

Langzeitwirkungen der atmosphärischen CO₂-Anreicherung auf den Kohlenstoff- und Wasserhaushalt von krautigen Pflanzengemeinschaften (*Trifolium pratense* L. und *Festuca pratensis* Huds.)

Manfred Forstreuter

Synopsis

Continuous measurements in Osnabrueck (52°18'N, 8°2'O) from 1984 to 1991 showed that atmospheric CO₂-concentration increased yearly at a rate of 2.8 ppm.

In three long-term investigations mixed plant stands of *Trifolium pratense* L. and *Festuca pratensis* Huds. were exposed to CO₂-concentrations of 350, 450, 600 and 800 ppm covering the period from 1984 to 1989. Dry-matter accumulation (aboveground plus roots) of the herbaceous plant stands was highly enhanced by the elevated CO₂-concentrations. Leaf area index (LAI) was practically unchanged at 450 ppm, whereas at 600 and 800 ppm it was increased by 14% and 35% compared to 350 ppm.

In the plant stands taken as a whole, higher CO₂-treatments caused higher net CO₂ exchange rates (NCER). NCER were increased by up to 37% (450 ppm), 59% (600 ppm) and 75% (800 ppm) compared to the plant stand at 350 ppm. Measured over a period of 6 years, the annual carbon budget of the plant stand at 600 ppm was increased by 16% compared to 350 ppm. During the growing season at 600 ppm a higher carbon gain of up to 40% was measured in comparison to the stand at 350 ppm.

The water budget of the plant stands was influenced by elevated CO₂-concentrations. Evapotranspiration was reduced at 450 ppm; it was hardly affected at 600 ppm, and it showed higher values at 800 ppm compared to the stand at 350 ppm. At higher CO₂-concentrations water use efficiency was significantly increased and resulted in a more efficient productivity.

Atmosphärische CO₂-Konzentration, CO₂-Anreicherung, CO₂-Gaswechsel.

Atmospheric CO₂ concentration, CO₂ enrichment, dry matter accumulation, leaf area index, CO₂ gas exchange, evapotranspiration, water use efficiency.

1. Einleitung

Die stetige Zunahme der atmosphärischen CO₂-Konzentration ist eine gut dokumentierte Tatsache (KEELING & WHORF 1990).

Bereits seit Ende des letzten Jahrhunderts wurden die Auswirkungen eines erhöhten CO₂-Angebotes auf Pflanzen und zwar besonders auf landwirtschaftlich und gartenbaulich genutzte, untersucht (GODLEWSKI 1873, DAUNICHT 1974, KIMBALL 1983, FORSTREUTER 1991a). Ein CO₂-Düngeeffekt auf die Assimilationsleistungen der Kulturen wurde hierbei nachgewiesen. STRAIN & CURE (1985) ermittelten bei einer Verdoppelung der CO₂-Konzentration eine Veränderung des Wachstums, der Konkurrenz und des CO₂-Gaswechsels von Pflanzen bzw. Pflanzengemeinschaften.

In Kurz- und Langzeitexperimenten unter erhöhtem CO₂-Angebot an einzelnen Pflanzen zeigte sich eine Reduzierung der Transpiration bei verschiedenen Arten, mit der eine Erhöhung der Wassernutzungs-Effizienzen verbunden war (GOUDRIAAN & VAN LAAR 1978, CARLSON & BAZZAZ 1980, KIMBALL & IDSO 1983, OVERDIECK 1989). Fast unerforscht ist bislang die Beeinflussung des Wasserhaushaltes ganzer Pflanzengemeinschaften, die nicht nur klimatische Auswirkungen haben könnten, sondern auch Verschiebungen im Artenspektrum von Flora und Fauna nach sich ziehen könnten (BAZZAZ 1990).

Ebenso existieren nur wenige Langzeitstudien unter freilandnahen Bedingungen an Pflanzenbeständen unter den zukünftig zu erwartenden CO₂-Konzentrationen, wie in der Tundra von Alaska (HILBERT & al. 1987), in der Salzmarsch von Nordamerika (CURTIS & al. 1989, DRAKE & al. 1989) und an Klee-Gras-Mischungen in Norddeutschland (OVERDIECK, BOSSEMEYER & LIETH 1984, OVERDIECK & FORSTREUTER 1987).

Gerade Langzeituntersuchungen unter freilandnahen Bedingungen sind notwendig, um mögliche Rückkopplungseffekte auf globale ökologische Stoffkreisläufe, auf den Kohlenstoff- und Wasserkreislauf, aufzuzeigen und zu quantifizieren.

2. Material und Methode

In den Jahren 1984 bis 1989 wurden in drei Teilversuchen krautige Pflanzenbestände atmosphärischen CO₂-Konzentrationen von 350 ppm (353 ± 18 ppm), 450 ppm (447 ± 17 ppm), 600 ppm (607 ± 20 ppm) und 800 ppm (801 ± 7 ppm) ausgesetzt und hinsichtlich der Trockensubstanzakkumulation, des CO₂-Gaswechsels und des Wasserhaushaltes untersucht.

Als Substrat diente ein humoser schluffiger Sand (Bodendichte 1,28 g cm⁻³). Eine ausreichende Nährstoffversorgung aus dem Boden wurde nachgewiesen (FORSTREUTER 1993). Die Versuchsanlage bestand aus vier gleichgroßen Mini-Gewächshauseinheiten aus UV-durchlässigem Acrylglas und einem Bauwagen zur Aufnahme der Meß- und Regelgeräte. Das Mikroklima in diesen Mini-Gewächshäusern wurde nach den Außenbedingungen nachgeregelt (FORSTREUTER 1991b). Die Windgeschwindigkeit wurde im Freiland mit einem Schalenstern-Anemometer (Typ 1469, LAMPRECHT) gemessen und innerhalb der Mini-Gewächshäuser mit einem Ventilator nachgeregelt. Die Photonenflußdichte wurde als photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) im Freiland und in den Mini-Gewächshäusern mit Hilfe eines Quantum-Sensors (Li-190 SB, LICOR) gemessen.

Die CO₂-Konzentrationen wurden von Ultrarotabsorptionsspektroskopen (URAS 3G, HARTMANN & BRAUN) gemessen. Die voreingestellten Sollwerte in den Mini-Gewächshäusern wurden mittels einer automatischen Ventilsteuerung aufrecht gehalten, die der Zuluft reines Kohlendioxid über thermische Massenflußregler (Typ 5850 TR, BROOKS INSTRUMENTS) beimischte.

Die Trockensubstanzakkumulation und der Blattflächenindex der Pflanzenbestände wurden anhand von Pflanzenproben bestimmt. Die Berechnungen des CO₂-Gaswechsels lehnte sich an die Methode von GAASTRA (1959), JANÁČ, CATSKY & JARVIS (1971) an. In der vorliegenden Untersuchung wurde der CO₂-Gaswechsel der "Modell-Ökosysteme" mittels des Luftdurchflusses, der CO₂-Konzentrationsdifferenz zuzüglich der Zugabemengen von reinem CO₂ errechnet und wie die anderen Ergebnisse auf m² Grundfläche bezogen. Der Wasserhaushalt der "Modell-Ökosysteme" wurde anhand der absoluten Wassergehaltsdifferenzen des zu- bzw. abströmenden Luftvolumens und der zugeführten Gießwassermengen und der abgeführten Kondens- und Sickerwassermengen berechnet. Eine weiterführende Erläuterung zur Methodik samt Auflistung der erfaßten Meßparameter ist bei FORSTREUTER (1991b, 1993) beschrieben.

3. Ergebnisse

Atmosphärische CO₂-Konzentration

Die Monatsmittelwerte der atmosphärischen CO₂-Konzentration (Abb. 1) zeigten eine Zunahme von 351 ppm zu Versuchsbeginn auf 370 ppm zu Versuchsende. Der jährliche Anstieg, ermittelt mit Hilfe einer linearen Trendanalyse, betrug demnach am Versuchsstandort 2,8 ppm pro Jahr. Setzt sich dieser Trend in der Zukunft fort, so würde sich die atmosphärische CO₂-Konzentration gegenüber der vorindustriellen Zeit im Jahre 2074 auf 600 ppm verdoppelt haben.

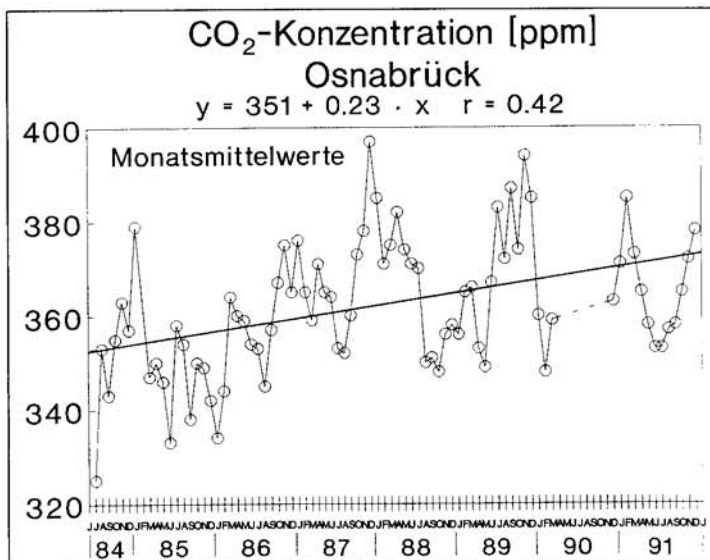


Abb.1: Monatsmittelwerte der atmosphärischen CO₂-Konzentration in Osnabrück (52°18'N, 8°2'O) am Standort Westerberg (90 m ü. NN).

Fig. 1: Monthly average of the atmospheric CO₂-concentration in Osnabrueck (52°18'N, 8°2'O) Westerberg (90 m above sea level).

Der Kurvenverlauf zeigte eine starke Saisonalität. Die Maxima lagen überwiegend in den Wintermonaten, bedingt durch den CO₂-Ausstoß durch Verbrennungs- und Atmungsprozesse, während die Minima, bedingt durch die Photosyntheseleistung der Pflanzen in den Sommermonaten gemessen wurde. Die mittlere Abweichung vom jeweiligen Jahresmittelwert betrug ±2%.

Trockensubstanzakkumulation

Die Gesamtphytomassenproduktion (Tab. 1) nahm mit steigender CO₂-Konzentration stark zu. Die oberirdische Phytomasse zeigte im Vergleich aller Konzentrationen bei 600 ppm den höchsten Steigerungswert, während die Wurzelmasse bei 800 ppm weiterhin zunahm.

Tab.1: Trockensubstanzakkumulation (relativ, 350 ppm = 1,0) der Pflanzenbestände bei verschiedenen CO₂-Konzentrationen zusammengefaßt für alle Erntetermine (350 ppm n = 22, 450 ppm n = 11, 600 ppm n = 22, 800 ppm n = 11).

Tab. 1: Relative dry matter accumulation (roots, shoots, total phytomass) of all harvesting periods (350 ppm n = 22, 450 ppm n = 11, 600 ppm n = 22, 800 ppm n = 11).

CO ₂ -Stufe	Trockensubstanzakkumulation (relativ)		
	Wurzeln	Oberirdisch	Gesamt
350 ppm	1,0	1,0	1,0
450 ppm	1,21	1,15	1,18
600 ppm	1,45 *	1,49 ***	1,50 ***
800 ppm	1,59 **	1,45 *	1,52 ***

t-Test, Signifikanzniveau gegenüber 450 ppm
 *** α < 0,05
 ** α < 0,10
 * α < 0,25

Blattflächenindex

Der Blattflächenindex (BFI) der Pflanzenbestände nahm unter erhöhten CO₂-Konzentrationen zu (Abb. 2). Der BFI des Bestandes bei 350 ppm lag durchschnittlich bei 5,1. Gegenüber dem BFI bei 350 ppm nahmen die BFI-Werte bei 450 ppm nur unwesentlich zu, bei 600 ppm war eine mittlere Zunahme der Blattflächen um 14% und bei 800 ppm eine signifikante Zunahme um 35% zu verzeichnen (t-Test: α < 0,05; n = 9). Die Abhängigkeit der Blattflächenwerte von der CO₂-Konzentration konnte mit Hilfe einer Exponentialfunktion beschrieben werden.

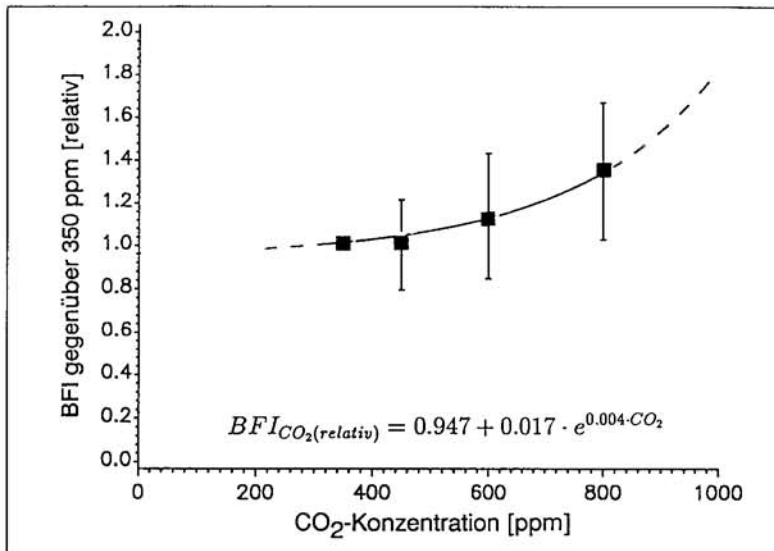


Abb. 2: Relativer Wert des Blattflächenindex (BFI) der Pflanzenbestände (Kontrolle 350 ppm = 1,0) bei den verschiedenen CO₂-Konzentrationen.

Fig. 2: Relative leaf area index (LAI) of plant stands at various CO₂-concentrations (control 350 ppm = 1.0).

CO₂-Gaswechsel

Innerhalb eines Zeitraumes von 100 Tagen nach dem Pikieren der Keimlinge zeigte der CO₂-Gaswechsel bei Photonenflußdichten von 1000 µE m⁻² s⁻¹ einen Optimumsverlauf (Abb. 3). Das Niveau des Optimums stieg mit zunehmender CO₂-Konzentration auf höhere CO₂-Gaswechselwerte. In dieser Optimumsphase waren die CO₂-Gaswechselraten der verschiedenen Modell-Ökosysteme um 37% (450 ppm), um 59% (600 ppm) und um 75% (800 ppm) gegenüber der Kontrolle (350 ppm) gesteigert. In der anschließenden Altersphase nahmen die CO₂-Gaswechselraten der Modell-Ökosysteme besonders unter den erhöhten CO₂-Konzentrationen ab. Zwischen den CO₂-Gaswechselraten bei 600 und 800 ppm ließen sich keine Unterschiede mehr sichern.

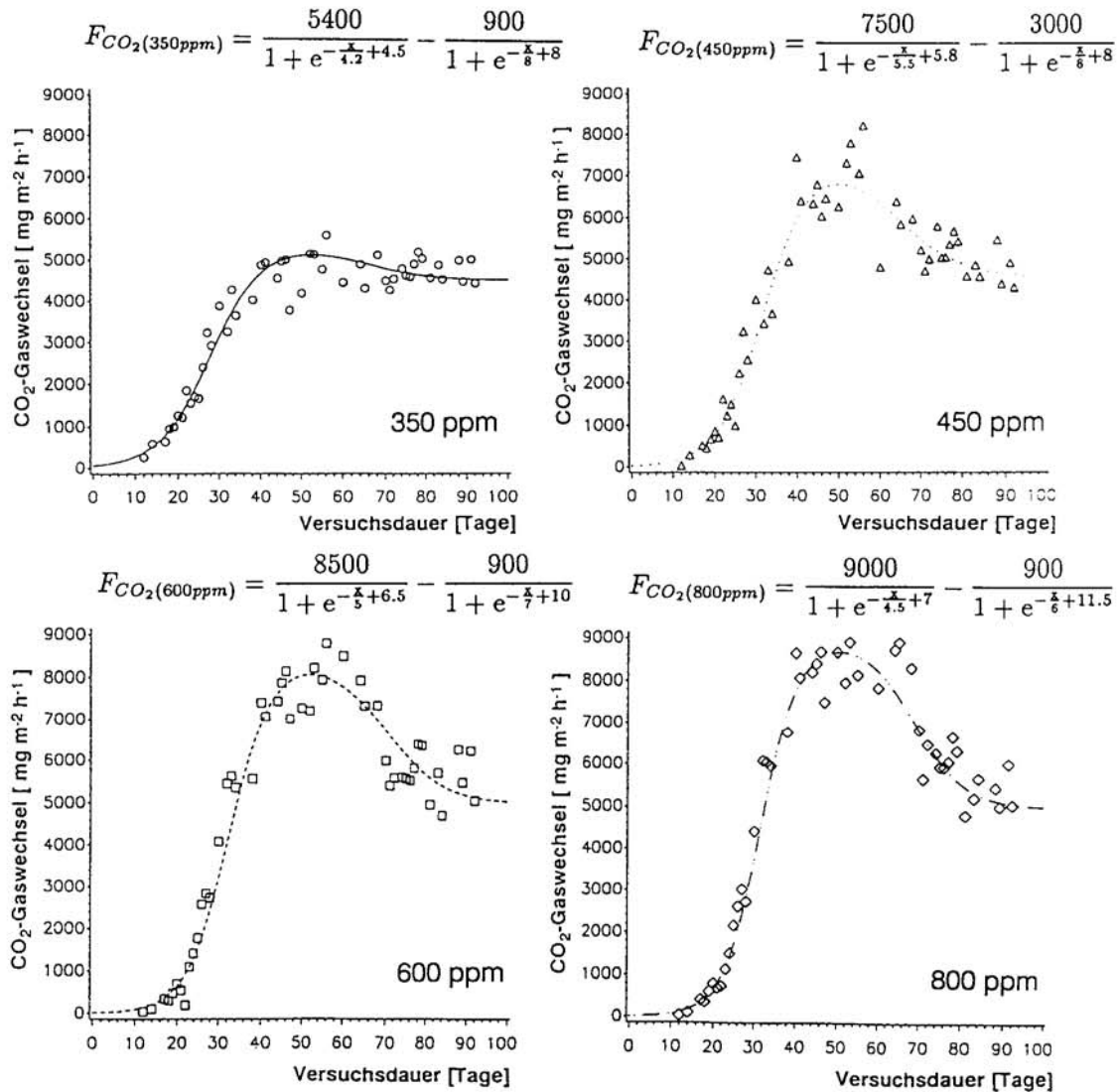


Abb. 3: Entwicklung des CO₂-Gaswechsels der Modell-Ökosysteme untersucht bei hoher Photonenflußdichte (1000 µE m⁻² s⁻¹) in der ersten Begasungsperiode 1987.

Fig. 3: Development of net CO₂ gas exchange (NCER) of model-ecosystems over a period of 100 days in 1987. Measured at high photon flux density (1000 µE m⁻² s⁻¹).

Aus den Halbstundenmittelwerten des CO₂-Gaswechsels wurden die CO₂-Tagesbilanzen aufsummiert. Aus diesen ergaben sich die mittleren CO₂-Tagesbilanzen für die einzelnen Monate über den gesamten Versuchszeitraum (Abb. 4). Sie wurden für die Modell-Ökosysteme bei 350 und 600 ppm zu einem mittleren Jahresverlauf zusammengefasst. Das Modell-Ökosystem bei 600 ppm CO₂ wies in den Monaten April bis August der Versuchsjahre 1984 bis 1989 eine gegenüber 350 ppm gesteigerte Kohlenstoffaufnahme bis zu 40% auf. Die sehr hohen Steigerungsraten der CO₂-Nettoassimilationsraten bei erhöhtem CO₂-Angebot in der Hauptvegetationsperiode wurden weitgehend kompensiert durch eine gesteigerte CO₂-Abgabe in der übrigen Jahreszeit. In der mittleren Jahresbilanz wurden bei 350 ppm 2474 g CO₂ m⁻² a⁻¹ und bei 600 ppm 2859 g CO₂ m⁻² a⁻¹ fixiert. Der positive CO₂-Effekt lag somit in der Jahresbilanz bei nur 16%.

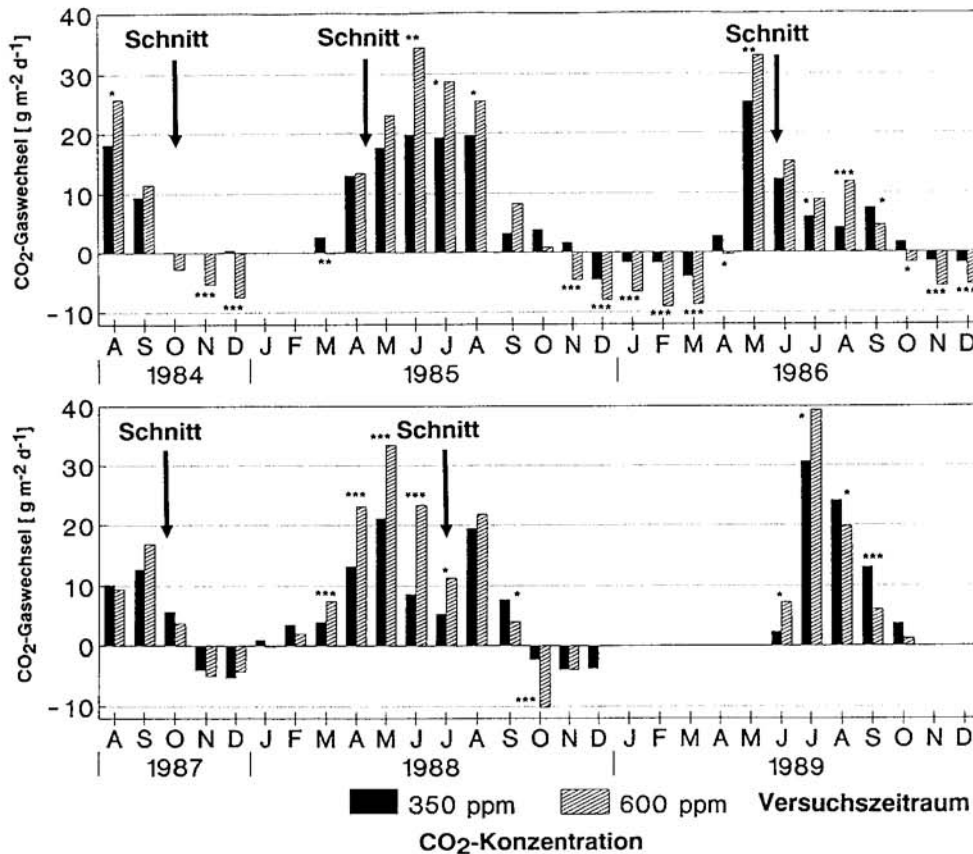


Abb. 4: Mittlere Tagesbilanzen des CO₂-Gaswechsels der Modell-Ökosysteme in Langzeitbegasungsversuchen von August 1984 bis Oktober 1989.

Fig. 4: Average daily CO₂ gas exchange rates of model-ecosystems at two CO₂-concentrations for the months from August 1984 to October 1989.

Evapotranspiration

Für die Untersuchungszeiträume 1988 und 1989 wurden die Tageswerte der Evapotranspiration der Modell-Ökosysteme bei den jeweiligen CO₂-Konzentrationen über 166 Tage aufsummiert (Abb. 5). Durchschnittlich wurden für die einzelnen CO₂-Konzentrationen Evapotranspirationsraten ermittelt, die bei 450 ppm niedriger (-8%), bei 600 ppm nahezu ausgeglichen und bei 800 ppm im Vergleich zu den Kontrollsystemen (350 ppm) höher (+2,3%) ausfielen.

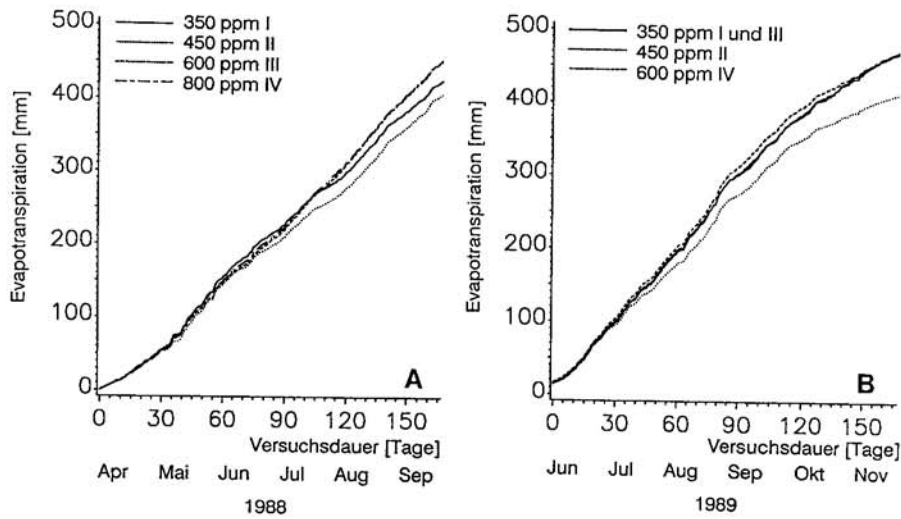


Abb. 5: Akkumulierte Tageswerte der Evapotranspiration der Modell-Ökosysteme bei verschiedenen CO₂-Konzentrationen, A: 1.4. - 14.9.1988 und B: 1.6. - 14.11.1989.

Fig. 5: Accumulated evapotranspiration of the model-ecosystems during the investigation periods, A: April to September 1988, and B: June to November 1989.

Wassernutzungs-Effizienzen (WUE)

Die Wassernutzungs-Effizienzen (WUE), auf der Basis des CO₂-Gaswechsels, stiegen mit zunehmender CO₂-Konzentration signifikant an und zeigten hinsichtlich des Wasserverbrauches eine effizientere Stoffproduktion unter erhöhter CO₂-Konzentration an (Tab. 2).

Tab. 2: Wassernutzungs-Effizienz (WUE) der Modell-Ökosysteme mit Rotklee/Wiesenschwingel-Mischungen (1:1) bei den verschiedenen CO₂-Stufen.

Tab. 2: Water use efficiency of the model-ecosystems (red clover and meadow fescue (1:1)) at various CO₂ concentrations over three time periods.

Wasserverbrauchs-Effizienz in 10 ⁻³ g CO ₂ /g H ₂ O							
CO ₂ / ppm	Kontrolle 350	450	D%	600	D%	800	D%
Teilversuch II 18.7.-16.10 1987	7,4 ±2,9	8,7 * ±3,1	18	8,6 * ±3,4	16	10,3*** ±3,1	39
1.4. - 5.7. 1988	6,9 ±2,2	6,4 ±3,5	-7	9,6*** ±3,6	39	7,6 ±3,7	10
Teilversuch III 1.6.-30.8. 1989	7,4±3,0 7,8±3,4	8,6 * ±3,4	13	8,5 * ±3,4	12	-	-
gesamt	7,4	7,9	7	8,9	20	9,0	22

Signifikanzniveau (t-Test, gegenüber der Kontrolle, 350 ppm):
 * α < 0,12
 ** α < 0,05
 *** α < 0,01

Innerhalb der verschiedenen Entwicklungsphasen der Pflanzenbestände konnten die Werte erheblich variieren. Durchschnittlich nahm die WUE bei 450 ppm um 7%, bei 600 ppm um 20% und bei 800 ppm um 22% gegenüber den Kontrollsystemen (350 ppm) zu.

Die Wassernutzungs-Effizienzen der Modell-Ökosysteme, auf der Basis der Trockensubstanz lagen bei $4,8 \pm 1,6$ (350 ppm, n = 14), $6,3 \pm 1,4$ (450 ppm, n = 7), $7,0 \pm 2,1$ (600 ppm, n = 14) und $8,8 \pm 2,2$ (800 ppm, n = 7) gTG/kgH₂O. Sie bestätigten einen signifikanten Anstieg mit steigender CO₂-Konzentration.

4. Diskussion

Atmosphärische CO₂-Konzentration

Die im vorliegenden Versuch ermittelte Zunahme der atmosphärischen CO₂-Konzentration von 0,8% pro Jahr lag über den Werten für die globale Zunahme von 0,4% pro Jahr (WARRICK & al. 1990). Aus den Monatsmittelwerten der atmosphärischen CO₂-Konzentration der Mauna Loa Meßreihe von 1984 bis 1988 (THONING & al. 1990) wurde mit Hilfe einer linearen Trendanalyse eine Zunahme von 1,67 ppm pro Jahr ermittelt. Aus den Monatsmittelwerten der Meßreihe von REITER & al. (1990) in Garmisch-Partenkirchen von 1978 bis 1987, wie auch in der Meßreihe Osnabrück, konnte eine Zunahme von 2,8 ppm pro Jahr ermittelt werden. Dieses Ergebnis deutet auf einen höheren Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration in den nördlicheren Breiten hin.

Trockensubstanzakkumulation

In der vorliegenden Untersuchung wurde ebenfalls eine Steigerung der Trockensubstanzakkumulation von krautigen Pflanzenbeständen durch Anhebung der momentanen atmosphärischen CO₂-Konzentration auf in der Zukunft zu erwartende Werte nachgewiesen, wie bei OVERDIECK & al. (1984), NIJS & al. (1988), CURTIS & al. (1989), OVERDIECK & FORSTREUTER (1991). ZANGERL & BAZZAZ (1984) ermittelten in Pflanzenbeständen eine starke Zunahme der Biomassenproduktion bei 450 ppm, während zwischen 450 und 600 ppm ein nur geringer CO₂-Steigerungseffekt auftrat. BHATTACHARYA & al. (1985) wiesen nach, daß unter erhöhter CO₂-Konzentration verstärkt Kohlenstoff in Speicherorgane eingelagert wurde. Wie im vorliegenden Versuch war die prozentuale Wachstumssteigerung der Wurzeln bei der höchsten CO₂-Stufe gegenüber der Kontrolle größer als die Steigerung der oberirdischen Phytomasse. LIETH (1988) ermittelte bei 18 Arten, darunter verschiedene Gräser und krautige Pflanzen mit und ohne Speicherorganen, bei verdoppelter CO₂-Konzentration eine Steigerung der Trockensubstanz, wobei auf eine unterschiedliche Reaktion der Pflanzen mit zusätzlichen Speicherorganen hingewiesen wurde. Dies deutet darauf hin, daß Pflanzenarten, die in der Lage sind, zusätzlich fixierten Kohlenstoff in überwinternde Organe zu speichern, zukünftig von erhöhten CO₂-Konzentrationen erheblich profitieren können. Daraus abgeleitet ist ein starker Effekt auf Holzpflanzen unter erhöhter CO₂-Konzentration zu erwarten (OVERDIECK 1993).

Blattflächenindex

Eine Zunahme der Blattflächen unter erhöhter CO₂-Konzentration wurde bei verschiedenen C₃- und C₄-Pflanzen und Pflanzenbeständen bereits nachgewiesen (MORISON & GIFFORD 1984, JONES & al. 1985, TISSUE & OECHEL 1987, CURTIS & al. 1989, ARP 1991). Die Zunahme der Blattflächen durch Vergrößerung der Einzelblätter und die Zunahme der Anzahl pro Fläche führen dazu, daß Pflanzenbestände unter erhöhten CO₂-Konzentrationen höhere Bestandesdichten aufweisen. Veränderte Evapotranspirationsraten bei Pflanzenbeständen unter erhöhten CO₂-Konzentrationen wären denkbar. Die Evaporation könnte aufgrund der Beschattung der Bodenoberfläche reduziert werden (ACOCK & ALLEN 1985). Aber auch der Lichtdurchtritt durch das Pflanzendach des Ökosystems könnte beeinflußt werden (STRAIN 1985).

CO₂-Gaswechsel

Der CO₂-Gaswechsel der Modell-Ökosysteme war durch eine Anhebung des CO₂-Konzentrationsniveaus deutlich gesteigert. Bereits GAASTRA (1959) betonte, daß die in der Außenluft vorherrschende CO₂-Konzentration die Photosyntheseleistung der Pflanzen begrenzt und die Diffusion des CO₂ von der Außenluft in die Chloroplasten durch die vorhandene CO₂-Konzentration beeinflußt wird. Messungen an verschiedenen Pflanzenbeständen unter erhöhten CO₂-Konzentrationen ergaben deutlich höhere maximale CO₂-Gaswechselraten aufgrund des zusätzlichen CO₂-Angebotes (JONES & al. 1985, OVERDIECK & BOSSEMEYER 1985, HILBERT & al. 1987, NIJS & al. 1989, DRAKE & al. 1991). LONG & DRAKE (1991) berichten, daß die Quantenausbeute der Photosynthese unter erhöhter CO₂-Konzentration effizienter verläuft und dieser Effekt den Lichtkompensationspunkt erniedrigt (DRAKE & LEADLY 1991). Blätter aus den unteren Lagen eines Pflanzenbestandes bzw. eines

in einem dichteren Pflanzenbestand konnten unter erhöhter CO₂-Konzentration noch bei geringen Photonenflußdichten positiv zur Assimilation des gesamten Pflanzenbestandes beitragen.

Mit fortschreitender Versuchsdauer machte sich ein Alterseffekt in den Pflanzenbeständen bemerkbar. Ein hoher Anteil an älteren Blättern im oberen Pflanzendach, in denen die Photosyntheseleistung abnahm, könnte sich hierauf besonders negativ ausgewirkt haben, wobei eine fortschreitende Zunahme der Bestandeshöhe und -dichte diesen Effekt verstärkt haben dürfte. Der Entwicklungsverlauf der CO₂-Gaswechselraten der Modell-Ökosysteme bei hohen Photonenflußdichten deutet auf eine Art "Überschußreaktion" des Pflanzenwachstums aufgrund einer erhöhten CO₂-Konzentration hin.

Im vorliegenden Versuch ergab der Vergleich der Jahresbilanzen zwischen 350 und 600 ppm eine positive CO₂-Aufnahme von 16% bei 600 ppm. Grünland-Ökosysteme stellen somit eine Senke für zusätzlich in die Atmosphäre abgegebene CO₂-Mengen dar, diese Senke fällt jedoch deutlich geringer aus, als bislang in der Literatur beschrieben. Die Ergebnisse dieser in der Literatur erwähnten Untersuchungen wurden hauptsächlich nur aus Messungen in der Hauptvegetationszeit gewonnen (OVERDIECK & BOSSEMEYER 1985, GRULKE & al. 1990, DRAKE & al. 1991). Dieses führte dazu, daß die steigende Wirkung eines zusätzlichen CO₂-Angebotes auf die Photosyntheseleistung von Pflanzenbeständen in Bezug auf den Kohlenstoffhaushalt von Ökosystemen zumeist überbewertet wurde. Andere metabolische Prozesse im Kohlenstoffkreislauf, wie die mikrobielle Atmung des Bodens, Abbau von Pflanzensubstanz, Wurzel- und Sproßatmung, Änderung der Bestandesstruktur und Einflüsse auf den Entwicklungsverlauf eines Pflanzenbestandes, müssen stärker berücksichtigt und in die Betrachtung einbezogen werden.

Evapotranspiration, Wassernutzungs-Effizienz

KIMBALL & IDSO (1983) stellten 46 Untersuchungen an 18 verschiedenen Pflanzenarten zusammen und ermittelten bei einer Verdoppelung der CO₂-Konzentration eine Reduzierung des Wasserverbrauches über die Transpiration um durchschnittlich 34%. Die mögliche Wasserersparnis aufgrund der reduzierten Transpiration pro Einheit Blattfläche kann jedoch durch die größeren Blattflächen pro Pflanze kompensiert werden, die unter erhöhten CO₂-Konzentrationen gebildet werden. MORISON & GIFFORD (1984) untersuchten den Wasserverbrauch an 16 Pflanzenarten bei 340 und 680 ppm CO₂, wobei sie nachwiesen, daß kein signifikanter Unterschied zwischen den CO₂-Konzentrationen besteht. Ebenfalls stellten JONES & al. (1985) in Begasungsversuchen an Sojabohnenbeständen bei 330 ppm und 800 ppm annähernd gleiche Transpirationsraten fest. Bei 800 ppm besaßen die Pflanzen erwartungsgemäß geringere Blatttranspirationswerte, jedoch war die Blattfläche dieses Bestandes so vergrößert, daß ein Ausgleich der Transpirationswerte gegeben war. In einem Langzeitbegasungsversuch an natürlichen Pflanzenbeständen bei 350 und 690 ppm ermittelte ARP (1991) geringere Evapotranspirationsraten unter erhöhter CO₂-Konzentration. Die Blattfläche des Bestandes bei 690 ppm nahm zwar zu, doch war diese Zunahme zu gering, um die verringerten Evapotranspirationswerte auszugleichen. Im vorliegenden Versuch waren die Pflanzenbestände bei einem geringen CO₂-Konzentrationsanstieg (450 ppm) in der Lage, ihren Wasserhaushalt in begrenztem Maße zu reduzieren, da die transpirierenden Oberflächen der Pflanzen bei dieser Konzentration nicht wesentlich vergrößert wurden. Im oberen Konzentrationsbereich (600 und 800 ppm) wurde die verringerte Transpiration pro Blattfläche durch die Zunahme der Blattflächen kompensiert bzw. überkompensiert.

Die im vorliegenden Versuch ermittelten Werte der Wassernutzungs-Effizienzen, sowohl auf der Basis des CO₂-Gaswechsels sowie auf der Basis der Trockensubstanzakkumulation, waren mit denen in der Literatur vorhandenen Werten vergleichbar (JONES & al. 1985, GOUDRIAAN & BIJLSMA 1987, NIJS 1989, ARP 1991) und zeigten hinsichtlich des Wasserverbrauches eine effizientere Stoffproduktion unter erhöhten CO₂-Konzentrationen an.

Danksagung

Für die Mitarbeit beim Versuchsaufbau und der -durchführung gilt mein Dank besonders Herrn Axel Tschuschke und für die Entwicklung und Betreuung der regelungstechnischen Geräte im Versuchsaufbau Herrn Dirk Rathmann, Elektronikwerkstatt Universität Osnabrück. Herrn Georg Zimmermann danke ich für die Mitarbeit bei der rechnergestützten Auswertung der enormen Datenmengen. Der Universität Osnabrück danke ich für die Förderung als Stipendiat nach dem Graduiertenförderungsgesetz.

Literatur

ACOCK, B. & L.H. ALLEN, 1985: Crop response to elevated carbon dioxide concentrations. - In: STRAIN, B. R. & J. D. CURE, (eds.) 1985: Direct effects of increasing carbon dioxide on vegetation. - US DOE/ER-0238: 53-97.

- ARP, W.J., 1991: Vegetation of a north american salt marsh and elevated atmospheric carbon dioxide.- Doctoral Thesis, Vrije Universiteit Amsterdam: 181 pp.
- BAZZAZ, F.A., 1990: The response of natural ecosystems to the rising global CO₂ levels. - *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 21: 167-196.
- BHATTACHARYA, N.C., BISWAS, P.K., BHATTACHARYA, S., SIONIT, N. & B.R. STRAIN, 1985: Growth and yield response of sweet potato to atmospheric CO₂ enrichment. - *Crop Sci.* 25: 975-981.
- CARLSON, R.W. & F.A. BAZZAZ, 1980: The effects of elevated carbon dioxide concentrations on growth, photosynthesis, transpiration, and water use efficiency of plants. - In: SINGH, J.J. & A. DEEPAK, (eds.): Environmental and climatic impact of coal utilization. - Academic Press, New York: 609-622.
- CURTIS, P. S., DRAKE, B. G., LEADLEY, P. W., ARP, W. J. & D. F. WHIGHAM, 1989: Growth and senescence in plant communities exposed to elevated CO₂ concentrations on an estuarine marsh. - *Oecologia* 78: 20-26.
- DAUNICHT, H. J., 1974: Control of plant growth and development by dioxide concentration. - *Acta Horticulturae* 39: 167-174.
- DRAKE, B. G. & P. W. LEADLY, 1991: Canopy photosynthesis of crops and native plant communities exposed to long-term elevated CO₂. - *Plant, Cell and Environment* 14: 853-860.
- FORSTREUTER, M., 1991a: Dry matter accumulation, CO₂ gas exchange, and water uptake of plants and plant communities under increased atmospheric CO₂ concentration. - In: FANTECHI, R., MARACCHI, G. & M. E. ALMEIDA-TEIXEIRA: Climatic change and impacts: A general introduction. - Proceedings of the European School of Climatology and Natural Hazards course, Luxembourg, EUR 11943: 393-402.
- FORSTREUTER, M., 1991b: Langzeitwirkungen der atmosphärischen CO₂-Anreicherung auf den Kohlenstoff- und Wasserhaushalt von Rotklee-Wiesenschwingelgemeinschaften. - *Verh. Ges. Ökol.*, Band XIX/III (Osnabrück 1989): 265-279.
- FORSTREUTER, M., 1993: Langzeitwirkungen der atmosphärischen CO₂-Anreicherung auf den Kohlenstoff- und Wasserhaushalt von Rotklee-Wiesenschwingelgemeinschaften. - Dissertation, Universität Osnabrück, Landschaftsentwicklung und Umweltforschung (Berlin) 91: 208 S.
- GAASTRA, P., 1959: Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature, and stomatal diffusion resistance. - *Mededelingen van de Landbouwhogeschool te Wageningen, Nederland* 59 (13): 1-68.
- GODLEWSKI, E., 1873: Abhängigkeit der Sauerstoffausscheidung der Blätter von dem Kohlensäuregehalt der Luft. - *Arbeiten des Botanischen Instituts in Würzburg, Leipzig, Bd. I, Heft 3:* 343-370.
- GOUDRIAAN, J. & H. H. VAN LAAR, 1978: Relations between leaf resistance, CO₂ concentration and CO₂ assimilation in maize, beans, lalang grass and sunflower. - *Photosynthetica* 12: 241-249.
- GOUDRIAAN, J. & R. J. BIJLSMA, 1987: Effect of CO₂ enrichment on growth of faba beans at two levels of water supply. - *Neth. J. Agric. Sci.* 35: 189-191.
- GRULKE, N. E., RIECHERS, G. H., OECHEL, W. C., HJELM, U. & C. JAEGER, 1990: Carbon balance in tussock tundra under ambient and elevated atmospheric CO₂. - *Oecologia* 83: 485-494.
- HILBERT, D. W., PRUDHOMME, T. I. & W. C. OECHEL, 1987: Response of tussock tundra to elevated carbon dioxide regimes: Analysis of ecosystem CO₂ flux through nonlinear modelling. - *Oecologia* 72: 466-472.
- JANÁČ, J., CATSKY, P. & G. JARVIS, 1971: Infrared gas analyser and other physical analysers. - In: SESTÁK, Z., CATSKY, J. & P. G. JARVIS, (eds.): *Plant Photosynthetic Production, Manual of methods.* - Jung, The Hague: p. 111-193.
- JONES, P., ALLEN, L. H., JONES, J. W. & R. VALLE, 1985: Photosynthesis and transpiration responses of soybean canopies to short- and long-term CO₂ treatments. - *Agronomy Journal* 77: 119-126.
- KEELING, C. D. & T. P. WHORF, 1990: Atmospheric carbon dioxide concentration, Mauna Loa. - In: BODEN, A., KANCIRUK, P. & M. P. FARELL, (eds.): *Trends'90, A compendium of data on global change.* - Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, ORNL/CDIAC-36: 8-9.
- KIMBALL, B. A., 1983: Carbon dioxide and agricultural yield: An assemblage and analysis of 770 prior observations. - *WCL Report 14, U.S. Dept. of Agric., Agric. Res. Serv.:* 71 pp.
- KIMBALL, B. A. & S. B. IDSO, 1983: Increasing atmospheric CO₂: Effects on crop yield, water use and climate. - *Agric. Water Management* 7: 55-72.
- LIETH, H., 1988: Starting a new term for the International Journal of Biometeorology. - *Int. J. Biometeorol.* 32: 1-10.
- MORISON, J. I. L. & R. M. GIFFORD, 1984: Plant growth and water use with limited water supply in high CO₂ concentrations. - I. Leaf area, water use and transpiration. - *Aust. J. Plant Physiol.* 11: 361-374.
- NIJS, I., IMPENS, I. & T. BEHAEGHE, 1988: Effects of rising carbon dioxide concentration on gas exchange and growth of perennial ryegrass. - *Photosynthetica* 22: 44-50.
- NIJS, I., IMPENS, I. & T. BEHAEGHE, 1989: Effects of different CO₂ environments on the photosynthesis-yield relationship and the carbon and water balance of a white clover (*Trifolium repens* L. cv. Lanca) sward. - *J. Exp. Bot.* 40, No. 212: 353-359.

- OVERDIECK, D., BOSSEMEYER, D. & H. LIETH, 1984: Long term effects of an increased CO₂ concentration level on terrestrial plants in model-ecosystems. - I. Phytomass production and competition of *Trifolium repens* L. and *Lolium perenne* L. - *Progress in Biometeorology* 3: 344-352.
- OVERDIECK, D. & D. BOSSEMEYER, 1985: Langzeiteffekte eines erhöhten CO₂-Angebotes auf den CO₂-Gaswechsel eines Modell-Ökosystems. - *Angew. Bot.* 59: 179-198.
- OVERDIECK, D. & M. FORSTREUTER, 1987: Langzeit-Effekte eines erhöhten CO₂-Angebotes bei Rotklee-Weisswängelgemeinschaften. - *Verh. Ges. Ökol.* XVI: 197-206.
- OVERDIECK, D., 1989: The effects of preindustrial and predicted future atmospheric CO₂ concentration on *Lyonia mariana* L. D. Don. - *Functional Ecology* 3: 569-576.
- OVERDIECK, D. & M. FORSTREUTER, 1991: Carbon dioxide effects on vegetation. - In: ESSER, G. & D. OVERDIECK, (eds.): *Modern Ecology: Basic and Applied Aspects*. - Elsevier, Amsterdam: p. 623-647.
- OVERDIECK, D., 1993: Erhöhte CO₂-Konzentration und Wachstum junger Buchen (*Fagus sylvatica*). - *Verh. Ges. Ökol.* 22: 431-438.
- REITER, R., SLADKOVIC, R., KANTER, H. J. & K. MUNZERT, 1990: Atmospheric carbon dioxide concentration, Garmisch-Partenkirchen. - In: BODEN, T. A., KANCIRUK, P. & M. P. FARRELL, (eds): *Trends '90, A compendium of data on global change*. - Carbon Dioxide Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA, ORNL/CDIAC-36: p. 78-79.
- STRAIN, B. R., 1985: Physiological and ecological controls on carbon sequestering in terrestrial ecosystems. - *Bio-geochemistry* 1: 219-232.
- STRAIN, B. R. & J. D. CURE, (eds.), 1985: Direct effects of increasing carbon dioxide on vegetation. - Durham, N.C., US DOE/ER-0238: 286 pp.
- THONING, K. W., TANS, P. & W. D. KOMHYR, 1990: Atmospheric carbon dioxide concentration, Mauna Loa. - In: BODEN, T. A., KANCIRUK, P. & M. P. FARRELL, (eds): *Trends '90, A compendium of data on global change*. - Carbon Dioxide Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA, ORNL/CDIAC-36: 20-21.
- TISSUE, D. T. & W. C. OECHEL, 1987: Response of *Eriophorum vaginatum* to elevated CO₂ and temperature in the Alaskan tundra. - *Ecology* 68: 401-410.
- WARRICK, R. A., BARROW, E. M. & T. M. L. WIGLEY, 1990: The greenhouse effect and its implications for the European Community. - COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, Report EUR 12707 EN, Brussels: 30 p.
- ZANGERL, A. R. & F. A. BAZZAZ, 1984: The response of plants to elevated CO₂. - II. Competitive interactions among annuals plants under varying light and nutrients. - *Oecologia* 62: 412-417.

Adresse

Dr. Manfred Forstreuter, Technische Universität Berlin, Institut für Ökologie, Fachgebiet: Ökologie der Gehölze, Königin-Luise-Straße 22, D-14195 Berlin.