sub>2</sub>-Reaktion aufgelistet und Zugehörigkeiten zu CO<sub>2</sub> x Jahre-Reaktionsgruppen durch gleiche Farben gekennzeichnet.

Auf den zeitabhängigen CO<sub>2</sub>-Einfluss in den Zeiträumen 1997-2002, 1997-2003 und 1997-2004 gab es keine stark negative Artreaktion. *Glechoma hederacea* und *Arrhenatherum elatius* reagierten in allen drei Jahren schwach positiv auf die Interaktion CO<sub>2</sub> x Jahre, *Plantago lanceolata*, *Sanguisorba officinalis*, *Filipendula ulmaria*, *Rumex acetosa* und *Geranium pratense* in allen Jahren schwach negativ, alle anderen Arten in den drei Jahren nicht einheitlich.

Auch bei Vergleich der CO<sub>2</sub>-Effekte der Jahre 5-7 wirkten sich die CO<sub>2</sub>-Einflüsse (CO<sub>2</sub> x Jahre-Interaktionen) von Jahr zu Jahr so unterschiedlich aus, dass es nicht mehr gelang, CO<sub>2</sub>-Reaktionsgruppen für den gesamten Zeitraum zusammenzustellen.

## 3.2 Der Wurzelraum

### 3.2.1 Wurzelbiomasse

Die Wurzelbiomasse war durch erhöhtes CO<sub>2</sub> in beiden Behandlungsvarianten und in beiden Tiefen erhöht, im Oberboden der Zylinderproben, in denen die Wurzelbiomassen stark streuten, allerdings nicht signifikant, wie in Tabelle 22 dargestellt.

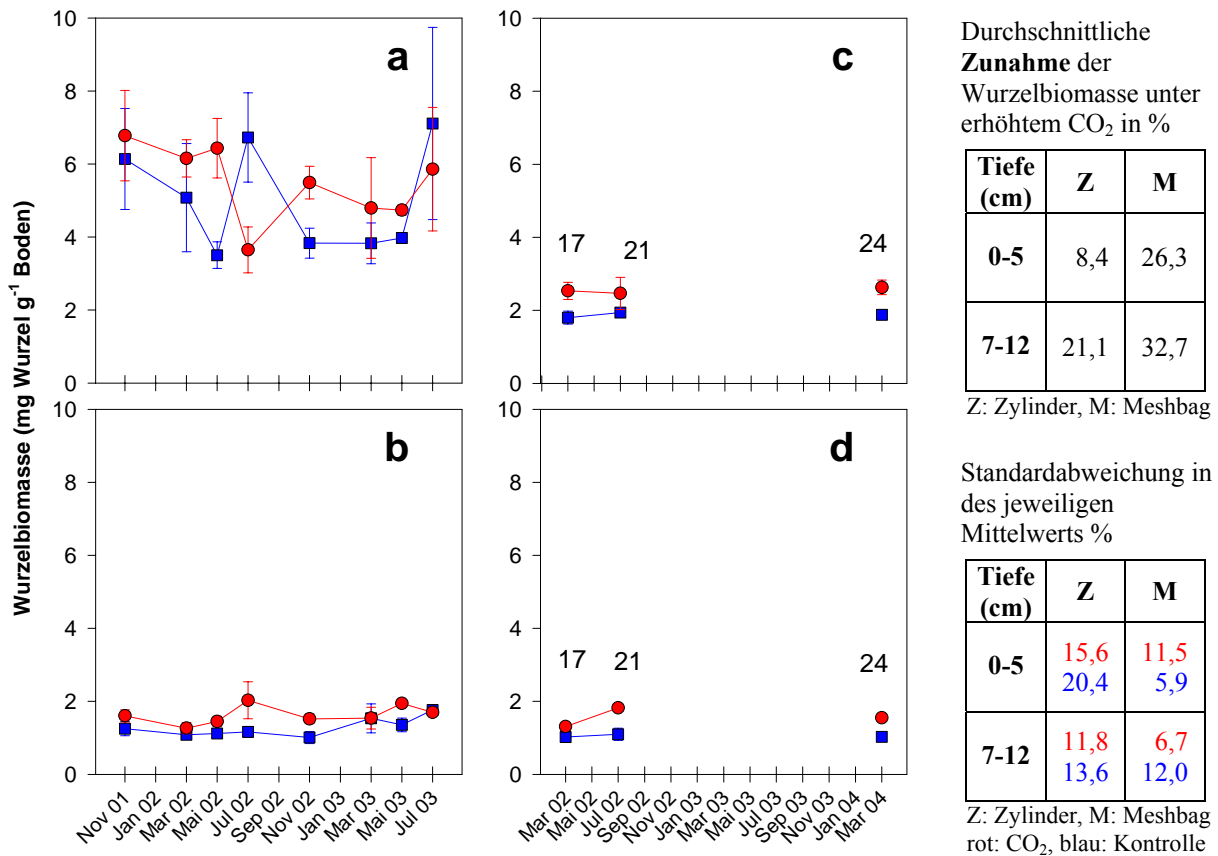
**Tabelle 22: CO<sub>2</sub>-Einfluss auf die Wurzelbiomasse**

Tests auf feste Effekte, Typ III, AR1							
VERSUCH	TIEFE	Quelle	Zähler-Freiheitsgrade	Nenner-Freiheitsgrade	F-Wert	Signifikanz	
Zylinder	0-5 cm	Intercept	1	89,595	3,299	0,073	
		CO <sub>2</sub>	1	38,088	2,291	0,138	
		RING	2	42,360	2,458	0,098	
		FEUCHTE	1	90,589	3,454	0,066	
		MONAT	1	79,351	0,475	0,493	
			FEUCHTE * MONAT	1	76,684	3,368	0,070
	7-12 cm	Intercept	1	133,858	2,189	0,141	
		CO <sub>2</sub>	1	42,747	4,409	0,042	
		RING	2	49,817	0,999	0,375	
		FEUCHTE	1	135,018	4,872	0,029	
MONAT		1	115,448	4,214	0,042		
		FEUCHTE * MONAT	1	106,794	6,728	0,011	
Meshbag	0-5 cm	Intercept	1	52,506	17,134	0,000	
		CO <sub>2</sub>	1	18,330	10,668	0,004	
		RING	2	19,985	1,325	0,288	
		FEUCHTE	1	58,555	0,543	0,464	
		MONAT	1	58,755	0,569	0,454	
			FEUCHTE * MONAT	1	58,536	0,536	0,467
	7-12 cm	Intercept	1	44,189	1,145	0,290	
		CO <sub>2</sub>	1	19,514	13,303	0,002	
		RING	2	20,585	0,576	0,571	
		FEUCHTE	1	54,475	0,540	0,466	
MONAT		1	54,221	0,166	0,685		
		FEUCHTE * MONAT	1	54,459	0,537	0,467	

Effekte der Parameter CO<sub>2</sub>, Ring, Feuchte, Monat und der Interaktion Feuchte x Monat auf die Wurzelbiomasse für die Zylinderproben und die Meshbag-Proben aus zwei Bodentiefen. Signifikante Einflüsse sind rot markiert, nicht signifikante CO<sub>2</sub>-Einflüsse blau.

Die Wurzelbiomasse war bei beiden Beprobungsmethoden im Unterboden signifikant von erhöhtem CO<sub>2</sub> beeinflusst, in den Meshbag-Proben auch im Oberboden (Abbildung 18). Die Feuchte, der Zeitpunkt der Probenahme (Monat) und die Interaktion zwischen Feuchte und dem Zeitpunkt der Probenahme nahmen nur auf die Wurzelbiomasse im Unterboden der Zylinderproben einen signifikanten Einfluss.

Abbildung 18 zeigt die Verteilung der Wurzelbiomassen auf E- und A-Flächen im Zeitverlauf



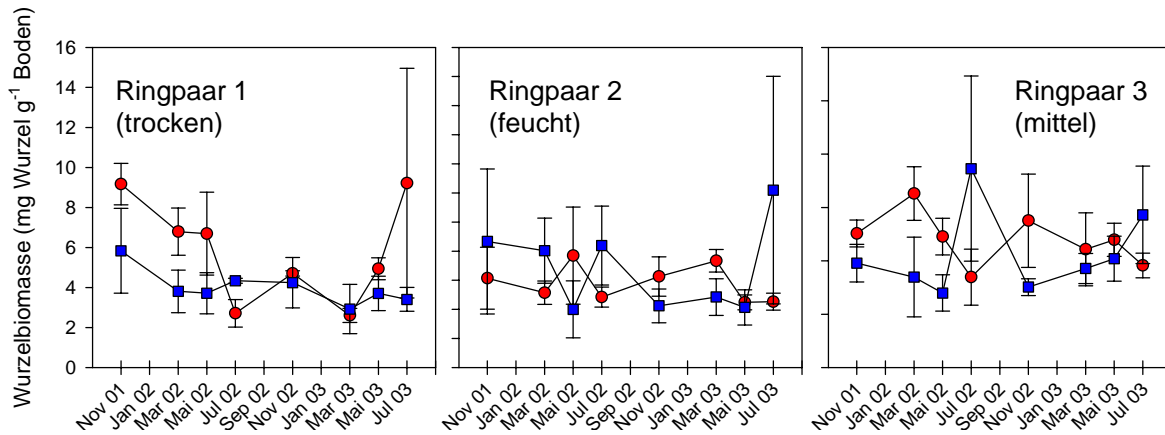
**Abbildung 18: CO<sub>2</sub>-Einfluss auf die Wurzelbiomasse**

Dargestellt sind Zylinder- (a+b) und Meshbag- (c+d) Proben, letztere nach 17, 21 und 24 Monaten, unter erhöhtem CO<sub>2</sub> (rote Kreise) und Umgebungsluft (blaue Kästchen) in 0-5 cm (a+c) und 7-12 cm (b+d) Tiefe. Die Werte sind Mittelwerte aus den drei CO<sub>2</sub>-Ringen unterschiedlicher Feuchte, die Balken zeigen den Standardfehler.

Die Wurzel-Biomasse wurde durch CO<sub>2</sub> in den Meshbag-Proben (+26,3 % im Oberboden und +32,7 % im Unterboden) deutlicher gefördert als in den Zylinderproben (+8,4 % im Oberboden und +21,1 % im Unterboden). Die Streuung der Werte war in den Zylinderproben des Oberboden am größten (15,6 % auf den E-Flächen und 20,4 % auf den A-Flächen) und in den Meshbag-Proben des Unterbodens am geringsten (6,7 % auf den E-Flächen und 12,0 % auf den A-Flächen).

Die Meshbag-Proben aus dem Oberboden beinhalteten deutlich weniger Wurzelbiomasse als die Zylinderproben. Im Unterboden dagegen unterschied sich die Wurzelbiomasse der Meshbag- und Zylinderproben kaum.

Auf den Kontrollflächen zeigte die Wurzelbiomasse aus den Zylinderproben vom Oberboden eine Saisonalität: Die Juli-Wurzelbiomassen beider Jahre waren deutlich erhöht (Abbildung 18, blau markiert). Dieser Effekt trat in den trockenen Ringen nur im Jahr 2002 und nur in geringem Umfang, in den feuchten und mittelfeuchten Ringen jedoch markant auf (Abbildung 19, blau markiert).



**Abbildung 19: CO<sub>2</sub>- und Feuchte-Einfluss auf die Wurzelbiomasse**

Dargestellt sind nur die Zylinderproben des Oberbodens unter erhöhtem CO<sub>2</sub> (rote Kästchen) und Umgebungsluft (blaue Kästchen). Die Werte sind Mittelwerte aus je drei Probe-Standorten pro Ring. Die Balken zeigen den Standardfehler.

Die Saisonalität der Wurzelbiomasse auf den Kontrollflächen ist nur auf den feuchteren Flächen zu finden, auf den trockeneren Flächen waren die Wurzelbiomassen der Kontrollflächen in den Juli-Monaten nicht wesentlich erhöht. Einen Trend über den Zeitraum der Untersuchung gibt es nicht. Der in der Statistik um den Einfluss der Bodenfeuchte bereinigte Standort (Ring) zeigte weder bei den Zylinder- noch bei den Meshbag-Proben einen signifikanten Einfluss auf die Wurzelbiomasse (Tabelle 22).

### 3.2.2 Wurzellänge

#### ***RLD (Root length density, Bestandswurzellänge)***

Die RLD war unter erhöhtem CO<sub>2</sub> signifikant erhöht. In Tabelle 23 sind die Ergebnisse der Mixed-Model-Analyse (SPSS) für die RLD dargestellt.

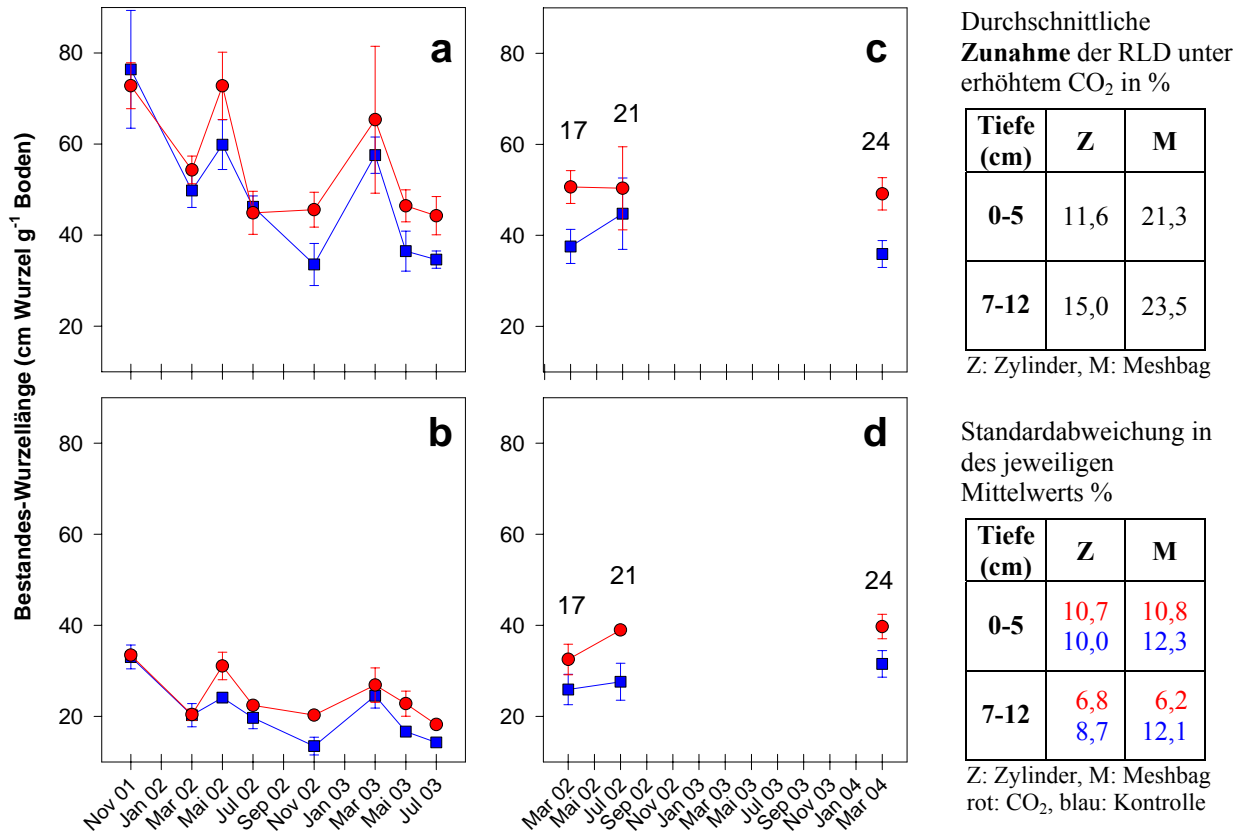
**Tabelle 23: CO<sub>2</sub>-Einfluss auf die RLD**

Tests auf feste Effekte, Typ III, AR1							
VERSUCH	TIEFE	Quelle	Zähler-Freiheitsgrade	Nenner-Freiheitsgrade	F-Wert	Signifikanz	
Zylinder	0-5 cm	Intercept	1	94,856	124,063	0,000	
		CO <sub>2</sub>	1	34,628	8,374	0,007	
		RING	2	38,803	1,128	0,334	
		FEUCHTE	1	96,263	3,799	0,054	
		MONAT	1	82,355	0,030	0,863	
			FEUCHTE * MONAT	1	79,410	0,238	0,627
	7-12 cm	Intercept	1	136,933	100,490	0,000	
		CO <sub>2</sub>	1	35,636	7,676	0,009	
		RING	2	41,467	1,348	0,271	
		FEUCHTE	1	136,805	17,282	0,000	
MONAT		1	118,480	1,199	0,276		
		FEUCHTE * MONAT	1	109,364	4,596	0,034	
Meshbag	0-5 cm	Intercept	1	55,993	327,188	0,000	
		CO <sub>2</sub>	1	17,306	7,367	0,015	
		RING	2	18,768	1,011	0,383	
		FEUCHTE	1	62,739	1,287	0,261	
		MONAT	1	62,849	1,366	0,247	
			FEUCHTE * MONAT	1	62,723	1,284	0,261
	7-12 cm	Intercept	1	45,250	391,219	0,000	
		CO <sub>2</sub>	1	19,162	10,805	0,004	
		RING	2	20,231	0,760	0,480	
		FEUCHTE	1	56,389	0,620	0,435	
MONAT		1	56,099	0,353	0,555		
		FEUCHTE * MONAT	1	56,372	0,616	0,436	

Effekte der Parameter CO<sub>2</sub>, Ring, Feuchte, Monat und der Interaktion Feuchte x Monat auf die Gesamt-Wurzel-Biomasse für die Zylinderproben und die Meshbag-Proben aus zwei Bodentiefen. Signifikante Einflüsse sind rot markiert, der im Text erwähnte Feuchte-Trend blau.

Erhöhtes CO<sub>2</sub> hatte einen signifikanten Einfluss auf die RLD bei beiden Probemethoden und -tiefen. In den Zylinderproben liegt im Oberboden ein starker Trend zum Einfluss der Feuchte vor, im Unterboden sind die Feuchte sowie die Interaktion zwischen Feuchte und Zeitverlauf signifikant. Die stärkere Streuung der Zylinder-Werte im Oberboden überlagerte den Trend zu abnehmender Wurzeldichte im Verlauf des Experiments (Abbildung 20). Im Unterboden der Zylinder-Werte war der Zeitverlauf in der Interaktion mit der Feuchte signifikant.

Abbildung 20 zeigt weiterhin, dass die Förderung der RLD in den Zylinderproben unter erhöhtem CO<sub>2</sub> erst im März und Mai 2002 (nach 13 bzw. 15 Monaten Begasung) erfolgte.



**Abbildung 20: CO<sub>2</sub>-Einfluss auf die RLD**

Dargestellt sind Zylinder- (a+b) und Meshbag- (c+d) Proben, letztere nach 17, 21 und 24 Monaten, unter erhöhtem CO<sub>2</sub> (rote Kreise) und Umgebungsluft (blaue Kästchen) in 0-5 cm (a+c) und 7-12 cm (b+d) Tiefe. Die Werte sind Mittelwerte aus den drei CO<sub>2</sub>-Ringen unterschiedlicher Feuchte, die Balken zeigen den Standardfehler.

Die RLD wurde durch CO<sub>2</sub> in den Meshbag-Proben (+21,2 % im Oberboden und +23,5 % im Unterboden) deutlicher gefördert als in den Zylinderproben (+11,6 % im Oberboden und +15,0 % im Unterboden). Die Streuung der Werte war auf den CO<sub>2</sub>-Flächen im Oberboden (10,7 % in Zylinderproben und 10,8 % in Meshbags) größer als im Unterboden (6,8 % in Zylinderproben und 6,2 % in Meshbags). Auf den Kontrollflächen streute die RLD in den Meshbag-Proben stärker (12,3 % im Oberboden und 12,1 % für den Unterboden) als in den Zylinderproben (10,0 % im Oberboden und 8,7 % für den Unterboden).

Die Wurzelichten der Zylinderproben nahmen vor allem in den ersten Monaten der Untersuchung ab. Eine Saisonalität war nicht erkennbar. Die Wurzeln waren im Unterboden in beiden Behandlungsvarianten weniger dicht. Die Dichte in Zylindern und Meshbags unterschied sich kaum (Abbildung 20).

**SRL (Specific root length, spezifische Wurzellänge)**

In Tabelle 24 sind die Ergebnisse der Mixed-Model-Analyse (SPSS) für die SRL dargestellt.

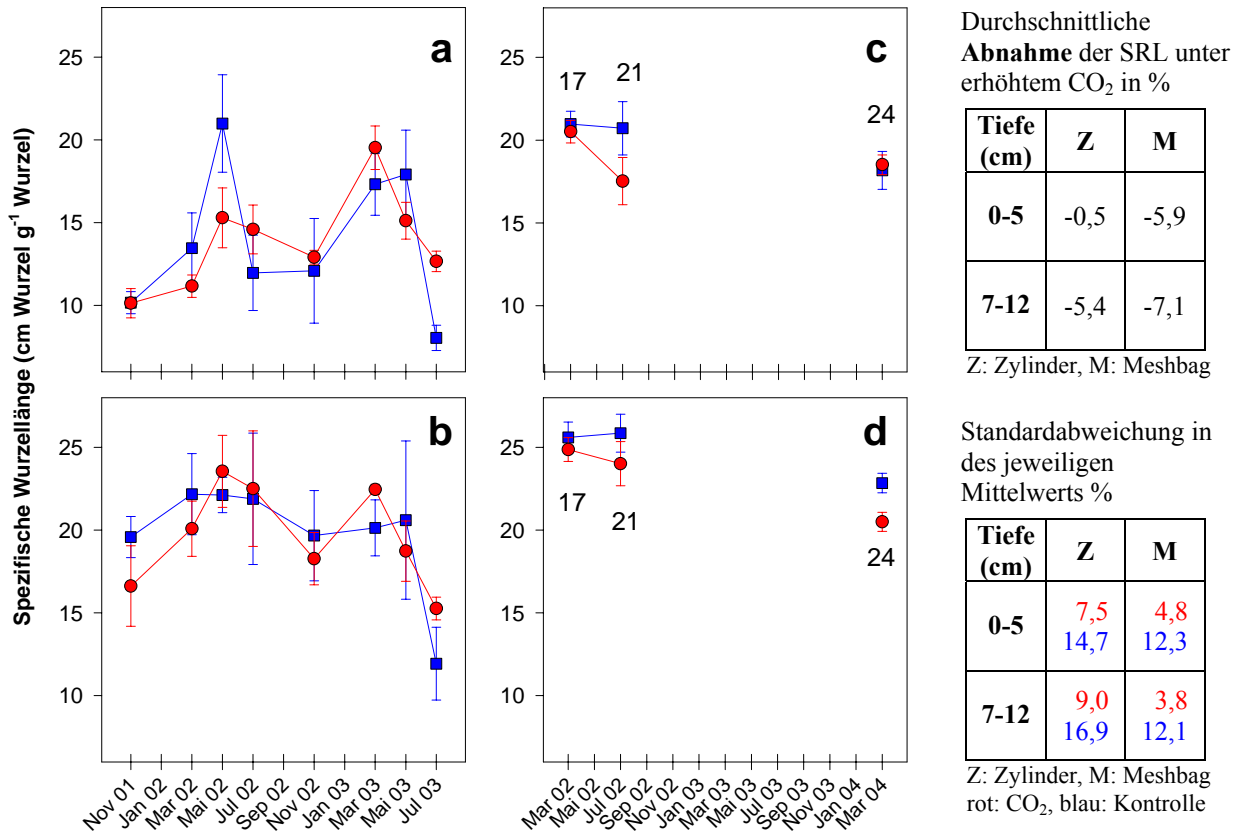
**Tabelle 24: CO<sub>2</sub>-Einfluss auf die SRL**

Tests auf feste Effekte, Typ III, AR1						
VERSUCH	TIEFE	Quelle	Zähler-Freiheitsgrade	Nenner-Freiheitsgrade	F-Wert	Signifikanz
Zylinder	0-5 cm	Intercept	1	98,662	29,581	0,000
		CO <sub>2</sub>	1	37,493	0,042	0,839
		RING	2	41,881	1,325	0,277
		FEUCHTE	1	100,038	0,524	0,471
		MONAT	1	86,460	0,972	0,327
		FEUCHTE * MONAT	1	83,577	3,041	0,085
	7-12 cm	Intercept	1	135,921	46,317	0,000
		CO <sub>2</sub>	1	38,821	0,276	0,602
		RING	2	45,336	0,262	0,770
		FEUCHTE	1	136,716	0,118	0,732
MONAT		1	116,900	2,571	0,112	
	FEUCHTE * MONAT	1	107,740	2,305	0,132	
Meshbag	0-5 cm	Intercept	1	50,224	186,203	0,000
		CO <sub>2</sub>	1	21,182	1,165	0,293
		RING	2	23,005	0,411	0,667
		FEUCHTE	1	54,724	0,036	0,849
		MONAT	1	54,950	0,018	0,892
		FEUCHTE * MONAT	1	54,708	0,035	0,853
	7-12 cm	Intercept	1	43,653	500,198	0,000
		CO <sub>2</sub>	1	18,865	2,785	0,112
		RING	2	19,917	0,077	0,926
		FEUCHTE	1	54,273	0,038	0,846
MONAT		1	54,007	0,022	0,881	
	FEUCHTE * MONAT	1	54,257	0,038	0,845	

Effekte der Parameter CO<sub>2</sub>, Ring, Feuchte, Monat und der Interaktion Feuchte x Monat auf die SRL für die Zylinderproben und die Meshbag-Proben aus zwei Bodentiefen. Signifikante Einflüsse sind rot markiert, nicht signifikante CO<sub>2</sub>-Einflüsse blau.

Erhöhtes CO<sub>2</sub> hatte weder in den Zylinderproben, noch in den Meshbag-Proben und in keiner der beiden Tiefen einen signifikanten Einfluss auf die spezifische Wurzellänge. Auch die anderen Faktoren und die Interaktion waren nicht signifikant.





**Abbildung 21: CO<sub>2</sub>-Einfluss auf die SRL**

Dargestellt sind Zylinder- (a+b) und Meshbag- (c+d) Proben, letztere nach 17, 21 und 24 Monaten, unter erhöhtem CO<sub>2</sub> (rote Kreise) und Umgebungsluft (blaue Kästchen) in 0-5 cm (a+c) und 7-12 cm (b+d) Tiefe. Die Werte sind Mittelwerte aus den drei CO<sub>2</sub>-Ringen unterschiedlicher Feuchte, die Balken zeigen den Standardfehler.

Die SRL erfuhr durch die CO<sub>2</sub>-Begasung in den Zylinderproben des Oberbodens die geringste Abnahme (-0.5 %) und in den Meshbag-Proben des Unterbodens die größte (-7,1 %). Sie wurde in den Meshbag-Proben (-5,9 % im Oberboden und -7,1 % im Unterboden) deutlicher verringert als in den Zylinderproben (-0,5 % im Oberboden und -5,4 % im Unterboden). Die Werte streuten unter erhöhtem CO<sub>2</sub> deutlich weniger (zwischen 3,8 und 9,0 %) im Vergleich zu den Kontrollen (zwischen 12,1 und 16,9 %, untere Tabelle zu Abbildung 21).

Erhöhtes CO<sub>2</sub> verringerte die SRL in den Zylinderproben des Oberbodens im Mai beider Jahre, in den Unterbodenproben war dieser Effekt jedoch schwächer, so dass eine eventuell vorliegende Saisonalität nur sehr schwach ausgeprägt war. Die Zylinder-Proben aus dem Jahr 2003 beider Tiefen und beider Behandlungen zeigten eine starke Abnahme der SRL vor allem der Proben unter Umgebungsluft, dennoch ist im Gegensatz zur RLD kein ein Trend zur Abnahme über den Zeitraum der Untersuchung erkennbar.

### 3.2.3 Wurzeldicke

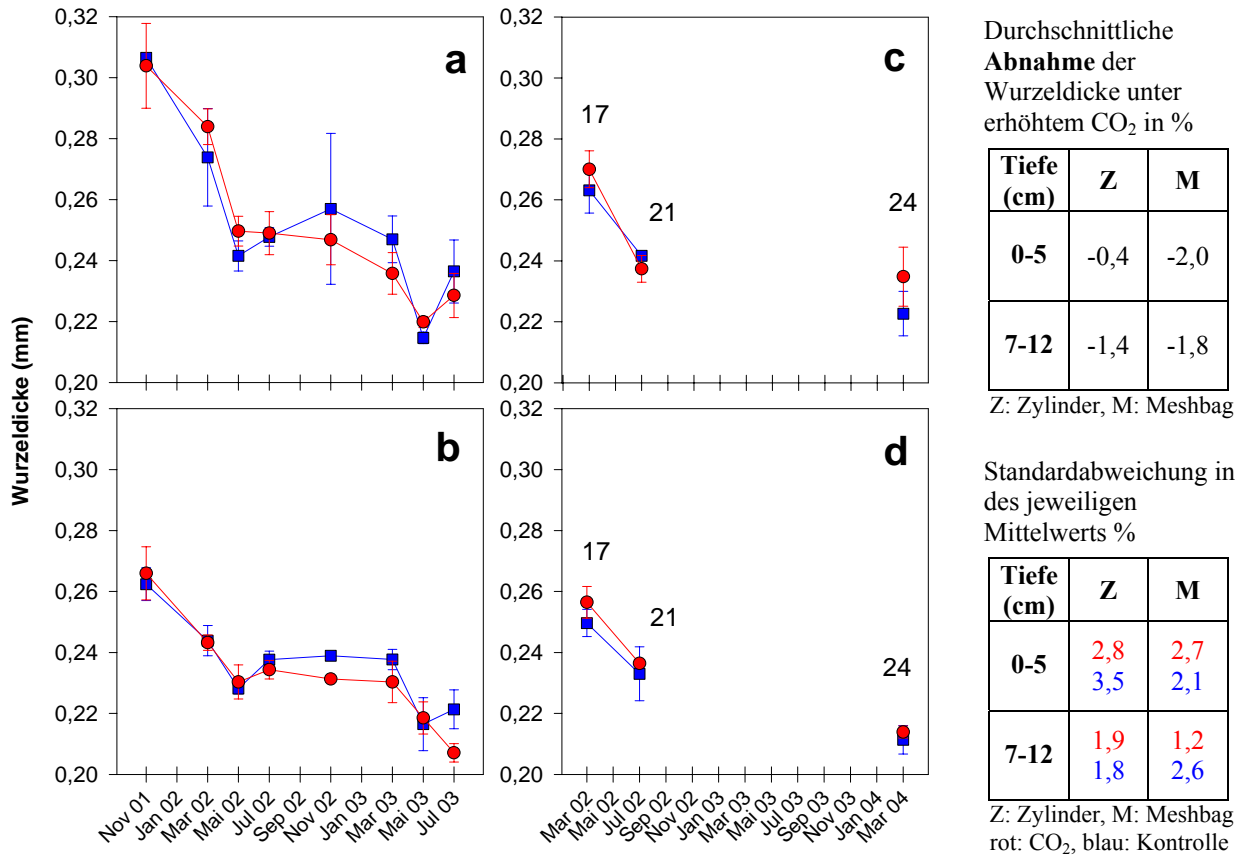
Die Ergebnisse der Mixed-Model-Analyse (SPSS) für die Wurzeldicke sind in Tabelle 25 dargestellt.

**Tabelle 25: CO<sub>2</sub>-Einfluss auf die Wurzeldicke**

Tests auf feste Effekte, Typ III, ARI							
VERSUCH	TIEFE	Quelle	Zähler-Freiheitsgrade	Nenner-Freiheitsgrade	F-Wert	Signifikanz	
Zylinder	0-5 cm	Intercept	1	99,493	239,146	0,000	
		CO <sub>2</sub>	1	35,500	0,002	0,964	
		RING	2	39,765	2,085	0,138	
		FEUCHTE	1	101,050	1,252	0,266	
		MONAT	1	86,460	2,302	0,133	
			FEUCHTE * MONAT	1	83,512	0,780	0,380
	7-12 cm	Intercept	1	136,986	819,150	0,000	
		CO <sub>2</sub>	1	34,019	1,348	0,254	
		RING	2	39,597	0,211	0,811	
		FEUCHTE	1	136,585	0,362	0,548	
MONAT		1	118,085	7,275	0,008		
		FEUCHTE * MONAT	1	108,817	0,078	0,781	
Meshbag	0-5 cm	Intercept	1	55,468	1147,989	0,000	
		CO <sub>2</sub>	1	13,401	1,298	0,274	
		RING	2	14,515	3,562	0,055	
		FEUCHTE	1	64,043	0,033	0,857	
		MONAT	1	64,110	0,265	0,608	
			FEUCHTE * MONAT	1	64,029	0,039	0,844
	7-12 cm	Intercept	1	43,111	1299,611	0,000	
		CO <sub>2</sub>	1	16,196	1,843	0,193	
		RING	2	17,162	2,353	0,125	
		FEUCHTE	1	56,362	0,032	0,859	
MONAT		1	55,995	0,394	0,533		
		FEUCHTE * MONAT	1	56,342	0,027	0,869	

Effekte der Parameter CO<sub>2</sub>, Ring, Feuchte, Monat und der Interaktion Feuchte x Monat auf die Gesamt-Wurzel-Biomasse für die Zylinderproben und die Meshbag-Proben aus zwei Bodentiefen. Signifikante Einflüsse sind rot markiert, nicht signifikante CO<sub>2</sub>-Einflüsse blau.

Erhöhtes CO<sub>2</sub> hatte in keiner der beiden Probemethoden und -tiefen einen signifikanten Einfluss auf die Wurzeldicke. Die Abnahme der Wurzeldicke im Verlauf des Experiments war, obwohl sie in der Abbildung 22 auch für den Oberboden und die Meshbag-Proben sichtbar war, nur im Unterboden der Zylinderproben signifikant (Tabelle 25, Monat, rot markiert).



**Abbildung 22: CO<sub>2</sub>-Einfluss auf die Wurzel Dicke**

Dargestellt sind Zylinder- (a+b) und Meshbag- (c+d) Proben, letztere nach 17, 21 und 24 Monaten, unter erhöhtem CO<sub>2</sub> (rote Kreise) und Umgebungsluft (blaue Kästchen) in 0-5 cm (a+c) und 7-12 cm (b+d) Tiefe. Die Werte sind Mittelwerte aus den drei CO<sub>2</sub>-Ringen unterschiedlicher Feuchte, die Balken zeigen den Standardfehler.

Die Wurzel dicken nahmen auf allen Flächen, in allen Behandlungsvarianten und in allen Tiefen im Untersuchungszeitraum ab (Abbildung 22), unter erhöhtem CO<sub>2</sub> sogar etwas stärker. In den Zylinderproben des Oberbodens war die Abnahme am geringsten (-0.4 %), in den Meshbag-Proben etwas größer (-2,0 % und -1,8 %). Die Streuung der Werte war auf allen Flächen sehr gering.

Eine Saisonalität deutet sich durch die Abnahme der Wurzel Durchmesser im Mai beider Jahre, vor allem unter Umgebungsluft, an. Im Oberboden waren die Wurzeln nur geringfügig dicker als im Unterboden. Auch in Meshbag- und Zylinderproben waren die Wurzeln von ähnlicher mittlerer Dicke.

## 4 Diskussion

### 4.1 Die Pflanzengemeinschaft

#### *Artenzahl*

Die im Giessen FACE beobachtete Abnahme der Artenzahl auf *allen* Flächen, mit geringerem Artenverlust auf den CO<sub>2</sub>-Flächen, wurde auch von Potvin & Vasseur (1997) auf einer dem Giessen FACE botanisch ähnlichen, allerdings artenärmeren Fläche nach 3 Jahren in OTCs und von Niklaus et al. (2001b) auf mit 31 Arten angesätem Grasland nach 5 Jahren im Swiss SACC beschrieben. Dieser von Niklaus et al. (2001b) als „protective effect of elevated CO<sub>2</sub>“ bezeichnete Effekt war in seinen Experimenten von den einzelnen Arten abhängig, denn die Artenzahl setzte sich aus unterschiedlichen Arten zu Beginn und zu Ende des Experiments zusammen. Edwards et al. (2001) suchten die Reaktion für die im Bulls FACE nach 3 Jahren unter 475 ppm CO<sub>2</sub> nicht-signifikant erhöhte Artenzahl auf begasten Flächen ebenfalls in den Eigenschaften der betreffenden Arten: hier nahmen vor allem annuelle, kurzlebige Arten, wie *Geranium molle* und *Conyza albida* zu. Auch bei den 7 Arten, die im Giessen FACE auf E-Flächen, nicht aber auf A-Flächen vorkamen, sind 6 jeweils nur einmal in den Jahren 1997-2005 beobachtet worden. Es handelte sich hierbei um Begleiter auf mageren Glatthaferwiesen (*Luzula campestris*, *Stellaria graminea*, *Campanula rotundifolia*), Störzeiger der Glatthaferwiesen (*Senecio jacobaea*) und Begleiter in Unkrautgesellschaften (*Poa annua*, *Veronica arvensis*) (Oberdorfer 1990). *Stellaria graminea* und *Veronica arvensis* gingen auf den Kontrollflächen verloren, blieben aber auf je einer CO<sub>2</sub>-Fläche erhalten, *Poa annua*, *Luzula* und *Campanula* waren bereits vorher auf CO<sub>2</sub>-Flächen gewesen, nie jedoch auf den Kontrollflächen, und *Senecio* kam auf einer CO<sub>2</sub>-Fläche hinzu, jedoch auf keiner Kontrollfläche. Das Vorkommen dieser Arten könnte auf eine ausgeprägtere kleinräumige Heterogenität den auf begasten Flächen hinweisen. Auch eine Förderung der Keimung von Samen aus der Samenbank ist denkbar. Edwards et al. (2001) vermuteten entweder eine Förderung der Keimung unter erhöhtem CO<sub>2</sub> oder eine größere mechanische Störung der CO<sub>2</sub>-Flächen im Gegensatz zu den Kontrollflächen. *Gegen* eine Störung in Form von Bodenverdichtung auf den CO<sub>2</sub>-Flächen spräche, dass die 7. Art, *Colchicum autumnale*, die im Giessen FACE nur zweimal in den Jahren nach 1997 auf einer CO<sub>2</sub>-Fläche beobachtet wurde, durch Bodenverdichtung zurückgedrängt wird (Oberdorfer 1990).

Sie ist eine Ordnungscharakterart der Molinietales und ein typischer Vertreter der feuchten Glatthaferwiesen.

Die *allgemeine* Artenverarmung ihrer Flächen sahen Potvin & Vasseur (1997) als eine Folge von Sukzession nach Einstellen der Beweidung. Niklaus et al. (2001b) beobachteten ebenfalls eine Sukzession: Anfangs erfolgreiche Arten nahmen ab bzw. gingen verloren, anfangs unscheinbare nahmen zu. Einen Einfluss durch die auch auf allen SACC-Flächen erfolgte Einstellung der Beweidung schlossen Schläpfer et al. (1998) nach einer Parallel-Untersuchung auf den Flächen dieses Kalkrasens jedoch aus. Dagegen fanden Newton et al. (2001a) in Neuseeland in einem vergleichenden Experiment einen starken Unterschied zwischen den Bewirtschaftungsformen Wiese und Weide: in ihrem Experiment wuchs Klee durch die Selektion der Weidetiere unter erhöhtem CO<sub>2</sub> ähnlich wie auf Wiesen ohne CO<sub>2</sub>-Anreicherung.

Die Flächen des Giessen FACE wurden seit langer Zeit als Wiese genutzt. Die massive Artenverarmung vor Beginn der Begasung 1993-1995 bis 1997 von 32,3 auf 16,2 Arten auf den CO<sub>2</sub>-Flächen und 37,4 auf 18,2 Arten auf den Kontrollflächen ist zunächst eventuell durch die Einzäunung des Geländes und den damit einhergehenden Ausschluss von Vektoren für Samen, ab 1995 sicherlich durch die Reduktion der Aufnahme-Fläche von 100 m<sup>2</sup> auf 2 x 4,5 m<sup>2</sup> verursacht worden. Kreeb (1977) empfahl für Wiesenflächen eine Aufnahmegröße von 20 m<sup>2</sup>, Dierschke (1989) von 10-25 m<sup>2</sup>. Zwar stellten Roscher et al. (2005) in einem Skalierungs-Versuch dar, dass die Artenzahl auf ihren 3,5 x 3,5 m-Flächen und auf den 20 x 20 m-Flächen gleich waren und kamen deshalb zu dem Schluss, dass Versuche auf kleinen Flächen nicht abgewertet werden dürften. Dennoch ist für das Giessen FACE davon auszugehen, dass in den CO<sub>2</sub>-Ringen nur ein Fragment des Minimal-Areals aufgenommen wurde und sich deshalb die Artenzahlen nach Installation der Begasungsringe nicht mit denen der Ursprungsfläche vergleichen lässt. Ursachen für die Abnahme der Arten auf den Flächen in den Ringen in den darauf folgenden Jahren können die mechanische Störung bei der Installation der Ringe und die Isolation der Flächen voneinander durch die Begasungsringe und/oder erhöhter Störungsfrequenz durch Beprobungen sein, sowie die durch die in den Ringen regelmäßig vorgenommene Einebnung der Maulwurfs- und Ameisenhügel verringerten exponierten Standorte für z. B. den o.g. Störzeiger *Senecio jacobaea* sowie die Begleiter in Unkrautgesellschaften (*Poa annua*, *Veronica arvensis*).

## ***Diversität***

Die Abnahme der Diversität ist zunächst durch eine Abhängigkeit von der Evenness (siehe unten), ab 2003 zunehmend auch durch den oben beschriebenen Artenverlust, bedingt. Auch im Jasper Ridge FACE trug der Ausfall dreier Arten zu einer leichten, nicht-signifikanten Abnahme der Diversität unter 680 ppm CO<sub>2</sub> nach 3 Jahren (Zavaleta et al. 2003a) bei. Byrne & Jones (2002) erklärten die Zunahme der Diversität im MEGARICH Irland durch die Förderung der Kräuter und die Abnahme der Gräser (nach 1 Jahr, 600 ppm CO<sub>2</sub>). Auch Teyssonneyre et al. (2002a) führten den Trend zur Abnahme der Diversität (nach 3 Jahren, 600 ppm) auf den Verlust von einzelnen Krautarten auf ihren Flächen zurück. Marissink & Hansson (2002) beobachteten starke Schwankungen der Diversität in den OTCs auf Grasland in Uppsala.

Die starke Abnahme der Diversität vor der Installation der Ringe zwischen 1993 und 1995 (bei gleichbleibender Artenzahl!) ist eventuell durch die regelmäßige Pflege (wöchentlicher Schnitt) der Flächen zwischen den Aufnahme-Flächen oder der Einzäunung des Geländes und den daraus erfolgten Ausschluss von Hunden und Wild zurückzuführen. Dies mag zu einer (unter erhöhtem CO<sub>2</sub> geringeren) Reduktion unterschiedlicher Mikroräume und Störstellen, eventuell auch zu einer reduzierten zoochoren Samenverbreitung geführt haben.

## ***Evenness***

Einen Anstieg der Evenness unter erhöhtem CO<sub>2</sub> beschrieben auch Potvin & Vasseur (1997, aus Deckungsdaten) und Niklaus et al. (2001b, aus Biomasse-Daten). Letztere führten als Erklärung eine Koexistenz von mehr Arten unter erhöhtem CO<sub>2</sub> an. Potvin & Vasseur (1997) berichteten aus einem Sukzessionsexperiment von der Förderung der frühen Arten *Plantago major* und *Taraxacum officinale*, die normalerweise von den späten Arten *Agropyron repens* und *Poa pratensis* überwachsen werden, dass diese Arten unter erhöhtem CO<sub>2</sub> nebeneinander existierten. Im Giessen FACE erreichten die immergrünen Arten, die bereits zu Beginn der Vegetationsperiode Raum auf den Flächen einnahmen und von erhöhtem CO<sub>2</sub> profitierten gegenüber den sommergrünen in den Jahren bis 2001 eine stärkeren Deckung; die resultierende Ungleichverteilung ergab eine verringerte Evenness unter erhöhtem CO<sub>2</sub>.

### ***Vergleich Biomasse - Deckung***

Die oberirdische Biomasse nahm, trotz einer moderaten CO<sub>2</sub>-Erhöhung von nur 20%, um 8-11 % zu (Kammann et al. 2005, Tabelle 2). Dies ist, verglichen mit einem Zuwachs in Grasländern um +17 % unter verdoppelten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (Campbell et al. 2000), relativ hoch. Die relativ kurze CO<sub>2</sub>-Reaktion der Biomasse (vom 3. Jahr der Begasung, 2000, bis 2002) und der konstante CO<sub>2</sub>-Einfluss auf die Deckungen (Zeiträume 1997-1999 bis 1997-2001) deuten ein Einpendeln in ein neues Gleichgewicht an. Der schnell zurückgehende CO<sub>2</sub>-Einfluss der Biomasse ist auch in Experimenten mit höherer CO<sub>2</sub>-Konzentrationen beobachtet worden: In den OTCs in Uppsala nahm der Einfluss von CO<sub>2</sub> auf die Biomasse unter 700 ppm stetig ab (Sindhøj et al. 2004, Höchstwerte im dritten Jahr, Marissink et al. 2002). Die zeitabhängigen CO<sub>2</sub>-Effekte auf Deckung ab 2002 deuten auf eine weitere Veränderung der Artgemeinschaft unter erhöhtem CO<sub>2</sub> an. Vergleiche mit Biomasse-Untersuchungen sind vor diesem Hintergrund problematisch.

### ***Die artspezifischen CO<sub>2</sub>-Reaktionen***

Die artspezifischen CO<sub>2</sub>-Reaktionen fielen, wie in den meisten FACE-Experimenten auf Grasland, für fast alle Arten nur sehr moderat aus. Eine Gegenüberstellung der Artreaktionen auf erhöhtes CO<sub>2</sub> ergab Übereinstimmungen und Abweichungen von den Ergebnissen im Giessen FACE und anderen Untersuchungen. Von den 18 Pflanzenarten, zu denen ein Vergleichsexperiment gefunden werden konnte, reagierten *Agropyron repens*, *Cardamine pratensis* und *Festuca pratensis*, grün markiert in Übereinstimmung mit (einem oder zwei) anderen CO<sub>2</sub>-Experimenten, 7 Arten wurden nur im Giessen FACE untersucht und alle anderen Arten reagierten anders; die 9 Arten *Alopecurus pratensis*, *Arrhenatherum elatius*, *Bromus hordeaceus*, *Lathyrus pratensis*, *Lolium perenne*, *Plantago lanceolata*, *Poa pratensis*, *Rumex acetosa* und *Taraxacum officinale* (rot markiert) sogar mit anderem Vorzeichen als in anderen Experimenten.

Tabelle 26 zeigt die artspezifischen CO<sub>2</sub>-Reaktionen der 27 im Giessen FACE untersuchten Arten und in anderen Experimenten. Im anschließenden Text werden die Ursachen für die beschriebenen CO<sub>2</sub>-Reaktionen, soweit dort angegeben, mit denen aus dem Giessen FACE verglichen und diskutiert. Dabei sind die Arten in Gruppen gemäß der Übereinstimmungen sortiert und in der Überschrift mit den Zeilennummern aus der Tabelle versehen.

Tabelle 26: Vergleich der artspezifischen CO<sub>2</sub>-Reaktionen aus Giessen FACE mit anderen Experimenten

Versuch Wissenschaftlicher Artname		Giessen FACE	OTC Kansas	OTC Farnham	OTC Schweiz	MEGARICH F	MEGARICH UK	MEGARICH IR	Jasper Ridge FACE	Bulls FACE	SACC Schweiz	SACC Schweiz	Swiss FACE 6	Swiss FACE 12
1	<i>Agropyron repens</i>	-		- ns *										
2	<i>Agrostis tenuis</i>	+/-						ns		0				
3	<i>Alopecurus pratensis</i>	+				-								
4	<i>Anthoxanthum odoratum</i>	+			ns	- ns	+/-	ns		+	ns	0		
5	<i>Arrhenatherum elatius</i>	+				- ns								-/+
6	<i>Bromus hordeaceus</i>	-				+ ns			0					
7	<i>Cardamine pratensis</i>	+				+ ns								
8	<i>Dactylis glomerata</i>	-				-	ns	ns			ns			+/-
9	<i>Festuca pratensis</i>	+												+
10	<i>Festuca rubra</i>	+/-			ns	- ns	ns	ns						
11	<i>Filipendula ulmaria</i>	--												
12	<i>Galium mollugo</i>	-/+												
13	<i>Galium verum</i>	-												
14	<i>Geranium pratense</i>	--												
15	<i>Glechoma hederacea</i>	+												
16	<i>Holcus lanatus</i>	+/-				ns	ns	ns						+/-
17	<i>Lathyrus pratensis</i>	-				+ ns								
18	<i>Lolium perenne</i>	-				ns	ns	ns		+			-	ns
19	<i>Plantago lanceolata</i>	-					ns	ns			ns		+ ns	
20	<i>Poa pratensis</i>	+	-	ns		- ns				0			+ ns	
21	<i>Poa trivialis</i>	-/+				ns							+ ns	
22	<i>Ranunculus acris</i>	-/+						ns						
23	<i>Rumex acetosa</i>	--					- ns	ns						+
24	<i>Sanguisorba officinale</i>	-												
25	<i>Saxifraga granulata</i>	-												
26	<i>Taraxacum officinale</i>	-		+ ns		ns								
27	<i>Trisetum flavescens</i>	+				+								+/-
	Quelle		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Dargestellt sind Zunahme (+), fehlende Wirkung (0), Abnahme (-) der Parameter unter erhöhtem CO<sub>2</sub>, „ns“ steht für nicht signifikant. Bei unterschiedlich reagierenden Arten (+/-) und (-/+) wurde die überwiegende Reaktion vorangestellt. Grün markierte Arten reagierten in Übereinstimmung mit der Literatur, schwarz geschriebene wichen nur geringfügig, rote erheblich von der Ergebnissen anderer Versuche ab und blau markierte Arten wurden in keinem anderen Freilandversuch auf ihre CO<sub>2</sub>-Reaktion untersucht. Eine Auflistung einiger Versuchsparameter befindet sich in Tabelle 4.

Quelle: 1: Owensby et al. (1993), 2: Potvin & Vasseur (1997), 3: Schäppi & Körner (1996), 4: Teyssonneyre et al. (2002a), 5: Harmens et al. (2004), 6: Byrne & Jones (2002), 7: Zavaleta et al. (2003b), 8: Edwards et al. (2001), 9: Leadley et al. (1999), 10: Niklaus & Körner (2004), 11: Norton et al. (1999a), 12: Lüscher et al. (1998)

\* : relative Abnahme im Vergleich zu Kontrollflächen

### Übereinstimmungen mit anderen Versuchsergebnissen (Zeilen 1, 7 und 9)

*Agropyron repens* reagierte mit einer leichten Abnahme der Deckung auf erhöhtes CO<sub>2</sub>. In den Farnham OTCs, in denen *Agropyron repens* auf den CO<sub>2</sub>-Flächen ebenfalls an Deckung verlor, war die Art mit z.T. über 50% der Deckung auf den Kontrollflächen vertreten. Dort wurden unter erhöhtem CO<sub>2</sub> *Plantago major* und *Taraxacum officinale*, typische Arten der frühen Sukzessionsstadien, stärker gefördert als *Agropyron repens*, einer Art der späten



Sukzessionsstadien (Potvin & Vasseur 1997). Im Giessen FACE reagierten *Agropyron repens* und *Taraxacum officinale* gleichermaßen schwach negativ auf erhöhtes CO<sub>2</sub>, beide hatten nur eine sehr geringe Deckung (0,04 bzw. 0,01 %, vgl. Tabelle 11), für beide lagen im Entscheidungsbaum die gleichen Merkmale, „immergrünes Wachstum, langsame Keimlings-Wachstumsrate und lange Blütezeit“ (vgl. Abbildung 17) vor. Das immergrüne Wachstum führte zu einer positiven CO<sub>2</sub>-Reaktion, die lange Blütezeit allerdings, die durch die Mahd im September unterbrochen wurde, zu einer negativen. Die negative CO<sub>2</sub>-Reaktion von *Agropyron repens* im Giessen FACE und Farnham OTC ist folglich kaum vergleichbar.

*Cardamine pratensis* und *Festuca pratensis* reagierten mit einer leichten Zunahme der Deckung auf erhöhtes CO<sub>2</sub>. Gleiche Reaktionen wurden für *Cardamine pratensis* von Teyssonneyre et al. (2002a, Punkt-Quadrat-Methode) und für *Festuca pratensis* von Lüscher et al. (1998, Biomasse) berichtet. Mögliche Ursachen für die positiven CO<sub>2</sub>-Reaktionen in diesen Experimenten wurden nicht angeführt. Sæbø & Mortensen (1996) beobachteten in einem Versuch in Klimakammern, dass *Festuca pratensis* nach 11 Wochen unter 700 ppm CO<sub>2</sub> profitierte und mehr Ausläufer bildeten konnte als unter Umgebungsluft.

Im Giessen FACE wurden beide Arten im Entscheidungsbaum durch die Merkmale „immergrünes Wachstum, langsame Keimlings-Wachstumsrate, kurze Blühperiode und CSR bzw. RCSR-Strategie“ (vgl. Abbildung 17) beschrieben. Ein immergrünes Wachstum führte zu einer positiven CO<sub>2</sub>-Reaktion, da die Arten, die im Frühjahr bereits auf den Flächen vorhanden waren, eher von erhöhtem CO<sub>2</sub> profitierten.

#### **Abweichungen von anderen Ergebnissen (Zeilen 3+5, 20, 18+26, 19+23)**

*Alopecurus pratensis* und *Arrhenatherum elatius* reagierten mit einer leichten Zunahme der Deckung. Für beide Arten liegen keine Angaben möglicher Ursachen aus den Versuchen, in denen sie negativ reagierten, vor.

*Alopecurus* zeigte in den Jahren 1999 bis 2001 die höchste Deckungszunahme durch den reinen Effekt von CO<sub>2</sub> (Abbildung 14-16), obwohl er beim Vergleich der unbereinigten Deckungen nach anfänglich höheren Deckungen auf den CO<sub>2</sub>-Flächen von 1999 auf 2000 stärker abnahm als unter Umgebungsluft (Abbildung 11). Ein Vergleich der Deckungen ohne die Einbeziehung der Zeit- und der Feuchte-Einflüsse hätte somit eine negative CO<sub>2</sub>-Reaktion dieser Art ergeben. Neben umgebungsabhängigen Artreaktionen erschwerte auch die unterschiedliche Behandlung der Daten die Vergleiche von Artreaktionen unterschiedlicher Experimente.

*Poa pratensis* zählte als immergrüne Art mit kurzer Blühdauer zu den Arten, die früh im Jahr von erhöhtem CO<sub>2</sub> profitierten und die Blühzeit vor der Herbsternte beendet hatte. Dagegen nahm *Poa pratensis* im OTC in Farnham: Potvin & Vasseur (1997) berichteten, dass *Poa pratensis* nach drei Jahren die in der Sukzession früheren Arten *Plantago major* und *Taraxacum officinale* unter erhöhtem CO<sub>2</sub> nicht so stark überwuchs wie in den Kontroll-OTCs. Owensby et al. (1993) beschrieben *Poa pratensis* ebenfalls als ein früh und langsam wachsendes Gras, das im späten April allerdings von den höher wachsenden C<sub>4</sub>-Pflanzen, die unter erhöhtem CO<sub>2</sub> stark zunahm, überwachsen wurde. C<sub>4</sub>-Pflanzen sind im Giessen FACE nicht vorhanden. Der Unterschied der CO<sub>2</sub>-Reaktion mag auch in der Nutzungsform begründet sein: Auf den ehemaligen Weiden in Farnham deckte *Poa pratensis* gemeinsam mit *Agropyron repens* 70-90 % der Flächen und war als dominante Art unter erhöhtem CO<sub>2</sub> nicht ganz so erfolgreich wie unter Umgebungsluft. Auf den Wiesen des Giessen FACE deckte *Poa* sehr viel weniger Fläche (unter Umgebungsluft 1,74 %, unter erhöhtem CO<sub>2</sub> 1,87 %, Tabelle 14). Auf der Weide im Bulls FACE blieb die Biomasse von *Poa pratensis* unter erhöhtem CO<sub>2</sub> gleich (Edwards et al. 2001).

*Lolium perenne* und *Taraxacum officinale* reagierten mit einer leichten Abnahme der Deckung auf erhöhtes CO<sub>2</sub>. Auch Newton et al. (1995) fanden an Monolithen nach 261 Tagen unter 550 bzw. 700 ppm eine Abnahme von *Lolium perenne* trotz erhöhter Photosynthese in den Blättern. Im Swiss FACE reagierte *Lolium perenne* negativ; Norton et al. (1999a) sahen den Grund dafür in der geringeren Konkurrenzkraft um Stickstoff und Licht gegenüber *Poa pratensis* und *Plantago lanceolata*. Lüscher et al. (1998) fanden eine größere Biomassezunahme von *Lolium perenne* bei gleichzeitig erhöhter N-Gabe. Als Charakterart der Assoziation Lolio-Cynosuretum (Weidelgrasweiden) ist *Lolium perenne* auf der gering gedüngten und nur 2 x im Jahr geschnittenen, feuchten Fettwiese des Giessen FACE nicht am optimalen Standort (Tabelle 34 im Anhang). Aufgrund seiner geringeren Wuchshöhe wird *Lolium* auf Fettwiesen von Obergräsern überwachsen, auf den Weiden des Bulls FACE (Edwards et al. 2001) und häufig geschnittenen Flächen (Harmens et al. 2004) jedoch nicht. Auf den Flächen des Giessen FACE stellte *Lolium* eine der kleineren Arten dar. Eine weitere Erschwernis beim Vergleich der CO<sub>2</sub>-Reaktionen von *Lolium perenne* ist, dass von verschiedenen *Lolium*-Sorten unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Reaktionen beschrieben wurden (Campbell et al. 1995).

Die Deckung von *Taraxacum officinale* war im OTC Farnham erhöht, weil es unter 625 ppm CO<sub>2</sub> nicht so stark von den in der Sukzessionsfolge späteren Arten *Agropyron repens* und *Poa pratensis* überwachsen wurde (Potvin & Vasseur 1997); im MEGARICH Frankreich jedoch

unverändert, weil sie als eine in der Sukzessionsfolge typische frühe Art nicht durch erhöhtes CO<sub>2</sub> gefördert wurde (Punkt-Quadrat-Methode, Teysssonneyre et al. 2002a).

Auf den Wiesen des Giessen FACE wurde *Taraxacum* (Deckung 0,01 %, Tabelle 11) auf allen Flächen, und durch die allgemein erhöhte Deckung der Obergräser unter erhöhtem CO<sub>2</sub> besonders stark, überwachsen und verlor demzufolge an Deckung.

*Plantago lanceolata* und *Rumex acetosa* reagierten mit einer relativ großen Abnahme der Deckung. Norton et al. (1999a) begründeten das in ihrem Versuch unter erhöhtem CO<sub>2</sub> geförderte Wachstum von *Plantago lanceolata* mit dem kräftigen, breiten Wuchs dieser Art. In diesem FACE-Versuch mit einer 6-Arten-Ansaat reagierten 5 Arten positiv auf erhöhtes CO<sub>2</sub>. Es ist anzunehmen, dass bei dieser Untersuchung keine natürliche Konkurrenzsituation erfasst wurde, sondern dass sich die Fläche zur Zeit der Auswertung nach 14 Monaten noch in einer Besiedlungs- oder Pionierphase befand. Andererseits schlossen Wulff & Alexander (1985) in ihrem Experiment mit 4 Genotypen von *Plantago lanceolata* auf genetische Variabilität bei der CO<sub>2</sub>-Reaktion dieser Art, so dass auch die genetische Variabilität als Ursache für eine unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Reaktion der Art in verschiedenen Experimenten in Frage kommt. Harmens et al. (2004) beobachteten für *Rumex acetosa* eine Interaktion von erhöhtem CO<sub>2</sub> und Temperatur: bei Umgebungstemperatur wirkte sich erhöhtes CO<sub>2</sub> negativ auf die Deckung von *Rumex acetosa* aus, bei erhöhter Temperatur nur in einem der beiden Versuchsjahre. Ein anderes Argument für die in anderen Untersuchungen gefundene positive CO<sub>2</sub>-Reaktion von *Plantago lanceolata* und auch von *Rumex acetosa* könnte deren Wurzelmorphologie sein: Lüscher et al. (1998) sah die Ursache für die Biomassezunahme von *Rumex acetosa* in der ihr als Reserveorgan dienenden Pfahlwurzel, die überschüssige Nährstoffe als Senke aufnahm. Byrne & Jones (2002) beobachteten eine CO<sub>2</sub>-Förderung von *Rumex acetosa* nur auf den hoch gedüngten Flächen. Auf den weniger stark gedüngten Flächen des Giessen FACE konnten *Plantago lanceolata* und *Rumex acetosa* unter erhöhtem CO<sub>2</sub> von ihren Pfahlwurzeln offensichtlich nicht profitieren. Zudem wurde für *Plantago lanceolata* im Jahr 2005 sogar ein um 10 Tage verspäteter Blühbeginn auf CO<sub>2</sub>-Flächen im Vergleich zu Kontrollflächen festgestellt (Streitfert 2005).

**Die negative CO<sub>2</sub>-Reaktion der Sommergrünen (Zeilen 24, 25, 17, 6, 12 + 11, 14)**

*Sanguisorba officinalis*, *Saxifraga granulata*, *Lathyrus pratensis* und *Bromus hordeaceus* reagierten mit einer moderaten Abnahme der Deckung unter erhöhtem CO<sub>2</sub>, *Galium mollugo* reagierte in 2 von 3 Jahren ebenso.

Für *Sanguisorba officinalis*, *Saxifraga granulata* und *Bromus hordeaceus* gibt es in der Literatur keine Ergebnisse über CO<sub>2</sub>-Reaktionen. *Bromus hordeaceus* ist im Giessen FACE die einzige annuelle und die einzige Art mit wintergrünem Wachstum (Abbildung 17).

Für *Lathyrus* wurde von Teyssonneyre et al. (2002a) keine mögliche Ursache für seine dort positive Reaktion angeführt. Interessant ist, dass die sommergrüne **Leguminose** im Giessen FACE zu der Gruppe der negativ reagierenden Arten zählt. In vielen Versuchen wird eine Zunahme der Leguminosen unter erhöhtem CO<sub>2</sub> beschrieben (Campbell et al. 2000). Als Ursache wird die häufig nachgewiesene Abnahme der Stickstoffkonzentration in der Pflanze unter erhöhtem CO<sub>2</sub> angegeben, die die N<sub>2</sub>-fixierenden Leguminosen leichter kompensieren können (Poorter et al. 1997). So berichteten Stöcklin & Körner (1999) von einer kaum erhöhten oberirdischen Biomasse einer 14-Arten-Ansaat ohne Leguminosen unter 600 ppm nach zwei Jahren im SACC; mit Leguminosen war sie jedoch um 45 % erhöht. West et al. (2005) zeigten jedoch in einer Ansaat mit 4 Leguminosen-Arten, N-Düngung und 560 ppm CO<sub>2</sub> im BioCON FACE keine allgemeine, sondern sehr artspezifische Veränderung der symbiontischen N<sub>2</sub>-Fixierung durch Leguminosen. In den OTCs auf alpiner Vegetation in der Schweiz war die Biomasse von *Trifolium alpinum* gar nicht durch 680 ppm CO<sub>2</sub> beeinflusst (Arnone 1999). Auf den niedrig gedüngten Flächen des FACE erreichte die Versorgung mit N offensichtlich ein Niveau, auf dem *Lathyrus* kein N<sub>2</sub> fixierte, denn die Blatt-N-Gehalte von *Lathyrus* waren, ebenso wie die der anderen Arten, reduziert (mdl. Mitteilung Kammann 2005). Die Fähigkeit, N<sub>2</sub> aus der Luft zu fixieren, war hier also weniger ausschlaggebend als das sommergrüne Wachstum, welches zu der o.g. Abnahme der Deckung durch erhöhtes CO<sub>2</sub> führte.

*Filipendula ulmaria* und *Geranium pratense* reagierten mit einer starken Abnahme der Deckung unter erhöhtem CO<sub>2</sub>. Für die beiden Arten gibt es keine Experimente zum Vergleich. Im Giessen FACE litten die sommergrünen Arten darunter, dass die immergrünen Arten im Frühjahr den Raum unter erhöhtem CO<sub>2</sub> bereits effektiver besetzt hatten. In diesem Fall profitierten die immergrünen, also „frühen“ sehr deutlich gegenüber den späten Arten. So wurde für *Geranium* im Jahr 2004 ein um 7 Tage, im Jahr 2005 um 5 Tage verspäteter Blühbeginn auf CO<sub>2</sub>-Flächen im Vergleich zu Kontrollflächen festgestellt (Streitfert 2005). Dieser Effekt kann in Gebieten mit milden Wintern, die nur während der Vegetationsperiode mit CO<sub>2</sub> begast werden, nicht beobachtet werden.

---

**Variierende CO<sub>2</sub>-Reaktionen (Zeilen 2, 16 + 21, 10 + 22 )**

*Holcus lanatus*, *Agrostis tenuis* und *Poa trivialis* reagierten in einem Jahr mit einer Abnahme und in zwei Jahren mit einer Zunahme der Deckung (bzw. *Poa* vice versa). Als mögliche Ursachen für eine positive CO<sub>2</sub>-Reaktion von *Holcus lanatus* und *Agrostis tenuis*, sowie auch von *Lolium perenne*, sahen Jongen & Jones (1997) die Zunahme der Ausläufer und damit die Vergrößerung der C-Senke. In den Giessen FACE-Flächen profitierten andere Pflanzen mit Reserveorganen (z. B. Pfahlwurzeln bei *Rumex acetosa* und *Plantago lanceolata*) jedoch nicht von der Möglichkeit, überschüssiges C einlagern zu können. Denkbar wäre aber, dass dieses Merkmal zwar zu einer positiven Reaktion führt, jedoch erst bei Vorhandensein anderer, wichtigerer Merkmale.

*Ranunculus acris* und *Festuca rubra* reagierten in einem Jahr mit einer Zunahme und in zwei Jahren mit einer Abnahme der Deckung (bzw. *Festuca* vice versa). Im MEGARICH in UK (Harmens et al. 2004) blieb *Ranunculus acris* unverändert und *Festuca rubra* wurde nur in der 6-Schnitt-Variante unter erhöhtem CO<sub>2</sub> gefördert. Hier wie in den anderen Experimenten, in denen *Festuca rubra* nicht bzw. leicht negativ reagierte, wurden keine möglichen Ursachen für die CO<sub>2</sub>-Reaktionen vorgestellt.

*Glechoma hederacea* reagierte mit einer Zunahme der Deckung. Berntson et al. (1998) beschrieben eine größere Zunahme von kleinwüchsigen Arten als von großwüchsigen über die Zeit von 2 Monaten in einem Gewächshausexperiment unter 550 und 700 ppm. Im Giessen FACE profitierte diese kleinwüchsige Art früh im Jahr: Der Blühbeginn dieser Art liegt im März, unter erhöhtem CO<sub>2</sub> blühte *Glechoma* im Jahr 2005 8 Tage eher (Streitfert 2005). Sie hatte ihren Vegetationszyklus (kurze Blühperiode) unter erhöhtem CO<sub>2</sub> noch eher abgeschlossen, bevor andere Arten sie stark überwachsen konnten.

**Die PFTs****A priori PFTs**

Die Einteilung der Vegetation in Gräser, Kräuter und Leguminosen vor Beginn des Versuchs stellt eine Zusammenfassung dar, die der Ermittlung von Gründen für die Reaktion auf erhöhtes CO<sub>2</sub> nicht dient. So reagierten die Arten der drei PFTs nicht einheitlich: Unter den überwiegend negativ reagierenden Kräutern waren auch positive (*Cardamine pratensis* und *Glechoma*

*hederacea*) und unter den überwiegend positiv reagierenden Gräser ebenso auch negative (*Agropyron repens*, *Bromus hordeaceus*, *Dactylis glomerata*, *Lolium perenne*) Arten zu finden. Teyssonneyre et al. (2002a) betonten, dass „Kräuter“ keinesfalls als ein einheitlicher PFT angesehen werden kann, da sich dieser PFT aus sehr unterschiedlichen Arten zusammensetzt. In einem Versuch von Goverde et al. (2002) reagierten die vier Grasarten *Agrostis stolonifera*, *Anthoxanthum odoratum*, *Festuca rubra* und *Poa pratensis* nach 65 Tagen alle unterschiedlich auf 700 ppm. Auch der PFT Leguminosen, der durch die Fähigkeit zur N<sub>2</sub>-Fixierung physiologisch gut begründet scheint, reagierte inhomogen auf eine CO<sub>2</sub>-Erhöhung. Körner (2000) beschrieb es als „eines der unwahrscheinlichsten Dinge, die geschehen können, dass zwei Pflanzenarten auf erhöhtes CO<sub>2</sub> identisch reagieren“.

Die einzeln auf ihre CO<sub>2</sub>-Reaktion untersuchten Arten ergaben, in die PFTs Gräser, Kräuter und Leguminosen eingeteilt, keine einheitlich reagierenden PFTs, dennoch überwog bei Gräser eine eher positive und bei den meisten Kräuter eine negative Reaktion auf erhöhtes CO<sub>2</sub>.

### ***A posteriori PFTs***

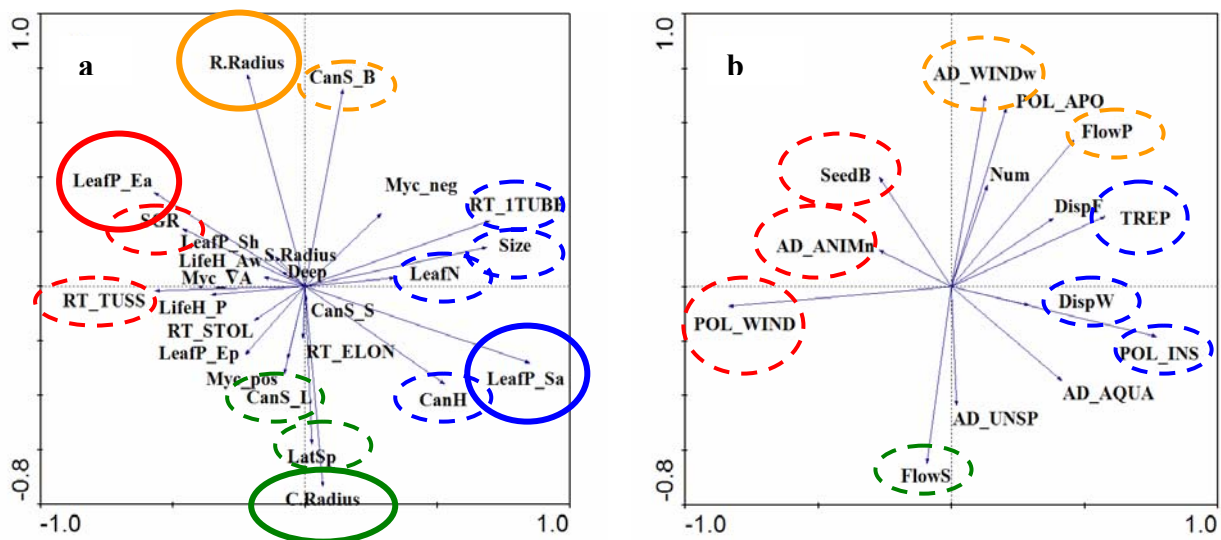
Beim Konzept der *a posteriori* PFTs werden Artengruppen mit einer ähnlichen Reaktion auf einen veränderten Umweltparameter auf die Ursachen, die diesen Reaktionen zugrunde liegen, untersucht (Chapin et al., 2000; Chapin et al., 2002; Díaz et al., 2002; Lavorel and Garnier, 2002; Chapin, 2003). Die CO<sub>2</sub>-Reaktion von Einzelpflanzen ergeben oft eine klare Zugehörigkeit zu PFTs wie C<sub>4</sub>-Pflanzen (geringe Reaktion) oder schnell wachsende C<sub>3</sub>-Pflanzen (starke positive Reaktion). Diese Reaktionen sind aber nicht auf die Konkurrenzsituation im Freiland übertragbar (Poorter & Navas 2003). Navas et al. (1999) berichteten von Ergebnis-Vergleichen an Einzelpflanzen, Monokulturen und Mischkulturen, die ergaben, dass die Ergebnisse von Monokulturen gut mit denen aus Mischkulturen zu vergleichen seien, mit denen von Einzelpflanzen jedoch nicht.

In der vorliegenden Arbeit stellte sich aus artspezifischen CO<sub>2</sub>-Reaktionen auf erhöhtes CO<sub>2</sub> das Merkmalspaar immergrün – sommergrün als die wichtigste Eigenschaft, die zur Bildung der CO<sub>2</sub>-Reaktionsgruppen führte, heraus: Alle 7 sommergrünen Arten reagierten negativ auf erhöhtes CO<sub>2</sub>, und alle 8 positiv reagierenden Arten waren immergrün. Die immergrünen Arten eroberten früh im Jahr den Raum und wurden dabei durch erhöhtes CO<sub>2</sub> bereits gefördert, wohingegen die sommergrünen weniger gute Startbedingungen im Jahr hatten. Dieser PFT ist allerdings auf Experimente in Gegenden mit milden Wintern bei einer ganzjährigen CO<sub>2</sub>-Anreicherung beschränkt.

Das Merkmal, das im Entscheidungsbaum die positiven und negativen CO<sub>2</sub>-Reaktionen der sommergrünen Arten im Giessen FACE am besten trennte, war die SGR. Keine positiv auf CO<sub>2</sub> reagierende Art hatte eine SGR von > 0,194 % d<sup>-1</sup>. Mit diesem Merkmal wurden *Rumex acetosa* und *Plantago lanceolata* als stark negativ auf CO<sub>2</sub> reagierenden Arten von den anderen immergrünen Arten abgetrennt. Allerdings stammt dieses Merkmal aus Untersuchungen an Einzelpflanzen und ist nur sehr bedingt auf die Konkurrenzsituation im Freiland übertragbar. Über die SGR von Wiesenarten unter Konkurrenz liegt keine Vergleichsliteratur vor. Stirling et al. (1997) beschrieben jedoch aus einem Ansaat-Experiment eine positive CO<sub>2</sub>-Reaktion von schnellwachsenden Pflanzen in Kurzversuchen, in Langzeitversuchen unter erhöhtem CO<sub>2</sub> waren schnell wachsende Arten nicht mehr im Vorteil.

### Natürliche PFTs

Die Merkmale, die zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Reaktion im Giessen FACE verwendet wurden, stehen natürlicherweise in einem Zusammenhang. Für das Giessen FACE kann die Beziehung der Merkmale untereinander mithilfe einer Principle Components Analysis (PCA) anschaulich gezeigt werden (Abbildung 23).



**Abbildung 23: Korrelation der Merkmale**

PCA der im Giessen FACE für die Berechnung der artspezifischen CO<sub>2</sub>-Reaktionen verwendeten Merkmale. Auf der ersten Ordinationsachse das Merkmalspaar Immergrüne – Sommergrüne (rot und blau markiert), auf der zweiten Achse Ruderale - Konkurrenten (orange und grün markiert). Korrelierende Merkmale sind jeweils gleichfarbig markiert. Erklärung der Abkürzungen im Text und in Tabelle 12. Die Graphiken sind der Publikation Grütters et al. (2006) entnommen, bei der ich Co-Autorin bin.

Die erste (horizontale) Ordinationsachse (**Immergrüne** – **Sommergrüne**) erklärte 15,4% der Variation der Zusammensetzung der Artmerkmale. Dieses im Giessen FACE wichtigste Merkmalspaar für die artspezifische CO<sub>2</sub>-Reaktion korrelierte für **Sommergrüne** (LeafP\_Sa) eng mit den Merkmalen verdickte Wurzeln (RT\_TUBE), größere Blätter (Size), höherer Wuchs (CanH), höhere Blatt-Stickstoff-Konzentration (LeafN), Pollenverbreitung durch Insekten (PolINS), späte Reproduktion (TRep) und dicke Samen (DispW). Für **Immergrüne** (LeafP\_Ea) ergab sich eine enge Korrelation mit den Merkmalen Pollenverbreitung durch Wind (POL\_WIND), Samenverbreitung durch Tiere (AD\_ANIM), längerer Aufenthalt der Samen in der Samenbank (SeedB), Horstgraswurzeln (RT\_TUSS) und eine schnellere Keimlings-Wachstumsrate (SGR, vgl. Tabelle 12).

Die zweite (vertikale) Ordinationsachse (**Ruderales** - **Konkurrenten**) erklärte 13,2 % der Variation der Zusammensetzung der Artmerkmale. Sie korrelierte für **Konkurrenten** (C-Radius) eng mit den Merkmalen gleichmäßige Verteilung der Blätter am Stengel (CanS\_L), große laterale Ausbreitung (LatSp) und später Blühbeginn (FlowS). Für **Ruderales** (R-Radius) ergab sich eine enge Korrelation mit den Merkmalen basale oder semi-basale Rosetten (CanS\_B), früher Blühbeginn (entgegengesetzt dem späten Blühbeginn FlowS, in grün) und lange Blühdauer (FlowP).

### ***Das Zusammenwirken der a posteriori und der natürlichen PFTs***

Merkmalskombinationen, die im Giessen FACE zu einer positiven CO<sub>2</sub>-Reaktion führten:

Immergrünes Wachstum (**LeafEa**), *schnelles* Keimlingswachstum (**SGR**) und *kleine* Samen (**DispW**), Abbildung 17.

oder *langsames* Keimlingswachstum (**SGR**), *kurze* Blühdauer (**FlowP**) und eine Tendenz zur Ruderalität (**R-Radius**),

oder, bei *geringerem* R-Anteil (**R-Radius**), ein *frühes* Einsetzen der Reproduktionszeit (**TRep**).

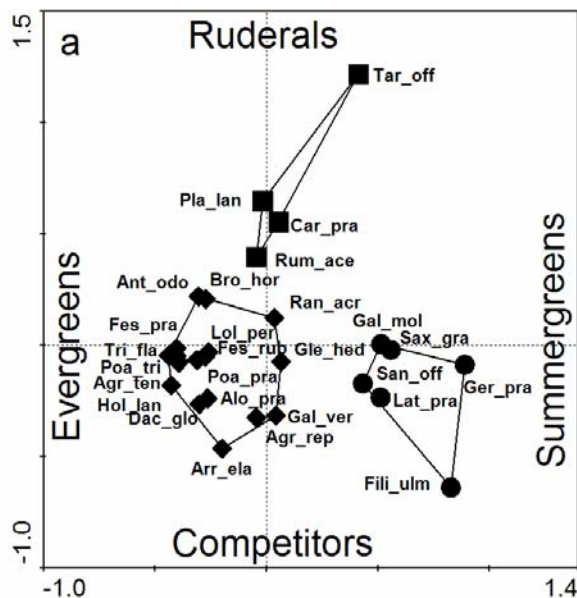
Merkmalskombinationen, die im Giessen FACE zu einer negativen CO<sub>2</sub>-Reaktion führten:

Sommergrünes Wachstum (**LeafSa**) und große Blätter (**Size**)

oder immergrünes Wachstum (**LeafEa**), *schnelles* Keimlingswachstum (**SGR**) und *große* Samen (**DispW**).



Positive Artreaktionen unter erhöhtem CO<sub>2</sub> waren im Giessen FACE demnach mit den Merkmalsgruppen um die **Immergrünen** und die **Ruderalen** verbunden, negative mit den **Sommergrünen**. Einzig die SGR fällt den entgegengesetzten Merkmalsgruppen zu. Denkbar wäre, dass sich die SGR, die an Einzelindividuen untersucht und festgelegt wurde, im Freiland unter Konkurrenz anders auswirkt.



Mit einer PCR, die die Verteilung der Arten entlang der beiden Gradienten

**Immergrüne – Sommergrüne**

**Ruderalen – Konkurrenten**

darstellt, kann nun jede Art in die o.g. Merkmalsgruppen eingeordnet werden (Grüters et al. 2006).

**Abbildung 24: Verteilung der Arten entlang des ersten und zweiten Gradienten**

PCA der im Giessen FACE untersuchten Arten entlang der ersten Ordinationsachse Immergrüne – Sommergrüne und der zweiten Ordinationsachse Ruderalen – Konkurrenten. Artenliste Tabelle 13.

In der PCA-Darstellung der Artenverteilung können 3 Gruppen entlang der beiden Hauptgradienten gebildet werden:

Die erste Arten-Gruppe besteht aus sechs sommergrünen Arten, die allesamt negativ auf erhöhtes CO<sub>2</sub> reagierten. Zusätzlich zu ihrer sommergrünen Eigenschaft zeigten sie eher eine Zugehörigkeit zu den Konkurrenten als zu den Ruderalen; sie können deswegen als **sommergrüne Konkurrenten** bezeichnet werden. Im Entscheidungsbaum (Abbildung 17) kam zu dieser Gruppe noch eine weitere nicht immergrüne Art hinzu, nämlich die einzige wintergrüne Art, *Bromus hordeaceus*.

Die zweite Arten-Gruppe wird aus vier Arten gebildet, die der Merkmalsgruppe der **Ruderalen** zuzuordnen ist. Die CO<sub>2</sub>-Reaktion dieser Gruppe war jedoch nicht einheitlich: *Cardamine*

*pratensis* reagierte positiv, *Taraxacum officinale* leicht negativ und *Plantago lanceolata* und *Rumex acetosa* stark negativ auf erhöhtes CO<sub>2</sub>.

Die dritte und größte Gruppe beinhaltet drei Kraut- und alle Gras-Arten. Diese befinden die sich fast alle am äußeren Achsen-Ende der Immergrünen. Drei von ihnen zeigen etwas mehr Eigenschaften, die zur Merkmalsgruppe „Ruderalität“ gehört, die anderen 14 tendieren zur Merkmalsgruppe „Konkurrenz“ (besonders *Arrhenatherum elatius*). In dieser Gruppe befinden sich alle positiv und unterschiedlich auf CO<sub>2</sub> reagierenden Arten (bis auf *Cardamine pratensis*) und zusätzlich auch 5 leicht negativ reagierende.

Fasst man die Artreaktionen gemäß dieser a posteriori PFTs zusammen, so reagierten im Giessen FACE alle sommergrünen Konkurrenten und die meisten Ruderalen negativ auf erhöhtes CO<sub>2</sub>, und die positiv reagierenden Arten gehörten alle zu den immergrünen Konkurrenten. Ausnahmen von diesem Muster entstehen z.B. durch das Einnehmen räumlicher Nischen durch Maulwurfshügel, Störstellen oder zeitlicher Nischen durch den Erntetermin: *Cardamine pratensis* als positiv reagierende Ruderale beendet ihren Vegetationszyklus bereits sehr früh im Jahr.

Das Merkmalspaar sommergrün – immergrün blieb das wichtigste Kriterium für die artspezifische CO<sub>2</sub>-Reaktion im Giessen FACE.

### ***Der konstante und der zeitabhängige CO<sub>2</sub>-Effekt***

Für die signifikante CO<sub>2</sub> x Jahre-Interaktion des Zeitraumes 1997-2002, der den Beginn des zeitabhängigen CO<sub>2</sub>-Effektes markiert, ergab sich für das Jahr 2002 eine dem konstanten CO<sub>2</sub>-Einfluss sehr ähnliche Artreaktion. In den Jahren darauf traten einschneidende Unterschiede in der Artreaktion auf. Einen Erklärungsansatz für den Wechsel des konstanten in einen zeitabhängigen CO<sub>2</sub>-Effekt bietet eventuell ein verschobener Vegetationsbeginn:

Zwar unterschieden sich die Jahresmittel der Lufttemperaturen auf den Flächen des Giessen FACE in den Jahren 2002, 2003 und 2004 nicht stärker als in den Jahren davor (Tabelle 27). Die Tagessummen über 0°C (im Januar mit dem Faktor 0,5; im Februar mit 0,75 und im März mit 1 multipliziert) erreichten jedoch 10 bzw. 20 Tage eher den Schwellenwert, der den Vegetationsbeginn nach Waßhausen (1997) markiert. Ein ähnlich früher Vegetationsbeginn

errechnete sich für das Jahr 1998. Beiden Jahren ist eine hoher Jahresniederschlag gemeinsam (die Feuchte wurde bereits bei der Berechnung der Deckungsreaktionen in Form der Bodenfeuchte für die betreffenden Flächen, nach Jahreszeiten aufgeteilt berücksichtigt). Das Jahr 1998 wies allerdings keine signifikante CO<sub>2</sub> x Jahre-Interaktion auf (Tabelle 19), und das darauffolgende Jahr 1999, das im Datensatz bis 2002 (nur P I) und im Datensatz bis 2004 eine signifikante CO<sub>2</sub> x Jahre-Interaktion zeigte, wies keine herausragenden Klimadaten auf.

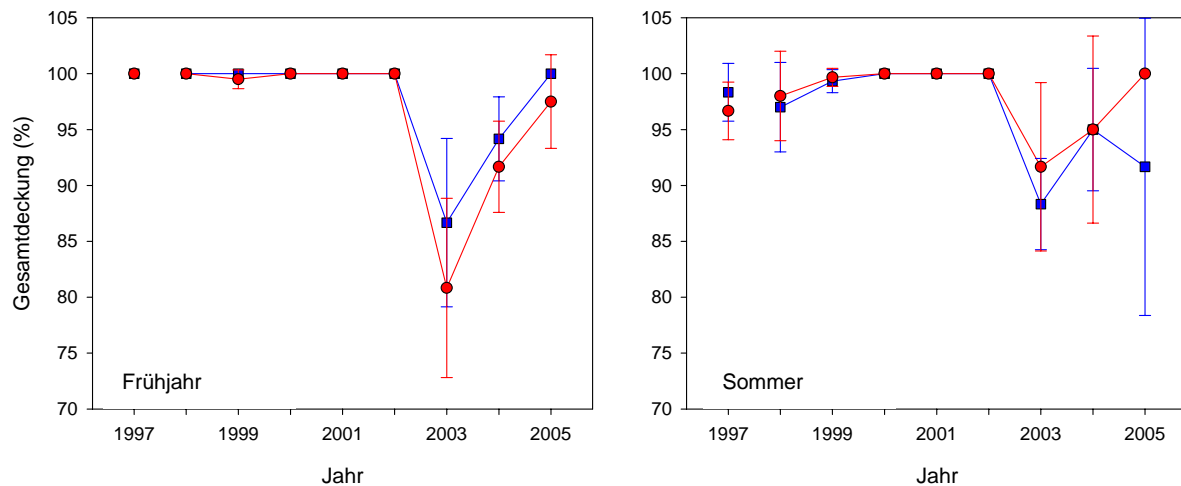
**Tabelle 27: Lufttemperatur, Niederschlag und Vegetationsbeginn auf den Giessen FACE Flächen**

	Temperatur (°C)	Vegetationsbeginn nach Waßhausen (1987) Datum	Niederschlag (mm)	Bodenfeuchte (mm)
1997	9,0	13.3.	437,8	30,0
1998	9,2	8.3.	704,9	37,3
1999	10,0	18.3.	565,1	38,0
2000	10,2	10.3.	596,5	39,2
2001	9,5	17.3.	619,5	38,1
2002	9,9	7.3.	750,3	40,7
2003	9,7	27.3.	422,3	32,7
2004	9,2	20.3.	589,3	37,5

Dargestellt sind die Jahresmittel der Lufttemperaturen und Niederschläge sowie der Vegetationsbeginn nach Waßhausen (1987) für die Jahre 1997–2004 auf den Giessen FACE Versuchsflächen. Die extremen Werte sind farbig markiert (hoch bzw. früh = rot, niedrig bzw. spät = blau).

Die klimatischen Unterschiede zwischen den Jahren 2002, 2003 und 2004 können zu einem zeitabhängigen CO<sub>2</sub>-Effekt in diesen Jahren beigetragen haben. Obwohl Feuchte und Niederschlag in den Berechnungen bereits berücksichtigt sind, können sie sich aber auch auf den Vegetationsbeginn ausgewirkt haben. In 2002 war es im zeitigen Frühjahr bereits warm (deshalb früher Vegetationsbeginn), später ebenfalls warm und feucht, 2003 war es im zeitigen Frühjahr noch kalt (deshalb später Vegetationsbeginn), später mittelwarm und trocken und 2004 war es im Frühjahr noch relativ lange kalt, später auch kühl und mittelfeucht (siehe auch Abbildung 2 und Abbildung 3). Die Artenzusammensetzung für den Zeitraum 1997-2001 unter konstantem CO<sub>2</sub>-Effekt und für den Zeitraum 1997-2002 unter zeitabhängigem CO<sub>2</sub>-Effekt wiesen dabei noch eine sehr ähnliche Artreaktion auf (Tabelle 18 im Vergleich zu Tabelle 20).

Das Jahr 2003 zeichnete sich nicht nur durch die (bei der Berechnung erfasste) Trockenheit, sondern auch durch einen heißen und langen Sommer aus (Abbildung 2). Die gesamte Biomasse war stark reduziert (Abbildung 9) und die Gesamtdeckung der Flächen wurde auf nur 70-80% Deckung geschätzt, im Gegensatz zu 90-100% in den vorangegangenen Jahren (Abbildung 25).



**Abbildung 25: Gesamtdeckung im Jahr 2003**

Dargestellt sind die Mittelwerte der Gesamtdeckung aus beiden Flächen der 3 Ringe für die Flächen unter Umgebungsluft (A, blaue Kästchen) und unter erhöhtem CO<sub>2</sub> (E, rote Kreise) mit Standardfehlern für Frühjahr und Sommer 2003.

Die Werte für die Gesamtdeckung (nicht Summe der Einzeldeckungen, siehe Material und Methoden) zeigen auch für die Jahre 2004 und 2005 eine lückenhafte Deckung der gesamten Fläche. Unter diesen Bedingungen veränderte sich die Artgemeinschaft entsprechend stark. Auffällig ist vor allem die positive CO<sub>2</sub>-Reaktion der beiden ruderalen Arten, *Taraxacum officinale* und *Bromus hordeaceus* (Tabelle 20: Vergleich der artspezifischen Reaktionen auf die Interaktion CO<sub>2</sub> x Jahr 5 bis 2004).

### ***Fazit der CO<sub>2</sub>-Wirkung auf die Pflanzengemeinschaft***

Welche Schlüsse können nun aus den gewonnen Parametern wie Artenzahl, Evenness oder Deckungsgrade gezogen werden? Welche sind die Parameter, die eine qualitative Aussage über die Entwicklung auf den Flächen zulassen? Grime (2001) wies darauf hin, dass eine gute Fitness nicht unbedingt an eine hohe Biomasse gekoppelt ist. Lepš (2004) führte an, dass ein Rückgang der Artenzahl nicht immer mit einer Abnahme der Biomasse einher geht. Er verwies auf Aarssen (2001), der der Identität der Arten mehr Bedeutung beimaß als der Anzahl der Arten auf einer Fläche. Gleiches berichteten Crawley et al. (1999) für ihre Grasland-Experimente. Diaz (2001) konstatierte, dass die Zusammensetzung der Vegetation nicht ein einfacher Messparameter sei, sondern dass darin Rückkopplungen und nicht-lineare Prozesse ablaufen, die sich auf verschiedene Ökosysteme unterschiedlich auswirkten. Der Vergleich der CO<sub>2</sub>-Reaktionen auf Artebene scheint eine relativ verlässliche Methode zu sein; Leadley & Stöcklin (1996) fanden jedoch genotyp-spezifische CO<sub>2</sub>-Reaktionen der Gesamtbiomasse von *Bromus erectus*, nicht aber

von *Festuca ovina*. Roumet et al. (2002) und Lüscher & Nösberger (1997) und Lüscher et al. (1998) fanden keine genotyp-spezifischen CO<sub>2</sub>-Reaktionen. Der Hinweis auf eventuelle genotypische Variabilität innerhalb einer Art kann also zusätzlich sehr wichtig sein. Eine Art ist in ihrem Reaktionsmuster darüber hinaus durch andere Arten beeinflusst. Im Giessen FACE wurden auch Phänologie und Blühverhalten durch erhöhtes CO<sub>2</sub> signifikant beeinflusst (Streitfert 2005). Es bleiben noch viele Fragen und unerkannte, wichtige Mosaiksteine und deren Zusammenwirken, die zum Verstehen des Ganzen vonnöten sind. Dennoch lassen sich für das Giessen FACE folgende Schlüsse ziehen:

Auf den typischen Glatthaferwiesen wurden die immergrünen Konkurrenten, die auch während des milden Winterklimas und zu Beginn der Vegetationsperiode von CO<sub>2</sub> profitieren konnten, gefördert. Alle sommergrünen und die meisten Ruderalen, die in dieser Vegetationsform zeitliche und räumliche Lücken ausnutzen mussten, verloren unter erhöhtem CO<sub>2</sub> an Deckung. Dieser konstante CO<sub>2</sub>-Effekt kann durch extreme Klimaeinflüsse (z.B. hohe Sommertemperaturen) zu einem von Jahr zu Jahr stark variierenden CO<sub>2</sub>-Effekt mit Förderung anderer, nicht den typischen Grasland-Gesellschaften angehöriger (z.B. ruderaler) Arten unter erhöhtem CO<sub>2</sub> verändert werden.

## 4.2 Wachstum und Entwicklung im Wurzelraum

### *Wurzelbiomasse*

Die starken Werte-Streuungen der Wurzelbiomasse, die in den Zylinderproben der Oberbodens besonders stark waren, könnten durch die Art der Probenahme aus der oberen Bodenschicht begründet sein: Die Meshbag-Proben wurden eingegraben und mit einer dünnen Rasensode überdeckt. Bei der Ernte der Meshbags wurde die Rasensode oberhalb des Meshbags abgeschnitten. Die Zylinder wurden ausgestochen, so dass ca. 3-4cm des dichtesten Wurzelfilzes und tiefer gelegene Sprossanteile in der Regel über den oberen Rand des Zylinders überstand und abgeschnitten und verworfen wurden. Die Bodenoberfläche weist aber große Unebenheiten auf. Es wurden also hin und wieder auch Bereiche mit mehr oder weniger dichtem Wurzelfilz (Spross-Anteile wurden aussortiert) in den Zylinderproben des Oberbodens als Wurzelbiomasse ausgewertet. Die unterschiedlichen Einzelproben aus den Zylindern trugen wahrscheinlich zu den starken Schwankungen der Werte bei. In den Meshbags dagegen fehlten die oberen 3-4 cm Wurzelfilz einheitlich in allen Proben, hier war die Wurzelbiomasse in den Proben des Oberbodens gleichmäßiger verteilt. Die Heterogenität des Bodens kann zusätzlich zu Streuungen der Werte geführt haben (Pendall et al. 2004).

Die Wurzelbiomasse wog in den Zylinderproben des Oberbodens (auch, aber nicht nur aufgrund der oben beschriebenen Heterogenitäten) doppelt bis dreimal so viel wie in den anderen Proben. In einem bereits so dicht bewurzelten Raum ist eine große Biomasse-Zunahme nur noch begrenzt möglich oder sinnvoll, denn schließlich entstehen bei der Erschließung des Raumes durch die Wurzeln Kosten für den Bau neuer Wurzeln, die nur durch eine resultierende verbesserte Nährstoffaufnahme gedeckt werden können. Im Unterboden, wie auch in den Meshbags mit zunächst wurzelfreiem Boden, war mehr freier Raum für die Erschließung durch Wurzeln vorhanden. Gründe für eine veränderte vertikale Verteilung der Wurzeln könnten jedoch auch eine artspezifische Förderung von Arten mit tiefer reichenden Wurzeln (Kutschera & Lichtenegger 1982, Nelson et al. 2004) oder eine Veränderung von Bodenparametern sein (Kutschera & Lichtenegger 1982, Dobrowolski et al. 1990).

### ***Zylinderproben versus Meshbag-Proben***

Wurzelbiomassen aus Bewurzelungsexperimenten mit Meshbags nahmen unter erhöhtem CO<sub>2</sub> fast ausschließlich zu, so auch im Giessen FACE. Parallele Beprobungen mit Zylindern ergaben jedoch unterschiedliche (Giessen FACE), indifferente (OTC Schweiz) bzw. negative (Bulls FACE) Wurzelbiomassen. Diese Differenzen können eventuell durch eine erhöhte turnover-Rate der Wurzeln im Boden erklärt werden (Higgins et al. 2002, Sindhøj et al. 2004). Auch die Abnahme der Wurzelbiomasse im Weideland des Bulls FACE-Experiments nach 4 Jahren unter 475 ppm CO<sub>2</sub> ging mit erhöhten Wachstumsraten der Wurzeln und erhöhtem Durchsatz an Biomasse einher (Allard et al. 2005). Ebenfalls eine Erhöhung der Wurzel-turnover-Rate wurde von Loiseau & Soussana (1999) nach 2,5 Jahren unter 700 ppm im Tunnel-Experiment mit *Lolium perenne*-Ansaat beobachtet, allerdings nur unter N-Düngung. Auf ungedüngten Flächen erfolgte dagegen eine Abnahme der Wurzel-turnover-Rate. Die turnover-Rate ist zudem temperaturempfindlich (Fitter et al. 1996). Die turnover-Rate wird durch die Beprobung mit Zylindern nicht erfasst. Zum Verständnis der Vorgänge im Boden sind die Werte aus Meshbags demnach sehr wichtig (Higgins et al. 2002). Die beobachteten Unterschiede in der Wurzelbiomasse aus Zylinder- und Meshbagproben weisen möglicherweise auf einen höheren Durchsatz an Wurzeln unter erhöhtem CO<sub>2</sub> hin.

Bei der Beprobung mit Meshbags entstehen allerdings möglicherweise auch Fehler und die Übertragbarkeit der Ergebnisse von Meshbagproben auf ungestörte Proben muss deswegen kritisch geprüft werden. Weniger verdichtetes Bodenmaterial im Meshbag führt zu einer Überschätzung (Milchunas et al. 2005), das Netz selber kann dagegen die Bewurzelung hemmen (was bei den durchweg zu den Feinwurzeln zählenden Graswurzeln des Giessen FACE sicher zu vernachlässigen ist). Ein kleiner Durchmesser des Meshbags kann ebenfalls zu Fehlern führen. Dieser Fehler haftet jedoch allen Bodenproben an: Da der Boden sehr heterogen ist, gibt es Stellen ohne und Stellen mit vielen Wurzeln. Diese heterogene Eigenschaft des Bodens kann im Giessen FACE ebenfalls zu den oben erwähnten Schwankungen der Biomassewerte im Oberboden beigetragen haben, allerdings in Meshbags und Zylinderproben gleichermaßen. Eine höhere Anzahl von Proben hätte der Heterogenität des Bodens mit Sicherheit besser Rechnung getragen, unsere Dauerbeobachtungsfläche allerdings noch stärker gestört. Um Fehler durch den Zeitpunkt der Probenahme zu verhindern, eignet sich ein Zeit-Schema, wie z.B. Probenahmen zu gleichen Zeitpunkten in aufeinanderfolgenden Jahren, wie es in den Versuchen des Giessen FACE angewendet wurde. Makkonen & Helmisaari (1999) verglichen Meshbags mit Zylinderproben und empfahlen Meshbags für den Vergleich von Feinwurzel-Produktion auf

unterschiedlichen Flächen, rieten aber davon ab, mit Meshbags in kurzen Zeiträumen (6-8 Wochen) zu beproben, da zu diesem Zeitpunkt noch zu viele Wurzeln in die Meshbags wachsen. Völlig unklar ist, ab wann von einem Gleichgewicht zwischen Auf- und Abbau der Wurzeln im Meshbag auszugehen ist. Zur Zeit sind die Meshbags aus dem Giessen FACE seit 2004 bzw. 2002 im Boden. Die nächste Beprobung wird zeigen, ob nach 4 Jahren eine weitere Angleichung der Wurzelparameter zwischen Zylinder- und Meshbagproben erfolgt.

Weitere wichtige, wenn auch oft nicht untersuchte Einflüsse auf die Wurzelbiomasse und vor allem die turnover-Rate stellen Pilze und Bodentiere dar. Ohne die Untersuchung der Organismen, die sich von Wurzeln ernähren, kann nicht auf die Menge gebildeter Wurzelbiomasse geschlossen werden.

### ***Bodenpilze***

Bodenpilze werden durch erhöhtes CO<sub>2</sub> beeinflusst. In den Swiss FACE-Versuchen fanden sich mehr Pilze im Boden (Lüscher et al. 2004). Rillig et al. (1999a) beobachteten einen Trend zur Abnahme von nicht-mykorrhizierenden Pilzen bei *Avena*, *Sherardia*, *Linanthus*, *Plantago* und *Epilobium*, bei *Euphorbia* dagegen einen Trend zur Zunahme nach 6 Jahren unter 720 im Jasper Ridge OTC, alle anderen Arten zeigte keine Veränderung im nicht-AMF-Pilzbesatz. Mitchell & Reich (2003) berichteten von einem höheren Pilzbefall im BioCON FACE, Minnesota, der zu einer Wurzelreduktion von 25 % führte. Die Autoren vermuteten, dass die im Jasper Ridge beobachteten dämpfenden Effekte von erhöhtem CO<sub>2</sub> auf ebensolche Pilzinfektionen zurückzuführen sind. Erhöhtes CO<sub>2</sub> dämpfte dort den Effekt der anderen Behandlungen, insbesondere den Zuwachs der Wurzelbiomasse (Shaw et al. 2002). Effekte einer solchen Größenordnung würden die Erkenntnisse aus dem Giessen FACE erheblich beeinflussen. Erste Untersuchungen lassen vermuten, dass im Giessen FACE von einer Zunahme der Bodenpilze ausgegangen werden kann (mdl. Mitteilung Müller, 2005).

### ***Bodentiere***

Wurzelfresser profitierten ebenfalls von erhöhtem CO<sub>2</sub>, z.B. im Bulls FACE (Yeates et al. 2003). Wilsey (2001) beschrieb einen vermehrten Nematodenfraß an *Phleum pratense* und *Poa pratensis* nach 56 Tagen unter 650 ppm CO<sub>2</sub>.

Im Giessen FACE ergab eine Untersuchung von Sonnemann & Wolters (2005), dass die wurzelhaarfressenden Nematoden im ersten Jahr des Experiments zunahmen, im zweiten abnahmen und im dritten zunahmen, bis der Anfangswert wieder erreicht war. Die jagenden



Nematoden nahmen jedoch weiter ab. Verstärkter Nematodenfraß an einzelnen Pflanzenarten könnte sich im Giessen FACE auf die Artenzusammensetzung und damit gegebenenfalls auch auf die Wurzelbiomasse und -verteilung auswirken. Die Beeinflussung der PFT Gräser aufgrund einer Kette von indirekten Effekten wäre folgendermaßen denkbar: Ergebnisse von Zaller & Arnone (1999) deuteten darauf hin, dass Grasarten öfter an Regenwurmkothaufen stehen als Kräuter, Regenwürmer auf erhöhtes CO<sub>2</sub> positiv reagierten und dass Gräser deshalb stärker zu reagieren scheinen, als ohne den Einfluss der Bodentiere. Blouin et al. (2005) beobachteten in Gegenwart von Regenwürmern weniger Nematodenfraß an den Wurzeln. Im Giessen FACE war die CO<sub>2</sub>-Reaktion vieler Grasarten positiv. Die Unterschiede in den Regenwurmdichten wurden nicht untersucht. Hier – wie in den meisten CO<sub>2</sub>-Experimenten – fehlen (noch) wichtige Glieder bei der Darstellung der Wechselwirkungen des Ökosystems.

### ***Wurzelbiomasse, RLD, SRL und Wurzeldicke im Vergleich***

Ergebnisse der Wurzelbiomassen, Wurzellängen und -dicken aus Grasland-Versuchen und Versuchen mit Graslandarten (Tabelle 28) zeigen den Zusammenhang der untersuchten Parameter und erlauben teilweise ein Ergänzen der in den Publikationen fehlenden Angaben.

**Tabelle 28: CO<sub>2</sub>-Reaktionen im Vergleich: Wurzel-Biomasse, RLD, SRL und Wurzeldicke**

Versuch	CO <sub>2</sub> -Reaktion				CO <sub>2</sub> (ppm)	Quelle	
	Biom.	RLD	SRL	Dicke			
<b>Zylinderproben (natürliche Vegetation)</b>							
1	Giessen FACE, Wiese	+/ns	+	ns	ns	+20%	Eigene Untersuchung
2	MEGARICH MiniFACE, Italien	+/ns	+/ns	ns *	ns *	580	Marchi et al. 2004
3	OTC Jasper Ridge, Serpentin	+	+	+	- *	680	Rillig et al. 1999b
4	OTC Jasper Ridge, Sandstein	+	ns	-	+ *	680	Rillig et al. 1999b
5	OTC Jasper Ridge, Sandstein	+(ns)	ns	- *	+ *	680	Higgins et al. 2002
6	OTC Colorado, Kurzgras-Steppe	ns	+/ns	-/ns *	ns	720	LeCain et al. 2006
7	2-Arten-Ansaat Swiss FACE	+	+ *	ns	ns *	600	Staddon et al. 2004
8	SACC Schweiz, Ehemalige Weide	ns	ns *	ns	ns *	600	Leadley et al. 1999
<b>Meshbags</b>							
9	Giessen FACE, Wiese	+	+	ns	ns	+20%	Eigene Untersuchung
10	OTC Uppsala, Ehemalige Weide	+	+ *	ns	ns	700	Sindhøj et al. 2004
11	2-Arten-Ansaat Swiss FACE	+	+	ns	ns *	600	Jongen et al. 1995
12	7-Arten-Ansaat Swiss FACE	+	+	ns *	ns *	600	Warwick et al. 1998
13	OTC Jasper Ridge, Sandstein	+	ns	- *	+ *	680	Higgins et al. 2002
<b>Topfexperimente (Gewächshaus)</b>							
14	2 Arten	+	+	+ *	-	203, 370	Derner et al. 2001
15	10 Arten	+	+	-(ns)	+ *	610	Staddon et al. 1999
16	<i>Trifolium repens</i>	+	+ *	-	+ *	700	Jongen et al. 1996
17	<i>Holcus lanatus</i>	+	+	ns *	ns *	+300	Barnard et al. 2005
18	<i>Bromus hord.</i> Töpfe in OTC J.R.	ns	ns	ns *	ns *	680	Rillig et al. 1998
19	2 Arten, Töpfe in OTC Jasper R.	ns *	+/ns	ns *	ns *	680	Rillig & Field 2003
20	<i>Plantago lanceolata</i>	ns *	+	ns *	ns *	590	Rouhier & Read 1998
21	2 Arten	ns *	ns *	ns	ns *	600	Volk & Körner 2001
22	4 Arten, nach 100 Tagen	+/ns	+/- *	+/ns	+/-	590	Ferris & Taylor 1993

Installierte Scheiben (23), Mini-Rhizotrone (24-26)							
23	Monolithe im Gewächshaus	*	+	*	*	700	Newton et al. 1996
24	OTC Uppsala, Ehemalige Weide	+	+	*	*	700	Sindhøj et al. 2000
25	OTC Jasper Ridge, Sandstein	ns	ns	ns	ns	680	Higgins et al. 2002
26	SACC Schweiz, Ehemalige Weide	ns	ns	ns *	ns	600	Arnone et al. 2000
<b>Σ</b>	<b>CO<sub>2</sub>-Reaktion (+ : ns : -)</b>	<b>17 : 4 : 0</b>	<b>16 : 8 : 0</b>	<b>3 : 9 : 5</b>	<b>6 : 8 : 2</b>		

Dargestellt sind die CO<sub>2</sub>-Reaktionen aus Grasland-Versuchen und Versuchen mit Grasarten. Negative und indifferente, nicht signifikante (ns) CO<sub>2</sub>-Reaktionen sind blau markiert, positive rot, auch wenn sie teilweise nicht signifikant ausfielen. Nicht untersuchte Parameter sind mit einem Asterisk\* markiert, nicht ableitbare Ergebnisse grau hinterlegt. In der untersten Zeile sind alle +, ns und – Reaktionen zusammengefasst und zueinander ins Verhältnis gesetzt (17:4:0 = 17 x +, 4 x ns, 0 x -).

In den meisten Versuchen reagierte die Wurzelbiomasse und die RLD positiv und die SRL und die Wurzeldicke ohne Veränderung auf erhöhtes CO<sub>2</sub> (unterste Zeile, Tabelle 28). Kein Versuch ergab eine Abnahme der RLD und der Wurzelbiomasse unter erhöhtem CO<sub>2</sub>. Im Giessen FACE (Zeile 1) und im MEGARICH MiniFACE (Zeile 2, Marchi et al. 2004) war die Zunahme der Wurzelbiomasse (+RLD) in Zylinderproben nur im Unterboden signifikant, im Oberboden dagegen nicht, in den OTCs in Colorado (Zeile 6, LeCain et al. 2006) dagegen war die RLD nur im Oberboden signifikant erhöht und im Unterboden nicht. Rillig et al. (1999b) erhielten unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Reaktionen der RLD und SRL auf Serpentin und Sandstein, die den Zusammenhang der vier in Tabelle 28 dargestellten Parameter verdeutlicht: Auf beiden Böden war die Biomasse erhöht. Auf Serpentin (Zeile 3) erhöhte sich die RLD stärker als die Biomasse, und damit erhöhte sich ebenfalls die SRL: Die Wurzelbiomasse nahm zu, die Wurzeln wurden länger pro Bodengewicht (RLD) und länger pro Wurzelgewicht (SRL), also feiner (Dicke hier nicht untersucht). Auf Sandstein (Zeile 4) veränderte sich die RLD nicht signifikant bei erhöhter Biomasse, deswegen war die SRL verringert: Die Wurzelbiomasse nahm zu, die Wurzeln veränderten ihre Länge pro Bodengewicht nicht (RLD) und wurden kürzer pro Wurzelgewicht (SRL), also dicker (Dicke hier nicht untersucht). Zwei weitere Jasper-Ridge-Versuche auf Sandstein (Zeilen 5 und 13) müssen ebenso dickere Wurzeln bei verminderter SRL (beides ergänzt) gehabt haben, weil sonst bei unveränderter Wurzellänge pro Bodengewicht eine Biomasse-Zunahme nicht erklärbar ist. Bei der Beobachtung mit Mini-Rhizotronen (Zeile 25, 26) in Jasper Ridge und SACC wurden keine signifikanten Veränderungen festgestellt.

Die fehlenden CO<sub>2</sub>-Reaktionen der Versuche aus den Zeilen 7, 8, 10, 11, 14, 15 und 16 lassen sich folgendermaßen ergänzen: Im Giessen FACE (Zeilen 1 und 9) und in den Meshbag-Proben der 2-Arten Ansaat des Swiss FACE (11) nahmen Biomasse und RLD gleichermaßen zu (Jongen et al. 1995), SRL und Wurzeldicke (im Swiss FACE nicht untersucht) veränderten sich nicht. Genauso muss es auch in den Meshbags der OTCs in Uppsala (Zeile 10) gewesen sein, da sich die erhöhte Wurzel-Biomasse bei unveränderter SRL und Wurzeldicke nicht anders erklären

lässt. In den Zylinderproben der 2-Arten-Ansaat im Swiss FACE (Zeile 7) blieb die SRL bei erhöhter Biomasse unverändert (Staddon et al. 2004); die Wurzeldicke muss also gleich geblieben sein und die RLD zugenommen haben. Auf der ehemaligen Weide des SACC in der Schweiz können RLD und Wurzeldicke bei nicht signifikanter Reaktion von Biomasse und SRL keine signifikanten CO<sub>2</sub>-Reaktionen geliefert haben.

Im Topfexperiment Zeile 14 wies der Boden bei erhöhter Biomasse und RLD mehr feine Wurzeln auf, folglich war die SRL erhöht. Im Versuch der Zeile 15 war die Zunahme der Biomasse stärker als die der RLD, die SRL daher geringer (die Wurzeln wurden unter erhöhtem CO<sub>2</sub> dicker, hier nicht untersucht). Ebenso muss es auch im Versuch der Zeile 16 gewesen sein (RLD und Dicke nicht untersucht). Für die Interpretation von Versuchen der Zeilen 2, 12, 17-21, 23 und 24 liegen nicht genügend Parameter vor, um die fehlenden zu ergänzen.

Um die Gründe für eine Zunahme der Wurzelbiomasse und RLD der meisten Versuche zu finden, wurden die Parameter aller Freilandversuche einander gegenübergestellt (Tabelle 29).

**Tabelle 29: Versuchparameter der Freiland-Versuche zu Wurzelbiomasse, -länge und -dicke**

	Lage (°) Breite Länge	T. (°C) NS (mm)	Bodentyp	Nutzung	Fläche (m Ø)	CO <sub>2</sub> - Konz. (ppm)	CO <sub>2</sub> - Beg.- Dauer	Probe-Zeitpunkt Zylinderproben Meshbag-Proben	Tiefe (cm)	Autoren
OTC Jasper Ridge	37 N 122 W	14* 550 <sup>+</sup>	Serpentin	Wiese	0,65	+350	Veg-P 24 h	Z: nach 7 Jahren	15	Rillig et al. 1999b
OTC Jasper Ridge	37 N 122 W	14* 550 <sup>+</sup>	Sandstein	Wiese	0,65	+ 350	Veg-P 24 h	Z: nach 7 Jahren	15	Rillig et al. 1999b
OTC Jasper Ridge	37 N 122 W	14* 550 <sup>+</sup>	Sandstein	Wiese	0,65	+ 360	Veg-P 24 h	Z: nach 4 Jahren M: 1-4 Monate	20	Higgins et al. 2002
OTC Colorado	40 N 104 W	11 320	Ustollic camborthid	Ehem. Weide	4,5	720	Veg-P 24 h	Z: im 5. Jahr	75	LeCain et al. 2006
Swiss SACC	47 N 7 E	9 900	Rendzina	Ehem. Weide	1	600	Veg-P 24 h	Z: im 1.-3. Jahr	8	Leadley et al. 1999
OTC Uppsala	49 N 18 E	5,5 527	Braunerde	Ehem. Weide	1,5	700	Veg-P (?)	Im 4. + 5. Jahr: M: 4 Monate	15	Sindhøj et al. 2004
Giessen FACE	50 N 8 E	9 600	Auenboden- Pseudogley (pH6)	Wiese	8	+20%	Jahr tags	Z: im 4.-7. Jahr M: 3-24 Monate	12	Eigene Unter- suchung
MEGARICH Italien	43 N 11 E	14** 880	Rendzina (pH6)	Wiese	1,8	580	Jahr (?)	Z: im 8.-10. Monat	30	Marchi et al. 2004
2-Arten Swiss FACE	47 N 8 E	9 1200	Braun- erde (pH 7)	Ansaat, gejätet	18	600	Veg-P tags	Im 3. + 7. Monat: M: 2 -3 Monate	25	Jongen et al. 1995
2-Arten Swiss FACE	47 N 8 E	9 1200	Braun- erde (pH 7)	Ansaat, gejätet	18	600	Veg-P tags	Z: 10 Jahre	10	Staddon et al. 2004
7-Arten Swiss FACE	47 N 8 E	9 1200	Braun- erde (pH 7)	Ansaat, gejätet	18	600	Veg-P tags	Im 2. Jahr: M: 62 Tage	13	Warwick et al. 1998

Dargestellt sind geographische Lage, Jahresmitteltemperatur und mittlerer Jahresniederschlag, Bodentyp, Nutzung, Größe der Flächen, applizierte CO<sub>2</sub>-Konzentration, Dauer der Applikation, Zeitpunkt der Probenahme, Probetiefe und Referenz zum Versuch. Markante Abweichungen sind in rot dargestellt, Jasper-Ridge-Flächen und die SACC-Fläche sind farbig hinterlegt. Fehlende Daten sind ergänzt aus \* Leemans & Cramer 1991, \*\* Müller 1982

Im Vergleich der Versuche wichen die Ergebnisse der Jasper-Ridge-Versuche (Rillig et al. 1998, Rillig et al. 1999b, Higgins et al. 2002), die entsprechend des Untergrundes (Serpentin und Sandboden) stark variierten, und die Versuche der OTCs in der Kurzgras-Steppe (LeCain et al. 2006) von anderen ab, die trotz der Unterschiede im Bodentyp einheitlich mit erhöhter Wurzelbiomasse und erhöhter RLD auf erhöhtes CO<sub>2</sub> reagierten. Eine Ausnahme bildeten die Versuche des SACC; hier wurden die nicht signifikanten CO<sub>2</sub>-Reaktionen mit der geringen Probetiefe erklärt (Leadley et al. 1999).

Bis auf den geringen Durchmesser der OTCs und den westlichen Breitengrad lassen sich aus der Gegenüberstellung dieser Versuchsparameter keine markanten Unterschiede als Ursache für die unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Reaktion auf den amerikanischen und europäischen Flächen feststellen. Die kalifornische Region, in der die Jasper Ridge-Flächen liegen, gehört zur mediterranen Vegetationszone, in der auch die MEGARICH Italien-Fläche liegt. Allerdings erhalten die kalifornischen Flächen, wie auch die Kurzgras-Steppe in Colorado, bei etwa gleicher Jahresmitteltemperatur (14/11°C) sehr viel weniger Niederschlag (550 mm, 320 mm) als die italienischen (880 mm). Die Swiss FACE Flächen sind Ansaaten, sie wären, wie die SACC-Flächen, azonal/alpin und Giessen und Uppsala gehören zur kühl-temperierten Vegetationszone (Jahresmitteltemperaturen ca. 9°C bis 5,5°C). Pflanzensoziologisch sind sich die europäischen Flächen untereinander relativ ähnlich im Vergleich zu den Jasper Ridge-Flächen. Zu den Kurzgras-Steppen liegen keine Artenlisten vor.

Der Vergleich der Ubiquisten zeigt bereits einen deutlichen Unterschied auf: Die amerikanischen Flächen beinhalten mehr Arten, die auf die Gesellschaften Secalietea, Chenopodietea und Plantaginetea, also Getreideunkraut-, Ruderal- und Trittpflanzengesellschaften hinweisen, als eine der europäischen Flächen (Tabelle 33 im Anhang). Die europäischen Flächen sind Grünlandgesellschaften. Die Vegetation des Giessen FACE ist als Arrhenatheretum elatioris beschrieben und gehört damit zur Ordnung Arrhenatherion (Fettwiesen) und die Arten der OTCs Uppsala weisen auf die Zugehörigkeit der Fläche zu den Cynosurien (Fettweiden) hin (Tabelle 34). Die MEGARICH-Italien-Flächen werden pflanzensoziologisch den Festucetalia erecti, den Halbtrocken- und Trockenrasen zugeordnet (Marchi et al. 2004).

Demnach ist die positive CO<sub>2</sub>-Reaktion von Wurzel-Biomasse und RLD bei nicht signifikant veränderter SRL und Wurzeldicke typisch für europäische Grasländer, und zwar unabhängig von Unterschieden im Versuchsaufbau, Bodentyp, der Nutzungsform (Wiese, Weide oder gejätete Ansaat) und der Versuchsdauer. An dieser Stelle müssten weitere Versuchsergebnisse den für eine solche Aussage recht mageren Datensatz ergänzen. Die Bodenabhängigkeit der CO<sub>2</sub>-

Reaktion ist eventuell nur bei einzelnen Arten (eventuell nur den amerikanischen) gegeben, bei anderen hingegen nicht: So stellten Eissenstat et al. 2000) dar, dass die SRL von *Malus* stark durch unterschiedliche Bodentypen beeinflusst wird, die SRL von *Citrus* dagegen nicht.

### **Artspezifische CO<sub>2</sub>-Reaktion der Wurzeln**

Artspezifische Wurzelreaktionen wurden im Giessen FACE nicht untersucht. Die oberirdische Vegetation wies jedoch artspezifische Verschiebungen unter erhöhtem CO<sub>2</sub> auf. Wahrscheinlich wirkten sich die Artverschiebungen auch auf die Wurzelparameter aus: zwei Arten mit Pfahlwurzeln (*Rumex acetosa* und *Plantago lanceolata*) nahmen ab, was zu der (allerdings aufgrund der geringen Deckungsgrade der beiden Arten nicht signifikanten) Abnahme der Wurzelstärke beigetragen haben kann.

Ferris & Taylor (1993), in Tabelle 28 in der Zeile 21, untersuchten vier Arten getrennt auf ihre CO<sub>2</sub>-Reaktion nach 100 Tagen unter 590 ppm CO<sub>2</sub> im Gewächshaus; die unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Reaktionen der Wurzelparameter dieser vier Arten bestärken die Hinweise auf artspezifische CO<sub>2</sub>-Reaktionen von Rillig & Field (2003), Volk & Körner (2001), Farnsworth & Bazzaz (1995) und anderen.

**Tabelle 30: CO<sub>2</sub>-Reaktionen der Wurzelbiomasse auf vier separat untersuchte Arten**

Versuch	CO <sub>2</sub> -Reaktion			
	Biomasse	RLD	SRL	Dicke
<i>Sanguisorba minor</i>	+	+	ns	+
<i>Lotus corniculatus</i>	+	+	ns	+/ns *
<i>Anthyllis vulneraria</i>	ns	ns	ns	+/ns *
<i>Plantago media</i>	ns	+	+	- *

Dargestellt sind die CO<sub>2</sub>-Reaktionen von vier Versuchsarten. Indifferente, nicht signifikante (ns) CO<sub>2</sub>-Reaktionen sind blau markiert, positive rot, auch wenn sie teilweise nicht signifikant ausfielen.

\*= Parameter nicht untersucht

Zu der artspezifischen CO<sub>2</sub>-Reaktion der Wurzeln kommt in Mehr-Arten-Gemischen bzw. unter natürlichen Bedingungen hinzu, dass Wurzellängen an sich bereits artspezifisch sind. Mengel & Steffens (1985) beschrieben in einer Untersuchung zur Wurzelmorphologie, dass *Lolium perenne* in den oberen 25cm sehr viel längere Wurzeln als *Trifolium repens* ausbildete. Durch eine CO<sub>2</sub>-bedingte Artenverschiebung können also leicht Wurzellängen-Veränderungen auftreten, die nicht mit einer direkten CO<sub>2</sub>-Wirkung auf die Wurzel erklärt werden können.

Streuungen in den Ergebnissen der Wurzellängen und -dicken können ebenfalls durch das seltene Vorkommen von einzelnen Pfahlwurzeln verstärkt werden. Zusätzlich wurden auch kurzfristige

Verkürzungen und Verdickungen von Wurzeln von bis zu 3 Tagen nach Kontakt mit einem Hindernis (Clark et al. 2003) und Verkürzungen der Wurzeln durch N-und/oder P-Düngung bei *Brachypodium pinnatum* und *Dactylis glomerata* beobachtet (Ryser & Lambers 1995). In zuvor gesiebttem Bodens war die Wurzeldicke von *Citrus sinensis* nach 5 Wochen erhöht, nach 40 Wochen waren Wurzeldicken in gestörtem und ungestörtem Boden gleich (Eissenstat 1991).

### ***C und N***

Die Ergebnisse des Giessen FACE (Zeilen 1 und 8) gleichen denen aus dem OTC-Versuch (Zeile 9) mit Meshbags in Uppsala (Sindhøj et al. 2004) und denen der 2-Arten-Ansaat mit Meshbag-Proben (Zeile 10) vom Swiss FACE (Jongen et al. 1995). Beide Autorengruppen begründeten die Zunahme der Wurzelbiomasse mit einer C-Allokation von der ober- in die unterirdische Biomasse und stellten eine N-Limitation bzw. ein erhöhtes C/N-Verhältnis der Nicht-Leguminosen fest. Auch Marchi *et al.* (2004) bezeichneten die erhöhte Wurzelbiomasse im MEGARICH MiniFACE (Zeile 2) als C-Senke und Barnard et al. (2005) fanden eine starke Nitrat-Abnahme im Boden. Im Giessen FACE konnten aber unter erhöhtem CO<sub>2</sub> weder ein signifikant verändertes C/N-Verhältnis im Boden noch in der unterirdischen Biomasse (mdl. Mitteilung Kaupe, Müller) beobachtet werden.

### ***Feuchte***

Im Giessen FACE wurde die Feuchte durch die Mixed Model Analyse als signifikanter Faktor nur in den Zylinderproben aus dem Unterboden für die Biomasse und die RLD errechnet. Ein CO<sub>2</sub>-bedingter Einfluss auf die Bodenfeuchte (Riedo et al. 1999, Niklaus et al. 1998) lag nicht vor (Kammann et al. 2005). Feuchte wird häufig als Ursache für eine indirekte CO<sub>2</sub>-Reaktion angeführt (Niklaus & Körner 2004, Morgan et al. 2004b). Sindhøj et al. (2000) fanden größere CO<sub>2</sub>-Reaktionen in trockenen und keine CO<sub>2</sub>-Reaktionen in feuchten Jahren. Für dieselben Flächen wiesen Sindhøj et al. (2004) nach 5 Jahren jedoch nach, dass CO<sub>2</sub>-Reaktionen *nicht* durch veränderte Bodenfeuchten zu erklären waren; in dem sehr trockenen Jahr 1999 war die Biomasse (ober- wie unterirdisch) unter erhöhtem CO<sub>2</sub> und unter Umgebungsluft nicht signifikant verschieden.

### **Zeit**

Eine Abhängigkeit von der Expositionsdauer beschränkte sich auf die signifikante Zunahme der Wurzelstärke in den Zylinderproben des Unterbodens; in den Zylinderproben des Oberbodens und bei den Meshbags war sie nicht zu beobachten. Die Zu- und Abnahmen, die oberirdisch für die Deckung der Arten beobachtet wurden, lässt artspezifische Zu- und Abnahmen im Wurzelraum vermuten; die Wurzeln sind jedoch nicht nach Arten getrennt untersucht worden und eine Veränderung der oberirdischen Vegetation spiegelt nicht die direkten Veränderungen der unterirdischen wieder (Warwick et al. 1998). Denkbar wäre jedoch eine Allokation von der Wurzel in den Spross bzw. vice versa: Die Deckung von *Holcus lanatus*, *Trisetum flavescens* und *Dactylis glomerata*, also Pflanzen mit feinen Wurzeln, nahm im Zeitraum 2000 bis 2003 ab, die Deckung von *Galium mollugo* und *Geranium pratense*, Pflanzen mit eher dickeren Wurzeln, jedoch zu. Van der Krift & Berendse (2002) beobachteten in einer Untersuchung mit Mini-Rhizotronen eine Abnahme der Wurzelstärke über die Zeit (ca. 20 Monate): die Wurzelstärke von *Arrhenatherum elatius*, *Lolium perenne*, *Nardus stricta* und *Molinia caerulea* wurden mit dem Alter der Pflanzen geringer. Auf unser System übertragen nahmen demnach nicht die Pflanzen mit dünneren Wurzeln mehr Raum ein als diejenigen mit dickeren Wurzeln, sondern alle Arten, jede für sich, bildete im Verlauf der Zeit dünnere Wurzeln. Aus Abbildung 22 lässt sich erkennen, dass dieser Vorgang unter erhöhtem CO<sub>2</sub> beschleunigt war und saisonale Schwankungen, mit geringsten Wurzelstärken im Mai, aufwies.

### **Saisonale Schwankungen**

In den Zylinderproben des Unterbodens zeigte sich eine signifikante Abhängigkeit der Wurzelbiomasse und Wurzelstärke vom Zeitpunkt der Probenahme (Tabelle 22, Tabelle 25). Sindhøj et al. (2004) verzeichnete stärkere Zunahme der Wurzelbiomasse unter erhöhtem CO<sub>2</sub> im Frühjahr und stärkere Abnahme im Winter. Im Giessen FACE nahm die Wurzelbiomasse unter erhöhtem CO<sub>2</sub> ebenfalls saisonal bedingt stärker zu, jedoch erst im Juli und nur in 7-12 cm Bodentiefe. Denkbar wäre eine durch erhöhtes CO<sub>2</sub> verschobene Entwicklung, so dass beispielsweise unter erhöhtem CO<sub>2</sub> die Phase des Wachstums später einsetzte als auf den Flächen unter Umgebungsluft (Abbildung 18).

### ***Fazit der CO<sub>2</sub>-Reaktionen im Wurzelraum***

Wurzelbiomasse und Wurzelichte nahmen unter erhöhtem CO<sub>2</sub> bei kaum veränderter Wurzeldicke zu. Der Einfluss der Feuchte und der Zeit ist hierbei bereits berücksichtigt. Weitere Parameter wie Fraß, Pilzbefall, Lebensdauer der Wurzeln etc. können zusätzlich Einfluss auf das System genommen haben; so stellte (Ryser 1998) z.B. dar, dass Pflanzen mit einer niedrigen RLD kürzer leben als solche mit einer hohen RLD. Auch sind Länge, Dicke und Masse der Wurzeln lediglich Vergleichsparameter. Sie können nicht mit den Lebensbedingungen der Pflanzen gleichgestellt werden. Ein weiteres Problem beim Vergleich von Wurzeldicke, RLD und SRL ist die fehlende Information über die Anordnung der Wurzeln. Wurzeln unterschiedlicher Anordnung und Dicke stehen für unterschiedliche Funktionen innerhalb der Pflanze zur Verfügung (Eissenstat et al. 2000).

So stellen Vergleiche der Wurzelparameter einen weiteren Mosaikstein im Gesamtbild von CO<sub>2</sub>-Reaktionen dar. Um ein genaueres Bild der Vorgänge im Boden zu erhalten, müssten noch mehr Versuche unter möglichst gleichen Bedingungen durchgeführt werden.



## 5 Zusammenfassung

Im Rahmen des Freiland-Experiments „Giessen FACE“ (FACE = Free Air Carbon dioxide Enrichment), in dem mit einer CO<sub>2</sub>-Konzentration von +20% über Umgebungsluft eine in ca. 30 Jahren zu erwartende CO<sub>2</sub>-Konzentration simuliert wird, wurde in den ersten Versuchsjahren ein signifikanter konstanter Einfluss von erhöhtem CO<sub>2</sub> auf die Deckung eines Arrhenatheretum elatioris beobachtet. Im Verlauf des Experiments nahm der Einfluss der Jahre stark zu, so dass der konstante CO<sub>2</sub>-Effekt im vierten Jahr nach Beginn der Begasung von einem zeitabhängigen CO<sub>2</sub>-Effekt (Interaktion CO<sub>2</sub> x Jahre) abgelöst wurde. Evenness und Diversität nahmen unter erhöhtem CO<sub>2</sub> ab. Die Abnahme der Artenzahl auf allen Flächen war unter Umgebungsluft stärker als unter erhöhtem CO<sub>2</sub>. Die meisten der 27 untersuchten Arten reagierten mit einer Abnahme der Deckung auf erhöhtes CO<sub>2</sub>, einige dominanten Arten allerdings mit einer Zunahme. Daraus ergab sich insgesamt eine kaum veränderte Deckung unter erhöhtem CO<sub>2</sub>. Wichtige Unterschiede in der Artenreaktion ließen sich auf die ganzjährige Begasung im wintermilden Klima zurückführen, weil die immergrünen Arten, die im Frühjahr bereits von erhöhtem CO<sub>2</sub> profitierten, den Raum effektiver besetzten. Eine feinere Differenzierung der Artcharakteristika in Merkmalsgruppen ergab eine negative CO<sub>2</sub>-Reaktion der sommergrünen Konkurrenten und der meisten Ruderalen sowie eine positive CO<sub>2</sub>-Antwort der immergrünen Konkurrenten. Kräuter und Gräser reagierten nicht einheitlich auf erhöhtes CO<sub>2</sub>: Es nahmen mehr Gräser zu als ab und mehr Kräuter ab als zu. Trotz der geringen Düngung konnte die einzige Leguminose der Fläche von ihrer Fähigkeit, Stickstoff zu fixieren, nicht profitieren und zählte aufgrund ihrer sommergrünen Eigenschaft ebenfalls zu den Verlierern.

Die Biomasse und die Bestandswurzellänge (RLD, root length density) nahmen unter erhöhtem CO<sub>2</sub> zu. In den Meshbag-Proben und den Unterbodenproben der Zylinder war die Zunahme der Wurzelbiomasse signifikant, in den Zylinderproben des Oberbodens nicht. Auch die Veränderungen von spezifischen Wurzellängen (SRL, specific root length) und Wurzeldicken waren nicht signifikant. Die Reaktionen im Wurzelraum (Biomasse, RLD, SRL und Wurzeldicke) waren in den Zylinderproben geringer ausgeprägt als in den Meshbagproben, die einen freien bewurzelbaren Raum darstellten. In Zylinderproben war vor allem der Oberboden bereits stark durchwurzelt, so dass hier die Zunahme der Bewurzelung unter erhöhtem CO<sub>2</sub> nicht signifikant war. Allgemein waren die CO<sub>2</sub>-Reaktionen im

Unterboden stärker als im Oberboden: Die Wurzelbiomasse und RLD nahmen im Unterboden stärker zu, die SRL stärker ab. Die Wurzeldicke nahm in den Zylinderproben im Unterboden stärker als im Oberboden, in den Meshbag-Proben war die Abnahme unter erhöhtem CO<sub>2</sub> im Oberboden stärker. Der Einfluss von Feuchte und Zeit auf die Wurzelparameter war erstaunlich gering.

## **Summary**

In the context of the grassland ecosystem experiment „Giessen FACE“ (FACE = Free Air Carbon dioxide Enrichment) with an elevated CO<sub>2</sub> concentration of + 20% above ambient CO<sub>2</sub> concentrations a significant constant CO<sub>2</sub> effect on the cover of an *Arrhenatheretum elatioris* community was observed for the first years in investigation. Due to the increasing influence of the years during the experiments the constant CO<sub>2</sub> effect changed into a time dependent CO<sub>2</sub> effect (CO<sub>2</sub> x year interaction) from the fourth year of application onwards. Evenness and diversity decreased under elevated CO<sub>2</sub>. The decrease of species richness was stronger under ambient CO<sub>2</sub> concentrations than under elevated CO<sub>2</sub>. Most of the 27 species under examination showed a decreased cover under elevated CO<sub>2</sub>, on the other hand some of the dominant species' cover increased, resulting in a marginal change of the general cover under elevated CO<sub>2</sub>. Important differences in species reactions were associated with the year round CO<sub>2</sub> application in the winter mild climate. Evergreen species profited already in early spring and occupied space in a more effective way under elevated CO<sub>2</sub> than in ambient CO<sub>2</sub> concentrations. A more differentiated analysis of species characteristics indicated a negative CO<sub>2</sub> response of summer green competitors and most of the ruderals, in contrast to a positive CO<sub>2</sub> response of evergreen competitors. Forbs and grasses responded heterogeneously, with more grass species increasing than decreasing under elevated CO<sub>2</sub>, and more forb species decreasing than increasing. Despite moderate nutrient application, legumes profited less from N-fixation under elevated CO<sub>2</sub> but suffered more from being summer green, and therefore decreased.

Root biomass and root length density (RLD) increased under elevated CO<sub>2</sub>. Increase of root biomass was significant in meshbags and soil cores of the lower soil, but not in soil cores of the upper soil. Changes of specific root length (SRL) and root diameter were not significant.

Root responses of all parameters (biomass, RLD, SRL and root diameter) were less pronounced in soil cores than in meshbags, which provided a space free of roots. In contrast soil cores from upper soil contained already many roots at the beginning of the experiment, and therefore the increase of biomass was not significant. CO<sub>2</sub>-responses were generally stronger in the lower soil than in the upper soil: root biomass and RLD increased stronger and SRL decreased stronger. Root diameter increased stronger in core samples of the lower soil than in upper soil, but meshbags showed a stronger increase in the upper soil. The impact of humidity and time on the root parameters examined was surprisingly low.

The Giessen FACE Experiment offers an outstanding chance for examination of long term effects under elevated CO<sub>2</sub>.

## **6 Danksagung**

Mein Dank geht an das Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie HLUG, und die Deutsche Forschungsgesellschaft (DFG), die unseren Arbeitskreis finanziell unterstützten, sowie an Herrn Prof. Jäger und alle Mitglieder des Instituts für Pflanzenökologie, die zum Gelingen der Untersuchungen am Giessen FACE beigetragen haben. Herzlich danken möchte ich auch Herrn Dr. Hertel, der mir freundlicherweise ermöglichte, meine Wurzelproben am Institut für Pflanzenwissenschaften in der Pflanzenökologie und Ökosystemforschung, Georg-August-Universität Göttingen, zu scannen.

## 7 Literatur

- Aarssen LW (2001) On correlations and causations between productivity and species richness in vegetation: Predictions from habitat attributes. *Basic and Applied Ecology* **2** 105-114.
- Ackerly DD, Bazzaz FA (1995) Plant growth and reproduction along CO<sub>2</sub> gradients: non-linear responses and implications for community change. *Global Change Biology* **1** 199-207.
- Allard V, Newton PCD, Lieffering M, Carran RA, Soussana JF, Matthew C (2005) Increased quantity and quality of coarse soil organic matter fraction at elevated CO<sub>2</sub> in a grazed grassland are a consequence of enhanced root growth rate and turnover. *Plant and Soil* **276** 49-60.
- Arnone JA (1999) Symbiotic N<sub>2</sub> fixation in a high Alpine grassland: effects of four growing seasons of elevated CO<sub>2</sub>. *Functional Ecology* **13** 383-387.
- Arnone JA, Zaller JG, Spehn EM, Niklaus PA, Wells CE, Körner C (2000) Dynamics of root systems in native grasslands: effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. *New Phytologist* **147** 73-85.
- Arp WJ, Van Mierlo JE, Berendse F, Snijders W (1998) Interactions between elevated CO<sub>2</sub> concentration, nitrogen and water: effects on growth and water use of six perennial plant species. *Plant, Cell and Environment* **21** 1-11.
- Barnard R, Leadley PW, Lensi R, Barthes L (2005) Plant, soil microbial and soil inorganic nitrogen responses to elevated CO<sub>2</sub>: a study in microcosms of *Holcus lanatus*. *Acta Oecologica-International Journal of Ecology* **27** 171-178.
- Bazzaz FA, Garbutt K (1988) The response of annuals in competitive neighborhoods: Effects of elevated CO<sub>2</sub>. *Ecology* **69** 937-946.
- Berntson GM, Rajakaruna N, Bazzaz FA (1998) Growth and nitrogen uptake in an experimental community of annuals exposed to elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. *Global Change Biology* **4** 607-626.
- Blouin M, Zuily-Fodil Y, Pham-Thi AT, Laffray D, Reversat G, Pando A, Tondoh J, Lavelle P (2005) Belowground organism activities affect plant aboveground phenotype, inducing plant tolerance to parasites. *Ecology Letters* **8** 202-208.
- Böhm W (1979) Methods of studying root systems. Springer Verlag, Berlin, 1-188 pp.
- Byrne C, Jones M (2002) Effects of elevated CO<sub>2</sub> and nitrogen fertilizer on biomass productivity, community structure and species diversity of a semi-natural grassland in Ireland. *Proceedings of the Royal Irish Academy* **102 B** 141-150.
- Campbell BD, Laing WA, Greer DH, Crush JR, Clark H, Williamson DY, Given MDJ (1995) Variation in grassland populations and species and the implications for community responses to elevated CO<sub>2</sub>. *Journal of Biogeography* **22** 315-322.
- Campbell BD, Smith DMS (2000) A synthesis of recent global change research on pasture and rangeland production: reduced uncertainties and their management implications. *GCTE Pastures Rangelands Network M* **82** 39-55.
- Carter DR, Peterson KM (1983) Effects of a CO<sub>2</sub>-enriched atmosphere on the growth and competitive interaction of a C3 and a C4 grass. *Oecologia* **58** 188-193.

- Casella E, Soussana JF, Loiseau P (1996) Long-term effects of CO<sub>2</sub> enrichment and temperature increase on a temperate grass sward. I. Productivity and water use. *Plant and Soil* **182** 83-99.
- Casper BB, Jackson RB (1997) Plant competition underground. *Annual Reviews in Ecology and Systematics* **28** 545-570.
- Chapin FS, Zavaleta ES, Eviner VT, Naylor RL, Vitousek PM, Reynolds HL, Hooper DU, Lavorel S, Sala OE, Hobbie SE, Mack MC, Díaz S (2000) Consequences of changing biodiversity. *Nature* **405** 234-242.
- Chapin FS, Matson PA, Mooney HA (2002) Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. Springer Verlag, New York.
- Chapin FS (2003) Effects of Plant Traits on Ecosystem and Regional Processes: a Conceptual Framework for Predicting the Consequences of Global Change. *Annals of Botany* **91** 455-463.
- Clark LJ, Whalley WR, Barraclough PB (2003) How do roots penetrate strong soil? *Plant and Soil* **255** 93-104.
- Curtis PS, Jablonski LM, Wang X (2003) Assessing elevated CO<sub>2</sub> responses using meta-analysis. *New Phytologist* **160** 6-7.
- Derner JD, Polley HW, Johnson HB, Tischler CR (2001) Root system response of C<sub>4</sub> grass seedlings to CO<sub>2</sub> and soil water. *Plant and Soil* **231** 97-104.
- Diaz S, Grime JP, Harris J, McPherson E (1993) Evidence of a feedback mechanism limiting plant response to elevated carbon dioxide. *Nature* **364** 616-617.
- Diaz S (2001) Complex interactions between plant diversity, succession and elevated CO<sub>2</sub>. *Trends in Ecology & Evolution* **16** 667.
- Diaz S, Briske DD, McIntyre S (2002) Range management and plant functional types. In: Global rangelands: Progress and prospects (eds Grice AC, Hodgkinson KC), pp. 81-100. CAB International.
- Diemer M, Körner C (1998) Transient enhancement of carbon uptake in an alpine grassland ecosystem under elevated CO<sub>2</sub>. *Arctic and Alpine Research* **30** 381-387.
- Dierschke H (1989) Kleinräumige Vegetationsstruktur und phänologischer Rhythmus eines Kalbuchenwaldes. *Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie* **17** 131-143.
- Dobrowolski JP, Caldwell MM, Richards JH (1990) Basin hydrology and plant root system. In: Ecological Studies 80 (eds Osmond CB, Pitelka LF, Hidy GM), pp. 243-292. Springer-Verlag, Berlin.
- Drake BG (1992) A field study of the effects of elevated CO<sub>2</sub> on ecosystem processes in a Chesapeake Bay wetland. *Australian Journal of Botany* **40** 579-595.
- Drake B, Peresta G, Beugeling E, Matamala R (1996) Long-term elevated CO<sub>2</sub> exposure in a Chesapeake Bay wetland: ecosystem gas exchange, primary production, and tissue nitrogen. In: Carbon dioxide and terrestrial ecosystems (eds Koch GW, Mooney HA), pp. 197-214. Academic Press.
- Dukes JS, Moore LA, Rebecca Shaw M, Tobeck T, Field CB, Chiariello NR, Cleland EE, Mooney HA, Thayer S (2005) Responses of grassland production to single and multiple global environmental changes. *PLoS Biology* **3** .
- Edwards GR, Clark C, Newton PCD (2001) The effects of elevated CO<sub>2</sub> on seed production and seedling recruitment in a sheep-grazed pasture. *Oecologia* **127** 383-394.

- Edwards GR, Clark H, Newton PCD (2003) Soil development under elevated CO<sub>2</sub> affects plant growth responses to CO<sub>2</sub> enrichment. *Basic and Applied Ecology* **4** 185-195.
- Eissenstat DM (1991) On the relationship between specific root length and the rate of root proliferation: a field study using citrus rootstocks. *New Phytologist* **118** 63-68.
- Eissenstat DM, Wells CE, Yanai RD, Whitbeck JL (2000) Building roots in a changing environment: implications for root longevity. *New Phytologist* **147** 33-42.
- Farnsworth EJ, Bazzaz FA (1995) Inter- and intra-generic differences in growth, reproduction, and fitness of nine herbaceous annual species grown in elevated CO<sub>2</sub> environments. *Oecologia* **104** 454-466.
- Ferris R, Taylor G (1993) Contrasting effects of elevated CO<sub>2</sub> on the root and shoot growth of four native herbs commonly found in chalk grassland. *The New Phytologist* **125** 855-866.
- Fitter AH (1997) An architectural approach to the comparative ecology of plant root systems. *New Phytologist* **106 (Suppl.)** 61-77.
- Fitter AH, Peat HJ (1994) The ecological flora database. *J. Ecol.* **82**, 415-425. (online: Ford H at <http://www.york.ac.uk/res/ecoflora/cfm/ecofl/index.cfm> )
- Fitter AH, Self GK, Wolfenden J, van Vuuren MMI, Brown TK, Williamson L, Graves JD, Robinson D (1996) Root production and mortality under elevated atmospheric carbon dioxide. *Plant and Soil* **187** 299-306.
- Fitter AH, Graves JD, Wolfenden J, Self GK, Brown TK, Bogie D, Mansfield TA (1997) Root production and turnover and carbon budgets of two contrasting grasslands under ambient and elevated atmospheric carbon dioxide concentrations. *The New Phytologist* **137** 247-255.
- Francey RJ, Allison CE, Etheridge DM, Trudinger CM, Enting IG, Leuenberger M, Langenfelds RL, Michel E, Steele LP (1999) A 1000-year high precision record of <sup>13</sup>C in atmospheric CO<sub>2</sub>. *Tellus, Series B: Chemical and Physical Meteorology* **51** 170-193.
- Gamper H, Peter M, Jansa J, Luscher A, Hartwig UA, Leuchtman A (2004) Arbuscular mycorrhizal fungi benefit from 7 years of free air CO<sub>2</sub> enrichment in well-fertilized grass and legume monocultures. *Global Change Biology* **10** 189-199.
- Goverde M, Arnone JA, Erhardt A (2002) Species-specific reactions to elevated CO<sub>2</sub> and nutrient availability in four grass species. *Basic and Applied Ecology* **3** 221-227.
- Grime JP (2001) Plant functional types, communities and ecosystems. pp. 161-181.
- Grime JP (2002) Plant strategies, vegetation processes and ecosystems properties. John Wiley & Sons, LTD, Chichester, New York, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, 1-417 pp.
- Grünhage L, Hanewald K, Jäger H-J, Ott W (1996) Auswirkungen dynamischer Veränderungen der Luftzusammensetzung und des Klimas auf terrestrische Ökosysteme in Hessen.
- Grünzweig JM, Körner C (2001) Growth, water and nitrogen relations in grassland model ecosystems of the semi-arid Negev of Israel exposed to elevated CO<sub>2</sub>. *Oecologia* **128** 251-262.
- Grüters U, Janze S, Kammann C, Jäger H-J (2006) Plant functional types and elevated CO<sub>2</sub>: A method of scanning for causes of community alteration. *Journal of Applied Ecology and Food Quality* (in press)
- Hakala K, Mela T (1996) The effects of prolonged exposure to elevated temperatures and elevated CO<sub>2</sub> levels on the growth, yield and dry matter partitioning of field-sown meadow fescue. *Agricultural and Food Science in Finland* **5** 285-298.

- Hanley ME, Trofimov S, Taylor G (2004) Species-level effects more important than functional group-level responses to elevated CO<sub>2</sub>: evidence from simulated turves. *Functional Ecology* **18** 304-313.
- Harmens H, Williams PD, Peters SL, Bambrick MT, Hopkins A, Ashenden TW (2004) Impacts of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and temperature on plant community structure of a temperate grassland are modulated by cutting frequency. *Grass and Forage Science* **59** 144-156.
- Hartwig UA, Lüscher A, Nösberger J, van Kessel C (2002) Nitrogen-15 budget in model ecosystems of white clover and perennial ryegrass exposed for four years at elevated atmospheric pCO<sub>2</sub>. *Global Change Biology* **8** 194-202.
- Hebeisen T, Lüscher A, Nösberger J (1997a) Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and nitrogen fertilisation on yield of *Trifolium repens* and *Lolium perenne*. *Acta Oecologia - Oecologia Plantarum* **18** 277-284.
- Hebeisen T, Lüscher A, Zanetti S, Fischer BU, Hartwig UA, Frehner M, Hendrey GR, Blum H, Nösberger J (1997b) Growth response of *Trifolium repens* L. and *Lolium perenne* L. as monocultures and bi-species mixture to free air CO<sub>2</sub> enrichment and management. *Global Change Biology* **3** 149-160.
- Higgins PAT, Jackson RB, Des Rosiers JM, Field CB (2002) Root production and demography in a California annual grassland under elevated atmospheric carbon dioxide. *Global Change Biology* **8** 841-850.
- Hodgson JG, Grime JP, Hunt R, Thompson K (1995) The electronic comparative plant ecology. Chapman and Hall, London, 1-19 pp.
- Hodgson JG, Wilson PJ, Hunt R, Grime JP, Thompson K (1999) Allocating C-S-R plant functional types: a soft approach to a hard problem. *Oikos* **85** 282-294. (Excel-files online: [http://www.shef.ac.uk/~nuocepe/ucpe/method\\_a.xls](http://www.shef.ac.uk/~nuocepe/ucpe/method_a.xls))
- Hui DF, Sims DA, Johnson DW, Cheng WX, Luo YQ (2002) Effects of gradual versus step increases in carbon dioxide on *Plantago* photosynthesis and growth in a microcosm study. *Environmental and Experimental Botany* **47** 51-66.
- IPCC (2001) Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of the Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1-881 pp.
- Jäger HJ, Schmidt SW, Kammann C, Grünhage L, Müller C, Hanewald K (2003) The University of Giessen Free-Air Carbon Dioxide Enrichment study: Description of the experimental site and of a new enrichment system. *Journal of Applied Botany-Angewandte Botanik* **77** 117-127.
- Jastrow JD, Miller RM, Owensby CE (2000) Long-term effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on below-ground biomass and transformations to soil organic matter in grassland. *Plant and Soil* **224** 85-97.
- Johnson HB, Polley HW, Whitis RP (2000) Elongated chambers for field studies across atmospheric CO<sub>2</sub> gradients. *Functional Ecology* **14** 388-396.
- Johnson NC, Wolf J, Koch GW (2003) Interactions among mycorrhizae, atmospheric CO<sub>2</sub> and soil N impact plant community composition. *Ecology Letters* **6** 532-540.
- Jones MB, Jongen M (1996) Sensitivity of temperate grassland species to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and the interaction with temperature and water stress. *Agricultural and Food Science in Finland* **5** 271-283.
- Jongen M, Jones MB, Hebeisen T, Blum H, Hendrey GR (1995) The effects of elevated CO<sub>2</sub> concentrations on the root growth of *Lolium perenne* and *Trifolium repens* grown in a FACE system. *Global Change Biology* **1** 361-371.



- Jongen M, Fay P, Jones MB (1996) Effects of elevated carbon dioxide and arbuscular mycorrhizal infection on *Trifolium repens*. *The New Phytologist* **132** 413-423.
- Jongen M, Jones MB (1997) Effects of elevated CO<sub>2</sub> on species co-occurring in a neutral grassland. *Abstracta Botanica* **21** 249-260.
- Jongen M, Jones MB (1998) Effects of elevated carbon dioxide on plant biomass production and competition in a simulated neutral grassland community. *Annals of Botany* **82** 111-123.
- Kammann C, Grünhage L, Jäger HJ (2001) A new sampling technique to monitor concentrations of CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> in air at well-defined depths in soils with varied water potential. *European Journal of Soil Science* **52** 297-303.
- Kammann C, Grünhage L, Grütters U, Janze S, Jäger HJ (2005) Response of aboveground grassland biomass and soil moisture to moderate long-term CO<sub>2</sub> enrichment. *Basic and Applied Ecology* **6** 351-365.
- Klausing O (1988) Die Naturräume Hessens mit Karte 1:200000.
- Kleyer M (1995) Biological traits of vascular plants: A database. Arbeitsberichte Institut für Landschaftsplanung und Ökologie der Universität Stuttgart 2 1-19. (online: <http://www.uni-oldenburg.de/landeco/Download/Databases/biot.htm>).
- Klironomos JN, Allen MF, Rillig MC, Piotrowski J, Makvandi-Nejad S, Wolfe BE, Powell JR (2005) Abrupt rise in atmospheric CO<sub>2</sub> overestimates community response in a model plant-soil system. *Nature* **433** 621-624.
- Körner C, Diemer M, Schächli B, Zimmermann L (1996) Response of Alpine vegetation to elevated CO<sub>2</sub>. In: Carbon dioxide and terrestrial ecosystems (eds Koch GW, Mooney HA), pp. 177-196. Academic Press, San Diego.
- Körner C, Diemer M, Schächli B, Niklaus PA, Arnone JA (1997) The responses of alpine grassland to four seasons of CO<sub>2</sub> enrichment: a synthesis. *Acta Oecologia - Oecologia Plantarum* **18** 165-175.
- Körner C (2000) Biosphere responses to CO<sub>2</sub> enrichment [Review]. *Ecological Applications* **10** 1590-1619.
- Körner C (2003) Ecological impacts of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on terrestrial ecosystems. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* **361** 2023-2041.
- Kreeb K (1977) Methoden der Pflanzenökologie. Gustav Fisher, Jena, 205-207 pp.
- Kutschera L, Lichtenegger E (1982) Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen. Gustav-Fischer-Verlag.
- Lavorel S, Garnier E (2002) Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail. *Functional Ecology* **16** 545-556.
- Leadley PW, Stöcklin J (1996) Effects of elevated CO<sub>2</sub> on model calcareous grasslands: Community, species, and genotype level responses. *Global Change Biology* **2** 389-397.
- Leadley PW, Niklaus PA, Stocker R, Körner C (1999) A field study of the effects of elevated CO<sub>2</sub> on plant biomass and community structure in a calcareous grassland. *Oecologia* **118** 39-49.
- LeCain DR, Morgan JA, Schuman GE, Reeder JD, Hart RH (2002) Carbon exchange and species composition of grazed pastures and exclosures in the shortgrass steppe of Colorado. *Agriculture Ecosystems & Environment* **93** 421-435.

- LeCain DR, Morgan JA, Milchunas DG, Mosier AR, Nelson JA, Smith DP (2006) Root biomass of individual species, and root size characteristics after five years of CO<sub>2</sub> enrichment on native shortgrass steppe. *Plant and Soil* **279** 219-228.
- Leemans R, Cramer W (1991) The IIASA database for mean monthly values of temperature, precipitation and cloudiness of a global terrestrial grid. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). RR-91-18. <http://www.pik-potsdam.de/~cramer/climate.html>
- Legendre P, Legendre L (1998) Numerical Ecology. Elsevier, Amsterdam.
- Lepš J (2004) What do the biodiversity experiments tell us about consequences of plant species loss in the real world? *Basic and Applied Ecology* **5** 529-534.
- Lepš J, Šmilauer P (2003) Multivariate analysis of ecological data using CANOCO. Cambridge University Press.
- Lilley JM, Bolger TP, Gifford RM (2001) Productivity of *Trifolium subterraneum* and *Phalaris aquatica* under warmer, high CO<sub>2</sub> conditions. *New Phytologist* **150** 371-383.
- Loiseau P, Soussana JF (1999) Elevated [CO<sub>2</sub>], temperature increase and N supply effects on the turnover of below-ground carbon in a temperate grassland ecosystem. *Plant and Soil* **210** 233-247.
- Lucas PW, Cottam DA, Mansfield TA (1987) A large-scale fumigation system for investigating interactions between air pollution and cold stress on plants. *Environmental Pollution* **43** 15-28.
- Lüscher A, Nösberger J (1997) Interspecific and intraspecific variability in the response of grasses and legumes to free air CO<sub>2</sub> enrichment. *Acta Oecologia - Oecologia Plantarum* **18** 269-275.
- Lüscher A, Hendrey GR, Nösberger J (1998) Long-term responsiveness to free air CO<sub>2</sub> enrichment of functional types, species and genotypes of plants from fertile permanent grassland. *Oecologia* **113** 37-45.
- Lüscher A, Daepf M, Blum H, Hartwig UA, Nösberger J (2004) Fertile temperate grassland under elevated atmospheric CO<sub>2</sub> - role of feed-back mechanisms and availability of growth resources. *European Journal of Agronomy* **21** 379-398.
- Makkonen K, Helmisaari HS (1999) Assessing fine-root biomass and production in a Scots pine stand - comparison of soil core and root ingrowth core methods. *Plant and Soil* **210** 43-50.
- Marchi S, Tognetti R, Vaccari FP, Lanini M, Kaligaris M, Miglietta F, Raschi A (2004) Physiological and morphological responses of grassland species to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations in FACE-systems and natural CO<sub>2</sub> springs. *Functional Plant Biology* **31** 181-194.
- Marissink M, Hansson M (2002) Floristic composition of a Swedish semi-natural grassland during six years of elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. *Journal of Vegetation Science* **13** 733-7.
- Marissink M, Pettersson R, Sindhøj E (2002) Above-ground plant production under elevated carbon dioxide in a Swedish semi-natural grassland. *Agriculture Ecosystems & Environment* **93** 107-120.
- Matamala R, Drake BG (1999) The influence of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on plant-soil nitrogen interactions in a wetland plant community on the Chesapeake Bay. *Plant and Soil* **210** 93-101.
- Mengel K, Steffens D (1985) Potassium uptake of rye-grass (*Lolium perenne*) and red clover (*Trifolium pratense*) as related to root parameters. *Biol.Fertil Soils* **1** 53-58.
- Milchunas DG, Mosier AR, Morgan JA, LeCain DR, King JY, Nelson JA (2005) Root production and tissue quality in a shortgrass steppe exposed to elevated CO<sub>2</sub>: Using a new ingrowth method. *Plant and Soil* **268** 111-122.

- Mitchell CE, Reich PB (2003) Assessing environmental changes in grasslands. *Science* **299** 1844.
- Morgan JA, LeCain DR, Mosier AR, Milchunas DG (2001) Elevated CO<sub>2</sub> enhances water relations and productivity and affects gas exchange in C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> grasses of the Colorado shortgrass steppe. *Global Change Biology* **7** 451-466.
- Morgan JA, Mosier AR, Milchunas DG, LeCain DR, Nelson JA, Parton WJ (2004a) CO<sub>2</sub> enhances productivity, alters species composition, and reduces digestibility of shortgrass steppe vegetation. *Ecological Applications* **14** 208-219.
- Morgan JA, Pataki DE, Körner C, Clark H, Del Grosso SJ, Grünzweig JM, Knapp AK, Mosier AR, Newton PCD, Niklaus PA, Nippert JB, Nowak RS, Parton WJ, Polley HW, Shaw MR (2004b) Water relations in grassland and desert ecosystems exposed to elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. *Oecologia* **140** 11-25.
- Mortensen LM, Sæbø A (1996) The effect of elevated CO<sub>2</sub> concentration on growth of *Phleum pratense* L. in different parts of the growth season. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B - Soil and Plant Science* **46** 128-134.
- Müller MJ (1982) Selected climatic data for a global set of standard stations for vegetation science. Kluwer Boston Dordrecht
- Naeem S, Tjossem SF, Byers D, Bristow C, Li SB (1999) Plant neighborhood diversity and production. *Ecoscience* **6** 355-365.
- Nagy Z, Tuba Z, Czobel S, Engloner A, Palicz G, Benko Z, Helyes L (2002) Ecophysiological responses by loess grassland vegetation to elevated air CO<sub>2</sub> concentration in a miniFACE system. *Acta Biologica Szegediensis* **46** 215-217.
- Navas ML, Guillerm JL, Fabreguettes J, Roy J (1995) The influence of elevated CO<sub>2</sub> on community structure, biomass and carbon balance of mediterranean old-field microcosms. *Global Change Biology* **1** 325-335.
- Navas ML, Garnier E, Austin MP, Gifford RM (1999) Effect of competition on the responses of grasses and legumes to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> along a nitrogen gradient: differences between isolated plants, monocultures and multi-species mixtures. *New Phytologist* **143** 323-331.
- Nelson JA, Morgan JA, LeCain DR, Mosier A, Milchunas DG, Parton BA (2004) Elevated CO<sub>2</sub> increases soil moisture and enhances plant water relations in a long-term field study in semi-arid shortgrass steppe of Colorado. *Plant and Soil* **259** 169-179.
- Newton PCD, Clark H, Bell CC, Glasgow EM, Campbell BD (1994) Effects of elevated CO<sub>2</sub> and simulated seasonal changes in temperature on the species composition and growth rates of pasture turves. *Annals of Botany* **73** 53-59.
- Newton PCD, Clark H, Bell CC, Glasgow EM, Tate KR, Ross DJ, Yeates GW, Saggart S (1995) Plant growth and soil processes in temperate grassland communities at elevated CO<sub>2</sub>. *Journal of Biogeography* **22** 235-240.
- Newton PCD, Clark H, Bell CC, Glasgow EM (1996) Interaction of soil moisture and elevated CO<sub>2</sub> on the above-ground growth rate, root length density and gas exchange of turves from temperate pasture. *Journal of Experimental Botany* **47** 771-779.
- Newton PCD, Clark H, Edwards GR (2001a) The effect of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on grazed grasslands. In: Structure and function in agrosystem design and management (eds Shiyomi M, Koizumi H), pp. 297-311. CRC PRESS INC, BOCA RATON.

- Newton PCD, Clark H, Edwards GR, Ross DJ (2001b) Experimental confirmation of ecosystem model predictions comparing transient and equilibrium plant responses to elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. *Ecology Letters* **4** 344-347.
- Nijls I, Impens I (1997) An analysis of the balance between root and shoot activity in *Lolium perenne* cv. Melvina. Effects of CO<sub>2</sub> concentration and air temperature. *The New Phytologist* **135** 81-91.
- Niklaus PA, Spinnler D, Körner C (1998) Soil moisture dynamics of calcareous grassland under elevated CO<sub>2</sub>. *Oecologia* **117** 201-208.
- Niklaus PA, Glockler E, Siegwolf R, Körner C (2001a) Carbon allocation in calcareous grassland under elevated CO<sub>2</sub>: a combined C-13 pulse-labelling/soil physical fractionation study. *Functional Ecology* **15** 43-50.
- Niklaus PA, Leadley PW, Schmid B, Körner C (2001b) A long-term field study on biodiversity x elevated CO<sub>2</sub> interactions in grassland. *Ecological Monographs* **71** 341-356.
- Niklaus PA, Körner C (2004) Synthesis of a six-year study of calcareous grassland responses to in situ CO<sub>2</sub> enrichment. *Ecological Monographs* **74** 491-511.
- Norby RJ, Luo Y (2004) Evaluating ecosystem responses to rising atmospheric CO<sub>2</sub> and global warming in a multi-factor world. *New Phytologist* **162** 281-293.
- Norton LR, Firbank LG, Blum H (1999a) Effects of free-air CO<sub>2</sub> Enrichment (FACE) on experimental grassland communities. *Functional Ecology* **13** 38-44.
- Norton LR, Firbank LG, Gray AJ, Watkinson AR (1999b) Responses to elevated temperature and CO<sub>2</sub> in the perennial grass *Agrostis curtisii* in relation to population origin. *Functional Ecology* **13** 29-37.
- Oberdorfer E (1990) Pflanzensoziologische Exkursionsflora. Ulmer, Stuttgart, 5-1050 pp.
- Obrist D, Arnone III JA (2003) Increasing CO<sub>2</sub> accelerates root growth and enhances water acquisition during early stages of development in *Larrea tridentata*. *New Phytologist* **159** 175-184.
- Odum E (1983) Grundlagen der Ökologie, 2. Auflage.- Georg Thieme Verlag Stuttgart-New York.
- Owensby CE, Coyne PI, Ham JM, Auen LM, Knapp AK (1993) Biomass production in a tallgrass prairie ecosystem exposed to ambient and elevated CO<sub>2</sub>. *Ecological Applications* **3** 644-653.
- Owensby CE, Auen LM, Coyne PI (1994) Biomass production in a nitrogen-fertilized, tallgrass prairie ecosystem exposed to ambient and elevated levels of CO<sub>2</sub>. *Plant and Soil* **165** 105-113.
- Owensby CE, Ham JM, Knapp AK, Auen LM (1999) Biomass production and species composition change in a tallgrass prairie ecosystem after long-term exposure to elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. *Global Change Biology* **5** 497-506.
- Pendall E, Mosier AR, Morgan JA (2004) Rhizodeposition stimulated by elevated CO<sub>2</sub> in a semiarid grassland. *New Phytologist* **162** 447-458.
- Picon-Cochard C, Teyssonneyre F, Besle JM, Soussana JF (2004) Effects of elevated CO<sub>2</sub> and cutting frequency on the productivity and herbage quality of a semi-natural grassland. *European Journal of Agronomy* **20** 363-377.
- Pinter PJ, Kimball BA, Wall GW, LaMorte RL, Hunsaker DJ, Adamsen FJ, Frumau KFA, Vugts HF, Hendrey GR, Lewin KF, Nagy J, Johnson HB, Wechsung F, Leavitt SW, Thompson TL, Matthias AD, Brooks TJ (2000) Free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE): blower effects on wheat canopy microclimate and plant development. *Agricultural and Forest Meteorology* **103** 319-333.

- Polley HW, Johnson HB, Derner JD (2003) Increasing CO<sub>2</sub> from subambient to superambient concentrations alters species composition and increases above-ground biomass in a C<sub>3</sub> / C<sub>4</sub> grassland. *New Phytologist* **160** 319-327.
- Poorter H (1993) Interspecific variation in the growth response of plants to an elevated ambient CO<sub>2</sub> concentration. *Vegetatio* **104/105** 77-97.
- Poorter H, Van Berkel Y, Baxter R, den Hertog J, Dijkstra P, Gifford RM, Griffin KL, Roumet C, Roy J, Wong C (1997) The effect of elevated CO<sub>2</sub> on the chemical composition and construction costs of leaves of 27 C<sub>3</sub> species. *Plant, Cell and Environment* **20** 472-482.
- Poorter H, Navas M-L (2003) Plant growth and competition at elevated CO<sub>2</sub>: on winners, losers and functional groups. *New Phytologist* **157** 175-198.
- Potvin C, Vasseur L (1997) Long-term CO<sub>2</sub> enrichment of a pasture community: Species richness, dominance, and succession. *Ecology* **78** 666-677.
- Rasse DP, Peresta G, Drake BG (2005) Seventeen years of elevated CO<sub>2</sub> exposure in a Chesapeake Bay Wetland: sustained but contrasting responses of plant growth and CO<sub>2</sub> uptake. *Global Change Biology* **11** 369-377.
- Reich PB, Knops J, Tilman D, Craine JM, Ellsworth D, Tjoelker MG, Lee TD, Wedin D, Naeem S, Bahauddin D, Hendrey G, Jose S, Wrage K, Goth J, Bengtson W (2001a) Plant diversity enhances ecosystem responses to elevated CO<sub>2</sub> and nitrogen deposition. *Nature* **410** 809-812.
- Reich PB, Tilman D, Craine J, Ellsworth D, Tjoelker MG, Knops J, Wedin D, Naeem S, Bahauddin D, Goth J, Bengtson W, Lee TD (2001b) Do species and functional groups differ in acquisition and use of C, N and water under varying atmospheric CO<sub>2</sub> and N availability regimes? A field test with 16 grassland species. *New Phytologist* **150** 435-448.
- Riedo M, Gyalistras D, Fischlin A, Fuhrer J (1999) Using an ecosystem model linked to GCM-derived local weather scenarios to analyse effects of climate change and elevated CO<sub>2</sub> on dry matter production and partitioning, and water use in temperate managed grasslands. *Global Change Biology* **5** 213-2.
- Rillig MC, Allen MF, Klironomos JN, Field CB (1998) Arbuscular mycorrhizal percent root infection and infection intensity of *Bromus hordeaceus* grown in elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. *Mycologia* **90** 199-205.
- Rillig MC, Field CB, Allen MF (1999a) Fungal root colonization responses in natural grasslands after long-term exposure to elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. *Global Change Biology* **5** 577-585.
- Rillig MC, Field CB, Allen MF (1999b) Soil biota responses to long-term atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment in two California annual grasslands. *Oecologia* **119** 572-577.
- Rillig MC, Field CB (2003) Arbuscular mycorrhizae respond to plants exposed to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> as a function of soil depth. *Plant and Soil* **254** 383-391.
- Rodwell JS, Pigott CD, Ratcliffe DA, Malloch AJC, Birks HJB, Proctor MCF, Shimwell DW, Huntley JP, Radford E, Wigginton MJ, Wilkins P (1992) British Plant Communities. Cambridge University Press, Cambridge, 1-525 pp.
- Rogers HH, Runion GB, Krupa SV (1994) Plant responses to atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment with emphasis on roots and the rhizosphere. *Environmental Pollution* **83** 155-189.
- Rogers HH, Runion GB, Krupa SV, Prior SA (1997) Plant responses to atmospheric carbon dioxide enrichment: Implications in root - soil - microbe interactions. In: Advances in carbon dioxide effect research (eds Kirkham MB, Olszyk DM, Whiteman CE), pp. 1-34. ASA Special Publication, Madison.

- Roscher C, Temperton VM, Scherer-Lorenzen M, Schmitz M, Schumacher J, Schmid B, Buchmann N, Weisser WW, Schulze ED (2005) Overyielding in experimental grassland communities - irrespective of species pool or spatial scale. *Ecology Letters* **8** 419-429.
- Ross DJ, Newton PCD, Tate KR (2004) Elevated [CO<sub>2</sub>] effects on herbage production and soil carbon and nitrogen pools and mineralization in a species-rich, grazed pasture on a seasonally dry sand. *Plant and Soil* **260** 183-196.
- Rötzel C, Leadley PW, Körner C (1997) Non-destructive assessment of the effects of elevated CO<sub>2</sub> on plant community in a calcareous grassland. *Acta Oecologia* **18** 231-239.
- Rouhier H, Read DJ (1998) The role of mycorrhiza in determining the response of *Plantago lanceolata* to CO<sub>2</sub> enrichment. *The New Phytologist* **139** 367-373.
- Roumet C, Laurent G, Canivenc G, Roy J (2002) Genotypic variation in the response of two perennial grass species to elevated carbon dioxide. *Oecologia* **133** 342-348.
- Ryser P, Lambers H (1995) Root and leaf attributes accounting for the performance of fast- and slow-growing grasses at different nutrient supply. *Plant and Soil* **170** 251-265.
- Ryser P (1998) Intra- and interspecific variation in root length, root turnover and the underlying parameters. In: Inherent variation in plant growth. Physiological mechanisms and ecological consequences (eds Lambers H, Poorter H, VanVuuren MMI), pp. 441-465. Leiden.
- Sæbø A, Mortensen LM (1996) The influence of elevated CO<sub>2</sub> concentration on growth of seven grasses and one clover species in a cool maritime climate. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B - Soil and Plant Science* **46** 49-54.
- Sanders IR, Streitwolf-Engel R, Van der Heijden MGA, Boller T, Wiemken A (1998) Increased allocation to external hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi under CO<sub>2</sub> enrichment. *Oecologia* **117** 496-503.
- Schäppi B, Körner C (1996) Growth responses of an alpine grassland to elevated CO<sub>2</sub>. *Oecologia* **105** 43-52.
- Schenk U, Manderscheid R, Hugen J, Weigel HJ (1995) Effects of CO<sub>2</sub> enrichment and intraspecific competition on biomass partitioning, nitrogen content and microbial biomass carbon in soil of perennial ryegrass and white clover. *Journal of Experimental Botany* **46** 987-993.
- Schimel DS (1995) Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology* **1** 77-91.
- Schläpfer M, Zoller H, Körner C (1998) Influences of mowing and grazing on plant species composition in calcareous grasslands. *Botanica Helvetica* **108** 57-67.
- Shaw MR, Zavaleta ES, Chiariello NR, Cleland EE, Mooney HA, Field CB (2002) Grassland responses to global environmental changes suppressed by elevated CO<sub>2</sub>. *Science* **298** 1987-1990.
- Sindhøj E, Hansson AC, Andren O, Katterer T, Marissink M, Pettersson R (2000) Root dynamics in a semi-natural grassland in relation to atmospheric carbon dioxide enrichment, soil water and shoot biomass. *Plant and Soil* **223** 253-263.
- Sindhøj E, Andren O, Katterer T, Marissink M, Pettersson R (2004) Root biomass dynamics in a semi-natural grassland exposed to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> for five years. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science* **54** 50-59.
- Smith RS, Shiel RS, Millward D, Corkhill P (2000) The interactive effects of management on the productivity and plant community structure of an upland meadow: an 8-year field trial. *Journal of Applied Ecology* **37** 1029-1043.

- Sonnemann I, Wolters V (2005) The microfood web of grassland soils responds to a moderate increase in atmospheric CO<sub>2</sub>. *Global Change Biology* **11** 1148-1155.
- Soussana JF, Casella E, Loiseau P (1996) Long-term effects of CO<sub>2</sub> enrichment and temperature increase on a temperate grass sward. II. Plant nitrogen budgets and root fraction. *Plant and Soil* **182** 101-114.
- Staddon PL, Graves JD, Fitter AH (1999) Effect of enhanced atmospheric CO<sub>2</sub> on mycorrhizal colonization and phosphorus inflow in 10 herbaceous species of contrasting growth strategies. *Functional Ecology* **13** 190-199.
- Staddon PL, Jakobsen I, Blum H (2004) Nitrogen input mediates the effect of free-air CO<sub>2</sub> enrichment on mycorrhizal fungal abundance. *Global Change Biology* **10** 1678-1688.
- Stewart J, Potvin C (1996) Effects of elevated CO<sub>2</sub> on an artificial grassland community: competition, invasion and neighbourhood growth. *Functional Ecology* **10** 157-166.
- Stirling CM, Williams TG, Jones ML, Ashenden TW (1997) Plant canopy development and turnover in a range of British native species grown at elevated CO<sub>2</sub> and temperature. *Abstracta Botanica* **21** 265-274.
- Stock WD, Ludwig F, Morrow C, Bell TL, Midgley GF, Wand SJE, Allsopp N (2005) Long-term effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on species composition and productivity of a southern African C4 dominated grassland in the vicinity of a CO<sub>2</sub> exhalation. *Plant Ecology* **178** 211-224.
- Stöcklin J, Leadley PW, Körner C (1997) Community and species level responses to elevated CO<sub>2</sub> in designed calcareous grassland communities. *Acta Oecologia - Oecologia Plantarum* **18** 241-248.
- Stöcklin J, Körner C (1999) Interactive effects of elevated CO<sub>2</sub>, P availability and legume presence on calcareous grassland: results of a glasshouse experiment. *Functional Ecology* **13** 200-209.
- Streitfert A (2005) Einfluss steigender Temperaturen und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf Pflanzenökologie und -anatomie, Diplomarbeit JLU Giessen
- Suter D, Nösberger J, Lüscher A (2001) Response of perennial ryegrass to free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) is related to the dynamics of sward structure during regrowth. *Crop Science* **41** 810-817.
- Suter D, Frehner M, Fischer BU, Nösberger J, Lüscher A (2002) Elevated CO<sub>2</sub> increases carbon allocation to the roots of *Lolium perenne* under free-air CO<sub>2</sub> enrichment but not in a controlled environment. *New Phytologist* **154** 65-75.
- ter Braak CJF, Šmilauer P (2002) CANOCO Reference Manual and User's Guide to CANOCO for WINDOWS: Software for Canonical Community Ordination (version 4,5). Microcomputer Power, Ithaca, NY, USA.
- Teyssonneyre F, Picon-Cochard C, Falcimagne R, Soussana J-F (2002a) Effects of elevated CO<sub>2</sub> and cutting frequency on plant community structure in a temperate grassland. *Global Change Biology* **8** 1034-1046.
- Teyssonneyre F, Picon-Cochard C, Soussana JF (2002b) How can we predict the effects of elevated CO<sub>2</sub> on the balance between perennial C3 species competing for light? *New Phytologist* **154** 53-64.
- Thomas SC, Jasienski M, Bazzaz FA (1999) Early vs. asymptotic growth responses of herbaceous plants to elevated CO<sub>2</sub>. *Ecology* **80** 1552-1567.
- Tuba Z, Jones MB, Szente K, Nagy Z, Garvey L, Baxter R (1998) Some ecophysiological and production responses of grasslands to long-term elevated CO<sub>2</sub> under continental and Atlantic climates. *Annals of the New York Academy of Sciences* **851** 241-250.

- van der Krift TAJ, Berendse F (2002) Root life spans of four grass species from habitats differing in nutrient availability. *Functional Ecology* **16** 198-203.
- van Kessel C, Horwath WR, Hartwig U, Harris D, Lüscher A (2000) Net soil carbon input under ambient and elevated CO<sub>2</sub> concentrations: isotopic evidence after 4 years. *Global Change Biology* **6** 435-4.
- Verdonschot PFM, ter Braak CJF (1994) An experimental manipulation of oligochaete communities in mesocosms treated with chlorpyrifos or nutrient additions: multivariate analyses with Monte Carlo permutation tests. *Hydrobiologia* **278** 251-266.
- Volk M, Niklaus PA, Körner C (2000) Soil moisture effects determine CO<sub>2</sub> responses of grassland species. *Oecologia* **125** 380-388.
- Volk M, Körner C (2001) Genotype x elevated CO<sub>2</sub> interaction and allocation in calcareous grassland species. *New Phytologist* **151** 637-645.
- Warwick KR, Taylor G, Blum H (1998) Biomass and compositional changes occur in chalk grassland turves exposed to elevated CO<sub>2</sub> for two seasons in FACE. *Global Change Biology* **4** 375-385.
- Wechsung G, Wechsung F, Wall GW, Adamsen FJ, Kimball BA, Garcia PJ (1995) Biomass and growth rate of a spring wheat root system grown in free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) and ample soil moisture. *J of Biogeography* **22** 623-634.
- West JB, Hillerislambers J, Lee TD, Hobbie SE, Reich PB (2005) Legume species identity and soil nitrogen supply determine symbiotic nitrogen-fixation responses to elevated atmospheric [CO<sub>2</sub>]. *New Phytologist* **167** 523-530.
- Wilsey BJ (2001) Effects of elevated CO<sub>2</sub> on the response of *Phleum pratense* and *Poa pratensis* to above-ground defoliation and root-feeding nematodes. *International Journal of Plant Sciences* **162** 1275-1282.
- Winkler JB, Herbst M (2004) Do plants of a semi-natural grassland community benefit from long-term CO<sub>2</sub> enrichment? *Basic and Applied Ecology* **5** 131-143.
- Wolfenden J, Diggle PJ (1995) Canopy gas exchange and growth of upland pasture swards in elevated CO<sub>2</sub>. *The New Phytologist* **130** 369-380.
- Wulff RD, Alexander HM (1985) Intraspecific variation in the response to CO<sub>2</sub> enrichment in seeds and seedlings of *Plantago lanceolata* L. *Oecologia* **66** 458-460.
- Yeates GW, Newton PCD, Ross DJ (2003) Significant changes in soil microfauna in grazed pasture under elevated carbon dioxide. *Biology and Fertility of Soils* **38** 319-326.
- Yoder CK, Vivin P, Defalco LA, Seemann JR, Nowak RS (2000) Root growth and function of three Mojave Desert grasses in response to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration. *New Phytologist* **145** 245-256.
- Zaller JG, Arnone JA (1999) Interactions between plant species and earthworm casts in a calcareous grassland under elevated CO<sub>2</sub>. *Ecology* **80** 873-881.
- Zavaleta ES, Shaw MR, Chiariello NR, Mooney HA, Field CB (2003a) Additive effects of simulated climate changes, elevated CO<sub>2</sub> and nitrogen deposition on grassland diversity. *Proc.Natl.Acad.Sci.* **100** 7650-7.
- Zavaleta ES, Shaw MR, Chiariello NR, Thomas BD, Aamlid TS, Cleland EE, Field CB, Mooney HA (2003b) Grassland responses to three years of elevated temperature, CO<sub>2</sub>, precipitation, and N deposition. *Ecological Monographs* **73** 585-604.



## 8 Anhang

### 8.1 Versuchsparmeter

Tabelle 31: Versuchsparmeter zu den in der Einleitung vorgestellten Untersuchungen.

Quelle	CO <sub>2</sub> (ppm)	Dauer der Untersuchung	Applikationssysteme, Nutzung bzw. Vegetation	Untersuchte Parameter
Allard et al. 2005	475	4 Jahre	Bulls FACE, Weide (Meshbags 2 Monate)	O, U
Arnone et al. 2000	600	2 Jahre	SACC Schweiz, ehemalige Weide	U, Wt
Arp et al. 1998	560	4-8 Monate	6 Arten, Ansaat, Töpfe, Gewächshaus	U
Barnard et al. 2005	+300	2 Monate	<i>Holcus lanatus</i> , Ansaat, Töpfe, Gewächshaus	O,U, RLD
Byrne & Jones 2002	600	1 Jahr	MEGARICH MiniFACE, Monolithe, Irland	O, D, S, GKL
Carter & Peterson 1983	600	112 Tage	2 Arten, Ansaat, Töpfe, Gewächshaus	O, U
Casella et al. 1996	700	2 Jahre	<i>Lolium perenne</i> , Töpfe, Tunnel	O
Derner et al. 2001	203, 368	8 Wochen	2 Arten, Ansaat, Töpfe, Tunnel Texas	O, U, RLD
Diaz et al. 1993	700	3 Monate	Grasland - Mikrokosmen, Gewächshaus	O
Diemer & Körner 1998	680	4 Jahre	OTC Schweiz, Alpine ehemalige Weide	O
Drake 1992	+340	4 Jahre	OTC Marschland (Meshbags 8 Monate)	O, U
Drake et al. 1996	+340	1.-7. Jahr	OTC Marschland (Meshbags 8 Monate)	O
Dukes et al. 2005	680	5 Jahre	Jasper Ridge FACE, Wiese	O, U
Edwards et al. 2001	475	3 Jahre	Bulls FACE, Weide	O, A, S
Edwards et al. 2003	574	246 Tage	<i>Plantago</i> -Pflanzung, natürliche CO <sub>2</sub> -Quelle	O, U
Farnsworth & Bazzaz 1995	700	6 Monate	9 Arten, Ansaat, Töpfe, Gewächshaus	O, U
Ferris & Taylor 1993	590	100 Tage	4 Arten, Ansaat, Töpfe, Gewächshaus	O, U, RLD, Wd SRL
Fitter et al. 1997	+ 250	2 Jahre	Solardome UK, Grasland-Monolithe Lancaster	O, U, Wt
Grünzweig & Körner 2001	440, 600	4 Monate	32 Arten, Ansaat, Töpfe, Gewächshaus	O, U
Hakala & Mela 1996	700	2 Jahre	<i>Festuca prat.</i> -Ansaat, Freiland, OTC Jokioinen	O, U
Hanley et al. 2004	600	546 Tage	14 Arten, Ansaat, Gewächshaus	O
Harmens et al. 2004	600	3 Jahre	MEGARICH Solardome Monolithe Bangor UK	ADE, S, GKL
Hartwig et al. 2002	600	4 Jahre	2 Arten Ansaat, Töpfe, Swiss FACE	O, U
Hebeisen et al. 1997a	600	2 Jahre	2 Arten Ansaat, Töpfe, Swiss FACE	O, U
Hebeisen et al. 1997b	600	3 Jahre	2 Arten Ansaat, Töpfe, Swiss FACE	O, U
Higgins et al. 2002	+360	3 Jahre	OTC Jasper Ridge, Wiese (Meshbags 1-4 Mon.)	U, RLD
Hui et al. 2002	700	80 Tage	<i>Plantago lanceolata</i> , Töpfe, Gewächshaus	O, U
Jastrow et al. 2000	720	8 Jahre	OTC Kansas, Langgras-Prärie	U
Johnson et al. 2003	560	20 Wochen	14 Arten, Ansaat, Töpfe, Gewächshaus	O
Jones & Jongen 1996	700	3 Jahre	4 Arten, Ansaat, Töpfe, OTC	O
Jongen & Jones 1997	700	3 Monate	4 Arten, Ansaat, Töpfe, OTC Irland	O
Jongen & Jones 1998	700	8 Monate	4 Arten, Ansaat, Töpfe, OTC Irland	O
Jongen et al. 1995	600	2 Monate	2 Arten, Ansaat Swiss FACE (Meshbags)	U, RLD, SRL
Jongen et al. 1996	700	58 Tage	<i>Trifolium repens</i> , Ansaat, Töpfe, Gewächshaus	U, SRL
Kammann et al. 2005	+20%	5 Jahre	Giessen FACE, Wiese	O, GKL
Körner et al. 1996	680	2 Jahre	OTC Schweiz, eh. Weide (Meshbags 12 Monate)	O, U
Körner et al. 1997	680	4 Jahre	OTC Schweiz, Alpine ehemalige Weide	O, U
Leadley et al. 1999	600	4 Jahre	SACC Schweiz, Alpine ehemalige Weide	O,U,AE,S,GKL,SRL
Leadley & Stöcklin 1996	500, 660	126 Tage	6 Arten, Ansaat, Töpfe, Gewächshaus	O, U
LeCain et al. 2006	720	5 Jahre	OTC Colorado, Kurzgras-Steppe	U, RLD
Lilley et al. 2001	690	1 Jahr	2 Arten, Ansaat, Tunnel Australien	O, U
Lüscher et al. 1998	600	3 Jahre	12 Arten Pflanzung in Lolium-Rasen Swiss FACE	O, S, GKL
Marchi et al. 2004	580	2 Jahre	MEGARICH MiniFACE, Monolithe, Italien	O, U, RLD, Wt
Marissink et al. 2002b	700	4 Jahre	OTC Uppsala, Ehemalige Weide	O
Marissink & Hansson 2002	700	6 Jahre	OTC Uppsala, Ehemalige Weide	D, GKL
Matamala & Drake 1999	+340	8 Jahre	OTC Chesapeake Bay, Marschland	O, U
Milchunas et al. 2005	720	5 Jahre	OTC Colorado (Meshbags 12 Monate, ab 2. Jahr)	U
Morgan et al. 2001	720	2 Jahre	OTC Colorado, Kurzgras-Steppe	O
Morgan et al. 2004a	720	5 Jahre	OTC Colorado, Kurzgras-Steppe	O, S
Naeem et al. 1999	450	99 Tage	6 Arten, Ansaat, Töpfe, Gewächshaus	O, U
Nagy et al. 2002	600	k.A.	MEGARICH MiniFACE, Monolithe, Ungarn	O
Navas et al. 1995	700	6 Monate	Monolithe aus Obstbaumwiese, Gewächshaus	O, U, A
Newton et al. 1994	700	217 Tage	Monolithe aus Weide, Gewächshaus	O, U
Newton et al. 1995	525, 700	261 Tage	Monolithe aus Weide, Gewächshaus	O, U, GKL
Newton et al. 1996	700	1 Jahr	Monolithe aus Weide, Gewächshaus	RLD

Nijs & Impens 1997	700	26-66 Tage	<i>Lolium perenne</i> , Töpfe, Gewächshaus	U
Niklaus et al. 2001a	600	6 Monate	Grasland-Monolithe nach 3 Jahren FACE 6 Monate im Gewächshaus (Meshbags 4 Wochen)	O,U, GKL
Niklaus et al. 2001b	600	5 Jahre	31 Arten, Ansaat, SACC Schweiz	O, U, S, AE, SRL
Niklaus et al. 2001b	600	3-4 Monate	31 Arten, Ansaat, SACC Schweiz (Meshbags)	U
Niklaus & Körner 2004	600	6 Jahre	SACC Schweiz, Alpines Grasland	O,U,ADE,S,GKL
Norton et al. 1999a	600	1 Jahr	6 Arten, Ansaat Swiss FACE	O, S
Norton et al. 1999b	+340	2 Jahre	<i>Agrostis curtisii</i> , Solardome Bangor UK	O
Obrist & Arnone 2003	600	6 Monate	Setzlinge <i>Larrea tridentata</i> Gewächsh., Rhizotron	RLD
Owensby et al. 1993	720	2. Jahr	OTC Kansas, Langgras-Prärie (Meshb 5 – 8 Mon)	U, GKL
Owensby et al. 1994	720	2 Jahre	OTC Kansas, Langgras-Prärie (Meshb 5 – 8 Mon)	U
Owensby et al. 1999	720	8 Jahre	OTC Kansas, Langgras-Prärie (Meshb. 8 Monate)	O, U, S, GKL
Pendall et al. 2004	720	5 Jahre	OTC Colorado, Kurzgras-Steppe	U, Wt
Picon-Cochard et al. 2004	600	3 Jahre	MEGARICH MiniFACE, Monolithe, Frankreich	O, GKL
Polley et al. 2003	200-560	4 Jahre	Tunnel Texas, C <sub>3</sub> /C <sub>4</sub> -Grasland	O, GKL
Potvin & Vasseur 1997	700	3 Jahre	OTC Uppsala, Ehemalige Weide	AE, S
Rasse et al. 2005	+340	17 Jahre	OTC Marschland	O
Reich et al. 2001a	560	2 Jahre	16 Arten, Ansaat, BioCON FACE	O, U, S
Reich et al. 2001b	560	2 Jahre	16 Arten, Ansaat, BioCON FACE	GKL
Rillig et al. 1998	+350	4 Monate	<i>Bromus hordeaceus</i> , Töpfe, OTC Jasper Ridge	U, RLD
Rillig et al. 1999b	680	6 Jahre	OTC Jasper Ridge, Wiese	U, RLD, SRL
Rillig & Field 2003	680	4 Jahre	<i>Bromus</i> & <i>Lotus</i> , Töpfe, OTC Jasper Ridge	U, RLD, Wt
Ross et al. 2004	475	5 Jahre	Bulls FACE, Weide	O, U
Rötzel et al. 1997	600	9 Wochen	61 Arten, Ansaat, SACC Schweiz	O
Rouhier & Read 1998	540	104 Tage	<i>Plantago lanceolata</i> , Töpfe, Gewächshaus	RLD
Roumet et al. 2002	700	2 Jahre	2 Arten Pflanzung in Monolithe, Gewächshaus	O
Sanders et al. 1998	600	18 Wochen	<i>Prunella vulgaris</i> , Töpfe, Gewächshaus	U
Schäppi & Körner 1996	680	3 Jahre	OTC Schweiz, Alpine ehemalige Weide	O, U
Schäppi & Körner 1996	680	12 Monate	OTC Schweiz, Alpine ehem. Weide (Meshbags)	U, S
Shaw et al. 2002	680	2 Jahre	Jasper Ridge FACE, Wiese	O
Schenk et al. 1995	690	43 Tage	2 Arten, Töpfe, Gewächshaus	O, U
Sindhøj et al. 2000	700	3 Jahre	OTC Uppsala, Ehemalige Weide	Wt
Sindhøj et al. 2004	700	5 Jahre	OTC Uppsala, Ehemalige Weide (Meshb. 4 Mon.)	O, U, SRL, Wd
Smith et al. 2000	550	2 Jahre	Mojave Desert FACE	Tot Bio/Feuchte
Soussana et al. 1996	700	2 Jahre	<i>Lolium perenne</i> , Töpfe, Tunnel	U
Staddon et al. 1999	610	4 Monate	10 Arten, Töpfe, Gewächshaus	U, RLD, SRL
Staddon et al. 2004	600	10 Jahre	<i>Lolium</i> & <i>Trifolium</i> Töpfe, Swiss FACE	U, SRL
Stirling et al. 1997	+340	140 Tage	8 Arten, Töpfe, Solardome Bangor UK	O
Stöcklin et al. 1997	650	2 x 4 Mon.	6-14 Arten, Töpfe, Gewächshaus	O
Stöcklin & Körner 1999	600	2 Jahre	14 Arten, Töpfe, Gewächshaus	O, U
Suter et al. 2002	600	2-8 Wochen	<i>Lolium perenne</i> , Töpfe, Swiss FACE	U, Wt
Teyssonneyre et al. 2002a	600	3 Jahre	MEGARICH MiniFACE, Monolithe, Frankreich	O, S, AD, GKL
Teyssonneyre et al. 2002b	+ 350	1 Jahr	3 Arten, Töpfe, Tunnel	O
Thomas et al. 1999	700	172 Tage	8 Arten, Töpfe, Gewächshaus	U
Tuba et al. 1998	700	4 Jahre	OTC auf Grasland, Dublin	O
Tuba et al. 1998	700	335 Tage	Grasland-Monolithe, OTC, Gödöllö	O, GKL
van Kessel et al. 2000	600	4 Jahre	2 Arten, Töpfe, Gewächshaus	O, U
Volk et al. 2000	600	3 Monate	2 Arten, Töpfe, Gewächshaus	U
Volk & Körner 2001	600	60 Tage	2 Arten, Töpfe, Gewächshaus	SRL
Warwick et al. 1998	600	2 Jahre	7 Arten, Ansaat Swiss FACE (Meshbags 62 Tage)	U, O, S, RLD
Wechsung et al. 1995	550	143 Tage	<i>Triticum</i> FACE Maricopa	Wt
Wilsey, 2001	650	56 Tage	2 Arten, Töpfe, Gewächshaus	O, U
Winkler & Herbst 2004	660	4 Jahre	MEGARICH MiniFACE, Monolithe, Deutschl.	O, GKL
Wolfenden & Diggle 1995	+ 250	2 Jahre	Solardome UK, Grasland-Monolithe Lancaster	O
Yoder et al. 2000	1000	< 1 Jahr	3 Arten, Töpfe, Gewächshaus	U
Zavaleta et al. 2003a	680	3 Jahre	Jasper Ridge FACE, Wiese	D, S
Zavaleta et al. 2003b	680	3 Jahre	Jasper Ridge FACE, Wiese	O, AD, GKL

Auflistung der Versuche nach Autoren mit den in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Parametern A=Artenzahl, D=Diversität, E=Evenness, GKL=Gräser, Kräuter, Leguminosen, O=oberirdische, U=unterirdische Biomasse, S=Arreaktionen, RLD=Bestands-, SRL=spezifische Wurzellänge, Wd=Wurzeldicke und Wt=Wurzeltiefe. Zur Erklärung der Applikationssysteme: siehe Text und Abbildungen im Anschluss an die Tabelle.

## 8.2 Applikationssysteme

### 1. Gewächshäuser



Bild 5: Gewächshaus Giessen

### 2. Solardomes

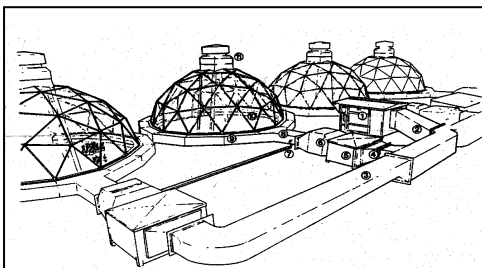


Bild 6: Solardomes in Lancaster, UK

### 3. OTC



Bild 7: OTC-Anlage Giessen

### 4. FACE



Bild 8: Giessen FACE, Deutschland

Die meisten Einzelpflanzen-Experimente und Experimente mit artenarmen Ansaaten wurden in Töpfen in *Gewächshäusern* durchgeführt, in denen untersuchte Parameter kontrolliert werden können. Die Wachstumsbedingungen unterscheiden sich allerdings stark von denen im Freiland, z.B. hinsichtlich der Windgeschwindigkeit und im Wurzelraum (Stewart & Potvin 1996).

*Solardomes* sind halbrunde Glashäuser, die auf die Vegetation installiert werden können. In Solardomes wurden Monolithe von (Wolfenden & Diggle 1995) und Fitter et al. (1987) in Lancaster (UK) und von Norton et al. (1999b) und Harmens et al. (2004) in Bangor (UK) untersucht.

*Open Top Kammern* ermöglichen die Untersuchung der Effekte einzelner Faktoren (wie z.B. CO<sub>2</sub>) auf bestehende Ökosysteme. Auch hier entstehen Unterschiede in Temperatur, Feuchte, Licht, sowie Schädlingsbefall, Bestäubern, usw. zu Flächen ohne Kammern. OTCs eignen sich auch für Topfexperimente.

In *Free Air Carbon dioxide Enrichment*-Anlagen werden Kammereffekte der OTC vermieden. Natürliche Vegetation kann am Standort untersucht werden. Es entstehen jedoch wesentlich höhere Kosten. Auf größeren Flächen kann die natürliche Heterogenität einbezogen werden (Mooney et al. 1994).

FACE-Ringe mit Ansaaten: Swiss FACE, BioCON.

## 5. SACC



Bild 9: SACC Nenzlingen, Schweiz

Die *Screen Aided CO<sub>2</sub> Control* - Anlage in der Schweiz stellt einen Kompromiss zwischen OTC und FACE dar: Durch das fehlende Dach und eine 7cm hohe Öffnung ringsherum über dem Boden ist ein guter Luft-Austausch mit der Umgebung gewährleistet. Leadley et al. (1999) und Niklaus et al. (2004) untersuchten die natürliche Vegetation und Niklaus et al. (2001b) eine Ansaat mit dem SACC-System.

## 6. MiniFACE



Bild 10: MiniFACE Oak Park, Irland

Das *MiniFACE* mit 1-2m Durchmesser ist eine kostengünstigste Variante von Freiland-CO<sub>2</sub>-Experimenten und ermöglicht eine hohe Anzahl von Parallelen. Sie wurden z.B. für den 6-teiligen MEGARICH- (**M**anaging **E**uropean **G**rasslands **A**s a **S**ustainable **R**esource **I**n a **C**hanging **C**limate) Transekt auf Grasländern durch Europa und für die Jasper Ridge-Versuche in Kalifornien (Shaw et al. 2002, Zavaleta et al. 2003b) verwendet.

## 7. Tunnels



Bild 11: Tunnels in Texas

In Tunnel-Experimenten sind Effekte von erhöhten und verringerten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen untersucht worden (Johnson et al. 2000). In den Tunnels entsteht durch Injektion von erhöhtem CO<sub>2</sub> am unteren Ende des Tunnels und die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Konzentration durch die Pflanzen bei der Photosynthese über die Länge des Tunnels ein CO<sub>2</sub>-Gradient. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration wird über Zugabe von Außenluft und den Windstrom reguliert. Für Experimente mit erniedrigten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen wird injizierte Außenluft durch die Pflanzen abgereichert. Tunnels können auf Grasland installiert (Polley et al. 2003) oder mit Töpfen bestückt werden (Soussana et al. 1996).

## 8.3 Pflanzennamen

**Tabelle 32: Liste der verwendeten Pflanzenarten**

Alphabetische Auflistung der wissenschaftlichen Pflanzennamen mit Synonymen und Autoren. Die Angaben zu den Autoren befinden sich in der Tabelle im Anschluss.

Wissenschaftlicher Artname	Synonyme
<i>Achillea millefolium</i> L.	
<i>Agropyron repens</i> (L.) P.B.	<i>Elymus repens</i> L.
<i>Agrostis alba</i> var. <i>stolonifera</i> (L.) Sm	<i>Agrostis stolonifera</i> L.
<i>Agrostis capillaris</i> L.	<i>Agrostis tenuis</i> Sibth, <i>Agrostis vulgaris</i> Wittrh
<i>Agrostis curtisii</i> Kerguelen	
<i>Agrostis stolonifera</i> L.	<i>Agrostis alba</i> var. <i>stolonifera</i> (L.) Sm
<i>Agrostis tenuis</i> Sibth	<i>Agrostis capillaris</i> L., <i>Agrostis vulgaris</i> Wittrh
<i>Agrostis vulgaris</i> Wittrh	<i>Agrostis capillaris</i> L., <i>Agrostis tenuis</i> Sibth,
<i>Ajuga reptans</i> L.	
<i>Alopecurus pratensis</i> L.	
<i>Ambrosia psilostachya</i> DC.	
<i>Anagallis arvensis</i> L.	<i>Anagallis phoenicia</i> Scop
<i>Anagallis phoenicia</i> Scop.	<i>Anagallis arvensis</i> L.
<i>Amorpha canescens</i> Pursh	<i>Amorpha canescens</i> Nutt
<i>Andropogon gerardii</i> Vitman	<i>Andropogon gerardii</i> subsp. <i>chrysocomus</i> Wipff
<i>Anemone cylindrica</i> A.Gray	
<i>Anthoxanthum odoratum</i> L.	
<i>Anthyllis vulneraria</i> L.	
<i>Arrhenatherum elatius</i> (L.) J.Presl & C.Presl	
<i>Artemisia ludoviciana</i> Nutt.	
<i>Asclepias tuberosa</i> L.	
<i>Avena barbata</i> Link	
<i>Avena fatua</i> L.	
<i>Avena pubescens</i> Huds.	<i>Avena pubescens</i> Huds.
<i>Bellis perennis</i> L.	
<i>Betonica officinalis</i> L.	<i>Stachys officinalis</i> (L.) Trevis
<i>Bouteloua gracilis</i> Vasey	
<i>Bouteloua curtipendula</i> Torr.	
<i>Brachypodium pinnatum</i> (L.) P.B.	
<i>Briza media</i> L.	
<i>Briza minor</i> L.	
<i>Bromopsis erecta</i> Fourr.	
<i>Bromus dertonensis</i> All.	<i>Festuca dertonensis</i> Aschers. et Graebn., <i>Vulpia bromoides</i> (L.) S.F.Gray, <i>Festuca sciuroides</i> Roth
<i>Bromus diandrus</i> Roth	
<i>Bromus erectus</i> Huds.	
<i>Bromus hordeaceus</i> L.	<i>Bromus hordeaceus</i> ssp. <i>hordeaceus</i> L. / <i>Bromus mollis</i> L.
<i>Bromus inermis</i> Leyss.	
<i>Bromus mollis</i> L.	<i>Bromus hordeaceus</i> ssp. <i>holosteoides</i> L.
<i>Campanula glomerata</i> L.	
<i>Campanula rotundifolia</i> L.	
<i>Capsella bursa-pastoris</i> (L.) Med.	
<i>Cardamine pratensis</i> agg.	In dieser Arbeit: <i>Cardamine pratensis</i> ssp. <i>pratensis</i> L.
<i>Carex caryophyllea</i> Latour	<i>Carex verna</i> Chaix
<i>Carex curvula</i> All.	
<i>Carex flacca</i> Schreb.	<i>Carex glauca</i> Scop
<i>Carex glauca</i> Scop	<i>Carex flacca</i> Schreb.
<i>Carex verna</i> Chaix	<i>Carex caryophyllea</i> Latour
<i>Centaurea nigra</i> L.	
<i>Centaurea jacea</i> L.	
<i>Centaurea solstitialis</i> L.	
<i>Cerastium caespitosum</i> Gilib.	<i>Cerastium holosteoides</i> Fries., <i>C. triviale</i> Link, <i>C. vulgare</i> L.
<i>Cerastium fontanum</i> Baumg.	
<i>Cerastium glomeratum</i> Thuill.	<i>Cerastium viscosum</i> L.
<i>Cerastium holosteoides</i> Fries	<i>Cerastium caespitosum</i> Gilib., <i>C. triviale</i> Link, <i>C. vulgatum</i> L.
<i>Cerastium triviale</i> Link	<i>Cerastium holosteoides</i> Fries., <i>C. caespitosum</i> Gilib., <i>C. vulgatum</i> L.
<i>Cerastium viscosum</i> L.	<i>Cerastium glomeratum</i> Thuill.
<i>Cerastium vulgatum</i> L.	<i>Cerastium holosteoides</i> Fries., <i>C. caespitosum</i> Gilib., <i>C. triviale</i> Link
<i>Chamaespartium sagittale</i> (L.) Gibbs	<i>Genista sagittalis</i> L., <i>Genistella sagittale</i> Gams
<i>Chenopodium pumilio</i> R.Br.	
<i>Chrysanthemum alpinum</i> L.	<i>Leucanthemopsis alpina</i> L. Heyw.
<i>Chrysanthemum leucanthemum</i> L.	<i>Leucanthemum vulgare</i> Lam.
<i>Cirsium acule</i> (L.) Scop.	

<i>Cirsium arvense</i> (L.) Scop.	
<i>Colchicum autumnale</i> L.	
<i>Convolvulus arvensis</i> L.	
<i>Conyza albida</i> Spreng.	
<i>Conyza canadensis</i> (L.) Cronquist	<i>Erigeron canadensis</i> L.
<i>Coronopus didymus</i> (L.) Sm.	<i>Senebiera didyma</i> (L.) Pers.
<i>Crepis biennis</i> L.	
<i>Crepis capillaris</i> (L.) Wallr.	
<i>Crepis vesicaria</i> L. ssp. <i>taraxacifolia</i> (Thuill.) Thell. ex Schinz et Keller	<i>Crepis vesicaria</i> L. subsp. <i>haenseleri</i> (Boiss. ex DC.) P.D. Sell, <i>Crepis taraxacifolia</i> Thuill., <i>Barkhausia taraxacifolia</i> (Thuill.) DC.
<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers.	
<i>Cynosurus cristatus</i> L.	
<i>Dactylis glomerata</i> L.	
<i>Danthonia californica</i> Bol.	
<i>Danthonia decumbens</i> (L.) D.C.	<i>Sieglingia decumbens</i> (L.) Bernh.
<i>Deschampsia cespitosa</i> (L.) P.B.	
<i>Elymus glaucus</i> Buckley	
<i>Elymus repens</i> L.	<i>Agropyron repens</i> (L.) P.B.
<i>Epilobium brachycarpum</i> C. Presl	
<i>Epilobium montanum</i> L.	
<i>Erigeron canadensis</i> (L.) Cronq.	<i>Conyza canadensis</i> L.
<i>Erodium botrys</i> C.A. Mey.	
<i>Festuca arundinacea</i> Schreb.	
<i>Festuca dertonensis</i> Aschers. & Graebn.	<i>Vulpia bromoides</i> (L.) S.F. Gray, <i>Festuca sciuroides</i> Roth
<i>Festuca ovina</i> L.	<i>Festuca vulgaris</i> (Koch) Hayek
<i>Festuca pratensis</i> Huds.	
<i>Festuca rubra</i> L.	
<i>Festuca sciuroides</i> Roth	<i>Festuca dertonensis</i> A. et Gr., <i>Vulpia bromoides</i> (L.) S.F.Gray
<i>Festuca vulgaris</i> (Koch) Hayek	<i>Festuca ovina</i> L.
<i>Filipendula ulmaria</i> (L.) Maxim.	
<i>Galium elatum</i> Thuill.	<i>Galium mollugo</i> L.
<i>Galium mollugo</i> L.	<i>Galium elatum</i> Thuill.
<i>Galium verum</i> L.	
<i>Genistella sagittale</i> Gams	<i>Genister sagittalis</i> L., <i>Chamaespartium sagittale</i> (L.) Gibbs
<i>Genister sagittalis</i> L.	<i>Genistella sagittale</i> Gams, <i>Chamaespartium sagittale</i> (L.) Gibbs
<i>Gentianella cruciata</i> Moench	<i>Gentiana cruciata</i> L.
<i>Gentianella germanica</i> (Willd.) Börner	<i>Gentiana germanica</i> Willd.
<i>Geranium dissectum</i> Jusl.	
<i>Geranium molle</i> L.	
<i>Geranium pratense</i> L.	
<i>Glechoma hederacea</i> L.	
<i>Heracleum sphondylium</i> L.	
<i>Hieracium pilosella</i> L.	
<i>Holcus lanatus</i> L.	
<i>Homogyne alpina</i> (L.) Lass.	
<i>Hordeum murinum</i> L.	
<i>Hypericum perforatum</i> L.	
<i>Hypochoeris radicata</i> L.	
<i>Knautia arvensis</i> (L.) Coult.	
<i>Koeleria cristata</i> (L.) Pers.	<i>Koeleria pyramidata</i> (Lam.) P.B.
<i>Koeleria pyramidata</i> (Lam.) P.B.	<i>Koeleria cristata</i> (L.) Pers.
<i>Larrea tridentata</i> Coult.	
<i>Lathyrus pratensis</i> L.	
<i>Leontodon autumnalis</i> L.	
<i>Leontodon helveticus</i> Merat	<i>Leontodon pyrenaicus</i> Gouan
<i>Leontodon leysseri</i> (Wallr.) Beck	<i>Leontodon saxatilis</i> Lam, <i>Leontodon nudicaulis</i> (L.) Banks
<i>Leontodon nudicaulis</i> (L.) Banks	<i>Leontodon leysseri</i> Wallr. Beck, <i>Leontodon saxatilis</i> Lam.
<i>Leontodon pyrenaicus</i> Gouan	<i>Leontodon helveticus</i> Merat
<i>Leontodon saxatilis</i> Lam	<i>Leontodon leysseri</i> Wallr. Beck, <i>Leontodon nudicaulis</i> (L.) Banks
<i>Lespedeza capitata</i> Michx.	
<i>Leucanthemopsis alpina</i> (L.) Heyw.	<i>Chrysanthemum alpinum</i> L.
<i>Leucanthemum vulgare</i> Lam.	<i>Chrysanthemum leucanthemum</i> L.
<i>Ligusticum mutellina</i> (L.) Crantz	<i>Meum mutellina</i> Gaertn.
<i>Linanthus parviflorus</i> (Benth.) Greene	
<i>Lolium multiflorum</i> Lam.	
<i>Lolium perenne</i> L.	
<i>Lotus corniculatus</i> L.	
<i>Lotus purshianus</i> Clem. & E.G. Clem.	
<i>Lotus wrangelianus</i> Fish. & Mey.	
<i>Lupinus perennis</i> L.	
<i>Luzula campestris</i> (L.) DC.	<i>Luzula vulgaris</i> Buchenau

<i>Luzula lutea</i> (All.) DC.	
<i>Luzula vulgaris</i> Buchenau	<i>Luzula campestris</i> (L.) DC.
<i>Medicago hispida</i> Gaertn.	<i>Medicago polymorpha</i> L., <i>Medicago nigra</i> Krock.
<i>Medicago lupulina</i> L.	
<i>Medicago nigra</i> Krock.	<i>Medicago hispida</i> Gaertn., <i>Medicago polymorpha</i> L.
<i>Medicago polymorpha</i> L.	<i>Medicago hispida</i> Gaertn., <i>Medicago nigra</i> Krock.
<i>Meum mutellina</i> Gaertn.	<i>Ligusticum mutellina</i> (L.) Crantz
<i>Molinia caerulea</i> (L.) Moench	<i>Molinia caerulea</i> ssp. <i>caerulea</i> Moench
<i>Nardus stricta</i> L.	
<i>Paspalum dilatatum</i> Poir.	
<i>Petalostemum villosum</i> Nutt.	<i>Petalostemon villosus</i> Nutt.
<i>Petalostemon villosus</i> Nutt.	<i>Petalostemum villosum</i> Nutt.
<i>Phleum pratense</i> L.	
<i>Phyteuma globularifolium</i> Sternb. et Hoppe	
<i>Pimpinella saxifraga</i> L.	
<i>Plantago lanceolata</i> L.	
<i>Plantago major</i> L.	
<i>Plantago media</i> L.	
<i>Poa alpina</i> L.	
<i>Poa angustifolia</i> L.	<i>Poa pratensis</i> ssp. <i>angustifolia</i> L.
<i>Poa annua</i> L.	
<i>Poa pratensis</i> L.	
<i>Poa trivialis</i> L.	
<i>Polygonum bistorta</i> L.	
<i>Portulaca oleracea</i> L.	
<i>Potentilla anserina</i> L.	
<i>Potentilla aurea</i> L.	
<i>Poterium sanguisorba</i> L.	<i>Sanguisorba minor</i> Scop.
<i>Prunella grandiflora</i> L. Scholler	
<i>Prunella vulgaris</i> L.	
<i>Psoralea tenuiflora</i> Pursh	
<i>Quercus agrifolia</i> Batt. & Trab.	
<i>Ranunculus acris</i> L.	
<i>Ranunculus bulbosus</i> L.	
<i>Ranunculus friesianus</i> Jord.	<i>Ranunculus acris</i> ssp. <i>friesianus</i> (Jord.) Rouy & Foucaud
<i>Ranunculus repens</i> L.	
<i>Rumex acetosa</i> L.	<i>Acetosa pratensis</i> Mill.
<i>Rumex acetosella</i> L.	
<i>Rumex conglomeratus</i> Murray	
<i>Rumex crispus</i> L.	
<i>Rumex obtusifolius</i> L.	
<i>Rumex pulcher</i> L.	
<i>Salvia pratensis</i> L.	
<i>Sanguisorba minor</i> Scop.	<i>Poterium sanguisorba</i> L.
<i>Sanguisorba officinalis</i> L.	
<i>Scabiosa columbaria</i> L.	
<i>Saxifraga granulata</i> L.	
<i>Schizachyrium scoparium</i> Nash	
<i>Senebiera didyma</i> (L.) Pers.	<i>Coronopus didymus</i> (L.) Sm.
<i>Senecio jacobaea</i> L.	
<i>Sieblingia decumbens</i> (L.) Bernh.	<i>Danthonia decumbens</i> (L.) DC.
<i>Silene gallica</i> L.	
<i>Sisyrinchium bellum</i> S. Watson	
<i>Solanum nigrum</i> L.	
<i>Solidago rigida</i> L.	
<i>Sonchus asper</i> (L.) Hill	
<i>Sonchus oleracea</i> L.	
<i>Sorghastrum nutans</i> (L.) Nash	
<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench	
<i>Sporobolus asper</i> (P.B.) Kunth	
<i>Stachys officinalis</i> (L.) Trevis.	<i>Betonica officinalis</i> L.
<i>Stellaria graminea</i> L.	
<i>Stipa comata</i> Trin. & Rupr.	
<i>Taraxacum officinale</i> Weber	
<i>Torilis arvensis</i> (Huds.) Link	<i>Torilis infesta</i> Koch
<i>Torilis infesta</i> Koch	<i>Torilis arvensis</i> (Huds.) Link
<i>Trifolium alpinum</i> L.	
<i>Trifolium dubium</i> Sibth.	<i>Trifolium minus</i> Scop
<i>Trifolium fragiferum</i> L.	
<i>Trifolium glomeratum</i> L.	
<i>Trifolium hirtum</i> All.	

<i>Trifolium medium</i> L.	
<i>Trifolium minus</i> Scop.	<i>Trifolium dubium</i> Sibth.
<i>Trifolium montanum</i> L.	
<i>Trifolium pratense</i> L.	
<i>Trifolium repens</i> L.	
<i>Trifolium striatum</i> L.	
<i>Trifolium subterraneum</i> L.	
<i>Trisetum flavescens</i> (L.) P.B.	
<i>Veronica arvensis</i> L.	
<i>Veronica baldwinii</i> Torr.	
<i>Veronica chamaedrys</i> L.	
<i>Veronica persica</i> Poir.	
<i>Vicia cracca</i> L.	
<i>Vicia sativa</i> L.	
<i>Vicia sepium</i> L.	
<i>Vicia tetrasperma</i> (L.) Schreb.	
<i>Vulpia bromoides</i> (L.) S.F.Gray	<i>Festuca dertonensis</i> Aschers. et Graebn., <i>Bromus dertonensis</i> All., <i>Festuca sciuroides</i> Roth

Abkürzung der Autoren	Name und Lebensdaten der Autoren
A.Gray	Asa Gray 1810-1888
All.	Carlo Allioni 1728-1804
Aschers.	Paul Friedrich August Ascherson 1834-1913
Banks	Joseph Banks 1743-1820
Batt.	Jules Aimé Battandier 1848-1922
Baumg.	Johann Christian Gottlob Baumgarten 1765-1843
Beck	Günther von Mannagetta und Lärchenau Beck 1856-1931
Bernh.	Johann Jakob Bernhadi 1774-1850
Benth.	George Bentham 1800-1884
Bol.	Henry Nicholas Bolander 1832-1897
Boiss.	Pierre Edmond Boissier 1810-1885
Börner	Carl (Karl) Julius Bernhard Börner 1880-1953
Buchenau	Franz Georg Philipp Buchenau 1831-1906
C.Presl	Carl (Karl, Carel, Carolus) Bořivoj (Boriwog, Boriwag) Presl 1794-1852
Clem.	Frederick Edward Clements 1874-1945
Coult.	Thomas Coulter 1793-1843
Crantz	Heinrich Johann Nepomuk von Crantz 1722-1799
Cronquist	Arthur John Cronquist 1919-1992
DC.	Augustin Pyramus de Candolle 1778-1841
E.G. Clem.	Edith Gertrude Clements (Schwartz) 1877-1971
Fish.	Friedrich Ernst Ludwig von Fischer (Fedor Bogdanovic) 1782-1854
Fries	Elias Magnus Fries 1794-1878
Foucaud	Julien Foucaud 1847-1904
Fourr.	Jules Pierre Fourreau 1844-1871
Gams	Helmut Gams 1893-1976
Gaertn.	Joseph Gaertner 1732-1791
Gibbs	Lilian Suzette Gibbs 1870-1925
Gilib.	Jean-Emmanuel Gilibert 1741-1814
Gouan	Antoine Gouan 1733-1821
Graebn.	Karl Otto Robert Peter Paul Graebner 1871-1933
S.F.Gray	Samuel Frederick Gray 1766-1828
Greene	Edward Lee Greene 1843-1915
Hayek	August von Hayek 1871-1928
Heyw.	Vernon Hilton Heywood 1927-
Hill	John Hill 1716-1775
Hitchc.	Albert Spear Hitchcock 1865-1935
Hoppe	David Heinrich Hoppe 1760-1846
Huds.	William Hudson 1730-1793
Koch	Johann Friedrich Wilhelm Koch 1759-1831
J.Presl	Jan Svatopluk (Swatopluk) Presl 1791-1849
Jord.	Claude Thomas Alexis Jordan 1814-1897
Jusl.	Abrahamus Danielis Juslenius 1732-1803
Keller	Johann Christoph Keller 1737-1796
Kerguelen	Michel François-Jacques Kerguelén 1928-1999
Krock.	Anton Johann Krockner 1744-1823
Kunth	Karl (Carl) Sigismund Kunth 1788-1850
L.	Carl Linnaeus 1707-1778
Lam.	Jean Baptiste Antoine Pierre de Monnet de Lamarck 1744-1829
Lass.	Alex A. Lasseigne 1944-
Link	Johann Heinrich Friedrich Link 1767-1851



Maxim.	Carl Johann (Ivanovič) Maximowicz 1827-1891
Merat	François Victor Mérat de Vaumartoise 1780-1851
Mey.	Carl Anton (Andreevič) von Meyer 1795-1855
Michx.	André Michaux 1746-1803
Mill.	Philip Miller 1691-1771
Moench	Conrad Moench 1744-1805
Munro	William Munro 1818-1880
Murray	Johan Andreas Murray 1740-1791
Nash	George Valentine Nash 1864-1921
Nutt.	Thomas Nuttall 1786-1859
P.B.	Ambroise Marie François Joseph Palisot de Beauvois 1752-1820
Pers.	Christiaan Hendrik Persoon 1761-1836
Poir.	Jean Louis Marie Poiret 1755-1834
Pursh	Frederick Traugott Pursh 1774-1820
R.Br.	Robert Brown 1773-1858
Roth	Albrecht Wilhelm Roth 1757-1834
Rouy	Georges C.Chr. Rouy 1851-1924
Rupr.	Franz Josef (Ivanovich) Ruprecht 1814-1870
Schinz	Hans Schinz 1858-1941
Scholler	Friedrich Adam Scholler 1718-1795
Schreb.	Johann Christian Daniel von Schreber 1739-1810
Scop.	Joannes Antonius (Giovanni Antonio Scopoli) 1723-1788
Sell	Peter Derek Sell 1929-
Sibth.	John Sibthorp 1758-1796
Sm.	James Edward Smith 1759-1828
Sternb.	Caspar Kaspar Maria von Sternberg 1761-1838
Spreng.	Curt (Kurt, Curtius Polycarp) Joachim Sprengel 1766-1833
Thell.	Albert Thellung 1881-1928
Torr.	John Torrey 1796-1873
Trab.	Louis (Charles) Trabut 1853-1929
Trevis.	Vittore Benedetto Antonio Trevisan de Saint-Léon 1818-1897
Trin.	Carl Bernhard von Trinius 1778-1844
Vasey	George Vasey 1822-1893
Vitman	Fulgenzio Vitman 1728-1806
Wallr.	Carl (Karl) Friedrich Wilhelm Wallroth 1792-1857
S.Watson	Sereno Watson 1826-1892
Weber	George Heinrich Weber 1752-1828
Willd.	Carl Ludwig von Willdenow 1765-1812

## 8.4 Pflanzensoziologische Zuordnung zu Klassen

Tabelle 33: Pflanzensoziologische Zuordnung der Arten von CO<sub>2</sub>-Versuchen auf natürlichen Flächen

Versuch Wissenschaftlicher Artname	Zugehörigkeit zu Pflanzensoziologischen Einheiten nach Oberdorfer (1990)	Giessen FACE	SACC	MEGARICH F	MEGARICH UK	MEGARICH IR	Bulls FACE	Jasper Ridge FACE	OTC Kansas	OTC Farnham	CSR
	Quelle (s.u.):	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<i>Achillea millefolium</i>	Arrhenatheretalia OC schwach			30							CRCSR
<i>Agropyron repens</i>	Agropyretalia OC	20		20						20	CCR
<i>Agrostis tenuis</i>	Arrhenatheretalia Begleiter	30				30	30				CSR
<i>Agrostis stolonifera</i>	Agro-Rumicion, Polygonion			21, 22							CR
<i>Alopecurus pratensis</i>	Molinio-Arrhenatheretea KC	30		30			30				CCSR
<i>Ambrosia psilostachia</i>	-								x		
<i>Anagallis arvensis</i>	Polygono-Chenopodietalia OC							17			RSR
<i>Andropogon gerardii</i>	-								x		
<i>Anthoxanthum odor.</i>	Arrhenatheretalia Begleiter	30	30	30	30	30	30				CRCSR
<i>Arrhenatherum elatius</i>	Arrhenatherion VC	30		30							CCSR
<i>Artemisia ludoviciana</i>	-								x		
<i>Avena barbata</i>	Chenopodietea Begleiter							17			
<i>Avena fatua</i>	Secalietalia KC, Chenopodietalia							16, 17			
<i>Bouteloua curtipendula</i>	-								x		
<i>Briza minor</i>	-							x			
<i>Bromus diandrus</i>	-							xxx			
<i>Bromus erectus</i>	Brometalia OC, Arrhenatherion (trocken), Molinion		33, 30, 30								CS
<i>Bromus hordeaceus</i>	Sisymbrien, Arrhenatherion	17, 30		17, 30			17, 30	17, 30			R
<i>Capsella bursa-pastoris</i>	Chenopodietea KC									17	R
<i>Cardamine pratensis</i>	Arrhenatheretalia Begleiter			30							RCSR
<i>Carex caryophyllea</i>	Mesobromion, Xerobromion Brometalia OC schwach		33								S
<i>Carex flacca</i>	Molinion, Mesobromion,		30, 33								S
<i>Centaurea solstitialis</i>	-							x			
<i>Cerastium caespitosum</i>	-			x							
<i>Cerastium fontanum</i>	Poion VC, Nardion		30, 38								RCSR
<i>Cerastium glomeratum</i>	Chenopod.-Oxalidetum, Secalietea						17, 16				
<i>Chenopodium pumilio</i>	Sisymbrien, Chenopodion						17				
<i>Cirsium acaule</i>	Mesobromion VC		33								
<i>Cirsium arvense</i>	Artemisietea, Agropyretea, Epilobietea, Secalietea			19, 20 41, 16							C
<i>Convolvulus arvensis</i>	Convolvulo-Agropyrien VC			20				20			CR
<i>Conyza albida</i>	-						x				
<i>Coronopus didymus</i>	-						x				
<i>Crepis capillaris</i>	Cynosurion VC schwach, Arrhenatherion						30				RSR
<i>Crepis versicaria</i>	-							x			
<i>Cynodon dactylon</i>	Polygonion, Cynosurion, Chenopodietea						22, 30, 17				
<i>Cynosurus cristatus</i>	Cynosurion, Arrhenatherion		30				30				CSR
<i>Dactylis glomerata</i>	Arrhenatheretalia OD schwach	30		30		30					CCSR
<i>Danthonia californica</i>	-							x			
<i>Elymus glaucus</i>	-							x			
<i>Epilobium brachycarp.</i>	-							x			
<i>Erigeron canadensis</i>	Sisymbrietalia OC, Chenopodietea			17							
<i>Erodium botrys</i>	-							x			
<i>Festuca arundinacea</i>	Potentillo-Festucetum arundinaceae AC, Molinietalia			21, 30							CSR
<i>Festuca pratensis</i>	Molinio-Arrhenatheretea KC	30									CSR
<i>Festuca rubra</i>	Molinio-Arrhenatheretea KC	30		30	30	30	30				CSR
<i>Filipendula ulmaria</i>	Filipendulion, Molinietalia	30									CCS
<i>Galium mollugo</i>	Arrhenatherion VC schwach	30									-
<i>Galium verum</i>	Festuco-Brometea KC schwach	33									CSCSR
<i>Geranium dissectum</i>	Fumario-Euphorbion VC							17			RSR
<i>Geranium molle</i>	Cynosurion, Alliarion, Chenopodietea						30, 19,				

							17					
<i>Geranium pratense</i>	Arrhenatherion VC, (feucht)	30										-
<i>Glechoma hederacea</i>	Glechometalia, Arrhenatheretalia	19, 30										CSR
<i>Hemizonia congesta</i>	-								x			
<i>Heracleum sphondyl.</i>	Arrhenatheretalia Diff., Glechometalia, Atropion		30, 19, 41	30, 19, 41								CR
<i>Hieracium pilosella</i>	Nardo-Callunetea KC, Sedo-Scleranthea, Festuco-Brometea		38, 32, 33									SCSR
<i>Holcus lanatus</i>	Molinio-Arrhenatheretea KC	30		30		30						CSR
<i>Hordeum murinum</i>	Hordeetum (Sisymbrium)						17					
<i>Hypochoeris radicata</i>	Cynosurion, Arrhenatherion, Molinion						30					CSR
<i>Knautia arvensis</i>	Arrhenatheretalia OC, Mesobromion, Caucalidion		30, 33, 16									CSR
<i>Lathyrus pratensis</i>	Molinio-Arrhenatheretea KC	30		30								CSR
<i>Leontodon autumnalis</i>	Cynosurion VC						30				30	RCSR
<i>Lolium multiflorum</i>	Hordeetum (Sisymbrium AD), Arrhenatheretalia							17, 30				
<i>Lolium perenne</i>	Lolio-Cynosuretum AC schwach	30		30	30	30	30					CRCSR
<i>Lotus corniculatus</i>	Arrhenatheretalia OC schwach, Mesobromion, Molinion		30, 33, 30				30, 33, 30					SCSR
<i>Lotus purshianus</i>	-								x			
<i>Medicago lupulina</i>	Mesobromion VC schwach, Arrhenatheretalia			33, 30								RSR
<i>Medicago polymorpha</i>	Sisymbrium, Thero-Brachypodium VC							17, 33				
<i>Nassella pulchra</i>	-								x			
<i>Paspalum dilatatum</i>	-							x				
<i>Phleum pratense</i>	Cynosurion VC			30							30	CSR
<i>Plantago lanceolata</i>	Molinio-Arrhenatheretea-KC	30		30	30	30	30					CSR
<i>Plantago major</i>	Plantaginetalia OC							22			22	RCSR
<i>Plantago media</i>	Cynosurion, Arrhenatherion, Mesobromion		30, 30, 33									
<i>Poa angustifolia</i>	Agropyretalia OC, Festuco-Brometea	20, 33		20, 33								CSR
<i>Poa annua</i>	Plantaginetalia OC, Cynosurion, Chenopodieta, Secaliete						22, 30, 17, 16					R
<i>Poa pratensis</i>	Molinio-Arrhenatheretea-KC	30	30	30			30			30	30	CSR
<i>Poa trivialis</i>	Molinio-Arrhenatheretea-KC	30		30			30					CRCSR
<i>Polygonum bistorta</i>	Calthion VC, Polygono-Trisetion	30		30								
<i>Portulaca oleracea</i>	Polygonion, Sisymbrietalia, Polygono-Chenopodietalia							22, 16, 17				
<i>Potentilla anserina</i>	Agro-Rumicion, Polygonion						21, 22			21, 22		CRCSR
<i>Psoralea tenuiflora</i>										x		
<i>Quercus agrifolia</i>	-								x			
<i>Ranunculus acris</i>	Molinio-Arrhenatheretea-KC	30					30					CSR
<i>Ranunculus bulbosus</i>	Mesobromion VC, Arrhenatherion		33, 30				33, 30					SRCSR
<i>Ranunculus repens</i>	Agro-Rumicion VC, Calthion			21, 30	21, 30							CR
<i>Rumex acetosa</i>	Molinio-Arrhenatheretea-KC	30			30	30						CSR
<i>Rumex acetosella</i>	Sedo-Scleranthea, Nardo-Callunetea, Polygonion						32, 38, 22	32, 38, 22				SRCSR
<i>Rumex conglomeratus</i>	Agro-Rumicion, Bidention, Atropetalia						21, 18, 41					CR
<i>Rumex crispus</i>	Agro-Rumicion VC, Molinio-A.			21, 30			21, 30	21, 30				RCR
<i>Rumex obtusifolius</i>	Agro-Rumicion, Arction, Aegopodion						21, 19, 19					CR
<i>Rumex pulcher</i>	Sisymbrium						17					
<i>Salvia pratensis</i>	Mesobromion, Cirsio-Brachypodium, Xerobromion, Festuco-Brometea KC		33									
<i>Sanguisorba minor</i>	Mesobromion, Festuco-Brometea KC Arrhenatherion		33, 33, 30									S
<i>Sanguisorba officinalis</i>	Arrhenatheretalia Begleiter	30										-
<i>Saxifraga granulata</i>	Arrhenatheretalia DO, mager	30										-
<i>Silene gallica</i>	Secaliete, Chenopodieta						16, 17					
<i>Sisyrinchium bellum</i>	Molinion							30				
<i>Solanum nigrum</i>	Chenopodieta						17					
<i>Sonchus asper</i>	Polygono-Chenopodietalia OC, Chenopodion, Secaliete							17, 16				RCR
<i>Sorghastrum nutans</i>	-									x		
<i>Sporobolus asper</i>	-									x		
<i>Stellaria graminea</i>	Molinio-Arrhenatheretea, Nardetalia			30, 38								CSR
<i>Taraxacum officinale</i>	Arrhenatheretalia OC schwach	30		30							30	RCSR
<i>Torilis arvensis</i>	Caucalidion VC							16				
<i>Trifolium dubium</i>	Arrhenatherion, Cynosurion, Arrhenatheretalia OC						30					RSR

<i>Trifolium fragiferum</i>	Juncetum AC (Agro-Rumicion)							21				
<i>Trifolium glomeratum</i>	-							x				
<i>Trifolium hirtum</i>	-								x			
<i>Trifolium medium</i>	Trifolium medii VC (Trifolio-Geranietea, Prunetalia)			40, 48								
<i>Trifolium montanum</i>	Mesobromion, Festuco-Brometea KC, Molinion, Geranion			33, 33, 30, 40								
<i>Trifolium pratense</i>	Molinio-Arrhenatheretea KC			30	30							CSR
<i>Trifolium repens</i>	Cynosurion VC, Arrhenatheretalia			30	30		30	30			30	CRCSR
<i>Trifolium striatum</i>	Thero-Airion VC							32				
<i>Trifolium subterraneum</i>	-							xxx				
<i>Trisetum flavescens</i>	Arrhenatheretalia OC	30		30								CSR
<i>Veronica baldwinii</i>	-									x		
<i>Veronica chamaedrys</i>	Arrhenatheretalia, Glechometalia			30								SCSR
<i>Veronica persicae</i>	Polygono-Chenopodieta OC, Sisymbrium, Secalietea			17, 17, 16								R
<i>Vicia cracca</i>	Molinio-Arrhenatheretea KC			30								CSC
<i>Vicia sativa</i>	Secalietea, Chenopodieta			16, 17				16, 17				
<i>Vicia sepium</i>	Arrhenatheretalia, Aegopodion			30, 19								RCSR
<i>Vicia tetraspermae</i>	Alch.-Matricaricetum, Molinion			30								
<i>Vulpia bromoides</i>	Filago-Vulpium (Thero-Airion)							32				SR
Klassen Nr.:	Klassenbezeichnung:	Klassenzugehörigkeiten										
16	Secalietea	0	1	3	0	0	4	4	0	0	0	
17	Chenopodieta	1	0	4	0	0	11	9	0	1	1	
18	Bidentetea	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
19	Artemisietea	1	0	2	0	0	2	0	0	0	0	
20	Agropyretea	2	0	4	0	0	0	1	0	1	1	
21	Agrostietea	0	0	4	1	1	4	1	1	0	0	
22	Plantaginetea	0	0	1	0	1	5	1	1	1	1	
30	Molinio-Arrhenatheretea	25	15	30	6	11	20	4	1	5	5	
32	Sedo-Sclerathetea	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	
33	Festuco-Brometea	2	13	2	0	1	1	1	0	0	0	
38	Nardo-Callunetea	0	2	0	0	0	1	1	0	0	0	
40	Trifolio-Geranietea	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
41	Epilobietea	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	
48	Quercu-Fagetea	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	
<b>Artenzahl</b>		<b>27</b>	<b>19</b>	<b>40</b>	<b>5</b>	<b>12</b>	<b>39</b>	<b>29</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	
	Quelle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9	

Dargestellt ist die Artenliste der Versuchsfelder und die Zuordnung der Arten zu pflanzensoziologischen Einheiten und die Zugehörigkeiten der Arten zu Klassen nach Oberdorfer (1990) in Textform und in Zahlen. Im unteren Teil der Tabelle ist die Anzahl der Hinweise auf die Klassen addiert und die Artenzahl jedes Versuchs vermerkt. Doppelhinweise einer Art zu einer Klasse (z.B. 30, 30) wurden hierbei nur einmal gezählt. x = Arten, die nicht in Oberdorfer (1990) beschrieben werden. AC = Assoziations-, VC = Verbands, OC = Ordnungs-, KC = Klassen-Charakterart

Quellen: 1: eigene Untersuchung, 2: Schläpfer et al. (1998), 3: Teyssonneyre et al. (2002), 4: Harmens et al. (2004), 5: Byrne & Jones (2002), 6: Mündl. Mittlg Newton (2004), 7: Mündl Mittlg Cleland, Zavaleta (2004), 8: Owensby (1994), 9: Potvin & Vasseur (1997).

In der Vegetation der Experimente 1, 3, 4, 5, 6 und 9 überwiegen Wirtschaftsgrünland-Arten (Molinio-Arrhenatheretea). Versuch 2 hat fast so viele Trocken- und Halbtrockenrasen-Arten (Festuco-Brometea wie Arten des Wirtschaftsgrünlandes und die Versuche 6 und 7 haben eine größere Anzahl von Arten aus den ein- und zweijährigen Hackunkraut- und Ruderal-Gesellschaften (Chenopodieta). In Versuch 8 kommen sehr viele Arten vor, die Oberdorfer (1990) nicht beschrieb. Da einige Arten Zugehörigkeiten zu mehreren Klassen aufweisen, andere Arten nach Oberdorfer (1990) nicht beschrieben sind, sind die Summen der Klassenzugehörigkeiten und die Artenzahlen der Versuchsfelder unterschiedlich hoch.

## 8.5 Pflanzensoziologische Zuordnung zu Wiesen und Weiden

Tabelle 34: Pflanzensoziologische Zuordnung der Molinio-Arrhenatheretea- & Festuco-Brometea- Arten

Versuch Wissenschaftlicher Artnamen	Zugehörigkeit zu Pflanzensoziologischen Einheiten nach Oberdorfer (1990)	Giessen FACE	SACC	MEGARICH F	MEGARICH UK	MEGARICH IR	Bulls FACE	Jasper Ridge FACE	OTC Kansas	OTC Farnham
	Quelle (s.u.):	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Achillea millefolium</i>	Arrhenatheretalia OC schwach			30.2						
<i>Agrostis tenuis</i>	Arrhenatheretalia Begleiter	30.2				30.2	30.2			
<i>Alopecurus pratensis</i>	Molinio-Arrhenatheretea KC	30		30			30			
<i>Anthoxanthum odor.</i>	Arrhenatheretalia Begleiter	30.2	30.2	30.2	30.2	30.2	30.2			
<i>Arrhenatherum elatius</i>	Arrhenatherion VC	30.2.1		30.2.1						
<i>Bromus erectus</i>	Brometalia OC, Arrhenatherion (trocken), Molinion		33.2, 30.2.1, 30.1.3							
<i>Bromus hordeaceus</i>	Arrhenatherion	30.2.1		30.2.1			30.2.1	30.2.1		
<i>Cardamine pratensis</i>	Arrhenatheretalia Begleiter	30.2		30.2						
<i>Carex caryophylla</i>	Mesobromion, Xerobromion Brometalia OC schwach		33.2.1, 33.2.3, 33.2							
<i>Carex flacca</i>	Molinion, Mesobromion,		30.1.3, 33.2.1							
<i>Cerastium fontanum</i>	Poion VC		30.2.4							
<i>Cirsium acule</i>	Mesobromion VC		33.2.1							
<i>Crepis capillaris</i>	Cynosurion VC schwach, Arrhenatherion						30.2.3, 30.2.1			
<i>Cynosurus cristatus</i>	Cynosurion, Arrhenatherion		30.2.3, 30.2.1				30.2.3, 30.2.1			
<i>Dactylis glomerata</i>	Arrhenatheretalia OD schwach	30.2		30.2		30.2				
<i>Festuca arundinacea</i>	Molinietalia			30.1						
<i>Festuca pratensis</i>	Molinio-Arrhenatheretea KC	30								
<i>Festuca rubra</i>	Molinio-Arrhenatheretea KC	30		30	30	30	30			
<i>Filipendula ulmaria</i>	Filipendulion, Molinietalia	30.1.3, 30.1								
<i>Galium mollugo</i>	Arrhenatherion VC schwach	30.2.1								
<i>Galium verum</i>	Festuco-Brometea KC schwach	33								
<i>Geranium molle</i>	Cynosurion						30.2.3			
<i>Geranium pratense</i>	Arrhenatherion VC, (feucht)	30.2.1								
<i>Glechoma hederacea</i>	Arrhenatheretalia	30.2								
<i>Heraclium sphondyl.</i>	Arrhenatheretalia Diff.		30.2	30.2						
<i>Hieracium pilosella</i>	Festuco-Brometea		33							
<i>Holcus lanatus</i>	Molinio-Arrhenatheretea KC	30		30		30				
<i>Hypochoeris radicata</i>	Cynosurion, Arrhenatherion, Molinion						30.2.3			
<i>Knautia arvensis</i>	Arrhenatheretalia OC, Mesobromion		30.2, 33.2.1							
<i>Lathyrus pratensis</i>	Molinio-Arrhenatheretea KC	30		30						
<i>Leontodon autumnalis</i>	Cynosurion VC						30.2.3			30.2.3
<i>Lolium multiflorum</i>	Arrhenatheretalia							30.2		
<i>Lolium perenne</i>	Lolio-Cynosuretum AC schwach	30.2.3		30.2.3	30.2.3	30.2.3	30.2.3			
<i>Lotus corniculatus</i>	Arrhenatheretalia OC schwach, Mesobromion, Molinion		30.2, 33.2.1, 30.1.3				30.2, 33.2.1, 30.1.3			
<i>Medicago lupulina</i>	Mesobromion VC schwach, Arrhenatheretalia			33.2.1, 30.2						
<i>Medicago polymorpha</i>	Thero-Brachypodion VC							33.1.2		
<i>Phleum pratense</i>	Cynosurion VC			30.2.3						30.2.3
<i>Plantago lanceolata</i>	Molinio-Arrhenatheretea-KC	30		30	30	30	30			
<i>Plantago media</i>	Cynosurion, Arrhenatherion, Mesobromion		30.2.3, 30.2.1, 33.2.1							
<i>Poa angustifolia</i>	Festuco-Brometea	33		33						
<i>Poa annua</i>	Cynosurion						30.2.3			
<i>Poa pratensis</i>	Molinio-Arrhenatheretea-KC	30	30	30			30		30	30
<i>Poa trivialis</i>	Molinio-Arrhenatheretea-KC	30		30			30			

<i>Polygonum bistorta</i>	Calthion VC, Polygono-Trisetion			30.1.1 30.2.2						
<i>Ranunculus acris</i>	Molinio-Arrhenatheretea-KC	30				30				
<i>Ranunculus bulbosus</i>	Mesobromion VC, Arrhenatherion		33.2.1, 30.2.1			33.2.1, 30.2.1				
<i>Ranunculus repens</i>	Calthion			30.1.1	30.1.1					
<i>Rumex acetosa</i>	Molinio-Arrhenatheretea-KC	30			30	30				
<i>Rumex crispus</i>	Molinio-Arrhenatheretea			30			30	30		
<i>Salvia pratensis</i>	Mesobromion, Cirsio-Brachypodion, Xerobromion, Festuco-Brometea KC		33.2.1, 33.1.2, 33.2.3, 33							
<i>Sanguisorba minor</i>	Mesobromion, Festuco-Brometea KC Arrhenatherion		33.2.1, 33, 30.2.1							
<i>Sanguisorba officinalis</i>	Arrhenatheretalia Begleiter	30.2								
<i>Saxifraga granulata</i>	Arrhenatheretalia DO, mager	30.2								
<i>Sisyrinchium bellum</i>	Molinion							30.1.3		
<i>Stellaria graminea</i>	Molinio-Arrhenatheretea			30						
<i>Taraxacum officinale</i>	Arrhenatheretalia OC schwach	30.2		30.2						30.2
<i>Trifolium dubium</i>	Arrhenatherion, Cynosurion, Arrhenatheretalia OC						30.2.1, 30.2.3, 30.2			
<i>Trifolium montanum</i>	Mesobromion, Festuco-Brometea KC, Molinion		33.2.1, 33, 30.1.3							
<i>Trifolium pratense</i>	Molinio-Arrhenatheretea KC		30	30						
<i>Trifolium repens</i>	Cynosurion VC, Arrhenatheretalia		30.2.3 30.2	30.2.3 30.2		30.2.3 30.2	30.2.3 30.2			30.2.3 30.2
<i>Trisetum flavescens</i>	Arrhenatheretalia OC	30.2		30.2						
<i>Veronica chamaedrys</i>	Arrhenatheretalia			30.2						
<i>Vicia cracca</i>	Molinio-Arrhenatheretea KC			30						
<i>Vicia sepium</i>	Arrhenatheretalia			30.2						
<i>Vicia tetraspermae</i>	Molinion			30.1.3						
<b>30</b>	<b>Molinio-Arrhenatheretea</b>	<b>10</b>	<b>2</b>	<b>11</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
30.1	Molinetalia	1	0	1	0	0	0	0	0	0
30.1.1	Calthion	0	0	2	1	0	0	0	0	0
30.1.2	Filipendulion	1	0	0	0	0	0	0	0	0
30.1.3	Molinion	0	4	1	0	0	1	1	0	0
30.2	Arrhenatheretalia	9	5	11	1	4	5	1	0	2
30.2.1	Arrhenatherion	4	5	2	0	1	4	1	0	0
30.2.2	Polygono-Trisetion	0	0	1	0	0	0	0	0	0
30.2.3	Cynosurion	1	3	3	1	2	9	0	0	3
30.2.4	Poion	0	4	0	0	0	0	0	0	0
<b>33</b>	<b>Festuco-Brometea</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
33.1.2	Cirsion-Brachypodion	0	1	0	0	0	0	1	0	0
33.2	Brometalia	0	2	0	0	0	0	0	0	0
33.2.1	Mesobromion	0	10	1	0	1	1	0	0	0
33.2.3	Xerobromion	0	2	0	0	0	0	0	0	0
<b>Artenzahl</b>		<b>27</b>	<b>19</b>	<b>40</b>	<b>5</b>	<b>12</b>	<b>39</b>	<b>29</b>	<b>10</b>	<b>8</b>
	Quelle	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Dargestellt ist die Zuordnung der Arten, die auf die beiden o.g. Klassen hinweisen, zu den untergeordneten Ordnungen und Verbänden nach Oberdorfer (1990) in Textform und in Zahlen. Im unteren Teil der Tabelle ist die Anzahl der Hinweise auf die Klassen, Ordnungen und Verbände addiert und die Artenzahlen für Wiesen- (blau) und Weiden- (rot) Pflanzen jedes Versuchs vermerkt.

**Quellen:** 1: eigene Untersuchung, 2: Schläpfer et al. (1998), 3: Teyssonneyre et al. (2002), 4: Harmens et al. (2004), 5: Byrne & Jones (2002), 6: Mündl. Mittlg Newton (2004), 7: Mündl. Mittlg Cleland, Zavaleta (2004), 8: Owensby (1994), 9: Potvin & Vasseur (1997).

Neben Hinweisen auf die Zugehörigkeit zu den Klassen Molinio-Arrhenatheretea bzw. Festuco-Brometea und die Ordnungen Molinetalia, Arrhenatheretalia bzw. Brometalia soll hier vor allem der wichtige Unterschied zwischen Wiesen (Arrhenatherion und Polygono-Trisetion) und Weiden (Cynosurion und Poion) verdeutlicht werden. Die meisten Versuche (2, 3, 4, 5, 6 und 9) fanden auf Weiden statt. Die Arten von Versuch 2 zeigen neben der Zugehörigkeit zu Weiden die vorherrschende Zugehörigkeit zu Halbtrockenrasen. Die Versuche 7 und 8 fanden auf Flächen statt, die diesen Klassen nicht zuzuordnen sind.

## 8.6 Verzeichnisse

### *Tabellenverzeichnis*

Tabelle 1: Auswirkung von erhöhtem CO <sub>2</sub> auf die Artenzahl, Diversität und Evenness.....	4
Tabelle 2: CO <sub>2</sub> -Reaktion der oberirdischen Biomasse .....	6
Tabelle 3: CO <sub>2</sub> -Reaktionen einzelner Pflanzenarten .....	8
Tabelle 4: Quellen zu den Versuchen über CO <sub>2</sub> -Reaktionen einzelner Pflanzenarten.....	11
Tabelle 5: CO <sub>2</sub> -Reaktionen der Grasland-PFTs Gräser, Kräuter, Leguminosen.....	13
Tabelle 6: CO <sub>2</sub> -Reaktion der Wurzelbiomasse aus Zylinderproben.....	14
Tabelle 7: CO <sub>2</sub> -Reaktion in Bewurzelungsexperimenten.....	16
Tabelle 8: CO <sub>2</sub> -Reaktion der RLD .....	18
Tabelle 9: CO <sub>2</sub> -Reaktion der SRL .....	19
Tabelle 10: CO <sub>2</sub> -Reaktion in unterschiedlichen Tiefen.....	20
Tabelle 11: Artenliste der Versuchsflächen, Werte für die Jahre 1997-2005.....	27
Tabelle 12: Auflistung der untersuchten Eigenschaften.....	34
Tabelle 13: Ausprägung der Eigenschaften bei den 27 Arten der Untersuchung.....	35
Tabelle 14: Durchschnittliche Deckung der dargestellten Arten auf den E- und A-Flächen .....	46
Tabelle 15: Erklärungsanteile einzelner Variablen auf die Varianz.....	52
Tabelle 16: Einfluss der Variablen auf die Deckung der Pflanzengesellschaft.....	53
Tabelle 17: Signifikanzen der Variablen aus den Monte-Carlo-Permutations-Tests .....	54
Tabelle 18: Vergleich der artspezifischen, konstanten CO <sub>2</sub> -Reaktionen.....	59
Tabelle 19: Einfluss des zeitabhängigen CO <sub>2</sub> -Effekts und seine Signifikanzen .....	62
Tabelle 20: Vergleich der artspezifischen Reaktionen auf die Interaktion CO <sub>2</sub> x Jahr 5 bis 2004.....	63
Tabelle 21: Vergleich der artspezifischen Reaktionen auf die Interaktion CO <sub>2</sub> x Jahre 5, 6 und 7 .....	64
Tabelle 22: CO <sub>2</sub> -Einfluss auf die Wurzelbiomasse .....	66
Tabelle 23: CO <sub>2</sub> -Einfluss auf die RLD.....	69
Tabelle 24: CO <sub>2</sub> -Einfluss auf die SRL .....	71
Tabelle 25: CO <sub>2</sub> -Einfluss auf die Wurzeldicke .....	73
Tabelle 26: Vergleich der artspezifischen CO <sub>2</sub> -Reaktionen aus Giessen FACE mit anderen Experimenten.....	79
Tabelle 27: Lufttemperatur, Niederschlag und Vegetationsbeginn auf den Giessen FACE Flächen....	90
Tabelle 28: CO <sub>2</sub> -Reaktionen im Vergleich: Wurzel-Biomasse, RLD, SRL und Wurzeldicke .....	96
Tabelle 29: Versuchsparameter der Freiland-Versuche zu Wurzelbiomasse, -länge und -dicke .....	98
Tabelle 30: CO <sub>2</sub> -Reaktionen der Wurzelbiomasse auf vier separat untersuchte Arten.....	100
Tabelle 31: Versuchsparameter zu den in der Einleitung vorgestellten Untersuchungen. ....	120
Tabelle 32: Liste der verwendeten Pflanzenarten .....	124
Tabelle 33: Pflanzensoziologische Zuordnung der Arten von CO <sub>2</sub> -Versuchen auf natürlichen Flächen .....	129
Tabelle 34: Pflanzensoziologische Zuordnung der Molinio-Arrhenatheretea- & Festuco-Brometea- Arten .....	132

### *Abbildungsverzeichnis*

Abbildung 1: Anstieg der CO <sub>2</sub> -Konzentration in der Atmosphäre.....	2
Abbildung 2: Luft- und Bodentemperaturen im Giessen FACE in den Jahren 1997-2004.....	26
Abbildung 3: Niederschlag und Bodenfeuchte im Giessen FACE in den Jahren 1997-2004 .....	27
Abbildung 4: Gesamt-Biomasse.....	40
Abbildung 5: Biomasse der Gräser und Kräuter .....	41
Abbildung 6: Artenzahl.....	42
Abbildung 7: Diversität und Evenness .....	42
Abbildung 8: Summe der Einzeldeckungen, Deckungen der PFTs Gräser, Kräuter und Leguminosen.....	43
Abbildung 9: Vergleich von Deckungen und Biomasse aller Pflanzen und lediglich der Gräser.....	45
Abbildung 10: Einzel-Deckungen der dominanten Gras-Arten .....	47

Abbildung 11: Einzel-Deckungen vier weiterer Gras-Arten.....	48
Abbildung 12: Einzel-Deckungen der dominanten Kräuter-Arten.....	49
Abbildung 13: Einzel-Deckungen vier weiterer Kräuter-Arten .....	50
Abbildung 14: Bereinigter CO <sub>2</sub> -Effekt auf die standardisierte Artreaktion der 27 Arten 1997-1999... 56	56
Abbildung 15: Bereinigter CO <sub>2</sub> -Effekt auf die standardisierte Artreaktion der 27 Arten 1997-2000... 57	57
Abbildung 16: Bereinigter CO <sub>2</sub> -Effekt auf die standardisierte Artreaktion der 27 Arten 1997-2001... 58	58
Abbildung 17: Entscheidungsbaum der a posteriori PFTs für die Jahre bis 2001.....	60
Abbildung 18: CO <sub>2</sub> -Einfluss auf die Wurzelbiomasse .....	67
Abbildung 19: CO <sub>2</sub> - und Feuchte-Einfluss auf die Wurzelbiomasse .....	68
Abbildung 20: CO <sub>2</sub> -Einfluss auf die RLD.....	70
Abbildung 21: CO <sub>2</sub> -Einfluss auf die SRL .....	72
Abbildung 22: CO <sub>2</sub> -Einfluss auf die Wurzeldicke .....	74
Abbildung 23: Korrelation der Merkmale.....	86
Abbildung 24: Verteilung der Arten entlang des ersten und zweiten Gradienten.....	88
Abbildung 25: Gesamtdeckung im Jahr 2003 .....	91

### ***Bilderverzeichnis***

Bild 1: Lage der CO <sub>2</sub> -Ringe und Kontrollen.....	28
Bild 2: Lage der Aufnahme­flächen in den Ringen.....	29
Bild 3: Zylinderprobe .....	37
Bild 4: Meshbag-Probe.....	37
Bild 5: Gewächshaus Giessen .....	122
Bild 6: Solardomes in Lancaster, UK.....	122
Bild 7: OTC-Anlage Giessen .....	122
Bild 8: Giessen FACE, Deutschland .....	122
Bild 9: SACC Nenzlingen, Schweiz.....	123
Bild 10: MiniFACE Oak Park, Irland.....	123
Bild 11: Tunnels in Texas .....	123

### ***Bildernachweis***

Titelbild	Giessen FACE	<a href="http://www.bio.uni-giessen.de/home/pflanzenoek">http://www.bio.uni-giessen.de/home/pflanzenoek</a>
Bild 1	Lage der CO <sub>2</sub> -Ringe und Kontrollen	Jäger et al. 2003
Bild 2	Lage der Aufnahme­flächen in den Ringen	Sibylle Janze
Bild 3	Zylinderprobe	Claudia Kammann
Bild 4	Meshbag-Probe	Claudia Kammann
Bild 5	Gewächshaus Giessen	Sibylle Janze
Bild 6	Solardomes in Lancaster, UK	Lucas et al. 1987
Bild 7	OTC-Anlage Giessen	<a href="http://www.uni-giessen.de/~gf1034/AG_Jaeger/OTC.html">http://www.uni-giessen.de/~gf1034/AG_Jaeger/OTC.html</a>
Bild 8	Giessen FACE	<a href="http://www.bio.uni-giessen.de/home/pflanzenoek">http://www.bio.uni-giessen.de/home/pflanzenoek</a>
Bild 9	SACC Nenzlingen, Schweiz	<a href="http://www.unibas.ch/botschoen/07/01/d.shtml">http://www.unibas.ch/botschoen/07/01/d.shtml</a>
Bild 10	MiniFACE Oak Park, Irland	<a href="http://www.irishscientist.ie/TCDJF149.htm">http://www.irishscientist.ie/TCDJF149.htm</a>
Bild 11	Tunnels in Texas	Johnson et al. 2000



## ***Abkürzungsverzeichnis***

Die Autorenbezeichnungen, die als fester Bestandteil zur korrekten Bezeichnung jeder Pflanzenart gehören (z.B. L. für Linné), sind aus Gründen der besseren Lesbarkeit im Text fortgelassen. Im Anhang sind alle verwendeten Pflanzennamen mit Autorenbezeichnung aufgeführt (Tabelle 32).

A	ambient; umgebend, Umgebungs-
AMF	arbuscular mycorrhizal fungi, Mykorrhiza-Pilz
BioCON	FACE-Experiment mit Biodiversität, CO <sub>2</sub> und N, Minnesota, USA
Bulls FACE	FACE in Bulls, Manawatu, Neuseeland
D	Deutschland, MiniFACE der MEGARICH-Reihe
E	elevated; erhöht
F	Frankreich, MiniFACE der MEGARICH-Reihe
FACE	<b>F</b> ree <b>A</b> ir <b>C</b> arbon dioxide <b>E</b> nrichment
Giessen FACE	FACE-Experiment bei Giessen, Deutschland
HU	Ungarn, MiniFACE der MEGARICH-Reihe
IPCC	<b>I</b> ntergovernmental <b>P</b> anel on <b>C</b> limate <b>C</b> hange
I	Italien, MiniFACE der MEGARICH-Reihe
IR	Irland, MiniFACE der MEGARICH-Reihe
JRGCE	<b>J</b> asper <b>R</b> idge <b>G</b> lobal <b>C</b> hange <b>E</b> xperiment, FACE in Kalifornien, USA
MEGARICH	<b>M</b> anaging <b>E</b> uropean <b>G</b> rasslands <b>A</b> s a sustainable <b>R</b> esource <b>I</b> n a <b>C</b> hanging <b>C</b> limate, MiniFACE-Transekt-Experiment durch Europa
OTC	<b>O</b> pen <b>T</b> op <b>C</b> hamber
P I	Monte-Carlo-Permutationstest
P II	abgeschwächter Monte-Carlo-Permutationstest
PFT	<b>P</b> lant <b>f</b> unctional <b>t</b> ype, funktioneller Pflanzentyp (z. B. Kräuter, Gräser)
RDA	<b>R</b> edundancy <b>A</b> nalysis, Gradienten-Analyse
RLD	<b>R</b> oot <b>l</b> ength <b>d</b> ensity, Bestandswurzellänge, Wurzeldichte (cm Wurzel g Boden <sup>-1</sup> )
SACC	<b>S</b> creen <b>A</b> ided <b>C</b> O <sub>2</sub> <b>C</b> ontrol, FACE-Experiment in Nenzlingen, Schweiz
SGR	<b>S</b> eedling <b>g</b> rowth <b>r</b> ate, Rate des Keimlings-Wachstums
SRL	<b>S</b> pecific <b>r</b> oot <b>l</b> ength, spezifische Wurzellänge (cm Wurzel g Wurzel <sup>-1</sup> )
Swiss FACE	FACE in der Schweiz, Eschikon
UK Bangor	United Kingdom, Solardome der MEGARICH-Reihe in Bangor
UK Lancaster	Solardome in Lancaster
Ø	Durchmesser