



Universität Hamburg

DER FORSCHUNG | DER LEHRE | DER BILDUNG



Fachbereich Biologie



**Einflüsse von erhöhtem CO₂ und Trockenstress auf
Physiologie und Anatomie
von *Populus x canescens* (AITON)
und *Fagus sylvatica* (L.)**

Dissertation

Zur Erlangung der Würde des Doktors der Naturwissenschaften des Fachbereichs
Biologie, der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften, der
Universität Hamburg

vorgelegt von Marlen Helbig
aus Wismar

Hamburg, 2012



Die vorliegende Arbeit wurde in der Zeit vom 01. Juli 2009 bis 20. Juni 2012, unter Anleitung von Herrn Prof. Dr. Jörg Fromm in der Abteilung Holzbiologie, am Zentrum für Holzwirtschaft der Universität Hamburg durchgeführt.

I.	Inhaltsverzeichnis	3
II.	Abkürzungsverzeichnis.....	7
III.	Zusammenfassung.....	8
IV.	Literaturverzeichnis.....	156
V.	Anhang	
VI.	Danksagung	

I. Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung

1.1. Organismus und Umwelt; Interaktionen im globalen Klimawandel	9
1.2. Auswirkungen von Trockenstress und erhöhtem Kohlendioxidgehalt der Luft auf junge Pappeln und Buchen	11
1.3. Einflüsse der Klimabedingungen auf die Photosyntheseleistung und die Holzbildung	13
1.4. Zielsetzung der Arbeit	14

2. Material und Methoden

2.1. Material	15
2.1.1 Pflanzenmaterial und Versuchsbedingungen im Gewächshaus	15
2.1.2 Chemikalien, Fixierlösungen, Farbstoffe, Düngerstoffe und Pestizide	19
2.1.3 Technische Geräte	21
2.2. Methoden	22
2.2.1 Phänotypisierung und Ernte der Versuchspflanzen 2010 und 2011	22
2.2.2 Pflanzenphysiologische Methoden	24
2.2.2.1 Regulierung des Trockenstress und des Kohlendioxidgehaltes in Klimakammern im Gewächshaus	24
2.2.2.2 <i>In vivo</i> Messungen zum Gaswechsel im Gewächshaus	27
2.2.2.3 <i>In vivo</i> Messungen der Chlorophyllfluoreszenz an <i>Populus x canescens</i>	31
2.2.2.4 <i>In vivo</i> Messungen des Chlorophyllgehaltes in Blättern	35
2.2.1.5 Digitale Erfassung von Blattflächen	36
2.2.2.6 Verwendung von Dendrometern zur Erfassung des Dickenwachstums	38
2.2.3 Lichtmikroskopische Methoden	40
2.2.3.1 Fixierung von Pflanzenproben zur lichtmikroskopischen Untersuchung	40
2.2.3.2 Schnitttechniken für Holz- und Blattmaterial	42
2.2.3.3 Färbemethoden zur Darstellung von Holz- und Blattgeweben	43
2.2.3.4 Digitale Messungen zur Holzanatomie	44
2.2.4 Elementanalyse durch Pyrolyse (C/N- Gehalt)	45

3. Ergebnisse

3.1. Phänotypisierung von <i>Populus x canescens</i> nach Abschluss der CO₂- Begasung 2010	47
3.2. Phänotypisierung von <i>Populus x canescens</i> und <i>Fagus sylvatica</i> nach Abschluss der CO₂- Begasung 2011	52
3.2.1 <i>P. canescens</i> 2011	52
3.2.2 <i>F. sylvatica</i> 2011	58
3.3. Saisonale Messungen an <i>Populus x canescens</i> im Gewächshaus 2010	62
3.3.1 Auswirkung von Trockenstress und CO ₂ auf Gaswechsel und Chlorophyllgehalt	
3.3.1.1 Gaswechsel im saisonalen Verlauf 2010	63
3.3.1.2 Chlorophyllgehalt im saisonalen Verlauf 2010	65
3.3.2. Zunahme des Stammdurchmessers	68
3.3.3 Dendrometerschwankungen im Bezug zum Trockenstress 2010	70
3.4. Saisonale Messungen an <i>Populus x canescens</i> und <i>Fagus sylvatica</i> im Gewächshaus 2011	73
3.4.1 Auswirkung von Trockenstress und CO ₂ auf Gaswechsel und Chlorophyllgehalt	
3.4.1.1 Gaswechsel von <i>P. canescens</i> im saisonalen Verlauf 2011	74
3.4.1.2 Gaswechsel von <i>F. sylvatica</i> im saisonalen Verlauf 2011	79
3.4.1.3 Chlorophyllgehalt von <i>P. canescens</i> im saisonalen Verlauf 2011	84
3.4.1.3.1 Source- Blätter	84
3.4.1.3.2 Sink- Blätter	86
3.4.1.4 Chlorophyllgehalt von <i>F. sylvatica</i> im saisonalen Verlauf 2011	88
3.4.1.4.1 Source- Blätter	88
3.4.1.4.2 Sink- Blätter	90

3.4.2 Chlorophyllfluoreszenz bei <i>P. canescens</i>	92
3.4.2.1 Gesamtwertebetrachtung	94
3.4.2.2 Unterscheidung der Messbereiche	99
3.4.3 Digitale Erfassung der Blattflächen von <i>P. canescens</i> und <i>F. sylvatica</i> 2011	100
3.4.4 Blattseneszenz bei Trockenstress von <i>P. canescens</i>	101
3.4.5 Zunahme des Stammdurchmessers bei <i>P. canescens</i>	105
3.4.6 Dendrometerschwankungen im Bezug zum Trockenstress 2011	106
3.5. Lichtmikroskopische Auswertung von <i>Populus x canescens</i> 2010	110
3.5.1 Quantitativer Holzzuwachs, digitale Messungen zur Jahrringbreite und der Markausdehnung	110
3.5.2 Relative Gefäßanzahl und rel. Gefäßgrößen von <i>P. canescens</i>	112
3.5.3 Messungen zur Rohdichte von <i>P. canescens</i>	116
3.6. Lichtmikroskopische Auswertung von <i>Populus x canescens</i> 2011	117
3.6.1 Quantitativer Holzzuwachs und digitale Messungen zur Jahrringbreite und der Markausdehnung	117
3.6.2 Relative Gefäßanzahl und rel. Gefäßgrößen von <i>P. canescens</i>	119
3.6.3 Messungen zur Rohdichte von <i>P. canescens</i>	122
3.6.4 Analysen zur Blattmorphologie an Source- Blättern	123
3.7. Lichtmikroskopische Auswertung von <i>Fagus sylvatica</i> 2011	126
3.7.1 Quantitativer Holzzuwachs und digitale Messungen zur Jahrringbreite und der Markausdehnung	126
3.7.2 Analysen zur Blattmorphologie an Source- Blättern	127
3.8. Elementanalyse durch Pyrolyse (C/N- Verhältnis)	131

4. Diskussion

4.1. Zusammenfassung der Ergebnisse	136
4.2. Zielsetzung der Arbeit	151
4.2.1 Welche Einflüsse beschreiben sich für die veränderten Klimabedingungen auf makroskopischer und mikroskopischer Ebene?	
4.2.2 Hat ein erhöhter Kohlendioxidgehalt der Luft einen signifikanten Einfluss auf die Folgen einer eingeschränkten Wasserzufuhr?	
4.2.3 Inwiefern passt sich die Physiologie den Versuchsbedingungen an?	
4.2.4 Ist eine artübergreifende Anpassung junger Bäume auf diese Klimaveränderung zu beschreiben?	
4.2.5 Wie wirkt sich eine Beschneidung der Versuchsbäume auf die Ergebnisse aus und ist eine Annäherung an natürliche Wachstumsbedingungen erstrebenswert?	
4.3. Die Reaktion des Organismus auf seine Umwelt	155

V. Anhang

V.I Tabellen zur Ergebnisdarstellung	i
V.I.I Gaswechsel	i
V.I.II Dendrometer	iv
V.I.III IMAGING- PAM	v
V.I.IV Blattmorphologie	vi
V.II Klimadaten Gewächshaus Bergedorf 2010 und 2011	vii
V.III Wetterdaten Hamburg- Bergedorf 2010 und 2011	xv
V.IV Begriffsdefinitionen für IMAGING- PAM	xx
V.I.V Gießpläne für <i>P. canescens</i> und <i>F. sylvatica</i> 2010 und 2011	xxii

II. Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
bzw.	beziehungsweise
ca.	<i>circa</i>
C_i	intrazellulärer CO ₂ - Gehalt
C_c	CO ₂ - Gehalt der Chloroplasten
d	Tag
d.h.	das heißt
etc.	<i>et cetera</i>
FG	Frischgewicht
<i>F. sylvatica</i>	<i>Fagus sylvatica</i>
g_s	stomatäre Leitfähigkeit
g_m	Leitfähigkeit im Mesophyll
h	Stunde
HT	Haupttrieb, Hauptspross
l.d.R	In der Regel
l	Liter
min	Minute
ml	Milliliter
<i>P. canescens</i>	<i>Populus x canescens</i>
rel.	relative
ST	Seitentrieb, Seitenspross
Ø	Durchmesser
Tab.	Tabelle
TS	Trockenstress
u.a.	unter Anderem
Vgl.	Vergleich
z.B.	zum Beispiel
%	Prozent

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt den Einfluss von erhöhtem CO₂ und Trockenstress auf physiologischer und anatomischer Ebene von jungen Bäumen.

Die als Modelorganismen verwendeten jungen Pappeln und Buchen wurden in Klimakammern im Gewächshaus kontrollierten Versuchsbedingungen ausgesetzt. Die künstliche Erhöhung des Kohlendioxidgehaltes der Luft und die eingeschränkte Wasserzufuhr wurden in 2 Versuchsjahren unabhängig voneinander durchgeführt.

Zusammenfassend sollte für beide Versuchsjahre gezeigt werden, welchen Einfluss der erhöhte CO₂- Gehalt der Luft und der Trockenstress jeweils auf die Versuchspflanzen haben konnte. Zusätzlich konnte ein Effekt des CO₂ auf gleichzeitig wirkenden Trockenstress nachgewiesen werden. Diese Versuchsvariationen beziehen sich sowohl bei Pappel, als auch bei Buche auf eine Kontrollvariation (normaler CO₂- Gehalt, normale Wasserzufuhr).

Für alle Versuche sind übergreifend die klimatischen Bedingungen (des Gewächshauses und der lokalen Bedingungen am Standort in Bergedorf) aufgezeichnet und verglichen worden. Anhand dieser Daten konnte gezeigt werden, dass alle durchgeführten Versuche einzig durch den CO₂- Gehalt der Kammern und der Wasserzufuhr klimatisch beeinflusst wurden.

Diese vollständige Abschirmung vom Ökosystem lässt einen Bezug der Ergebnisse zur Pflanze zu, ohne weitere Interaktionen berücksichtigen zu müssen (z.B. Windgeschwindigkeit). Dies muss im Vergleich der Ergebnisse zur aktuellen Forschung berücksichtigt werden.

1. Einleitung

1.1 Organismus und Umwelt; Interaktionen im globalen Klimawandel

Der globale Klimawandel wirft Fragen auf, deren Beantwortung nur dann möglich ist, wenn sich Teilergebnisse auf andere Anwendungsgebiete beziehen lassen. Zusammenhänge sind umfassend zu begreifen und zu beschreiben und Interaktionen von Umwelt und Organismus werden nicht nur als Reaktionen wahrgenommen. Die Anpassung von Lebewesen an eine sich verändernde Umwelt ist immer ein fester Bestandteil der Erdgeschichte gewesen.

Warum reagiert eine Pflanze so und nicht anders auf einen Umweltreiz? Wie wirkt sich diese Reaktion wiederum auf ihre Umwelt aus? Und was kann man schlussfolgernd aus dieser Interaktion für andere Reize, Stressfaktoren und Umwelteinflüsse beschreiben? Dabei werden mit jeder Antwort weitere Fragen möglich und eine vollständige Erfassung der gesamten Situation immer komplexer.

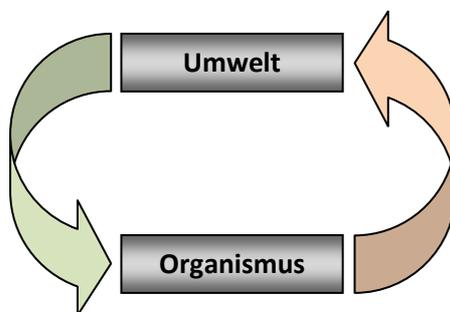


Abb. 1.1: Aktion und Reaktion von Organismen auf ihre Umwelt

Die Vorhersagen von Klimamodellen dienen weniger der genauen Beschreibung einzutreffender Ereignisse, sondern vielmehr der Identifizierung von Interaktionen (FRIEND, 2010). Rückblicke auf die botanische Evolution zeigen, dass die CO_2 -Aufnahmerate im Gaswechsel der Photosynthese, sowie die stomatäre Leitfähigkeit sich empfindlich auf eine Veränderung der Gaszusammensetzung der Luft adaptiert haben (Leakey, Lau, 2012). Die frühen Landpflanzen der Erdgeschichte entwickelten sich in einer Atmosphäre mit sehr hohem Kohlendioxidgehalt (1.500- 3.000 ppm). Funde fossiler Überreste geben Hinweise auf die Morphologie der Blätter und somit auf mögliche Photosyntheseleistungen.

Anhand dieser Funde konnte erklärt werden, wie durch den hohen CO_2 -Gehalt der Luft riesige grüne Blätter wachsen konnten, die über verstärkte stomatäre Leitfähigkeit und erhöhte Transpiration gekühlt und die zu jener Zeit auf der Erdoberfläche vorherrschende Strahlung tolerieren konnten (BRODRIBB *et al.*, 2010; OSBORNE *et al.*, 2004). Szenarien zeigen weiter, dass ein Absinken der CO_2 -Konzentration der Luft in den Bereichen über 1.000 ppm keine sprunghaften Veränderungen verursacht haben. Für Werte unter 1.000 ppm und den modernen Landpflanzen ist dies nicht gültig.

Die Annahme, dass der Sättigungsgrad für die Photosynthese früher Landpflanzen wesentlich höher lag als 1.000 ppm, wirft die Frage auf, bei welcher Gaszusammensetzung der Luft die modernen Landpflanzen ein Maximum ihrer Photosyntheseleistung erreicht haben werden (LEAKEY, LAU, 2012).

Ergebnisse vergangener Forschungen zeigen auch, dass der Selektionsdruck für die Adaption an einen erhöhten atmosphärischen Kohlendioxidgehalt vielfach auch eine Anpassung an den Gaswechsel in Bezug zur Transpiration hatte. Diese Selektion wird jedoch nicht als genetisch bedingt bewertet, da physiologische Adaptionen an veränderte Umweltbedingungen signifikanter sind, als durch Evolution hervorgegangen (HOFFMANN *et al.*, 2011). Der Anstieg des atmosphärischen Kohlendioxidgehaltes ist global einheitlich. Das bedeutet, dass eine Anpassung von Populationen nicht auf einzelne Arten beschränkt sein wird, wohingegen Umweltveränderungen, die lokal begrenzt auftreten, Arten hervorbringen, die genetisch an ihren Standort angepasst sind. Somit liegt, bezogen auf CO₂, kein genetischer Selektionsdruck einer Art zur Behauptung ihres Besiedlungsgebietes vor (LEAKEY, LAU, 2012).

Die Erhöhung des atmosphärischen Kohlendioxidgehaltes ist mit einer Stimulierung der Photosyntheserate verknüpft, welche die Biomasseproduktion verstärkt (FITTER and HAY, 2001; BARRON- GAFFORD *et al.*, 2005; UDDLING *et al.*, 2008). Diese Entwicklungen können dramatische Folgen auf das Grundwasser und die Bodenfeuchteverhältnisse haben, die einen Trockenstress der Pflanzen bedingen.

Die vorliegende Arbeit bezieht sich auf diese beiden Teilaspekte des Klimawandels, erhöhter CO₂- Gehalt der Luft und Trockenstress.

Da sich der Klimawandel jedoch nicht nur auf die atmosphärische Zusammensetzung bezieht, sondern auch Veränderungen in der Temperatur und der Niederschläge zu erwarten sind, sind lokal bedingte Umweltumstellungen, die zu abiotischem Stress führen können, ebenso wahrscheinlich, wie der beschriebene genetische Selektionsdruck einzelner Arten (DONOVAN *et al.*, 2011).

Industriell hergestellte Treibhausgase werden als Verursacher für Strahlungsanomalien auf der Erdoberfläche angesehen. Kohlendioxid spielt als Treibhausgas dabei eine tragende Rolle, da es als natürliche C₁- Verbindung in fast allen biologischen Prozessen vorkommt. Seit 1958 können zuverlässig Daten zur Zusammensetzung der Atmosphäre gemessen und zusammen mit Eiskernbohrungen ein Profil für den Gehalt an Kohlendioxid der Luft für vergangene Klimaperioden erstellt werden. Die vorindustrielle CO₂- Konzentration der Luft betrug 280 ppm (10⁻⁶) und stieg seitdem bis 2012 auf 387 ppm an (Quelle: *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), Washington DC/USA). Der jährliche Anstieg der vergangenen 30 Jahre von etwa 1,66 ppm lässt bei gleichbleibender Entwicklung eine Verdopplung der heutigen Konzentration in ca. 230 Jahren erwarten.

Die 1985 erstmals beschriebene Auffälligkeit in der Ozonschicht über den Polarregionen und die damit zusammenhängende weitergehende Erforschung der Erdatmosphäre haben ergeben, dass die Kenntnisse über die Entstehung und die Folgen der Zerstörung der Ozonschicht auf politischer Ebene global Konsequenzen erfordern.

Im Klimaprotokoll von Montreal 1987 konnten Verwendungsbeschränkungen für Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) beschlossen werden. Bereits nach wenigen Jahren zeigten sich positive Tendenzen für die Regenerierung der Ozonschicht. Das aktuell auslaufende Kyoto-Protokoll stellt die internationale Staatengemeinschaft der Vereinten Nationen erneut vor große Aufgaben.

Die Erhöhung des atmosphärischen Kohlendioxidgehaltes bedingt unter anderem die Verstärkung des globalen Treibhauseffektes, welcher wiederum eine Erhöhung der Oberflächentemperatur der Erde verursacht. Seit Beginn der Industrialisierung ist die mittlere Jahrestemperatur in Mitteleuropa bereits um 1,5°C angestiegen. Bei einer Verdopplung des CO₂-Gehaltes der Luft bedeuten diese Einflüsse eine Erhöhung der Landtemperatur von bis zu 3,3°C (CAO *et al.* 2010). Die dadurch zu erwartenden lokalen Trockenzeiten in bis *dato* niederschlagsreichen Regionen werden sich auf die Biodiversität der Organismen auswirken.

Eine atmosphärisch bedingte eingeschränkte Wasserzufuhr führt bei Pflanzen zu Trockenstress, der sich in Kombination mit der Veränderung der Gaszusammensetzung der Luft auf das Wachstum und die Entwicklung auswirkt.

Diese Schlussfolgerungen weisen darauf hin, dass vorliegenden Ergebnisse, bezogen auf die Wahl der Versuchsbedingungen und Modelorganismen, mit Verknüpfung mehrerer abiotischer Stressfaktoren für andere Arten und Gattungen variieren können. Auch muss bedacht werden, dass kontrollierte Versuchsbedingungen in Klimakammern den Kreislauf der Interaktion von Umwelt und Organismus unterbrechen.

1.2 Auswirkungen von Trockenstress und erhöhtem Kohlendioxidgehalt der Luft auf junge Pappeln und Buchen

Die Versuche dieser Arbeit beziehen sich auf junge Bäume (2-jährig), die in kontrollierten Bedingungen in Klimakammern im Gewächshaus wachsen konnten. Dabei wurden nur die Monate berücksichtigt, die entscheidend für die Holzbildung sind. Von der Blattentwicklung im Frühjahr (April), bis zum Ende der Holzbildungsperiode im Herbst (September) wurden die jungen Bäume den beschriebenen Klimaveränderungen ausgesetzt. Das Alter der Bäume spielt dabei eine wichtige Rolle. Zum Einen muss bei diesen Versuchen Rücksicht auf die Handhabung mit den Versuchsorganismen genommen werden, da sie in ihrer Gesamtheit erfasst und beeinflusst werden. Und zum Anderen werden für junge Bäume schnellere und signifikantere Anpassungen prognostiziert.



Abb. 1.2: (A) Darstellung des Gewächshauses des Betriebsgeländes der Universität Hamburg/Bergedorf, Abteilung Holzwirtschaft im Frühjahr 2010; die Klimakammern der saisonalen Versuche im Gewächshaus sind identisch aufgebaut (B/C), sodass nur der künstlich erhöhte Kohlendioxidgehalt der Luft, die eingeschränkte Wasserzufuhr und die einfallende Sonnenstrahlung einen variablen Einfluss auf die Pflanzenentwicklung haben konnte.

Die Balsampappel *Populus trichocarpa* ist die erste Baumart, dessen Genom im Rahmen des *Populus Genome Project* molekularbiologisch entschlüsselt werden konnte (TUSKAN *et al.*, 2006). Somit stellen die Pappelarten (*Populus*, L.) eine Ressource für die Wissenschaft dar, die sich interdisziplinär über viele Teilbereiche der Biologie, Ökonomie und der Klimaforschung erstreckt.

Die Graupappel *Populus x canescens*, die in der vorliegenden Arbeit als Modellorganismus zur Verfügung stand, ist eine natürlich vorkommende trockenolerante Hybride aus Silber (*P. alba*)- und Zitterpappel (*P. tremula*), die auch in norddeutschen Auwäldern zu finden ist.

Der globale Klimawandel, mit Veränderungen der Atmosphäre und den Folgen in Bezug auf erhöhte Strahlungsintensitäten auf der Erdoberfläche, wird in den kommenden Jahrzehnten auch zu Verschiebungen in den Klimazonen führen. Extreme Wetterereignisse wie Trocken- und Regenzeiten werden außerhalb ihrer bekannten Perioden in Erscheinung treten und lokal einen Einfluss auf die Pflanzenwelt haben. So ist bekannt, dass eine Erhöhung des atmosphärischen CO₂- Gehaltes die Photosyntheserate stimuliert (GUNDERSON & WULLSCHLEGER, 1994). Das dieser Effekt in Kombination mit physiologischem Stress jedoch nicht immer einen positiven Effekt auf die Pflanze zeigt, wird vielfach in Zusammenhang mit Temperatureinflüssen und Wassermangel prognostiziert. Pflanzen unter erhöhtem CO₂ tendieren zur Maximierung ihrer Ressourcennutzung.

Der erhöhte Kohlendioxidgehalt der Luft wirkt sich positiv auf die Biomassebildung aus, hingegen bedingt konstanter Wassermangel eine Reduktion der Pflanzengröße. Die Erkenntnisse darüber, inwieweit beide Faktoren signifikant Einfluss auf die Holzbildung nehmen, sind unvollständig. Für die Stieleiche (*Quercus robur*) ist bekannt, dass junge Pflanzen, die unter erhöhtem CO₂ wachsen konnten, eine größere Gefäßdichte zeigen. Diese Gefäße sind im Vergleich zur Kontrolle auch vergrößert, was eine Verringerung der Rohdichte zur Folge hat (ATKINSON und TAYLOR, 1996; HACKE *et al.*, 2001; WAGNER *et al.*, 1998).

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich damit, ob und wie eine eingeschränkte Wasserzufuhr und dem darauf folgendem Trockenstress für junge Pappeln und Buchen Einfluss auf die durch erhöhtes CO₂ stimulierte Photosyntheseleistung und die Holzbildung nimmt.

1.3 Einflüsse der Klimabedingungen auf die Photosyntheseleistung und die Holzbildung

Die Netto- Reaktionsgleichung der oxygenen Photosynthese lautet wie folgt:



Eine Veränderung der Reaktionsedukte Kohlendioxid und Wasser wird folglich einen Einfluss auf die Reaktionsprodukte Glucose und Sauerstoff haben. Diese Gleichung soll beschreibend für die vorliegende Arbeit den Zusammenhang aus Klimawandel (Edukt- bezogen) und Holz- bzw. Biomassebildung (Produkt- bezogen) erklären. Wie zuvor beschrieben, hat eine veränderte Gaszusammensetzung der Luft Einfluss auf die Morphologie der Pflanzen, indem atmosphärisches CO₂ u.a. Einfluss auf die Blattgröße nimmt. Die Erhöhung des Kohlenstoffs als Reaktionsedukt wirkt sich positiv auf die Biomasse und somit auf die Photosyntheseleistung aus. Wird der Pflanze additiv ein Reaktionsedukt verwehrt, wird das den positiven Effekt des CO₂ beeinflussen.

Was dieser Einfluss einer eingeschränkten Wasserzufuhr auf makroskopischer und mikroskopischer Ebene für junge Pappeln und Buchen bedeutet, wird einen Einblick auf die zu erwartende Variabilität der Veränderungen im Zuge des Klimawandels geben können. Die Vermutung, dass ein veränderter Kohlendioxidgehalt der Luft Pflanzen gegenüber Klimaveränderungen sensibler werden lässt, ist auch auf Trockenstress zu beziehen. So ist bekannt, dass bei eingeschränkter Wasserzufuhr die stomatare Leitfähigkeit und auch die Transpiration der Blätter herabgesetzt werden (BOBICH *et al.*, 2010, FIELD *et al.*, 1995). Die Wasserlimitierung als Eduktminimierung für die Photosynthese wird sich demnach nicht nur auf die Biomasse auswirken, sondern auch auf physiologischer Ebene in Reaktionsabläufe eingreifen. Die Stomata können zur Tageszeit länger geschlossen bleiben, ohne dass die Netto-Photosyntheserate sich ändert. Dies bedingt eine Reduzierung der Transpiration. Eine Reduzierte Transpiration durch erhöhtes CO₂ wirkt jedoch der Blattflächenvergrößerung entgegen.

Inwieweit sich die Effekte des erhöhten CO₂ und des Trockenstress, als Gegenspieler für die Veränderungen der Biomasse auch in der Physiologie entgegenwirken, soll anhand zweier Saisonversuche, mit jeweils erhöhtem Kohlendioxidgehalt der Luft und eingeschränkter Wasserzufuhr gezeigt werden. Dazu werden Messungen zum Gaswechsel durchgeführt, mit zeitnahen Untersuchungen zum Chlorophyllgehalt der Blätter. Analysen zur Chlorophyllfluoreszenz und lichtmikroskopische Untersuchungen der Blattmorphologie werden als Bestandteile dieser Arbeit Antworten darauf geben können, wie sich Veränderungen auf zellulärer Ebene physiologisch auswirken und umgekehrt.

Auswirkungen von Trockenstress auf die Holzanatomie sind bekannt. Die Anzahl der Holzgefäße nimmt zu, deren Größe hingegen ab (AREND & FROMM, 2007). Dies sind ebenfalls Folgen der herabgesetzten Transpiration und des verminderten Wasserpotentials in den Gefäßen. Die veränderte Gaszusammensetzung der Luft innerhalb einer Saison hat Auswirkungen auf die Holzbildung und die Gefäßanatomie. Inwieweit sich die Bäume im Verlauf einer Holzbildungssaison an die Klimabedingungen im Gewächshaus anpassen, ist unklar.

Wie bereits erwähnt, werden Veränderungen im Klimawandel lokal in der Diversität der Arten zu beobachten sein. Strategien zur Vermeidung von Schäden durch Trockenstress sind bekannt. So sind ein verstärktes Einrollen und Abwerfen der Blätter, eine Veränderte Aktivität der Stomata und ein verändertes Wurzelwachstum zu erwarten (TURNER, 1979).

Dass eine lokale Veränderung der Wasserzufuhr bezogen auf Blattseneszenz eine primäre Reaktion bedeutet, konnte ebenfalls bereits beschrieben werden (TSCHAPLINSKY *et al.*, 1997). Die vorliegende Arbeit wird zusätzlich Hinweise geben, wie sich diese Anpassungen bei verschiedenen Baumarten, Pappel und Buche, in unterschiedlichen Baumabschnitten entwickeln.

1.4 Zielsetzung der Arbeit

Der Aufbau und die Durchführung der Versuche im Gewächshaus kann auf folgende Fragen eine Antwort geben:

- 1) Welche Einflüsse beschreiben sich für die veränderten Klimabedingungen auf makroskopischer und mikroskopischer Ebene?
- 2) Hat ein erhöhter Kohlendioxidgehalt der Luft einen signifikanten Einfluss auf die Folgen einer eingeschränkten Wasserzufuhr?
- 3) Inwiefern passt sich die Physiologie den Versuchsbedingungen an ?
- 4) Ist eine artübergreifende Anpassung junger Bäume auf diese Klimaveränderung zu beschreiben?
- 5) Wie wirkt sich eine Beschneidung der Versuchsbäume auf die Ergebnisse aus und ist eine Annäherung an natürliche Wachstumsbedingungen erstrebenswert?

Zahlreiche Versuchsvariationen zum Thema Klimawandel belegen, dass künftige Umweltveränderungen einen konkreten Einfluss auf heimische Bäume haben werden. Die Kombination eines erhöhten CO₂- Gehaltes der Luft und einer eingeschränkten Wasserzufuhr soll in diesem Projekt belegen, dass eine Folgenabschätzung für den Klimawandel nur dann möglich ist, wenn lokal bedingte Klimaveränderungen in die Szenarien mit eingebunden werden.

2. Material und Methoden

2.1 Material

2.1.1 Pflanzenmaterial und Versuchsbedingungen im Gewächshaus

Gewächshaus und Klimakammern in Bergedorf

Bei Rückfragen zur technischen Anlage: O. Rühmann, Tel. +49(40) 73962-251

Geographische Lage: 53°30'18" N; 10°11'59" O; 28 m üNN

Klimadaten der Kammern s. Anhang.

Bezugsquelle Pflanzenmaterial

Hans Reinke GBR, Hans-Günther und Niels Reinke,
Pinneberger Straße 80, 25462 Rellingen/Deutschland
Geographische Lage: 53°38'54" N; 9°51'49" O; 11 m üNN

Gartenzentrale Appel GmbH, Peter Melchior,
Brandschneise 2, 64295 Darmstadt/Deutschland
Geographische Lage: 53°38'54" N; 9°51'49" O; 98 m üNN

2010:

Populus x canescens: geliefert am 22.04.2010, 1jährige Stecklinge, umgetopft in 2 Liter Langtopf (Höhe: 17,4 cm, Durchmesser: 16,8 cm)

2011:

Populus x canescens: geliefert am 18.03.2010, 1jährige Stecklinge, umgetopft in 3 Liter Langtopf (Höhe: 19,2 cm, Durchmesser: 17 cm)

Fagus sylvatica: geliefert am 04.03.2010, 1jährig Stecklinge (Restbestand, 2011 2jährig); umgetopft in 3 Liter Langtopf (Höhe: 19,2 cm, Durchmesser: 17 cm)

Verwendete Substrate für Stecklinge in Langtöpfen

Kultursubstrat TKS-1

Floragard Vertriebs GmbH für Gartenbau, Gerhard- Stalling- Str. 7,
26135 Oldenburg/ Deutschland)

Informationen des Herstellers:

Zur Aussaat, zum Stecken und Pikieren von Gemüse- und Zierpflanzen in Trays, Zapfencontainern und anderen Anzuchtgefäßen sowie zum Topfen von salzempfindlichen Pflanzen.

Art und Herkunft der Ausgangsstoffe:

Gemisch aus wenig bis mäßig zersetztem Hochmoortorf (H2-H4/H3-H5), NPK- Dünger und Spurenelementdünger, Füllmenge/Liefermenge: 225 Liter

Salzgehalt: 0,8 g/l, pH- Wert (CaCl_2): 5,6

Verfügbare Nährstoffe: 140 mg N- Stickstoff (CaCl_2), 80 mg P_2O_5 - Phosphat (CAL), 190 mg K_2O - Kaliumoxid (CAL)

Versuchsbedingungen im Gewächshaus

Die äußeren Bedingungen für die Versuchspflanzen sind den Wetter- und Klimadaten für die jeweilige Saison im Anhang zu entnehmen.

In den Kammern wurden Raumfeuchte und Raumtemperatur konstant gehalten und unterlagen dabei nur leichten Schwankungen, die für die Messungen nicht relevant gewesen sind.

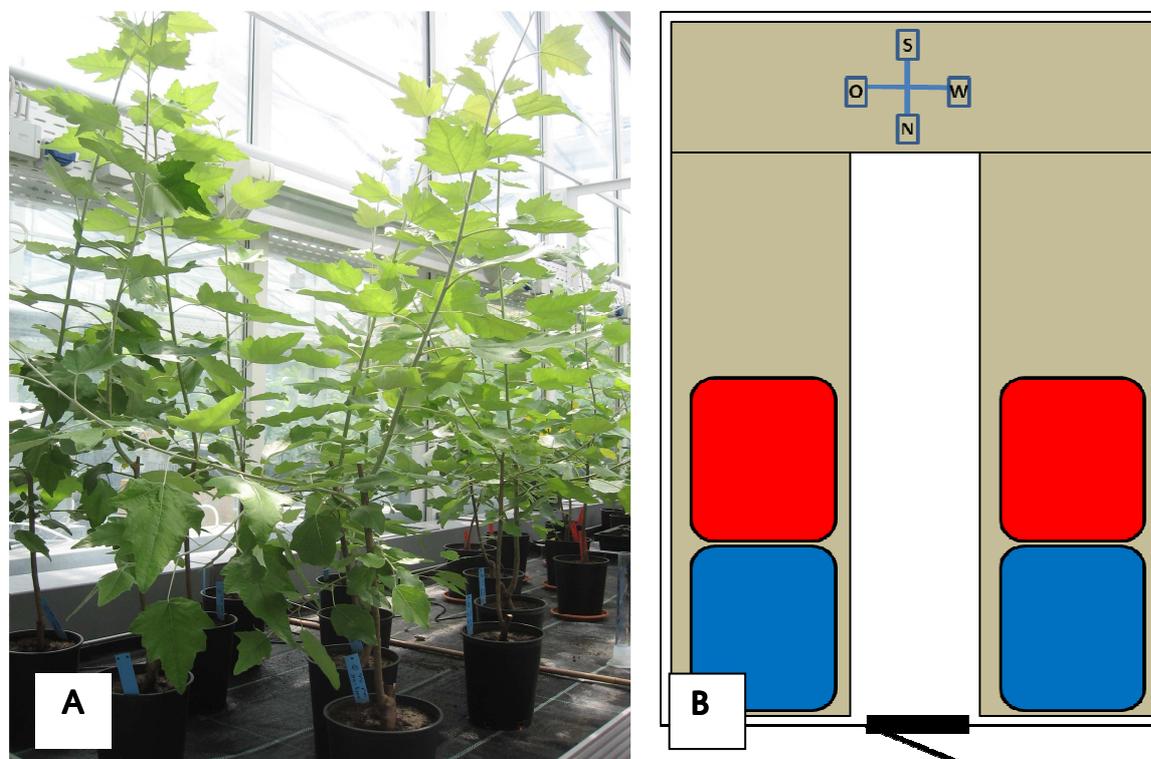


Abb. 2.1: Darstellungen zur Aufteilung der Versuchspflanzen im Gewächshaus 2010 und 2011; (A) *P. canescens* (blau markiert = normale Wasserzufuhr, rot markiert = Trockenstress) auf Pflanzentisch in Klimakammer; (B) Skizze zur Aufteilung der Versuchspflanzen in den Klimakammern 2010 und 2011: in den blauen Bereichen nahe dem Eingang befanden sich Pappeln und Buchen mit normaler Wasserzufuhr, in den roten Bereichen mittig der Kammern die Versuchsvariationen im Trockenstress, Skizze gültig für Kammer 5 ($>\text{CO}_2$) und Kammer 6 (CO_2N), mit Nord- Südausrichtung der Klimakammer.

Die Standorte der Pflanzen beschränkten sich in den Kammern auf einen Bereich von 2- 4 m^2 . Dabei standen die Pflanzen einer Variation jeweils zusammen. Sie wurden einmal die Woche nach den Messungen für den Gaswechsel in ihren Positionen innerhalb dieses Standortbereiches verändert, somit konnte eine direkte Ausbildung von Licht- und Schattenblättern verhindert werden.

Auch hat die seitlich in den Kammern befindliche Lüftungsanlage der Klimakammern keinen dauerhaften Einfluss auf einzelne Pflanzen haben können.

Spritzschaden 2010

Durch eine vorbeugende Spritzung beider Kammern im Juli 2010 traten Spritzschäden an mehreren Pappeln auf. Die ölhaltige Flüssigkeit hat auf den Blattoberflächen der Pappeln vereinzelt zu Verbrennungen geführt. Es wurde folglich darauf geachtet nicht in Bereichen zu messen, die großflächig von diesen Verbrennungen betroffen waren. Ein versuchsübergreifender und signifikant schädlicher Einfluss der Spritzschäden konnte nicht beschrieben werden.

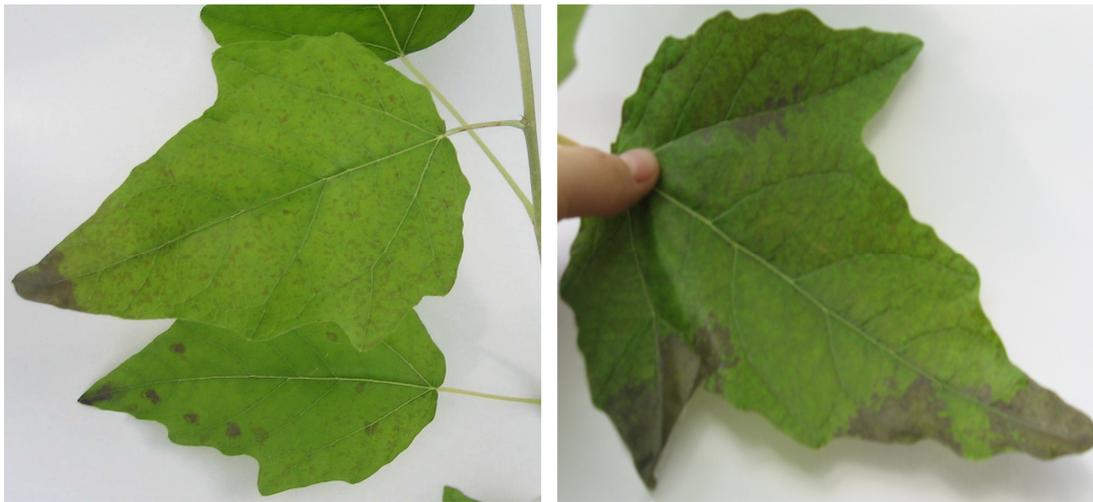


Abb. 2.2: Darstellung des Spritzschadens an *Populus x canescens* 2010; betroffen sind die Stellen auf der Blattoberfläche, die zum Zeitpunkt der Spritzung die Flüssigkeit halten konnten. Das Öl der Flüssigkeit konnte sich durch auftreffende Sonneneinstrahlung stärker erhitzen und führte zu Verbrennungen der Blätter.

Schädlingsbekämpfung und Düngung in den Klimakammern

2010: *Populus x canescens* der vorliegenden Versuchsreihen nicht direkt betroffen, keine Kammerumfassende Schädlingsbekämpfung, keine direkte Düngung (keine Mangelerscheinungen)

2011: Am 23. Juli kammerumfassende Schädlingsbekämpfung: 0,05% Magister (Magister 200 SC, Fenazaquin) gegen Rote Spinne, zusätzlich Düngung von *P. canescens* mit Floranid permanent, 5g pro Topf (Herstellerangaben: N = 16, P= 7, K= 15, MgO= 2).

Schädlingsbefall 2011

In beiden Versuchskammern des Gewächshauses unterlagen in der Saison 2011 die Pappeln mit normaler Wasserzufuhr einem Spinnmilben- Befall. Nach Analyse der Schäden konnte der Schädling „Rote Spinne“ (*Panonychus spec.*) identifiziert werden, der mittels Schädlingsbekämpfung (Magister 200 SC, Fenazaquin) im Juli bekämpft werden konnte.

Die Schäden an den Pflanzen waren teilweise erheblich. Die Schädlinge haben sich vermehrt an den Sprossspitzen verteilt und dort die neu ausgebildeten Sink- Blätter befallen (s. Abb. 2.3), deren weitere Entwicklung dadurch beeinflusst wurde. Der Schaden an den Source- Blättern hatte einen merklichen Einfluss auf die Messungen des Chlorophyllgehalt und auch auf den Gaswechsel.

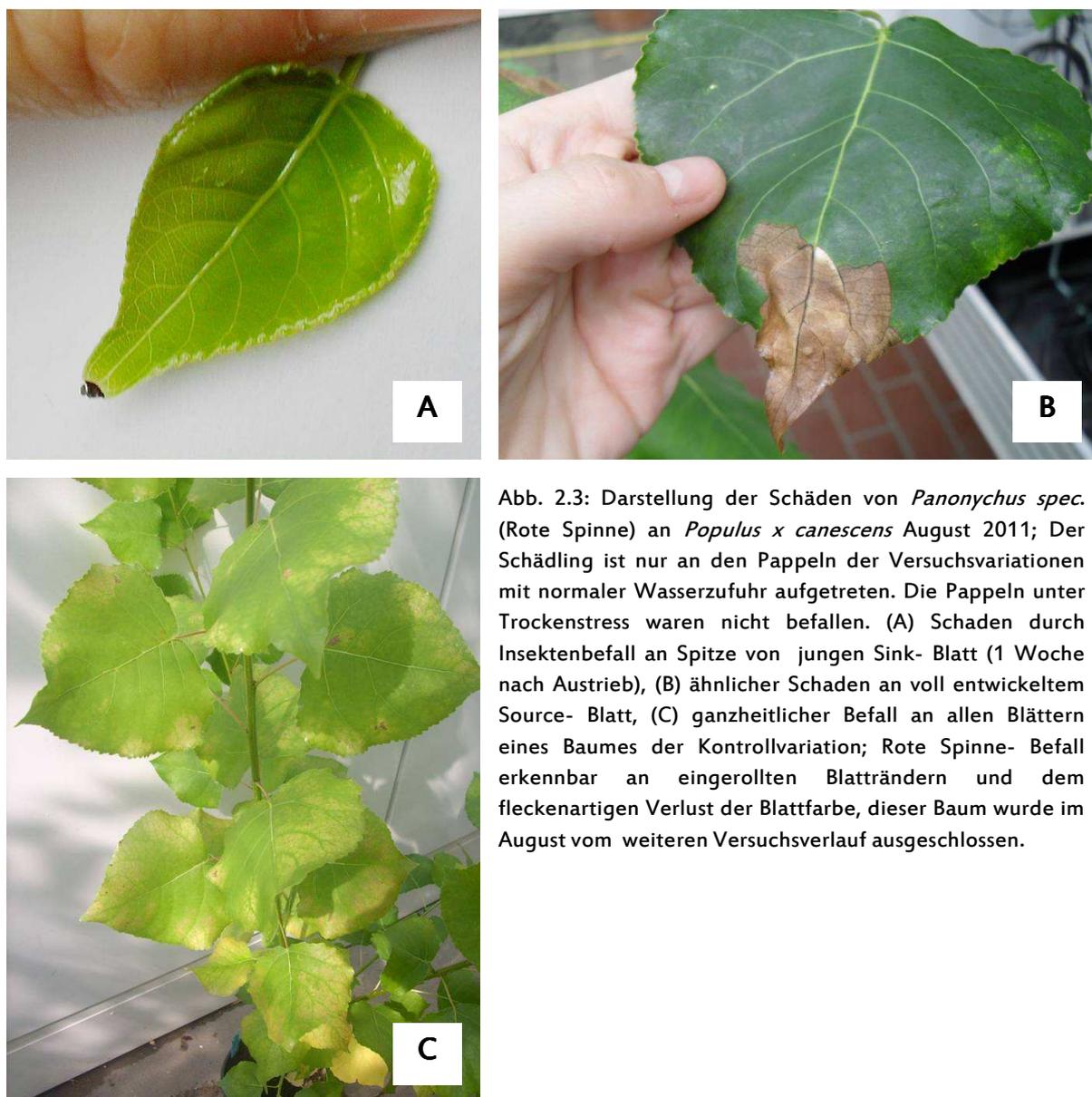


Abb. 2.3: Darstellung der Schäden von *Panonychus spec.* (Rote Spinne) an *Populus x canescens* August 2011; Der Schädling ist nur an den Pappeln der Versuchsvariationen mit normaler Wasserzufuhr aufgetreten. Die Pappeln unter Trockenstress waren nicht befallen. (A) Schaden durch Insektenbefall an Spitze von jungen Sink- Blatt (1 Woche nach Austrieb), (B) ähnlicher Schaden an voll entwickeltem Source- Blatt, (C) ganzheitlicher Befall an allen Blättern eines Baumes der Kontrollvariation; Rote Spinne- Befall erkennbar an eingerollten Blatträndern und dem fleckenartigen Verlust der Blattfarbe, dieser Baum wurde im August vom weiteren Versuchsverlauf ausgeschlossen.

Für beide Methoden musste folglich explizit darauf geachtet werden, in Blattregionen zu messen, in denen die Schäden nicht bezeichnend waren.

2.1.2 Chemikalien, Fixierlösungen, Farbstoffe, Düngestoffe und Pestizide

Das verwendete Wasser, nachfolgend als Nano H₂O bezeichnet, wurde über das Filtersystem Barnstead Nanopure (*Thermo Fisher Scientific*, Bonn/Deutschland) aufgereinigt.

Verwendete Fixierlösungen für die Lichtmikroskopie:

Glycerin (CAS: 56-81-5)

Euparal (CAS: 21368-68-3)

gepuffertes Formol (s. 2.2.3.1)

Alle verwendeten Fixierlösungen bezogen über:

Carl Roth GmbH & Co.KG, 76231 Karlsruhe/Deutschland

Verwendete Farbstoffe für die Lichtmikroskopie:

Astrablau: CAS- Nummer 61724-62-7, Basic Blue 140, Phthalocyaninfarbstoff

Safranin: C.I. 50240, Basic Red 2, Phenazinderivat

Chrysoidin: C.I. 11270, Basic Orange 2, Azofarbstoff

Neufuchsin: C.I. 42520 Basic Violet 2

ACN: Farbgemisch aus Astrablau, Chrysoidin und Neufuchsin (Verhältnis 20:1:1)

Toluidinblau O

Alle Farbstoffe bezogen über:

Chroma Gesellschaft Schmidt GmbH & Co, 48161 Münster/Deutschland

Weitere zur Puffer- und Lösungsmittelherstellung verwendeten Chemikalien bezogen über: Merck KGaA, 64293 Darmstadt/Deutschland

Alle zur Kulzer- Einbettung verwendeten Chemikalien, Einwegklingen, Formen und Halterungen wurden bezogen über: Heraeus Kulzer GmbH, 61273 Wehrheim/Deutschland

Materialien zur Probenfixierung und Einbettung in kaltpolymerisierendem Kunststoff

Zur lichtmikroskopischen Analyse der Blattmorphologie (s. 2.2.3.1) waren Dünnschnitte < 5 µm notwendig, um Gewebeabschnitte deutlich voneinander trennen zu können. Dafür wurden entnommene Laubblattproben nach Fixierung in Kunststoff eingebettet und am Rotationsmikrotom geschnitten.

Fixierlösung: 4% neutral gepuffertes Formol

Entwässerung: Ethanolreihe 30%-100% (v/v)

Präinfiltration: Kunststoff Technovit 7100 (Heraeus Kulzer GmbH, Wehrheim/Deutschland)

Infiltration: Technovit 7100 in Kombination mit Kunststoffhärter 1

Polymerisation: Technovit 7100 inklusive Härter 1 in Kombination mit Kunststoffhärter 2

Trägeraufsatz für eingebettete Probe: Technovit 7100 in Kombination mit Technovit 3040

Farbstoff Toluidinblau O

Boraxlösung (1%): 1,25 g Borax auf 125 ml Nano H₂O

Pyronin G- Lösung (1%): 0,25 g auf 25 ml Boraxlösung (1%)

Toluidinblau- Lösung (1%): 1 g auf 100 ml Boraxlösung (1%)

Toluidinblau mit Borax und Pyronin G: 100 ml Toluidinblau- Lösung auf 25 ml Pyronin G- Lösung (Verhältnis 4:1)

Farbgemisch im Anschluss gefiltert, gelagert bei 4°C.

Verwendete Dünger: Floranid Permanent,
COMPO GmbH & Co. KG, 48157 München/Deutschland

Verwendete Pestizide: Magister 200 SC, Fenazaquin (200 g/l),
Hermann Meyer KG, 25454 Rellingen /Deutschland

2.1.3 Technische Geräte

Es folgt eine Auflistung verwendeter Geräte und deren Hersteller:

- **CMS- 400:** Walz Mess- und Regeltechnik, 01090 Effeltrich/Deutschland
- **LI- 6400XT:** *Portable Photosynthesis System* LI-COR LI-6400 XT, LI-COR *Biosciences* GmbH, 61352 Bad Homburg/Deutschland
- **IMAGING- PAM:** M- Serie, Mini- Version, Walz Mess- und Regeltechnik, 91090 Effeltrich/Deutschland
- **Chlorophyllmeter:** SPAD-502 Plus, *Konica Minolta* Business Solutions Europe GmbH, 30855 Langenhagen/Deutschland
- **Dendrometer:** Durchmesserdendrometer CR-800, Ecomatik, 85221 Dachau/ Deutschland
- **Bodenfeuchtegehalt:** 5TM, ECH₂O Logger EM50, *Decagon Devices*, 81379 München /Deutschland
- **Blattflächenmessgerät:** 3000C *Portable Area Meter*; Walz Mess- und Regeltechnik, 91090 Effeltrich/Deutschland
- **Lichtmesser:** Quantum Flux, *Apogee Instruments*, Utah/USA

- Schlittenmikrotome:
 - M1:** ehem. Sartorius AG, 37022 Göttingen/Germany;
 - Hyrax S30:** Microm GmbH, 69190 Walldorf/Germany
- Rotationsmikrotom: ehem. Jung AG, Heidelberg/Deutschland

- Mikroskopie:
 - Axiocvert 25 (Invers), Axioskop 40 (Durchlicht), Discovery. V8 (Stereo), Carl Zeiss AG, 07745 Jena/Deutschland

- **Pyrolyse, C/N- Analyse der Wurzeln:** *Vario EL cube*, Elementar Analysetechnik, 63452 Hanau/Deutschland

2.2 Methoden

2.2.1 Phänotypisierung und Ernte der Versuchspflanzen 2010 und 2011

2010

Der Start der Versuchsreihe im Gewächshaus begann am 03.05.2010 mit der Erhöhung des Kohlendioxidgehaltes der Luft in Kammer 5 (770 ppm; Kontrollkammer mit normalem CO₂-Gehalt von 385 ppm). Mit der Ernte der Versuchspflanzen am 30.09.2010 enden die saisonalen Versuche an *P. canescens*. Der Beginn der eingeschränkten Wasserzufuhr und somit des einsetzenden Trockenstress für die Versuchspflanzen war am 31.05.2010 (s. 2.2.2.1).

Die Versuchspflanzen wurden alle einzeln fotografiert und vermessen. Der gesamte Baum wurde inkl. Topf gewogen und die Baumhöhe notiert. Im Anschluss wurde der Stamm auf Erdbodenhöhe abgeschnitten, die Blätter entfernt und gezählt und das Stammmaterial erneut gewogen. Sechs von zehn Wurzeln der jeweiligen Variationen wurden ausgewaschen und getrocknet und anschließend gewogen. Die verbliebenen 4 Töpfe pro Variante wurden inkl. Wurzel zur Trocknung gelagert. Durch die Trocknung der Wurzeln im Topf konnte die Wuchsform beibehalten werden und in ihrem Höhen- und Breitenumfang vermessen werden.

Die Baumstämme wurden in Abschnitte unterteilt (s. 2.2.3.2) und ca. 3 cm große Proben in 70% Ethanol für die Lichtmikroskopie konserviert. Das Blattmaterial wurde zusammen mit dem übrigen Stammmaterial bei -20°C gelagert.

Die saisonalen Versuche im Gewächshaus fanden am 30.09.2010 ihr Ende. Die Begasung mit zusätzlichem Kohlendioxid wurde beendet und die Versuchspflanzen geerntet. Verschiedene Abschnitte der Bäume wurden entsprechend ihrer weiterführenden analytischen Verwendung zur Lagerung vorbereitet.

Pappeln 2011

Der Start der Versuchsreihe im Gewächshaus begann am 11.05.2011 mit der Erhöhung des Kohlendioxidgehaltes der Luft in Kammer 5 (950 ppm; Kontrollkammer mit normalem CO₂-Gehalt von 385 ppm) und den Beobachtungen zur eingeschränkten Wasserzufuhr (Trockenstress). Mit der Ernte der Versuchspflanzen am 28.09.2011 enden die saisonalen Versuche an *P. canescens* und *F. sylvatica*.

Die Versuchspflanzen wurden alle einzeln fotografiert und vermessen. Der gesamte Baum wurde inkl. Topf gewogen und die Baumhöhe notiert. Im Anschluss wurde der Stamm auf Erdbodenhöhe geschnitten, die Blätter entfernt, gezählt und gewogen. Der Stamm wurde anschließend ohne Wurzel- und Blattwerk gewogen. Alle Wurzeln der jeweiligen Variationen verblieben im Topf zur Trocknung. Durch diese Trocknung der Wurzeln im Topf konnte die Wuchsform beibehalten werden und in ihrem Höhen- und Breitenumfang vermessen werden.

Die Baumstämme wurden an distinkten Regionen in Abschnitte unterteilt (s. 2.2.3.2), vermessen und ca. 3 cm große Proben in 70% Ethanol für die Lichtmikroskopie konserviert. Das Blattmaterial wurde zusammen mit dem übrigen Stammmaterial bei -20°C gelagert.

Verschiedenen Abschnitte der Bäume wurden entsprechend ihrer weiterführenden analytischen Verwendung zur Lagerung vorbereitet. Alle Versuchspflanzen wurden in ihrer Gesamtheit untersucht und ihr Phänotyp hinsichtlich der voran gegangenen Versuchsbedingungen analysiert.

Buchen 2011

Die saisonalen Versuche im Gewächshaus wurden am 29.09.2010 mit Beenden der Begasung mit zusätzlichem Kohlendioxid und der Ernte der die Versuchspflanzen abgeschlossen. Verschiedenen Abschnitte der Bäume wurden entsprechend ihrer weiterführenden analytischen Verwendung zur Lagerung vorbereitet, alle Versuchspflanzen in ihrer Gesamtheit untersucht und ihr Phänotyp hinsichtlich der vergangenen Versuchsbedingungen analysiert.

Der Haupttrieb der Saison 2011 wurde definiert, als jener Trieb, der an oberster Sprossspitze wachsen konnte. Buchen bilden unter bestimmten Umweltbedingungen auch seitlich des Haupttriebes neue Triebe aus (Prolepsis, Johannistrieb), die anders als bei Pappeln in der vorliegenden Arbeit nicht als Seitentrieb unterschieden wurden.

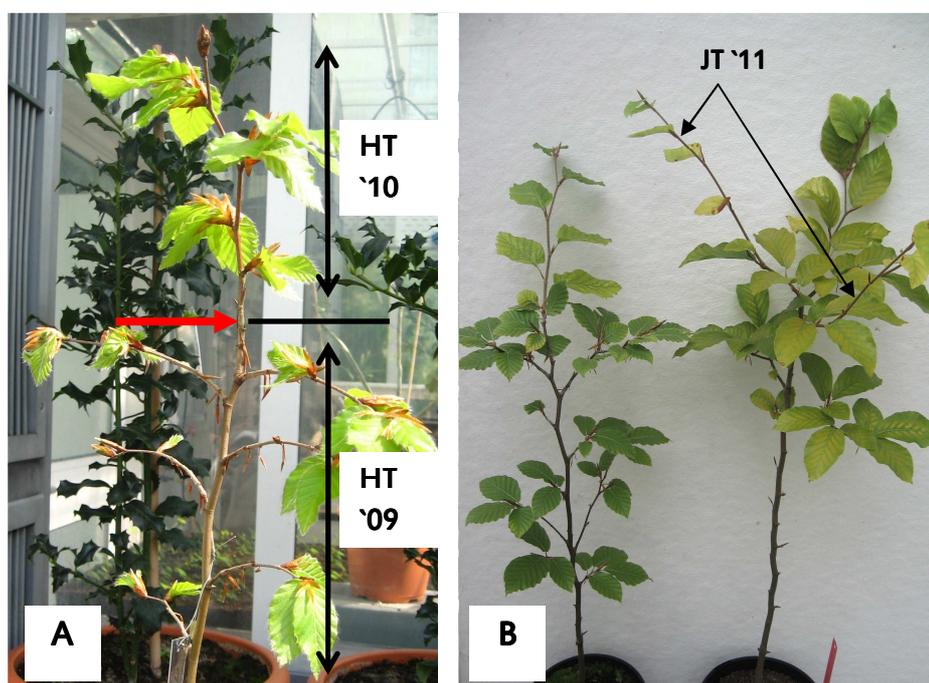


Abb. 2.4: Darstellung zur Definition von Haupt-, Seiten- und Johannstrieben an *F. sylvatica* 2011. (A) Buche in Klimakammer Mitte April 2011 mit Unterteilung des Haupttriebes (HT), Seitentriebe aus den Vorjahren mit Blattknospen und ersten Blättern. Roter Pfeil = Übergang des Haupttriebes 2009 (HT '09) auf 2010 (HT '10), erkennbar an den Narben der Knospungsschuppen. (B) Buchen zur Ernte Ende September 2011, links = Buche mit normaler Wasserzufuhr, rechts = Buche unter Trockenstress mit zwei Johannstrieben (JT)

Die Bezeichnung „Seitentrieb“ bezieht sich auf die zum Beginn der Begasung bereits vorhandenen und verholzten Triebe seitlich des Haupttriebes.

2.2.2 Pflanzenphysiologische Methoden

2.2.2.1 Regulierung des Trockenstress und des Kohlendioxidgehaltes in Klimakammern im Gewächshaus

In beiden Versuchsjahren 2010 und 2011 wurden alle Pflanzen in 4 Versuchsvariationen (mit farblicher Orientierung für die graphischen Darstellungen) unterteilt:

- 1) normal CO₂, normale Wasserzufuhr/ kein Trockenstress = Kontrollvariation
(CO₂N,H₂O_N) = dunkelblau
- 2) normal CO₂, eingeschränkte Wasserzufuhr/Trockenstress
(CO₂N,<H₂O) = gelb
- 3) erhöht CO₂, normale Wasserzufuhr/ kein Trockenstress
(>CO₂,H₂O_N) = hellblau
- 4) erhöht CO₂, eingeschränkte Wasserzufuhr/Trockenstress
(>CO₂,<H₂O) = rot

Normal CO₂ = Literaturwert für 2010 und 2011: 385 ppm
Erhöht CO₂ = 2010 verdoppelt auf 770 ppm; 2011: 950 ppm
(technisch umsetzbares Limit der Klimakammern)

Kohlendioxid- Begasung

Die Kohlendioxid- Begasung wurde über Nacht (21:00- 04:00) ausgestellt. Einzelne Nachtmessungen an Pappeln während der Saison 2010 haben gezeigt, dass nach 22 Uhr bei Dunkelheit kein Gaswechsel zu verzeichnen war (CO₂- Aufnahme konstant bei 0, Daten nicht gezeigt). Somit wurde aus ökologischen und finanziellen Gründen auf eine Freisetzung von Kohlendioxid während der Nacht verzichtet.

Trockenstress

Der als Trockenstress bezeichnete Versuchsablauf wurde wie folgt durchgeführt:

morgens zwischen 7 und 10 Uhr wurden in beiden Kammern die Pflanzen durch Mitarbeiter der Gärtnerei mit Wasser versorgt. Zu dieser Tageszeit sind strahlungs- und temperaturbedingte Reaktionen der Pflanzen nicht zu erwarten.

Die Pflanzen, die unter Trockenstress gesetzt wurden, sind dementsprechend nur dann mit Wasser versorgt worden, wenn der geringe Turgor der Blätter sie welk und weich am Blattstiel hängen ließ. Dabei wurde der Neigungswinkel der Blätter zur Stammachse beachtet (nicht vermessen).

Die betreffenden Versuchspflanzen wurden auf einen Untersetzer gestellt und nach Bedarf aus diesem mit definierter Wassermenge versorgt (2010: 60 ml, 2L Langtöpfe; 2011: 100 ml, 3L Langtöpfe)



Abb. 2.5: Darstellung zum Trockenstress an *P. canescens* 2010 und 2011; (A) Versuchspflanzen wenige Stunden nach Wasserzufuhr, mit Blättern in normalem Neigungswinkel zur Stammachse; (B) Versuchspflanzen unter Trockenstress, Blätter neigen sich durch verringerten Turgor, sind in ihrer Beschaffenheit weich und schlaff, diese äußerlichen Gegebenheiten dienten als Hinweis darauf, dass die Bäume unter Stress stehen und in Kürze eine Wasserzufuhr benötigen.

IdR. konnten die Pflanzen 2x die Woche mit Wasser versorgt werden (Gießpläne s. Anhang). Wann die Bäume ihren Trockenstress durch das Hängen der Blätter zeigten, war baumübergreifend nicht auf einzelne Pflanzen beschränkt. Das Anzeigen des Wasserbedarfs betraf immer alle Pflanzen einer Versuchsreihe.

Der Bodenfeuchtegehalt wurde saisonal über einen Sensor aufgezeichnet. Die Sensoren (5TM, ECH₂O Logger EM50) wurden ca. 4 cm vom Topfrand in die Erde eingegraben, sodass die Sensoren im unteren Drittel der Erde die Bodenfeuchte registrieren konnten.

Zeitgleich zur Bodenfeuchte wurde auch die Temperatur der Erde gemessen. Die Pflanztöpfe sind aus schwarzem Kunststoff gefertigt und es wurde vermutet, dass eine Erwärmung der Töpfe durch auftreffendes Sonnenlicht den Feuchtigkeitsgehalt im Boden beeinflussen könnte. Dies konnte nach Abschluss der Saison durch Auswertung der Daten ausgeschlossen werden (Daten nicht gezeigt).

Tab. 2.1: Werteübersicht zur Bodenfeuchte 2010 und 2011; die mittels Sensor ermittelten Daten zeigen saisonal eine mittlere Bodenfeuchte von $0,14 \text{ m}^3/\text{m}^3$ für die Pflanzen mit eingeschränkter Wasserzufuhr ($n = 2$); die Kontrolle hingegen zeigt saisonal eine mittlere Bodenfeuchte von $0,22 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ($n = 1$)

2010	$\text{CO}_2\text{N}, <\text{H}_2\text{O}$	$>\text{CO}_2, <\text{H}_2\text{O}$	$\text{CO}_2\text{N}, \text{H}_2\text{ON}$
Mai	$0,186 \pm 0,02$	$0,163 \pm 0,04$	
Juni	$0,11 \pm 0,04$	$0,067 \pm 0,01$	nicht
Juli	$0,117 \pm 0,02$	$0,128 \pm 0,04$	gemessen
August	$0,154 \pm 0,01$	$0,075 \pm 0,01$	
2011	$\text{CO}_2\text{N}, <\text{H}_2\text{O}$	$>\text{CO}_2, <\text{H}_2\text{O}$	$\text{CO}_2\text{N}, \text{H}_2\text{ON}$
Mai			$0,243 \pm 0,07$
Juni	nicht gemessen		$0,214 \pm 0,08$
Juli			$0,205 \pm 0,09$
August			$0,204 \pm 0,09$
September			$0,239 \pm 0,09$

Die Werteunterschiede für 2010 (Trockenstress) und 2011 (Kontrolle) sind signifikant. Somit kann unabhängig vom Zustand der Pflanzen nachträglich bestätigt werden, dass die beschriebene eingeschränkte Wasserzufuhr während der gesamten Saison zu einer verminderten Bodenfeuchte geführt hat und die Versuchspflanzen nachweislich weniger Wasser zur Verfügung hatten.

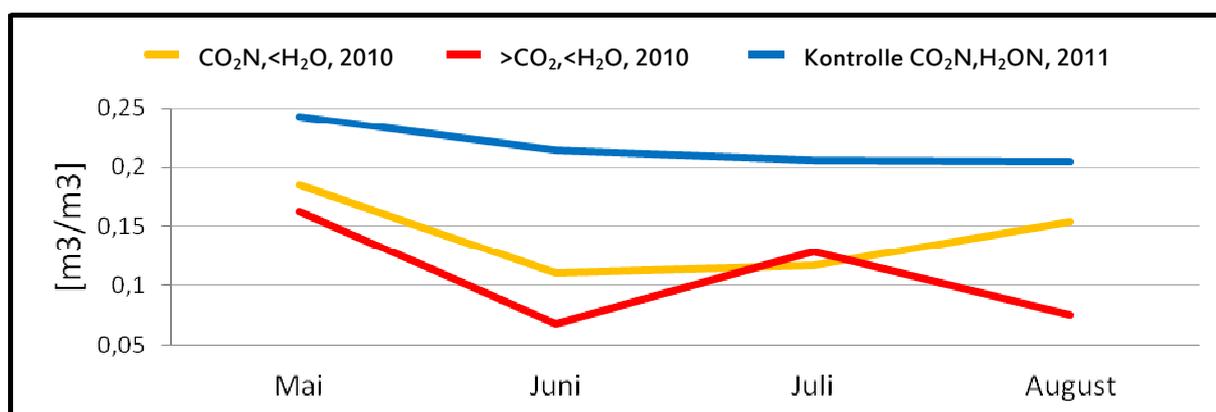


Abb. 2.6: Graphische Darstellung zur saisonalen Messung der Bodenfeuchte 2010 und 2011. die Schwankungen in den Messungen der trockengestressten Bäume begründen sich durch die Anzahl der Gießtage im Jeweiligen Monat (Gießpläne s. Anhang); farbliche Orientierung: rot/gelb = eingeschränkte Wasserzufuhr, blau = normale Wasserzufuhr; normaler CO_2 - Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO_2 - Gehalt = 770 ppm (2010)

2.2.2.2 *In vivo* Messungen zum Gaswechsel im Gewächshaus

Die saisonalen Messungen zum Gaswechsel an Pappel und Buche sind mit zwei verschiedenen Messgeräten durchgeführt worden. Im Jahr 2010 (*P. canadensis*): *Compact Minicuvette System CMS-400* (1989, Walz Mess- und Regeltechnik). Im Folgejahr 2011 (*P. canadensis*, *F. sylvatica*): *Portable Photosynthesis System LI-COR LI-6400 XT* (LI-COR Biosciences GmbH).

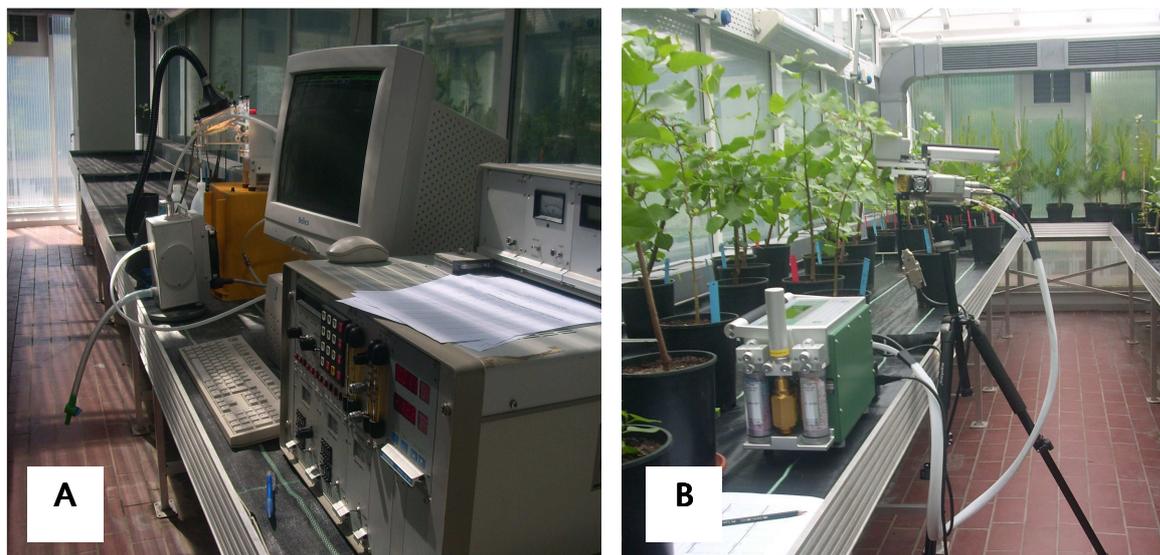


Abb. 2.7: Verwendete Messgeräte für den saisonalen Gaswechsel der Firma Walz; (A) CMS- 400; Gerät außerhalb der Versuchskammern aufgebaut, nicht portabel (2010); (B) LI-6400 XT, mobil in den jeweiligen Versuchskammern aufzubauen (2011).

Beide Geräte unterscheiden sich in ihrer Arbeitsweise nur geringfügig (geschlossene Kammersysteme mit Sollwert- Abgleich über Referenz- Gasstrommessung). Der große Unterschied lag in der Handhabung während der Messungen, dem Verlauf der Messungen und der Auswertung der Daten.

Beide Messgeräte beschreiben ein geschlossenes System, in dem in festgelegten Zeitabständen (Δt in s) wird über einen Infrarot- Gasanalysator (IRGA) der CO_2 - und H_2O - Partialdruck gemessen. Das Messblatt nimmt fortlaufend CO_2 aus der Kuvettenluft auf und gibt H_2O als Wasserdampf ab, wodurch über die Änderungsraten des Kohlenstoffs ($C_t, C_{t+1} = \text{CO}_2$ - Konzentrationen am Anfang und Ende eines Messintervalls), die effektive Luftmasse im System (V_s) und die Blattfläche die Berechnung der Netto-Photosyntheserate (A in $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) ermöglicht wird.

$$A = \frac{(C_t - C_{t+1}) \cdot V_s}{\Delta t \cdot B} \quad [\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}]$$

Der Begriff **Nettophotosyntheserate** ist deshalb zu betonen, da eine mitochondriale Freisetzung von CO_2 nicht von der photosynthetischen CO_2 - Fixierung getrennt zu betrachten ist.

Die Berechnung der effektiven Luftmasse im System V_s ist in geschlossenen Systemen einer Trägheitskomponente unterlegen.

Solange ein Messblatt in einer geschlossenen Kuvette assimiliert, muss das Gas im System erst umgewälzt werden, um überall gleichmäßig berechnet werden zu können.

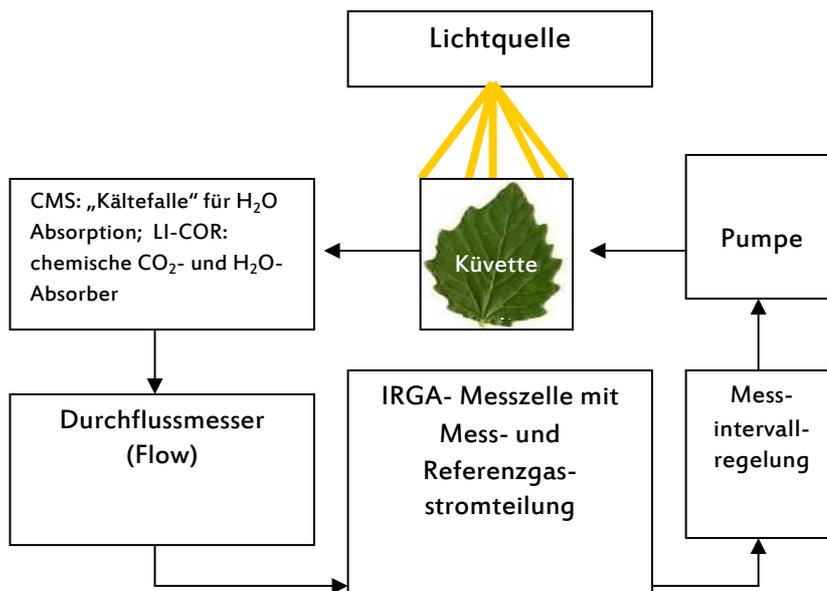


Abb. 2.8: vereinfachte Darstellung zum Prinzip einer geschlossenen Gaswechselformung.

CMS- 400

Das Gerät, bestehend aus Zentraleinheit, Messküvette, Lichtquelle und PC- Einheit, wurde außerhalb der Messkammern im Gewächshaus fest aufgebaut und die Versuchspflanzen zur Messung zum Gerät getragen. Pro Baum wurde ein Source- Blatt mittlerer Baumhöhe ausgewählt, markiert und wöchentlich neu bemessen. Kam es zum Verlust des Blattes, wurde ein neues vergleichbarer Entwicklung gewählt. Nach jeder Messung wurde der Umfang des Blattes skizziert, um eine Blattoberfläche berechnen zu können, die zur Auswertung der Messergebnisse verwendet wurde. Der Sensor zur Aufzeichnung der Blattoberfläche war beschädigt. Somit konnten die vom Gerät berechneten Werte, die diesen Messwert mit einbeziehen, nicht verwendet werden.

Das CMS- 400 versteht sich als Komponentensystem, das nach dem Baukastenprinzip zusammengesetzt werden kann. Dazu gehört primär die Zentraleinheit CMS- 400, der Temperaturregler (RSV-41, Küvetten- Temperaturregelung) und die Messkammer (GK- 0235). Die Zentraleinheit umfasst eine Datenerfassungseinheit mit Pumpensteuerung, einer Pneumatikeinheit, einem Gasanalysator (BINOS-100/4P) für die Differenzmessung (Referenz- und Probenmessung), den Gaspumpen und dem Massendurchflussmeter für Mess- und Referenzgas (elektronische Steuerung der Durchflussmengen). Zusätzlich werden die Lichtregelung und der Messgaskühler über die Zentraleinheit gesteuert.

Die Pneumatik teilt den Messgasstrom hinter der Kammer und den Referenzgasstrom nach dem Ausgleichsgefäß (gefüllt mit H₂O) auf. Ein Teil der Luftmenge wird vor dem Gasanalysator abgeblasen, der restliche Luftstrom durch ihn durch geleitet. Die Luftmengen für den Gasanalysator sollen dabei ca. 0,8 l/min betragen (*Flow*- Einstellung für Mess- und Referenzgas).

Vor dem Wechsel der Versuchsvariationen wurden zur Hintergrundmessung wiederholt Nullpunkte gesetzt (Leerlaufmessung ohne Probenblatt).

Der direkt am Gerät installierte PC konnte nach Abschluss der Messungen die Daten aus der Zentraleinheit des CMS mittels Übertragungsprogramm abrufen und speichern. Messdauer pro Blatt ca. 3-15 Minuten.

LI-COR 6400 XT

Das Gerät wurde zur Messung in der Klimakammer aufgebaut und die Versuchspflanzen in ihrer Kammer vor Ort bemessen. Pro Baum wurden 2 Messblätter (Sink, Source) ausgewählt und bemessen. Diese Messblätter wurden nicht markiert und wöchentlich wiederholt neu ausgewählt.

Die Messung der Netto- Photosyntheserate von Pflanzen wird über die CO₂- Aufnahme rate bestimmt. Dabei arbeitet dieses Gerät in einem offenen Modus, das bedeutet, dass eine Luftzufuhr kontrollierter Zusammensetzung in einer geschlossenen Kammer um das Messblatt gesetzt wird. Diese Kammer umschließt das Messblatt bzw. einen Ausschnitt dessen (2 cm²) luftdicht und verhindert äußere Einflüsse auf die Messung. Im inneren der Kammer werden stetig die Gaszusammensetzung (O₂, CO₂) und das vom Blatt transpirierte Wasser, die Temperatur der Luft in der Kammer und des Messblattes und die Intensität des gesetzten Lichtes gemessen. Somit kann für jede Messung eine definierte Umwelt bestimmt werden.

Im vorliegenden Versuchsaufbau wurde lediglich, wie im Jahr 2010, die Lichtintensität (800 μmol m²/s, LED, Wellenlänge = 670 nm) und der CO₂- Gehalt der Luft (385 ppm, 770 ppm, 950 ppm) als feste Werte gesetzt, da die Lufttemperatur und Luftfeuchte der Versuchskammern im Gewächshaus technisch von außen kontrolliert wurden und nicht variierten. Alle anderen Messwerte des Systems sind vom Hersteller vorgegeben und wurden 2011 nicht verändert.

Die Erhöhung des CO₂ für die Messungen wurde am Gerät über Einweg- CO₂- Kartuschen reguliert. Die Messung des CO₂ und der Menge an H₂O über Infrarot- Sensoren im Messkopf direkt am Blatt ermöglicht eine zeitnahe Messung. Diese Messungen werden gemittelt, da die absoluten Werte der CO₂- und H₂O- Konzentrationen über eine Referenz abgeglichen werden, um Hintergrundkonzentrationen nicht in die Berechnungen mit einzubeziehen.

Die Konzentrationen des nach Öffnen der Kammer einströmenden Kohlendioxids und der Luftfeuchte werden am Gerät über chemische Absorber kontrolliert aus dem System aufgenommen (Trocknungsmittel für H₂O: 98% CaSO₄ + 2% CoCl₂, Absorber für CO₂= Soda Lime).

Nach setzen eines Nullwertes für die Bestimmung des Hintergrunds kann in der Kammer ein Blatt zur Messung eingespannt und die Messung gestartet werden.

Die Luft kontrollierter Konzentration wird zur Messung in kontrollierter Menge und Geschwindigkeit (Flow- Einstellung für 2011: 1000 μmol) in das Gerät gepumpt. Diese wird in zwei Luftströme unterteilt: 25% für die Referenzmessung, 75% für die direkte Probenmessungen. Beide Ströme werden unabhängig voneinander über Infrarot- Sensoren vermessen. Messdauer pro Blatt ca. 1-4 Minuten.

Die gemessenen Daten verbleiben im Speicher des Gerätes und können nach Abschluss der Messungen mittels PC- Programm (*File- exchange*, LI-COR) auf einen externen PC geladen und die tabellarisch gelisteten Messungen ausgewertet werden.

Für weitere technische Informationen zu den Messgeräten wird an dieser Stelle an den technischen Support der jeweiligen Firmen verwiesen:

Walz:

Heinz Walz GmbH, Eichenring 6, Effeltrich/Deutschland; +49-(0)9133-7765-31

LI-COR:

Dr. Annika Müller

Technical Sales and Support Specialist

LI-COR *Biosciences* GmbH

Siemensstraße 25A, Bad Homburg/ Deutschland; +49-(0)6172-1717743

Tab. 2.2: Übersicht zu den technischen Einstellungen der Gaswechsel- Messgeräte 2010 und 2011. Alle hier nicht gelisteten Werte sind Werkseinstellungen und wurden demnach für die Messung im Gewächshaus nicht verändert.

techn. Einstellung	Saison 2010	Saison 2011	Anmerkung
Luftstrom (<i>Flow</i>)	1200 μmol bzw. 1,5 l/min	400 μmol	unterschiedliche Kammervolumina
CO ₂ - Referenz (Sollwert)	normal CO ₂ = 385 ppm, erhöht = 770 ppm (>CO ₂ - Luft aus begaster Kammer 5 in das Gerät gepumpt)	normal CO ₂ = 385 ppm, erhöht = 950 ppm (CO ₂ aus Gaskartuschen am Gerät gepumpt)	
Luftfeuchte (Sollwert)	ca. 50%	ca. 50%	
Lichtintensität	800 $\mu\text{mol m}^2/\text{s}$	800 $\mu\text{mol m}^2/\text{s}$; 10% blaues Licht	LED; aktinisches Licht, 670 nm
Blattmessbereich	auf gesamte Blattfläche des Messblattes bezogen (nachträglich berechnet)	2 cm ² (Werksvorgabe zur Berechnung)	unterschiedliche Kammervolumina

2.2.2.3 *In vivo* Messungen der Chlorophyllfluoreszenz an *P. canescens*

Heterogene und zweidimensionale Messungen der Photosyntheseaktivität lebender Pflanzen können Aufschluss darüber geben, inwiefern Umweltbedingungen pflanzenphysiologisch auf Reaktionsprozesse einwirken können.

Dazu wurden via IMAGING- PAM Chlorophyll Fluorometer (M- Serie, Mini- Version, Walz Mess- und Regeltechnik) *in- vivo* während der Saison an Pappeln Messungen durchgeführt. Diese Technik ermöglicht mittels *Pulse- Amplitude- Modulated Measuring Light* (PAM, aktinisches Licht) die Stimulation der Photosynthese. Durch gezielte Sättigung der Reaktionszentren im Photosystem II (PS II) ist es möglich, nach Berücksichtigung des Kautsky- Effektes, eine höchstmögliche Reaktionseffizienz zu simulieren.

Die Lichtenergie der Sonne wird vom Chlorophyll in den Chloroplasten aufgenommen und zur Wasserspaltung verwendet. Diese Abspaltung von Elektronen ist notwendig für den Ablauf der Lichtreaktion im Photosystem. Überschüssige Lichtenergie wird zum Schutz des Systems vor unkontrollierter Wasserspaltung (Radikalbildung) entweder als Wärmeenergie oder als Chlorophyllfluoreszenz abgeleitet. Beide Reaktionen konkurrieren innerhalb des Systems, wonach Messungen der Chlorophyllfluoreszenz Hinweise auf das Verhältnis von absorbiertem Licht und der photochemischen Energie der Pflanze geben. Diese Technik ist nicht invasiv und kann zeitnah unter gegebenen Versuchsbedingungen lokal im Gewächshaus durchgeführt werden.

Die saisonalen Messungen mit IMAGING- PAM stehen in einem direkten Verhältnis zur Chlorophyllkonzentration (s. 2.2.2.4).

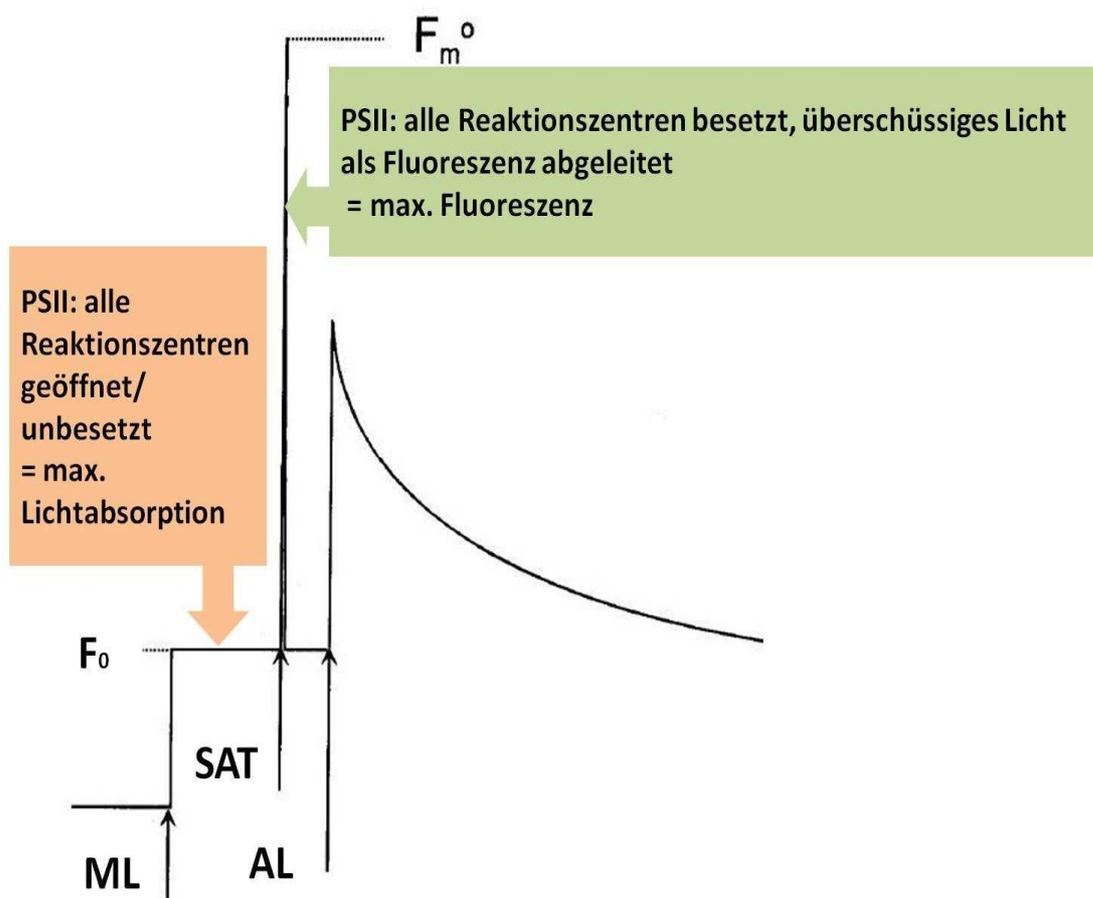


Abb. 2.9: Graphische Darstellung zur Begriffsdefinition einer Messung der Chlorophyllfluoreszenz mit IMAGING- PAM; nach Dunkeladaptation Einstellen des Messlichtes (*measuring light*, ML), Messung des Zustandes F_0 möglich; nach Setzen eines sättigenden Lichtimpulses (*saturating light pulse*, SAT) Messen der maximal möglichen Fluoreszenz (möglich durch maximal geschlossene/belegte Reaktionszentren im PSII); zur kontinuierlichen Messung der Effizienz des Photosystems und der Chlorophyllfluoreszenz ($Y(II)$ und F_m) Einstellen des aktinischen Lichtes (AL) zur Stimulierung der Photosynthese unter gleichbleibenden Bedingungen, Darstellung nach MAXWELL, JOHNSON (2000).

Zur Bestimmung der maximal möglichen Reaktionseffizienz und der Quenching- Parameter ist eine Dunkeladaptation der Pflanzen notwendig. In Abwesenheit von photosynthetisch aktivem Licht öffnen sich alle Reaktionszentren im Photosystem II ($F = F_0$), um eine maximale Lichtaufnahme zu ermöglichen. F_0 wird dabei durch schwaches rotes, nicht aktinisches Licht gemessen und als Hintergrundfluoreszenz verrechnet. Zu diesem Zeitpunkt ist die Emission von nicht- photochemischer Energie (Wärmeenergie) minimal ($q_N = NPQ = 0$). Der gesamte Baum wurde zur Dunkeladaptation für mindestens 15 min vom Licht in der Klimakammer abgeschirmt. Diese Abschirmung wurde mit einem Lichtmesser geprüft (s. Abb. 2.11 A).

Anschließend wurde das betreffende Messblatt in die Halterung des Gerätes gespannt. Durch die Dunkeladaption ist es zu Beginn der Messung möglich, die maximal mögliche Chlorophyll- Fluoreszenz (F_m) zu ermitteln. Durch das Setzen eines definierten Lichtimpulses (*Saturating Light Pulse, SAT*) werden alle durch die Abwesenheit von Licht geschlossenen und inaktiven Reaktionszentren des Photosystem II größtmöglich reaktiviert und geöffnet. Dieser Lichtimpuls ist so stark, dass die Fluoreszenz des Chlorophyll mit Hilfe einer Schutzbrille gegen blaues Licht, mit bloßem Auge sichtbar wäre. Über das LED- System des Messkopfes werden dann in bestimmten Abständen aktinische Lichtimpulse auf das Blatt gesetzt, die Photosynthese somit unter definierten und gleichbleibenden Bedingungen stimuliert und die überschüssige, vom Blatt nicht aufzunehmende Lichtenergie als Chlorophyllfluoreszenz abgegeben. Diese Energieabgabe wird vom Messkopf registriert und als Messwert gespeichert.

Die Messungen des Gerätes werden tabellarisch über ein externes PC- Programm (IMAGING- WIN) gespeichert.

Die für den Vergleich der Versuchsvariationen relevanten Daten sind:

- 1) F_m' = *maximum fluorescence yield* (max. Chlorophyllfluoreszenz)
- 2) Y_{II} = *effective PSII quantum yield* (Leistung des Photosystem II)

Berechnet nach GENTY *et al.* (1989): $Y(II) = (F_m' - F)/F_m'$; Angabe der Messwerte in Quantum Yield (0-1): 0,5 bedeutet, dass die Hälfte der zur Verfügung stehenden Reaktionszentren des PSII besetzt sind, die Hälfte der absorbierten Lichtquanten chemisch fixiert wurden.

Die andere Hälfte wird (un)reguliert als Wärmeenergie oder Chlorophyllfluoreszenz emittiert ($Y(NPQ)$, $Y(NO)$). $Y(II) + Y(NPQ) + Y(NO) = 1$, zu berechnen nach KRAMER *et al.* (2004) (s. Anhang Begriffsdefinitionen IMAGING- PAM).

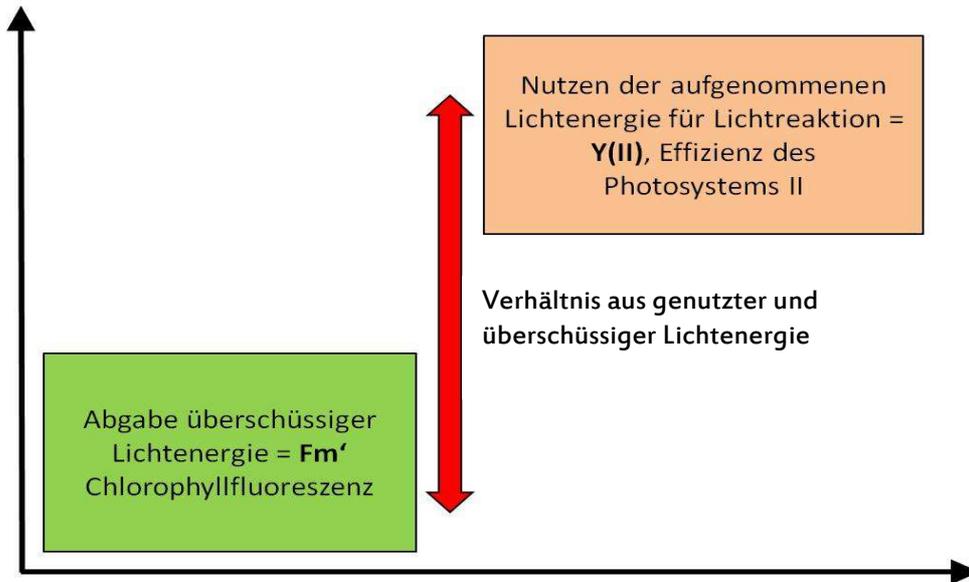


Abb. 2.10: Darstellung zur Verwendung der Werte der saisonalen Messungen mit IMAGING- PAM; die graphischen Darstellungen der Messungen wurden nach diesem Schema erstellt; die Unterteilung der beiden Wertblöcke (Fm' und $Y(II)$) lässt einen vergleichenden Blick auf deren Verhältnis zueinander zu (roter Pfeil); je größer der Abstand der Wertblöcke, desto effektiver die Nutzung der Lichtenergie der Pflanze. Nähern sich die Verhältnisse an, relativiert sich der Nutzen zugunsten der Abgabe überschüssiger Energie. Zu beachten: $Y(II)$ steht in direktem Verhältnis zur Chlorophyllkonzentration der Blätter; weniger Chlorophyll bedeutet weniger Absorption der Energie und deutlich erhöhter Abgabe der Energieüberschüsse als Fluoreszenz.

Pro Blatt wurde in drei definierten Bereichen gemessen (s. Abb. 2.11 C): Mesophyllbereiche (Mph) links und rechts angrenzend an die Mittelrippe und der Bereich der Mittelrippe (Mr).

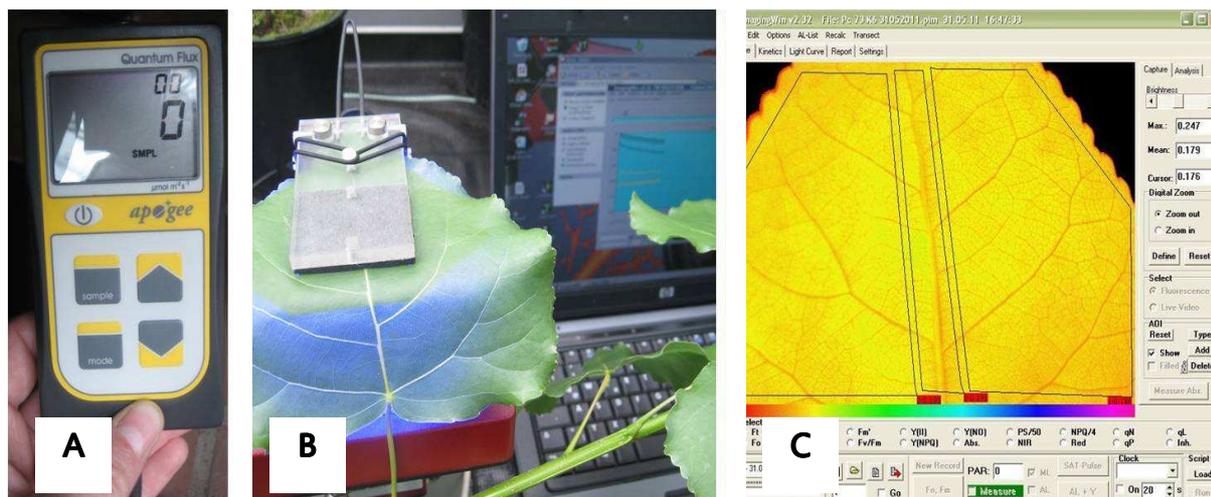


Abb. 2.11: Darstellungen zur Messung der Chlorophyllfluoreszenz von *P. canescens* 2011; (A) Überprüfen der Dunkeladaptation der Messpflanze mit einem Lichtmessgerät; (B) im Messkopf des IMAGING- PAM eingespanntes Pappelblatt (source) zum Zeitpunkt einer Messung; (C) Darstellung einer Messung am Bildschirm mit IMAGING- WIN; Mph = Mesophyllbereich, Mr = Bereich der Mittelrippe.

Nach Ermittlung der maximal möglichen Fluoreszenz (F_m) wurde alle 12 Sekunden zur Stimulierung der Photosynthese ein Lichtimpuls gesetzt und die Fluoreszenz der drei Bereiche registriert. Die Messungen wurden 10 Minuten (50 Lichtimpulse) pro Pflanze durchgeführt. Pro Versuchsvariation wurden 3 Pappeln verwendet.

Für diese drei Bereiche wurden die Messwerte F_m' und $Y(II)$ in jeweils $F_m' 1/2/3$ bzw. $Y(II) 1/2/3$ tabellarisch gespeichert.

2.2.2.4 *In vivo* Messungen des Chlorophyllgehaltes in Blättern

An photosynthetisch aktiven Blättern am lebenden Baum konnte mit Hilfe eines Chlorophyllmeters (SPAD-502 Plus) der Gehalt an Chlorophyll ermittelt werden. Dabei wird der *Chlorophyll Concentration Index* (CCI) über Messungen mit kalibrierten LED- Licht berechnet. Die Messungen sind nicht invasiv und beeinträchtigen die Pflanze nicht.

Der Index berechnet sich aus dem Verhältnis der Absorptionen von rotem und infrarotem Licht, welches über das Gerät durch das Blattgewebe geleitet wird. Die Absorptionsmaxima von Chlorophyll a und b werden zusammenfassend in einem Wellenlängenbereich von 653 nm (rotes Licht) erfasst. Die Dicke des Messblattes (max. 1,2 mm) wird in einem Wellenlängenbereich von 931 nm (infrarotes Licht) ermittelt. Das Gerät berechnet sensorisch über eine Silizium- Photodiode aus der Absorption beider Wellenlängen des emittierten Lichtes, welches nach der Absorption im Blatt vom Messkopf in elektrische Signale umgewandelt wird, eine prozentuale Transmissionsrate. Beide Transmissionsraten, die des Chlorophyll und die der Blattdicke, werden zueinander ins Verhältnis gesetzt und als Index digital vom Gerät angezeigt.

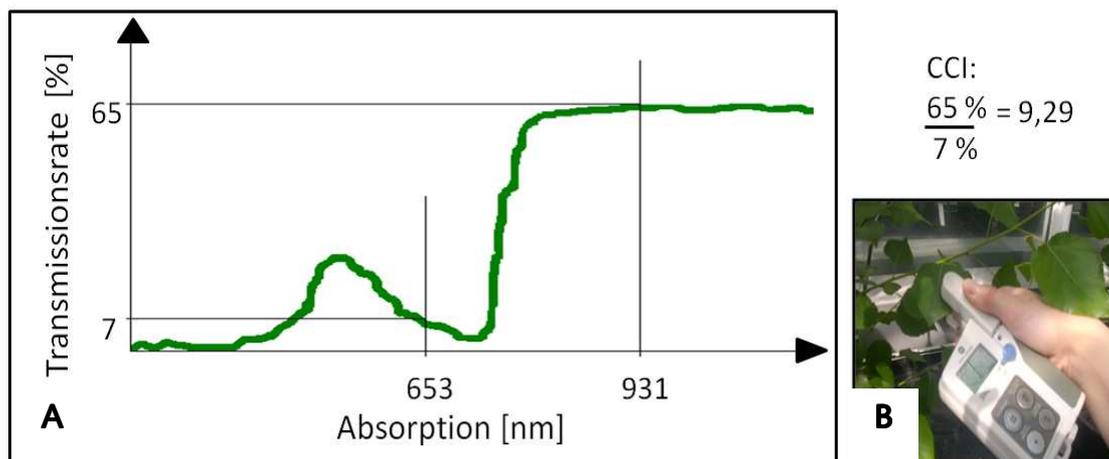


Abb. 2.12: (A) Graphische Darstellung des Absorptionsspektrums eines grünen Blattes als Beispiel zur Berechnung des CCI; die Absorptionsmaxima von Chlorophyll a/b (653 nm) und der Blattdicke (931 nm) werden durch die Umwandlung von Licht in elektrische Signale in eine Transmissionsrate umgerechnet; das Verhältnis der Transmissionsraten zueinander ergibt den *Chlorophyll Concentration Index* (CCI), der als Richtwert für den Chlorophyllgehalt in lebenden Blättern gültig ist. (nach Apogee Instruments Inc.). (B) Darstellung einer *in vivo* Messung an *P. canescens*.

Gemessen wurden wöchentlich alle Pflanzen der jeweiligen Versuchsreihe.

Im Jahr 2010 beschränkte sich die Indexerfassung auf Messungen an einem Blatt pro Baum, welches parallel als Messblatt für den Gaswechsel (s. 2.2.2.2) verwendet wurde. Diese Messblätter wurden entsprechend markiert und die Blattfläche ermittelt. Im Verlauf der Saison wurden mehrfach neue Messblätter gewählt, da diese durch natürliche Blattseneszenz verloren gingen.

2011 wurden bei Pappel und Buche jeweils >10 Blätter pro Baum gemessen, in allen Höhen und allen Ausrichtungen, Licht- und Schattenblätter wurden dabei nicht getrennt erfasst, jedoch wurde bei beiden Baumarten eine Unterteilung in Sink- und Source- Blättern vorgenommen.

2.2.2.5 Digitale Erfassung von Blattflächen

Nach Abschluss der Saison 2011 wurden die Blattflächen der zu erntenden Bäume (*P. canescens*, *F. sylvatica*) digital vermessen. Mittels Blattflächenmessgerät (LI-3000C *Portable Area Meter*; Walz Mess- und Regeltechnik) wurden im September die zur Ernte noch fest am Baum verbliebenen photosynthetisch aktiven Blätter vermessen.

Die Handhabung des Messgerätes macht es nicht möglich, die Blattflächen fehlerfrei direkt am lebenden Baum zu messen. Die Blätter waren teilweise kleiner, als der Knopf des zu ziehenden Längenmaßes. Die zeitgleiche Bewegung des Blattes durch den Messkopf und die korrekte Führung des Längenmaßes, hat es methodisch nicht möglich gemacht, die Blätter der Pappeln und der Buchen direkt am Baum zu messen.

Die zum Teil sehr großen Source- Blätter bei den Pappeln konnten nicht ohne Schäden zu erleiden durch den geschlossenen Führungsschlitz des Messkopfes geführt werden.

Um die mechanische Beeinträchtigung der Bäume und einen möglichen negativen Einfluss auf den Gaswechsel zu verhindern, wurden diese deshalb erst nach Abschluss aller saisonalen Versuche mit der Messung der Blattflächen begonnen.

Dazu wurden sie vom Baum getrennt und manuell entsprechend den Herstellerangaben durch den Messkopf des Lesegerätes bewegt. Der Messkopf wird dazu geöffnet und umschließt das Blatt ohne Druck. Im Kopf befindliche 128 LE- Dioden registrieren die durch den Kopf bewegte Blattfläche, die Länge des Blattes wird über ein außen am Messkopf befindliches Längenmaß registriert. Dieses Längenmaß muss korrekt zur Bewegung des Blattes durch den Messkopf parallel zum Gerät gezogen werden. Eine nicht korrekte Ausführung dieser ziehenden Bewegung stellt eine große Fehlerquelle dar (s. Abb. 2.13 C).

Die LE- Dioden im Messkopf teilen den Messbereich in Quadrate ein; wenn mehr als 50% eines Quadrates mit Blattfläche belegt ist, registriert das Gerät diese Fläche als Blattfläche. Sobald eine LE-Diode vom Blatt verdeckt wird, misst das Gerät 1mm^2 . Zur Berechnung: wenn 20 LE- Dioden mit einer Fläche von $20 \cdot 100\text{mm}^2$ verdeckt werden, zeigt das System eine Fläche von 20 cm^2 .

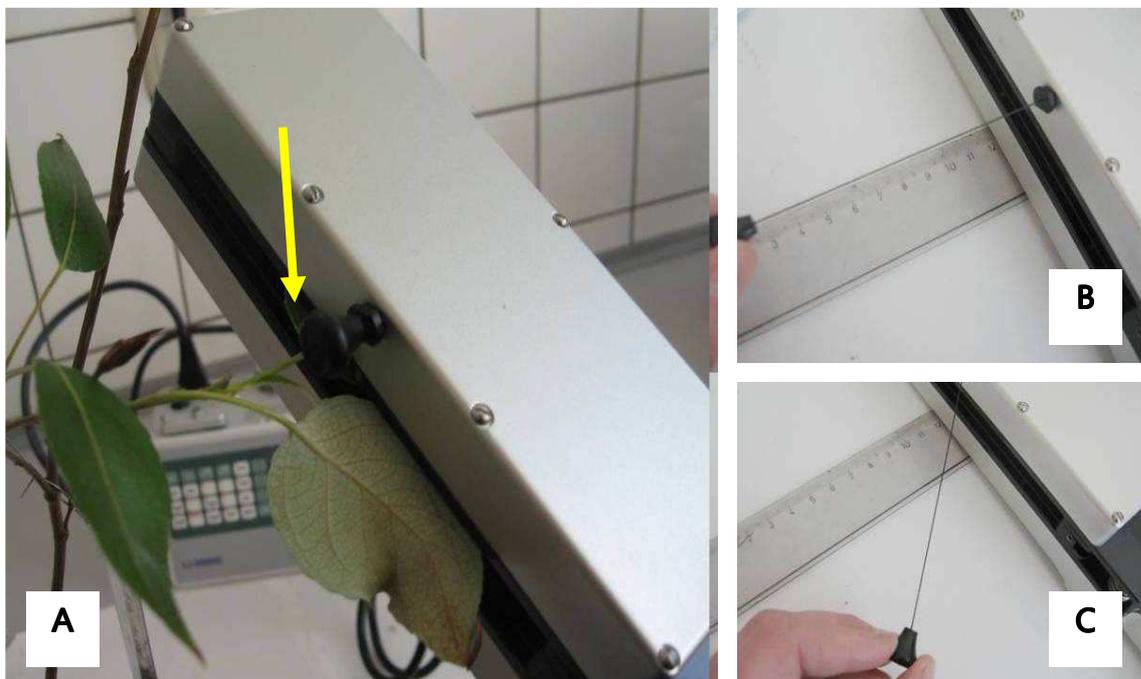


Abb. 2.13: Darstellung zur Messung mit dem Blattflächenmessgerät LI-3000C (Walz Mess- und Regeltechnik, Effeltrich/Deutschland); (A) im Messkopf eingelegtes Blatt (Pfeil), zur Messung wird zeitgleich zur Bewegung des Blattes durch den Messkopf das Längenmaß gezogen; (B) korrektes Ziehen des Längenmaß im 90° Winkel zum Messkopf; (C) fehlerhaftes Ziehen des Längenmaß; sobald der Winkel zum Messkopf nicht 90° beträgt, vergrößern sich mögliche Messfehler (Prozentsätze s. Herstellerangaben).

Pro Variante wurden 5 Bäume gewählt, bei Pappeln wurden die Seitentriebe dabei nicht berücksichtigt. Die Vermessungen der Blätter wurden summiert, somit können 5 Gesamtblattflächen (mit Standardfehler) pro Versuchsvariation verglichen werden.

2.2.2.6 Verwendung von Dendrometern zur Erfassung des Dickenwachstums

Zur kontinuierlichen Messung des Holzwachstums und der Wassergehaltsänderung im Stamm junger Pappeln wurde mit Hilfe eines Dendrometers (Durchmesserdendrometer CR-800, Ecomatik, Dachau/ Deutschland) die Änderung des Stammdurchmessers zeitlich hochauflösend aufgezeichnet. Diese nicht- invasive Messmethode ermöglicht eine Aufzeichnung der Zunahme im Dickenwachstum an einer distinkten Stelle am Stamm. Sensoren registrieren über ein Spannungsfedersystem jede Änderung im Stammdurchmesser und zeichnen diese auf einem Speichergerät (Datenlogger) auf (s. Abb. 2.14 B). Am Ende der Saison konnte das Speichergerät ausgelesen und die Daten entsprechend verarbeitet werden. Es werden Spannungen am Sensor in kalibrierbaren Abständen erfasst und als Stammumfangsänderungen (*circumference* Ci in μm) gespeichert.

An jungen Pappeln wurden im Jahr 2010 und 2011 an 2 Varianten Sensoren ca. 5 cm über dem Erdboden zur Erfassung des Durchmessers angebracht und vom Sensor alle 10 Minuten Spannungen am Stamm registriert und als Messwert im System gespeichert. Die Sensoren wurden zu Beginn der CO₂- Begasung der Klimakammern in Betrieb genommen und erst zum Ende der Saison vom Stamm entfernt.

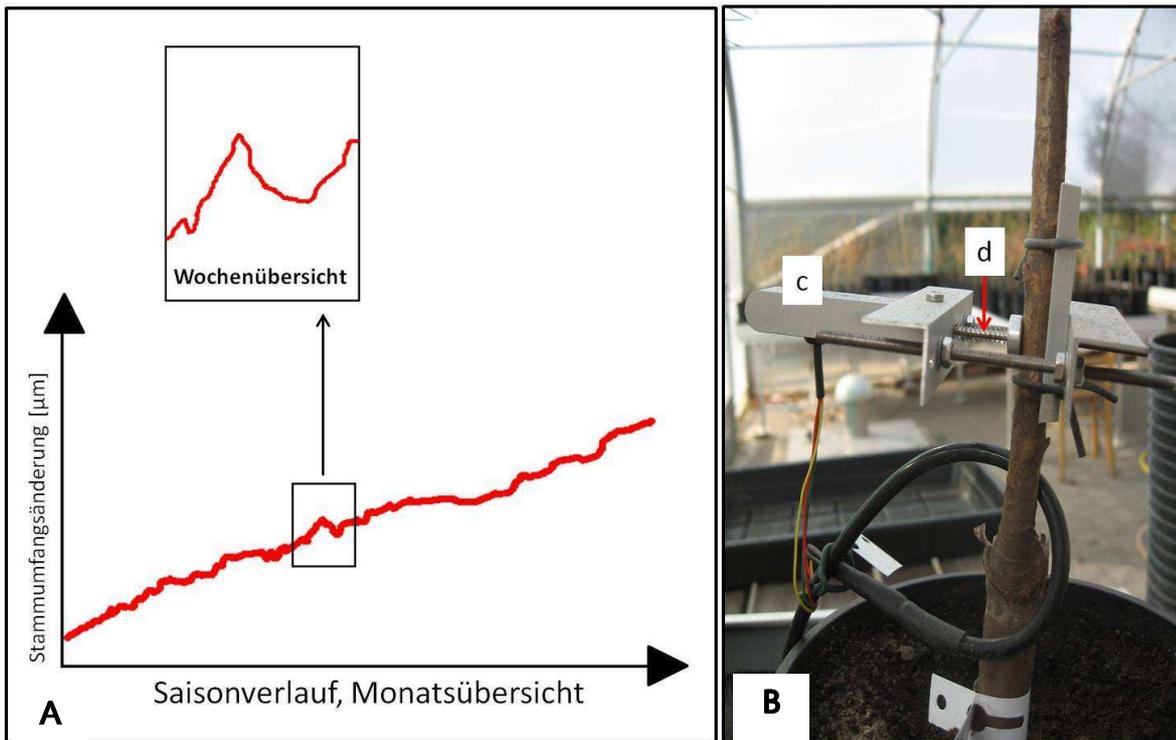


Abb. 2.14: Darstellung zur Anwendung und Verarbeitung der Datenerhebung mittels Durchmesser dendrometer; (A) Beispiel eines Datenverlaufs über mehrere Monate einer Saison mit detailliertem Blick in eine Woche der Datenaufzeichnungen, (B) Praktische Anwendung eines Messsystems an *P.canescens* 2011; (c) der Messkopf zur Datenverarbeitung zeichnet Änderungen des Stammdurchmessers auf, die mittels (d) Spannungsfedersystem registriert werden.

Zusätzlich zum Dendrometer sind Sensoren zur Registrierung der Feuchtigkeit im Boden verwendet worden. Die dort aufgezeichneten Daten dienen der Kontrolle des angewandten Trockenstress (s. 2.2.2.1). Diese Sensoren wandeln den Wert der Dielektrizitätskonstanten (ϵ) in eine Angabe zum volumetrischen Wassergehalt (*volumetric water content*, VWC) um und geben die Bodenfeuchte als Messwert in [m^3/m^3] an (TOPP *et.al.*1980).

Die Kombination beider Datensätze ermöglicht eine zeitnahe Beschreibung, wie stark der Wassergehalt im Boden einen Einfluss auf den Wassergehalt im Stamm und somit auf den Durchmesser haben konnte.

2.2.3 Lichtmikroskopische Methoden

2.2.3.1 Fixierung von Pflanzenproben zur lichtmikroskopischen Untersuchung

Methode zur Probenfixierung und Einbettung in kaltpolymerisierendem Kunststoff

Alle zur Einbettung benötigten Verbrauchsmaterialien sind über Heraeus Kulzer GmbH, Wehrheim/Deutschland bezogen worden.

Pro Versuchsvariation wurden 4 Bäume gewählt (*P. canescens*, *F. sylvatica*), von denen Mitte August von je einem Source- Blatt mittlerer Baumhöhe (keine Unterteilung in Licht- und Schattenblatt) ein ca. 1 cm² großes Stück mit einer Rasierklinge entfernt wurde.

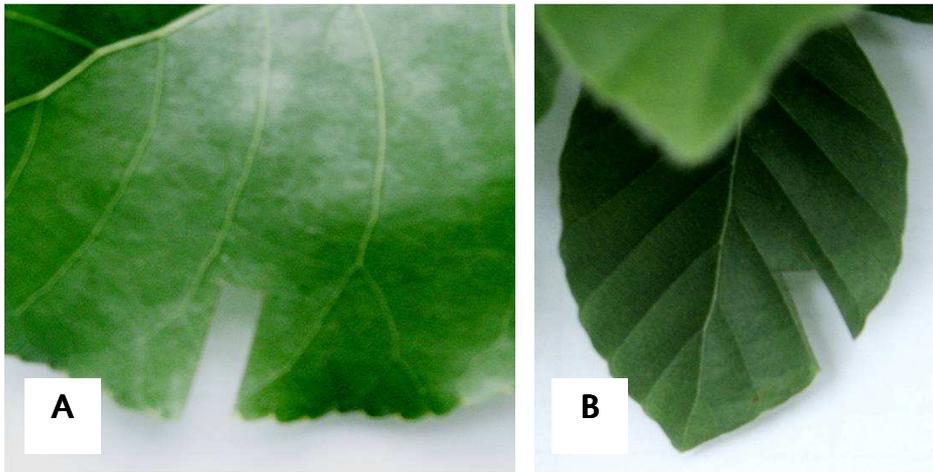


Abb. 2.15: Darstellung zur Probennahme von Blattproben zur Analyse der Morphologie an Source- Blättern 2011; (A) *P. canescens*, (B) *F. sylvatica*; es wurde bei der Entnahme darauf geachtet, dass die Blattprobe keine großen Leitgefäße enthält.

Die entnommenen Blattproben wurden direkt vor Ort in frische Fixierlösung (gepuffertes Formol, 5 ml Rollrandgläser) überführt und anschließend dunkel und kühl bis zum Absinken der Proben gelagert. Das Absinken der Blattproben versichert die vollständige Infiltration der Fixierlösung.

Der Austausch der Fixierlösung gegen Ethanol bis zur vollständigen Entwässerung, geschieht mittels aufsteigender Ethanolreihe. Dabei werden die Proben bei Raumtemperatur je 5 Minuten in 30%, 40%, 50% und 60% iger Ethanolreihe schrittweise entwässert. Danach für jeweils 10 Minuten in 70%, 80% und 90% iger Ethanolösungen und abschließend zweimal für 15 Minuten in 100% igem Ethanol.

Für die Präinfiltration der Blattproben mit Kunststoff, wird das enthaltende Ethanol schrittweise gegen Technovit 7100 (flüssig) ersetzt. Dafür werden die Proben für 10 Minuten in einem Gemisch- Verhältnis Ethanol- Technovit 7100 von 2:1 überführt. Das Gemisch- Verhältnis Ethanol- Technovit wird anschließend auf 1:1 verändert, die Präinfiltrationszeit beträgt erneut 10 Minuten. Abschließend wird das Gemisch- Verhältnis Ethanol- Technovit 7100 auf 1: 2 verändert und die Proben für 1h präinfiltriert.

Der noch verbliebene Anteil an Ethanol wird durch die Infiltration der Proben mit Kunststoff (Technovit 7100, 100 ml) in Kombination mit einem Kunststoffhärter (Härter 1, 1g) entfernt.

Der Abschluss der Infiltration ist nach mehreren Tagen (dunkle und kühle Lagerung) durch das Absinken der Proben im Gemisch zu erkennen.

Die Polymerisation des Kunststoffes wird bei Raumtemperatur durchgeführt. Der Infiltrationskunststoff inklusive Härter 1 wird mit Kunststoffhärter 2 versetzt und schnell verwendet, da die Aushärtung in wenigen Minuten bereits beginnt. In beschriftete Teflonformen wird ein Kunststoffbett vorgelegt, die Blattprobe aus dem Infiltrationskunststoff entnommen, Restflüssigkeit mittels Filterpapier entfernt und die Probe in die Teflonform gestellt. Dabei wird die spätere Schnitttechnik am Mikrotom berücksichtigt. Nach Einstellen der Blattproben wird die Teflonform mit Kunststoff aufgefüllt. Vor der Polymerisation sollten die Proben nochmals angehoben werden, damit sie vollständig umschlossen werden und nicht am Boden der Formen aufliegen (Proben- Bruchgefahr beim Arbeiten am Mikrotom). Die Polymerisation des Kunststoffes erfolgt über Nacht. Dabei erhärtet die Oberfläche in Kontakt mit der Luft nicht vollständig, was die Verbindung des Probenkunststoffes mit dem Trägerkunststoff (Technovit 3040) begünstigt.

Zum Aufsetzen der Träger wird ein Kunststoff verwendet, der Technovit 7100 mit einem Trägerkunststoff (Technovit 3040, Pulver) kombiniert. Dieser wird zähflüssig nach Bedarf angerührt und auf die Teflonform gegossen. Ein beschrifteter Träger, passend zur Teflonform, wird auf den noch zähflüssigen Kunststoff aufgesetzt. Die Aushärtung des Trägerkunststoffes ist nach 1-2h abgeschlossen.

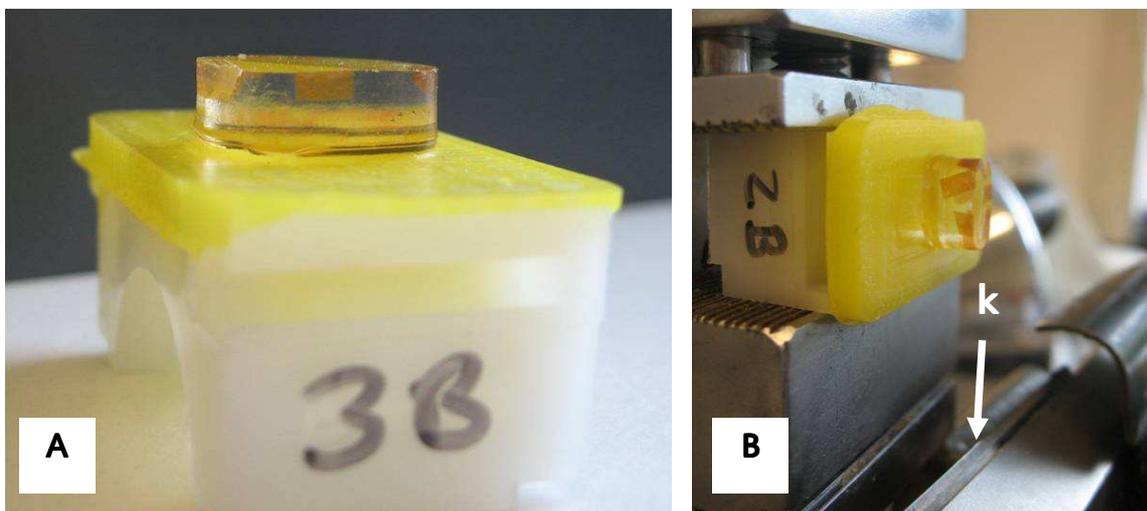


Abb. 2.16: Laubblattproben von *F. sylvatica* in Kunststoff (Kulzer), 2011; (A) Probenmaterial in durchsichtigem Kunststoff auf weißem Träger mit gelbem Trägerkunststoff, (B) im Rotationsmikrotom eingespannte Probe, die zur Herstellung von Dünnschnitten an eine Einweg- Klinge (k) geführt wird.

Der Träger mit angepasster Kunststoffprobe wird aus der Teflonform gelöst und kann sofort am Mikrotom eingespannt und die Probe geschnitten werden.

2.2.3.2 Schnitttechniken für Holz- und Blattmaterial

Schnitttechnik für Frischmaterial am Schlittenmikrotom

Zur Ernte der Bäume Ende September sind an bestimmten Bereichen (s. Abb. 2.17) 2- 5 cm große Stammstücke in 70% igem Ethanol in Rollrandgläsern konserviert und bis zur Aufbereitung für die Lichtmikroskopie bei Raumtemperatur aufbewahrt worden.

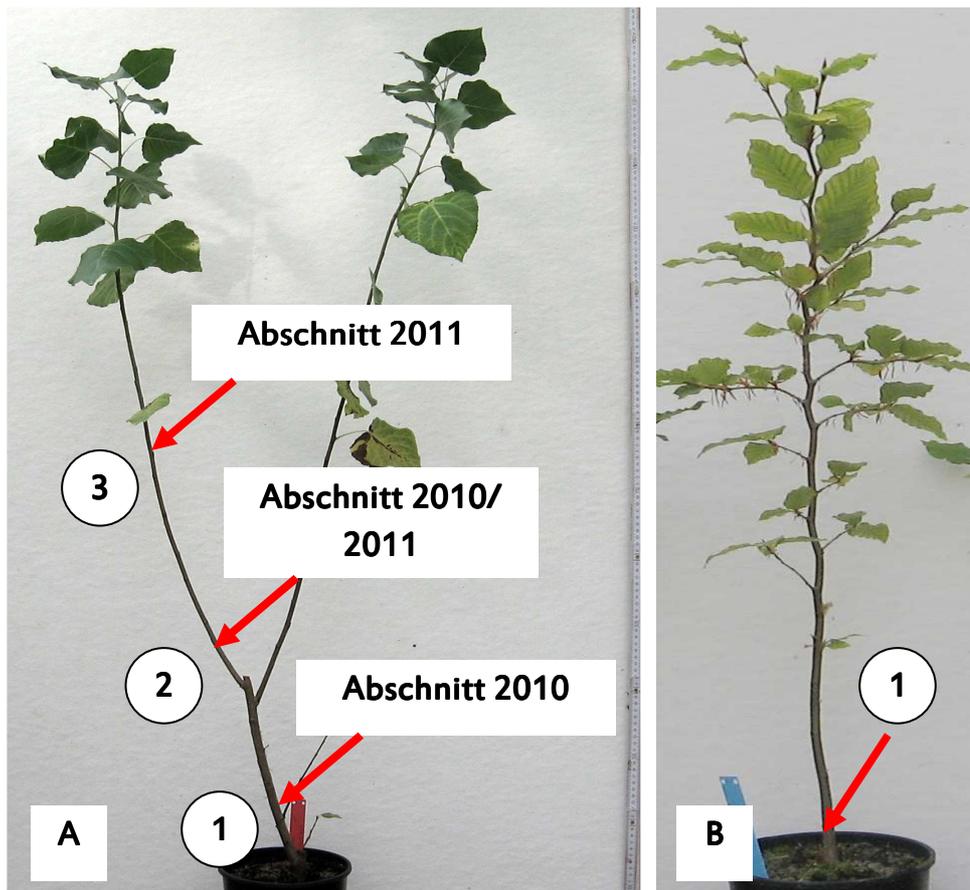


Abb. 2.17: Übersicht zur Unterteilung der Versuchsbäume in Abschnitte; (A) *P. canescens* unterteilt in jeweils 2 Abschnitte pro Jahr: 2010 in Abschnitt 1 und 2; 2011 in Abschnitt 2 und 3; Abschnitt 1 wird 5 cm über dem Topfboden definiert, Abschnitt 2 befindet sich im Haupttrieb des jeweiligen Jahres und wird 5 cm über dem Vorjahrestrieb definiert, Abschnitt 3 wird 40 cm (H_2O)/ 80 (H_2ON) cm über dem Vorjahrestrieb definiert; (B) *F. sylvatica* wird nicht in unterschiedliche Abschnitte unterteilt; alle lichtmikroskopischen Messungen werden im Abschnitt 1 gefertigt (5 cm über dem Topfboden definiert, analog zu *P. canescens*).

Zur lichtmikroskopischen Analyse der Holzproben von *P. canescens* und *F. sylvatica* wurden radiale und tangentielle Dünnschnitte (6- 20 μ m Schnittdicke) am Schlittenmikrotom angefertigt.

Bei diesen Mikrotomen wird ein Messer zur Probe geführt (vgl. Rotationsmikrotom). Die Probe wird in einer Halterung fixiert, die nach jedem Schnitt die Probe um die eingestellte Schnittdicke nach oben hebt, sodass der nachfolgende Dünnschnitt wiederum dieselbe Schnittdicke besitzt.

Die in Ethanol konservierten Holzproben werden ohne Trocknung im Mikrotom fixiert und geschnitten. Die anschließende Gewebefärbung zur Analyse der Holz Anatomie erfolgt bei Raumtemperatur.

Schnitttechnik für Kunststoffproben am Rotationsmikrotom

Beim Arbeiten mit einem Rotationsmikrotom wird die Probe an eine am Gerät installierte (Einweg-) Klinge geführt. Diese Klinsen sind speziell für das Schneiden von Kulzer- Kunststoffproben geeignet. Die Klinge kann in seinem Winkel zur Probe angepasst werden.

Verwendete Einweg- Klinsen für Kulzer- Kunststoff: *Histoknife* (Heraeus Kulzer GmbH, Wehrheim/Deutschland).

Die Schnitte wurden auf die Oberfläche von kaltem Nano H₂O überführt, wo sie sich strecken und die Blattprobe glatt im Kunststoff liegt. Nach Überführung der Schnitte auf Objektträger wurden diese kurz auf einer Wärmeplatte bei 65°C getrocknet.

Die Färbung der Blattproben erfolgte mit Toluidinblau O.

2.2.3.3 Färbemethoden zur Darstellung von Holz- und Blattgeweben

Färbung von konservierten Proben

Nach dem Schneiden der in Ethanol konservierten Holzproben sind diese entsprechend ihrer Färbung in alkoholischer oder wässriger Farblösung überführt worden.

Alkoholische Färbung mit anschließender Fixierung in Euparal

Die mittels Schlittenmikrotom angefertigten Dünnschnitte von *P. canescens* und *F. sylvatica* sind in 70% igem Ethanol in einem Färbeglas gesammelt worden. Nach Abnehmen der Flüssigkeit wurden die Dünnschnitte zunächst für 6 min in Astrablau gefärbt. Überschüssige Farbe wurde wiederholt mit 70% igem Ethanol aus den Dünnschnitten gespült. Anschließend wurden die Proben für 2 min mit Safranin gegengefärbt und überschüssige Farbe ebenfalls mit Ethanol ausgewaschen. Die gefärbten Schnitte werden für 10 min in 96% igem Ethanol infiltriert und als Dauerpräparat auf einem Objektträger in Euparal eingebettet.

Wässrige Färbung mit anschließender Fixierung in Glycerin

Die mittels Schlittenmikrotom angefertigten Dünnschnitte sind in Nano H₂O in einem Färbeglas gesammelt worden. Nach Abnehmen der Flüssigkeit wurden die Dünnschnitte für 2- 4 min in ACN (Mehrfachfärbung nach Schmitz) gefärbt und anschließend mehrfach bis zur vollständigen Ausspülung überschüssiger Farbe in Nano H₂O gewaschen. Anschließend wurden die Proben in Glycerin auf einem Objektträger eingebettet.

Färbung von fixierten Proben (Technovit) mit Toluidinblau O

Zur lichtmikroskopischen Analyse der Blattmorphologie (*P. canescens*, *F. sylvatica*) sind 2011 Blattproben in kaltpolymerisierendem Kunststoff eingebettet worden. Am Rotationsmikrotom konnten diese Proben in Schnittdicken von 1-5 µm bearbeitet werden. Zur Färbung der Blattquerschnitte wurden die Kunststoffscheiben auf dem Objektträger für 2 Minuten mit Toluidinblau O (mit Borax und Pyronin G) versetzt, die Farbe hinterher abgenommen und die Schnitte mit Nano H₂O gespült. Der Farbstoff Toluidinblau färbt pflanzliche Zellwände blau, verkorkte und verholzte Gewebe grünblau.

2.2.3.4 Digitale Messungen zur Holzanatomie

Die digitalen Messungen für Vermessungen der Holzanatomie wurden folgende Analyse- Programme verwendet:

AxioVision Rel. 4.8 (Version 4) und ZEN 2011 (ZENlite, *blue edition*), Carl Zeiss, Königsallee 9-21, 37081 Göttingen/Deutschland.

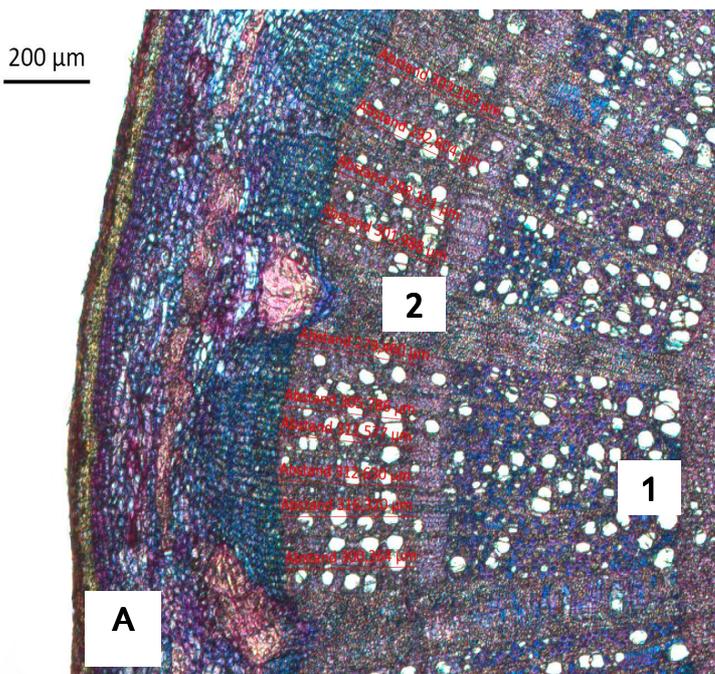
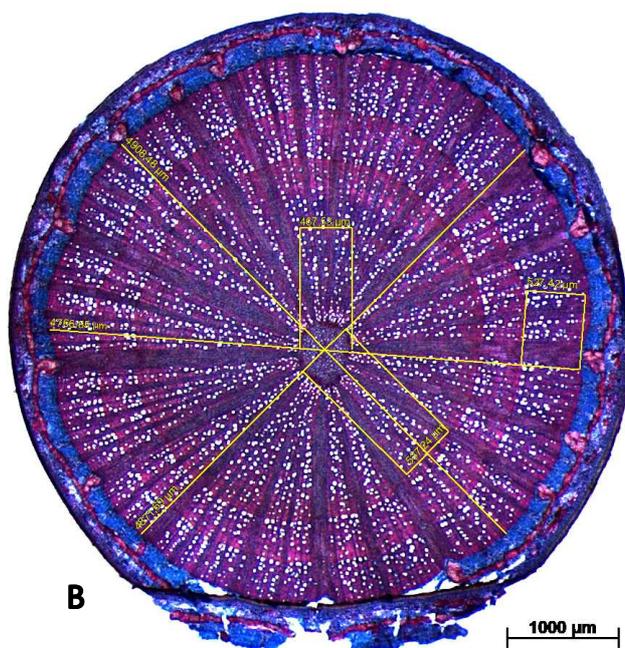


Abb. 2.18: Darstellung zur Färbung und digitalen Messung von Dünnschnitten in der Lichtmikroskopie von *F. sylvatica*, 2011;

(A) Ausschnitt eines Holzquerschnittes, gefärbt mit ACN, Schnittdicke = 8 µm, Jahrringmessung mittels ZENlite (rote Abstandsmarkierungen) nur im Holzzuwachs der Saison 2011; Jahrringgrenzen von 2009 auf 2010 (1) und auf 2011 (2) durch große Gefäße des Frühholzes zu erkennen; 40fache Vergrößerung;

(B) Aufsicht auf Dünnschnitt gefärbt mit Astrablau und Safranin, Schnittdicke 10 µm; Vermessungen mit AxioVision (gelbe Abstandsmarkierungen); Gesamtdurchmesser, Holzzuwachs der Saison 2011 und Markvermessungen einzeln im Programm auf das Bild zu legen; 5fache Vergrößerung



Messwerte beider Programme tabellarisch abzuspeichern und statistisch auszuwerten.

2.2.4 Elementaranalyse durch Pyrolyse (C/N- Gehalt)

Für weitere Untersuchungen zum Einfluss der Versuchsbedingungen auf die Pflanzen sind Kleinstmengen (5 bzw. 10 mg) der Wurzeln Und Blattmaterial von Pappeln und Buchen zur chemischen Analyse aufbereitet worden. Die getrockneten Wurzeln der Versuchsbäume beider Jahre sind von restlicher Topferde befreit und kleine Abschnitte aus verschiedenen Bereichen (Hauptwurzeln, Feinwurzeln) der Wurzelballen herausgetrennt worden. Diese Abschnitte sind ungewaschen mittels Scheibenschwingmühle zu Pulver zermahlen worden.

Aus diesem Pulver konnten durch Pyrolyse die enthaltenen Elemente in gasförmigen Zustand versetzt und technisch der Kohlen- und Stickstoffgehalt analysiert werden. Die Analysemethode (*Vario EL cube*, Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau/Deutschland) basiert auf einer Trennung der Analysephase und der Detektion mit einem Wärmeleitfähigkeitsdetektor. Das eingewogene trockene Pflanzenpulver wird in einem Zinnbehälter bei 1200- 1800°C unter Zugabe definierter Mengen von Sauerstoff verbrannt bzw. eingeschmolzen. Vorhandene Stickoxide werden an einem Kupferkontakt zu Stickstoff reduziert, der Sauerstoffüberschuss entfernt. Das Gasmisch der Verbrennung wird an spezifischen Adsorptionssäulen aufgetrennt (CO₂, SO₂, H₂O) und die Konzentrationen anhand des Probengewichtes berechnet.

Durch den unterschiedlichen Stoffgehalt der gemahlten Proben, ist die Methode angepasst worden:

für die Pappelwurzeln aus 2010 gilt:

Standard 959, mittlere Probeneinwaage: 3,5 g, Methode: 5 mg 90 s;

für die Pappelwurzeln 2011 gilt:

Probe: Standard 959, mittlere Probeneinwaage: 5,5 g, Methode: 10 mg 120 s;

für die Buchenwurzeln 2011 gilt:

Probe: Standard 959, mittlere Probeneinwaage: 10,9 g, Methode: 10 mg 120 s.

3. Ergebnisse

3.1 Phänotypisierung von *Populus x canescens* nach Abschluss der CO₂- Begasung 2010

Alle Versuchspflanzen wurden in ihrer Gesamtheit untersucht und ihr Phänotyp hinsichtlich der vorangegangenen Versuchsbedingungen analysiert. Für detaillierte Untersuchungen der Wurzelbiomasse, wurden von jeder Variante 4 Wurzeln gesondert getrocknet und ausgewertet (s. Pyrolyse 3.8).

Tab. 3.1: Übersicht zur Auswertung der Ernte von *P. canescens* am 30.09.2010 mit Standardabweichungen; alle Gewichte sind Frischgewichte (FG); Baumgröße = Größe des Hauptsprosses ohne Pflanztopf (ohne Wurzel); Baumgewicht = Gewicht der Biomasse (Holz- und Blattmasse) ohne Pflanztopf (ohne Wurzel); Stammgewicht = Gewicht des Holzes ohne Pflanztopf (ohne Wurzel) und ohne Blätter; Wurzelgewicht = Gewicht der Wurzeln ohne Erde; Anzahl der Blätter = die zum Zeitpunkt der Ernte fest am Baum verbliebenen photosynthetisch aktiven Blätter; normal CO₂ = 385 ppm, erhöht CO₂ = 770 ppm. Student's *t*-Test für die Einzelwerte der Variationen bezogen auf die Kontrollvariante CO₂N,H₂O, Signifikanz (*) für Werte ≤ 0,05.

Variation	Baumgröße [cm] (n=10)	Baumgewicht [g] (n=10)	Stammgewicht [g] (n=10)	Wurzelgewicht [g] (n=6)	Blattanzahl (n=10)
CO ₂ N, H ₂ O	150,5 ± 28,8	2407,9 ± 37	60,4 ± 22,6	78,5 ± 33,4	47,7 ± 7,7
CO ₂ N, <H ₂ O	108,8* ± 16,9	1922,1* ± 71,7	31,3* ± 8,3	34,8* ± 9,1	26,8* ± 10,7
>CO ₂ ,H ₂ O	141,9 ± 33,8	2460,6* ± 54	56,2 ± 19,3	70,2 ± 31,9	46,3 ± 14,6
>CO ₂ ,<H ₂ O	130,8* ± 7	1966,9* ± 64,5	45,7* ± 9,6	73,7 ± 9,4	33,9* ± 7,5

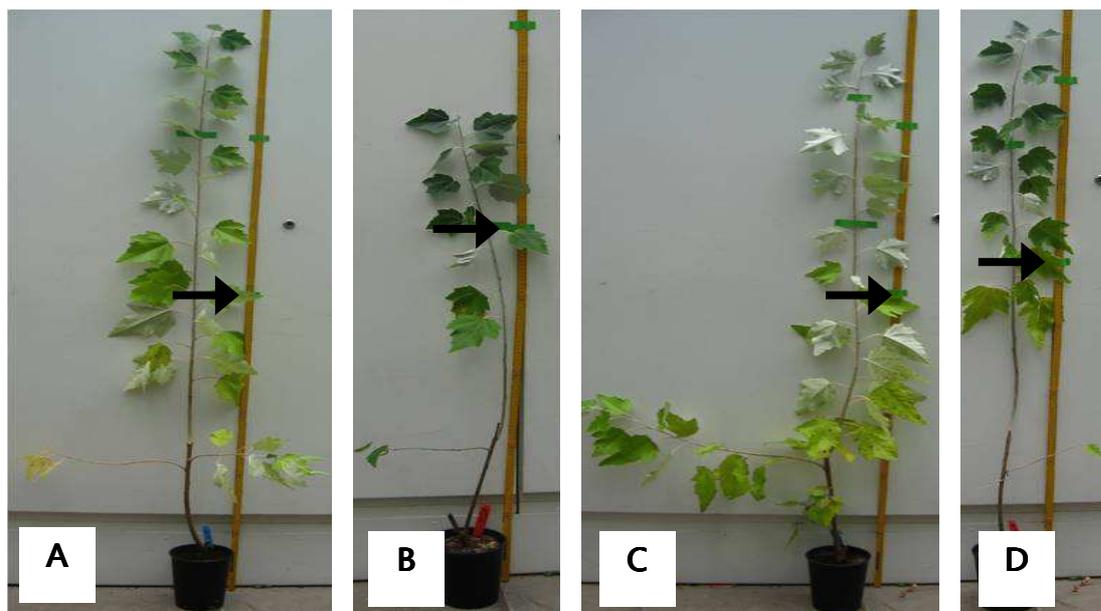


Abb. 3.1: Darstellung repräsentativer Pflanzen (2j.) der 4 Versuchsvariationen von *P. canescens* am 30.09.2010; (A) = $\text{CO}_2\text{N}, \text{H}_2\text{ON}$; (B) = $\text{CO}_2\text{N}, <\text{H}_2\text{O}$; (C) = $>\text{CO}_2, \text{H}_2\text{ON}$; (D) = $>\text{CO}_2, <\text{H}_2\text{O}$; Pflanztöpfe: 2L, Höhe = 17,4 cm; Pfeil = Höhenmarkierung 1 m; (A+B) normaler CO_2 - Gehalt = 385 ppm, (C+D) erhöhter CO_2 - Gehalt = 770 ppm.

Wie in Abb. 3.1 zu erkennen ist, gibt es deutliche Unterschiede im Phänotyp der Versuchsvariationen. So ist neben dem Größenunterschied der Bäume auch der Einfluss der Versuchsbedingungen auf die Blätter zu sehen: die Blattfärbung als Anzeige für den Chlorophyllgehalt (3.3.1.2), sowie die unterschiedlich großen Blattflächen (keine Daten für 2010), zeigen die phänotypische Anpassung der Bäume an die veränderten Klimaveränderungen im Gewächshaus.

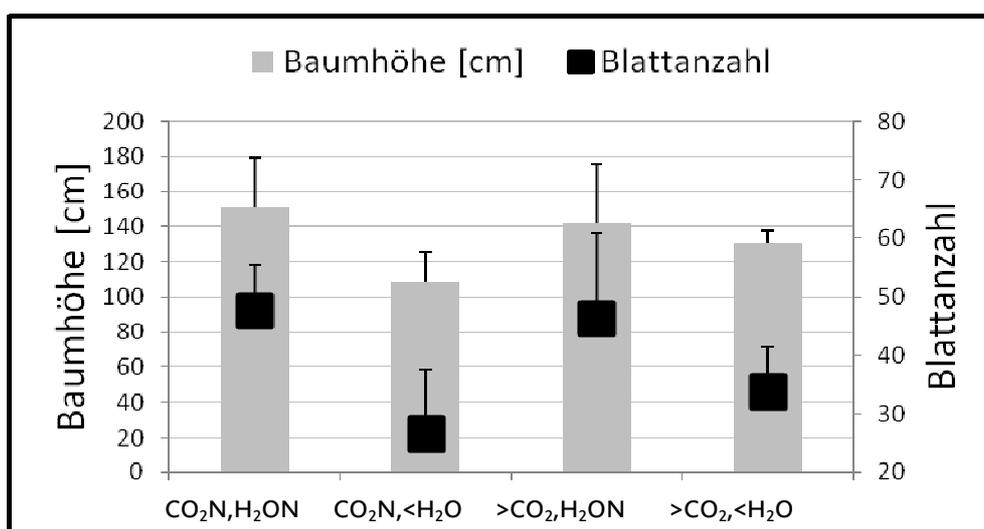


Abb. 3.2: Graphische Darstellung der Messwerte von *P. canescens* zur Baumhöhe (inkl. Topf) und der Blattanzahl am Erntetag 30.09.2010 mit Standardabweichungen; normaler CO_2 - Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO_2 - Gehalt = 770 ppm.

Es besteht eine Korrelation zwischen der erhöhten CO_2 - Konzentration der Luft und der Höhe des Baumes und der Anzahl der zur Ernte verbliebenden photosynthetisch aktiven Blätter. Je höher der Haupttrieb der Pappel 2010, desto mehr Blätter waren vorhanden.

Signifikante Unterschiede der Versuchsvariationen zur Kontrolle ($\text{CO}_2\text{N},\text{H}_2\text{ON}$) bestehen bei der Vermessung der Baumgröße (inkl. Topf) und der Anzahl der Blätter nur im Bezug zum Trockenstress. Die veränderte Gaszusammensetzung der Luft zeigt keinen Einfluss auf die Vermessung und die Auszählung zum Versuchsabschluss.

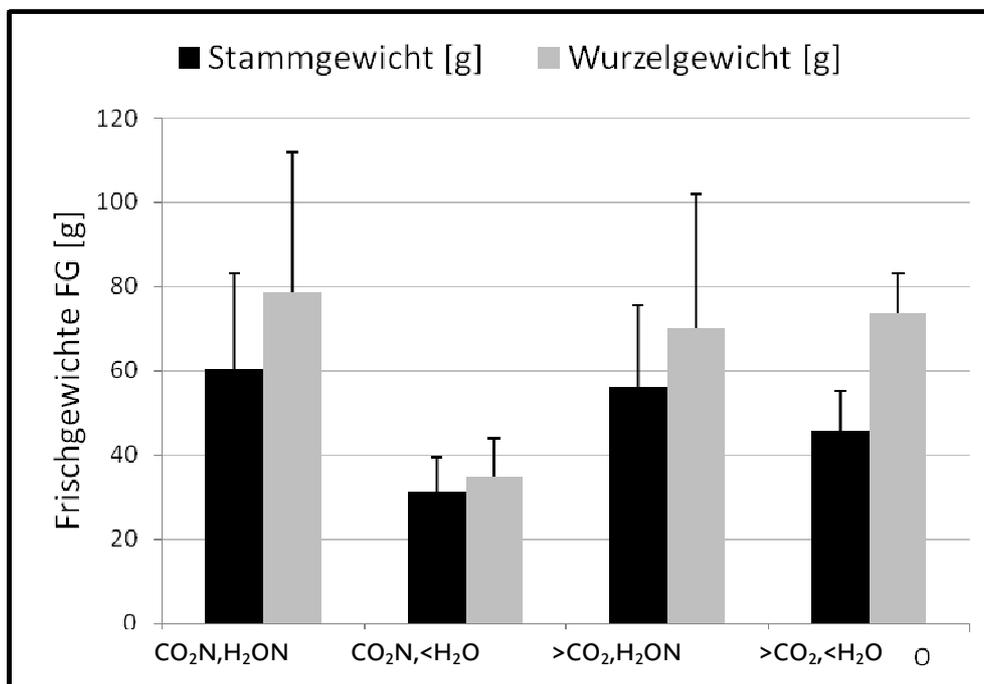


Abb. 3.3: Graphische Darstellung der Messwerte von *P. canescens* zum Stamm- und Wurzelgewicht (Frischgewichte) am Erntetag 30.09.2010 mit Standardabweichungen, normaler CO_2 - Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO_2 - Gehalt = 770 ppm.

Die Frischgewichte des Stammes (Holz und Rinde) zeigen signifikante Unterschiede zur Kontrollvariation ($\text{CO}_2\text{N},\text{H}_2\text{ON}$) nur im Bezug zum Trockenstress, nicht zum erhöhten CO_2 - Gehalt der Luft. So ist auch im Wurzelfrischgewicht einzig die Versuchsvariation $\text{CO}_2\text{N},<\text{H}_2\text{O}$ signifikant zur Kontrolle zu unterscheiden.

Das Auswaschen der Wurzeln nach Entfernung des Baumes und der Erde hat den Nachteil, dass man die Wuchsform im Topf nach Abschluss der Saison nicht erhalten kann. Die 2010 verwendeten 2L Pflanztöpfe haben eine Höhe von 17,4 cm und einen Durchmesser von 16,8 cm. Pro Versuchsvariation wurden 4 Pflanztöpfe mit Wurzel bei der Ernte zurückgehalten und zum Austrocknen verwahrt.

Nach vollständiger Trocknung der Erde wurde diese vorsichtig aus dem Wurzelballen entfernt, fotografiert, gewogen und vermessen. Das Wurzelgewicht ist hierbei zweitrangig, da nicht abzuschätzen ist, wie weit ein mikrobieller Abbau die Vergleichbarkeit zum Frischgewicht verhindert. Zu beachten: die Pappeln der Saison 2010 sind 2jährig, für die Wachstumsbedingungen vor Erhalt der Versuchspflanzen liegen keine detaillierten Behandlungsprotokolle vor.

Tab. 3.2: Übersicht zur gesonderten Wurzelauswertung von *P. canescens* 2010 mit Standardabweichungen ($n = 4$); normaler CO_2 - Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO_2 - Gehalt = 770 ppm; Student's t -Test für die Einzelwerte der Variationen bezogen auf die Kontrollvariante $\text{CO}_2\text{N},\text{H}_2\text{ON}$, Signifikanz (*) für Werte $\leq 0,05$.

Variation	Umfang, Breite [cm]	Umfang, Höhe [cm]	Gewicht, Wurzel [g]
CO ₂ N, H ₂ O	36,8 ± 2,3	44,9 ± 4,8	48,4 ± 17,9
CO ₂ N, <H ₂ O	33,2* ± 1,8	31,4* ± 4,7	24,69* ± 1,9
>CO ₂ , H ₂ O	36 ± 1,7	46 ± 2,9	60,2 ± 8,9
>CO ₂ , <H ₂ O	33,2* ± 1,9	32,9* ± 3,1	52,3 ± 25,1

Die Wurzelgewichte geben keine signifikante Unterscheidung, somit kann die optische Verdichtung der Wurzelballen statistisch nicht beschrieben werden.

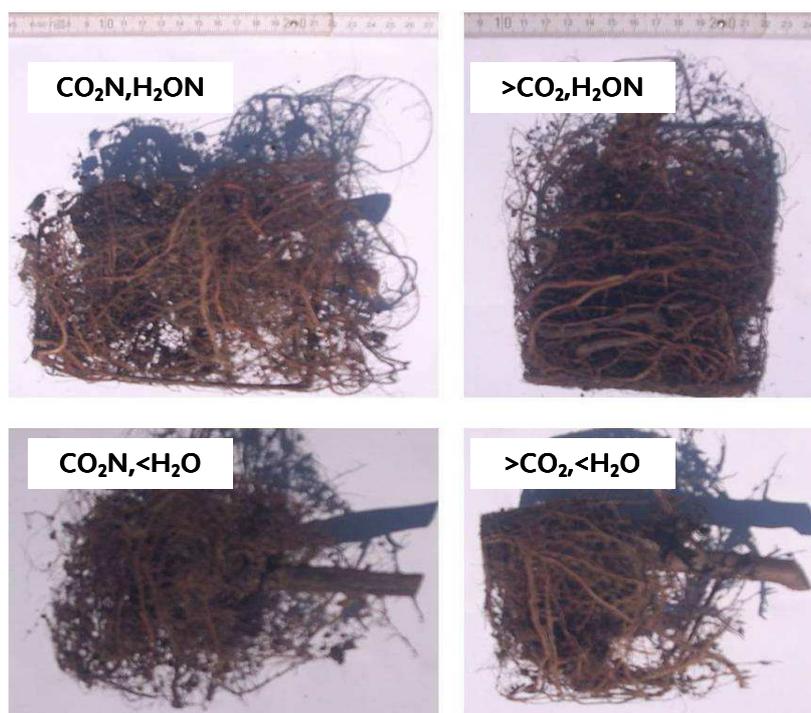


Abb. 3.4: Darstellung repräsentativer getrockneter Wurzeln der 4 Versuchsvariationen von *P. canescens* 2010. Die Wuchsform des Wurzelwerkes im 2L- Pflanztopf konnte durch Austrocknung im Topf beibehalten werden; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 770 ppm.

Die Wurzelgewichte geben keine signifikante Unterscheidung, somit kann die optische Verdichtung der Wurzelballen statistisch nicht beschrieben werden.

Die mit einem Maßband vermessenen Umfangswerte der gesondert getrockneten Wurzeln zeigen jedoch signifikante Unterschiede im Bezug auf die eingeschränkte Wasserzufuhr der Bäume der Saison 2010. Der erhöhte CO₂- Gehalt der Luft zeigt keinen Einfluss (s. Tab. 3.2).

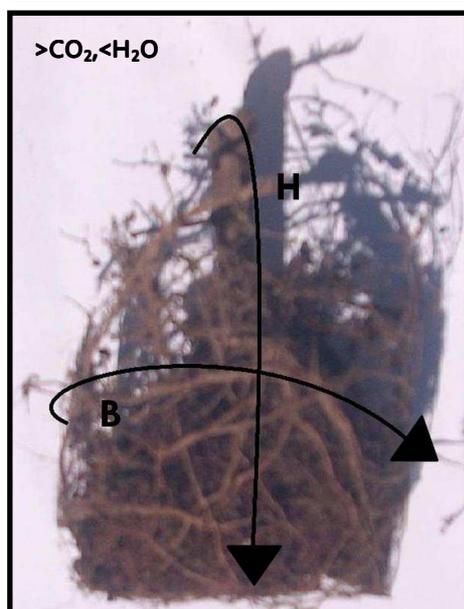
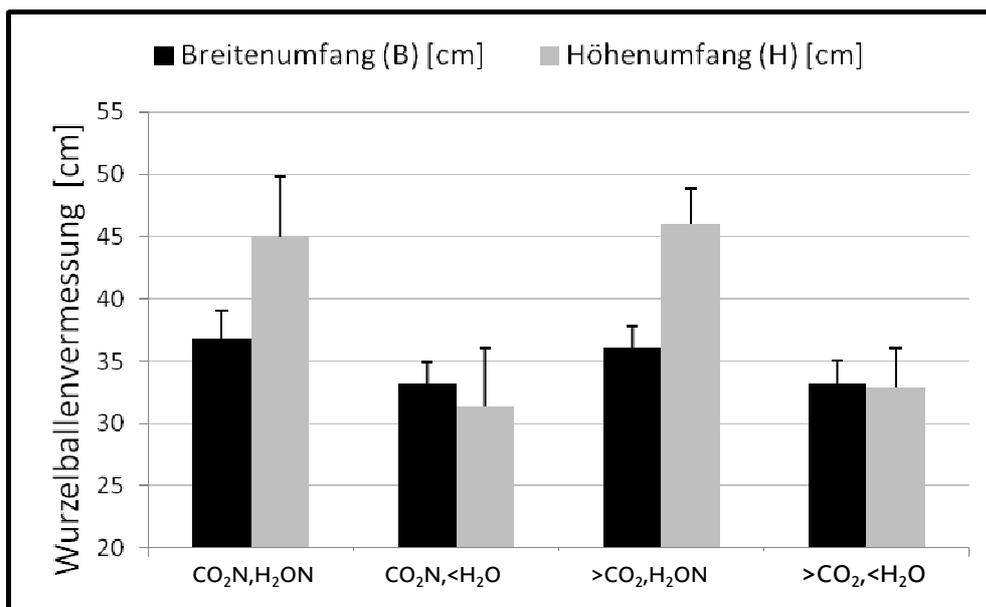


Abb. 3.5: Graphische Darstellungen zur Wurzelballenvermessung von *P. canescens* 2010 mit Standardabweichungen. 4 von 10 Wurzeln der Versuchsvariationen wurden gesondert im Pflanztopf getrocknet, so ihre Form erhalten und vermessen; normaler CO₂-Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂-Gehalt = 770 ppm.

Die Pflanzen unter Trockenstress bilden ihr Wurzelwerk verstärkt im unteren Topfbereich, dort wo an den Gießtagen der Saison eine bestimmte Wassermenge in den Topfuntersatz gefüllt wurde. Dies bestätigt auch die signifikante Vermessung des Höhengumfangs.

Der Pflanztopf bietet kaum Möglichkeit für individuelle horizontale Wurzelverbreitung. Dennoch sind auch die Vermessungen zur Wurzelbreite, im Bezug zum Trockenstress, signifikant (s. Tab. 3.2, grüne Wertemarkierung).

3.2 Phänotypisierung von *Populus x canescens* und *Fagus sylvatica* nach Abschluss der CO₂- Begasung 2011

3.2.1 *P. canescens* 2011

Alle Versuchspflanzen wurden in ihrer Gesamtheit untersucht und ihr Phänotyp hinsichtlich der vergangenen Versuchsbedingungen analysiert.

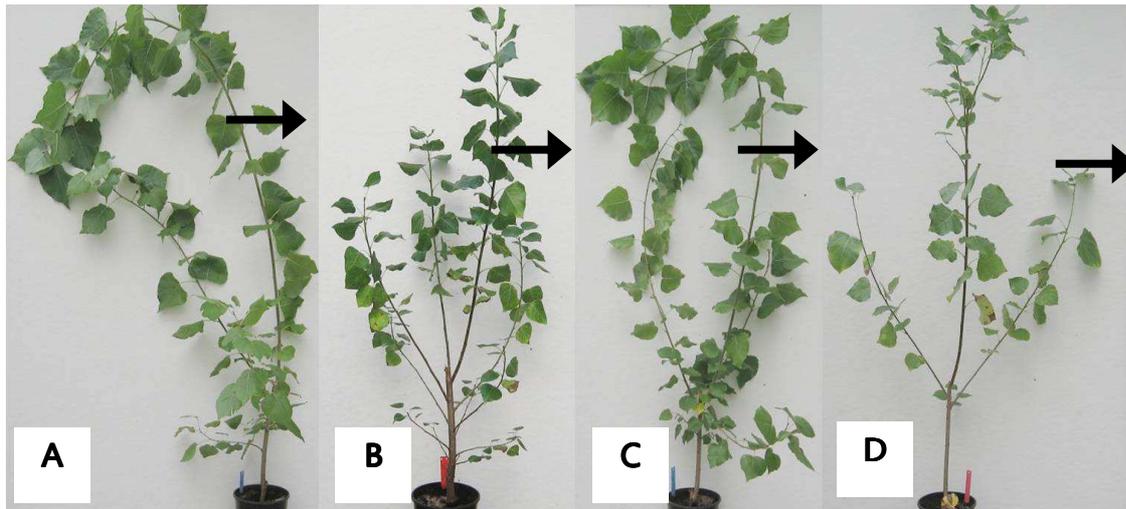


Abb. 3.6: Darstellung repräsentativer Pflanzen (2j.) der 4 Versuchsvariationen von *P. canescens* am 28.09.2011; (A) = CO₂N,H₂O; (B) = CO₂N,<H₂O; (C) = >CO₂,H₂O; (D) = >CO₂,<H₂O; Pflanztöpfe: 3L, Höhe = 19,2 cm; Pfeil = Höhenmarkierung 1 m. Beachte: die Haupttriebe der Bäume mit normaler Wasserzufuhr (A, C) wurden zur einheitlichen Darstellung eingerollt; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm.

Wie in Abb. 3.6 zu erkennen ist, gibt es deutliche Unterschiede im Phänotyp der Versuchsvariationen. So ist neben dem offensichtlichen Größenunterschied der Bäume auch der Einfluss der eingeschränkten Wasserzufuhr an der Blattanzahl zu beschreiben. Auch zeigt sich durch unterschiedlich große Blattflächen (s. Kapitel 3.4.3) die phänotypische Anpassung der Bäume an die veränderten Klimaveränderungen im Gewächshaus.

Tab. 3.3: Übersicht zur Auswertung der Ernte von *P. canescens* am 28.09.2011 mit Standardabweichungen (n = 10); Anzahl der Blätter = die zum Zeitpunkt der Ernte fest am Baum verbliebenen photosynthetisch aktiven Blätter; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm; Student's *t*-Test für die Einzelwerte der Variationen bezogen auf die Kontrollvariante CO₂N,H₂ON, Signifikanz (*) für Werte ≤ 0,05.

		Variation			
		CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
Größe [cm]	Haupttrieb 2010	31,45 ± 1,3	30,89 ± 2,9	29,78* ± 1,8	32,34 ± 1,3
	Haupttrieb 2011	179,67 ± 10,4	78* ± 10,8	170,78 ± 27,3	92,67* ± 8,7
Stammgewicht (FG) [g]	Haupttrieb 2011	68,13 ± 12,8	15,36* ± 2,8	68,6 ± 22,2	21,11* ± 3,2
	inkl. Seitentriebe	138,93 ± 23,5	69,35* ± 10,7	137,67 ± 33	79,65* ± 14,1
Blattgewicht (FG) [g]	Haupttrieb 2011	82,5 ± 6,5	22,98* ± 3,4	80 ± 24	21,78* ± 6,6
	inkl. Seitentriebe	125 ± 14,1	42,06* ± 18,4	127,39 ± 25,1	45,82* ± 16,5
Wurzelgewicht [g]		63,1 ± 21	23,3* ± 4,5	74,5 ± 20	80,3 ± 35
Blattanzahl	Haupt- und Seitentriebe	113,75 ± 5,5	114,25* ± 5,3	133,75 ± 17,6	78,25* ± 15,6
mittleres Blattfrischgewicht [g]		2,78 ± 0,4	1,71* ± 0,1	2,48 ± 0,3	1,54* ± 0,7

Die 2jährigen Bäume sind 2011 nicht beschnitten worden. Der an der obersten Spitze des Haupttriebes 2010 (HT '10) ausgetriebene Spross wurde als Haupttrieb 2011 gekennzeichnet. Fortlaufend werden alle Triebe, die nicht, wie beschrieben, als Haupttrieb zu kennzeichnen waren, als Seitentriebe bezeichnet.

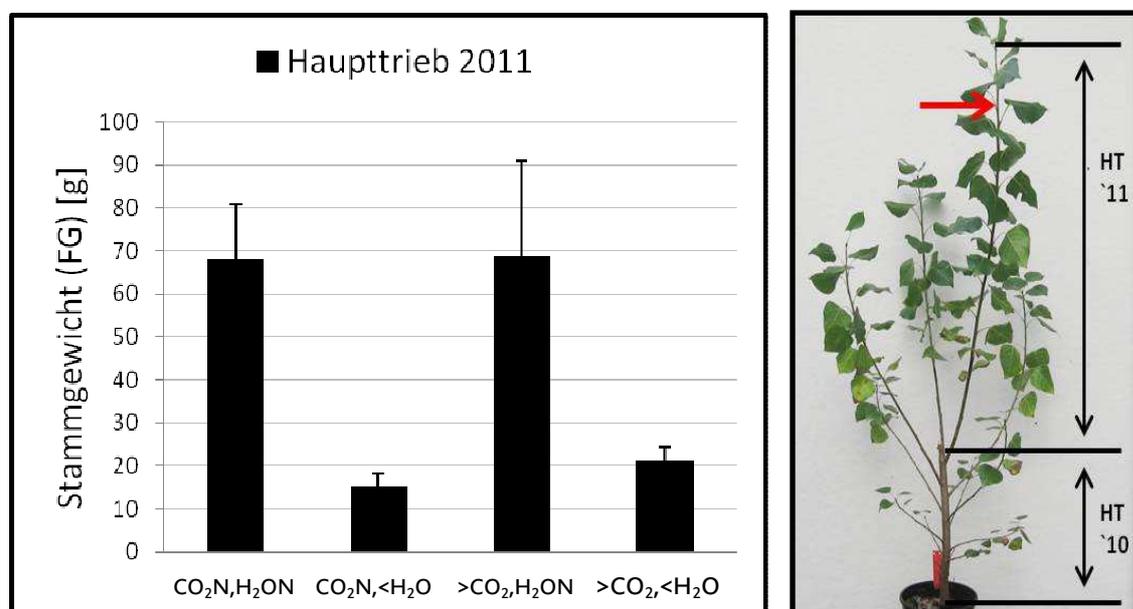


Abb. 3.7: Darstellung der Messungen der Versuchsvariationen bezogen auf ihr Stammgewicht mit Standardabweichung und der Definition vom Haupttrieb (HT, roter Pfeil) an *P. canescens* 2011. Der Haupttrieb aller Versuchspflanzen unterteilt sich in den Abschnitt, der im Jahr 2010 wachsen konnte (HT '10) und dem Abschnitt, der im Zuge dieser Arbeit unter definierten Versuchsbedingungen gebildet werden konnte (HT '11); normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm.

Im Stammgewicht (Frischgewicht) konnten signifikante Unterschiede zur Kontrollvariation ($\text{CO}_2\text{N}, \text{H}_2\text{O}$) im Bezug zum Trockenstress festgestellt werden. So kann auch innerhalb der Trockenstressvariationen für den erhöhten CO_2 - Gehalt der Luft (950 ppm) ein signifikanter Unterschied gezeigt werden.

Tab. 3.4: Gesamtübersicht zur Berechnung der Signifikanz mittels Student's t - Test; Signifikanz (*) für Werte $\leq 0,05$; K = Kontrolle; HT = Haupttrieb, ST = Seitentrieb; FG = Frischgewicht; normaler CO_2 - Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO_2 - Gehalt = 950 ppm.

Student's t -Test $\text{CO}_2\text{N}, \text{H}_2\text{O} = \text{K}$		Größe		Stammgewicht	
		2010	2011	HT	inkl. ST
$\text{CO}_2\text{N}, < \text{H}_2\text{O}$	(K)	0,6	<0,001*	<0,001*	<0,001*
$> \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$	(K)	0,04*	0,4	0,9	0,9
$> \text{CO}_2, < \text{H}_2\text{O}$	(K)	0,2	<0,001*	<0,001*	<0,001*
$> \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$	$\text{CO}_2\text{N}, < \text{H}_2\text{O}$	0,35	<0,001*	<0,001*	<0,001*
$> \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$	$> \text{CO}_2, < \text{H}_2\text{O}$	0,003*	<0,001*	<0,001*	<0,001*
$\text{CO}_2\text{N}, < \text{H}_2\text{O}$	$> \text{CO}_2, < \text{H}_2\text{O}$	0,2	0,006*	0,001*	0,1

Student's t -Test $\text{CO}_2\text{N}, \text{H}_2\text{O} = \text{K}$		Blattgewicht		Blattanzahl
		HT	inkl. ST	HT + ST
$\text{CO}_2\text{N}, < \text{H}_2\text{O}$	(K)	<0,001*	<0,001*	0,05*
$> \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$	(K)	0,8	0,8	0,32
$> \text{CO}_2, < \text{H}_2\text{O}$	(K)	<0,001*	<0,001*	0,19
$> \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$	$\text{CO}_2\text{N}, < \text{H}_2\text{O}$	0,001*	0,001*	0,4
$> \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$	$> \text{CO}_2, < \text{H}_2\text{O}$	<0,001*	<0,001*	0,1
$\text{CO}_2\text{N}, < \text{H}_2\text{O}$	$> \text{CO}_2, < \text{H}_2\text{O}$	0,7	0,7	0,34

Student's t -Test $\text{CO}_2\text{N}, \text{H}_2\text{O} = \text{K}$		Wurzelgewicht	mittl. Blattgewicht (FG)
		$\text{CO}_2\text{N}, < \text{H}_2\text{O}$	(K)
$> \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$	(K)	0,471	0,2
$> \text{CO}_2, < \text{H}_2\text{O}$	(K)	0,44	0,02*
$> \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$	$\text{CO}_2\text{N}, < \text{H}_2\text{O}$	0,003*	0,001*
$> \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$	$> \text{CO}_2, < \text{H}_2\text{O}$	0,78	0,04*
$\text{CO}_2\text{N}, < \text{H}_2\text{O}$	$> \text{CO}_2, < \text{H}_2\text{O}$	0,019*	0,6

Die Bestimmung der Wurzelgewichte und die Vermessung der Wurzelballen (Daten nicht gezeigt) zeigen relevante Signifikanz nur im Bezug auf den Trockenstress der Pflanzen. Durch die großen Standardabweichungen innerhalb der Variationen lässt sich kein deutlicher Einfluss des CO_2 zeigen.

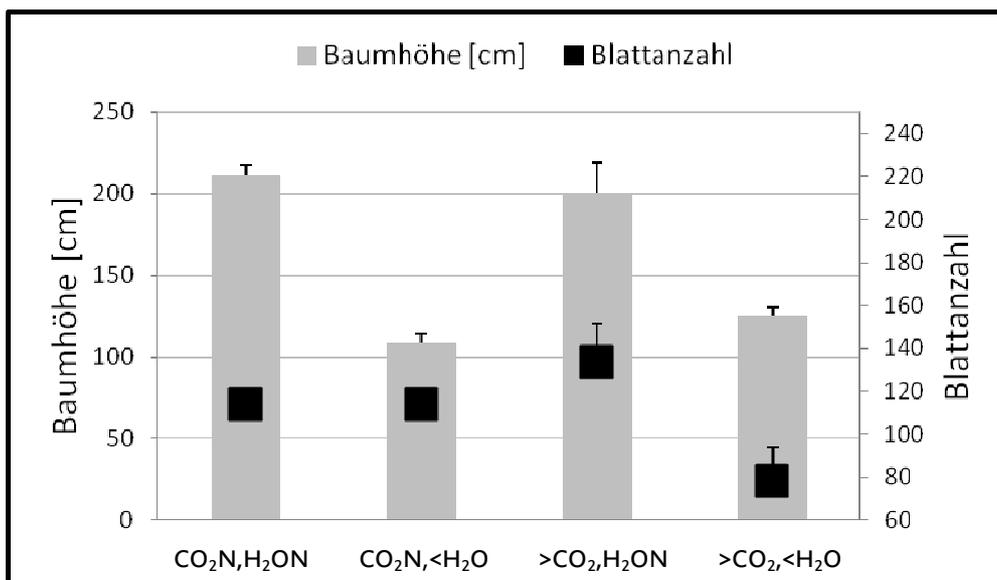


Abb. 3.8: Graphische Darstellung der Messwerte von *P. canescens* zur Baumgröße und der Blattanzahl am Erntetag 28.09.2011 mit Standardabweichungen; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm.

Es besteht keine Korrelation der Versuchsvariationen bezogen auf Höhe des Baumes und der Anzahl der zur Ernte verbliebenen photosynthetisch aktiven Blätter.

Signifikante Unterschiede der Versuchsvariationen zur Kontrolle (CO₂N,H₂O) bestehen bei der Vermessung der Baumgröße (Topfgröße) und der Anzahl der Blätter nur im Bezug zum Trockenstress. Die veränderte Gaszusammensetzung der Luft zeigt keinen Einfluss auf die Vermessung und die Auszählung zum Versuchsabschluss.

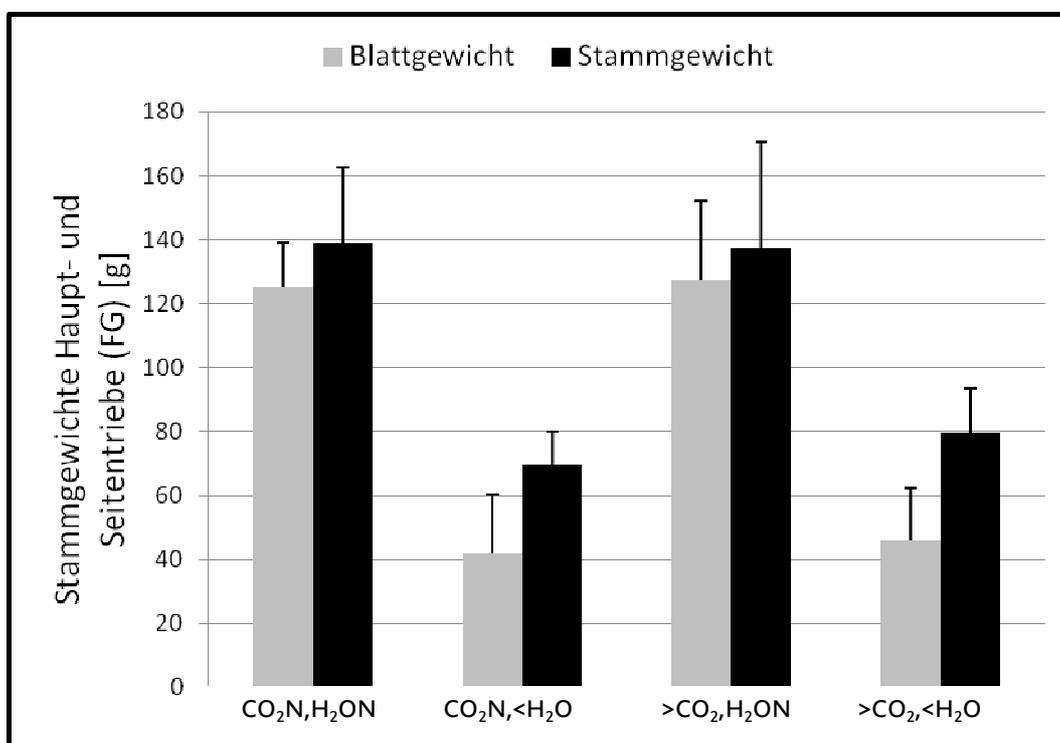


Abb. 3.9: Graphische Darstellung der Messwerte von *P. canescens* zum Stamm- und Blattgewicht (Haupttrieb und Seitentriebe nicht getrennt) am Erntetag 28.09.2011 mit Standardabweichungen; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm.

Zur Ermittlung der Gesamtbiomasse wurden die Messwerte aller Triebe der Pappeln zusammenfassend dargestellt. Wie zu erkennen ist, beziehen sich die Unterschiede der Messungen der Versuchsvariationen nur auf die eingeschränkte Wasserzufuhr. Die minimal erhöhten Werte für die Variationen unter erhöhtem CO_2 (950 ppm) sind nicht signifikant.

Die 2011 unter gegebenen Versuchsbedingungen gebildete Biomasse konnte bei der Ernte in Haupttrieb und Seitentriebe unterteilt werden (s. Abb. 3.7).

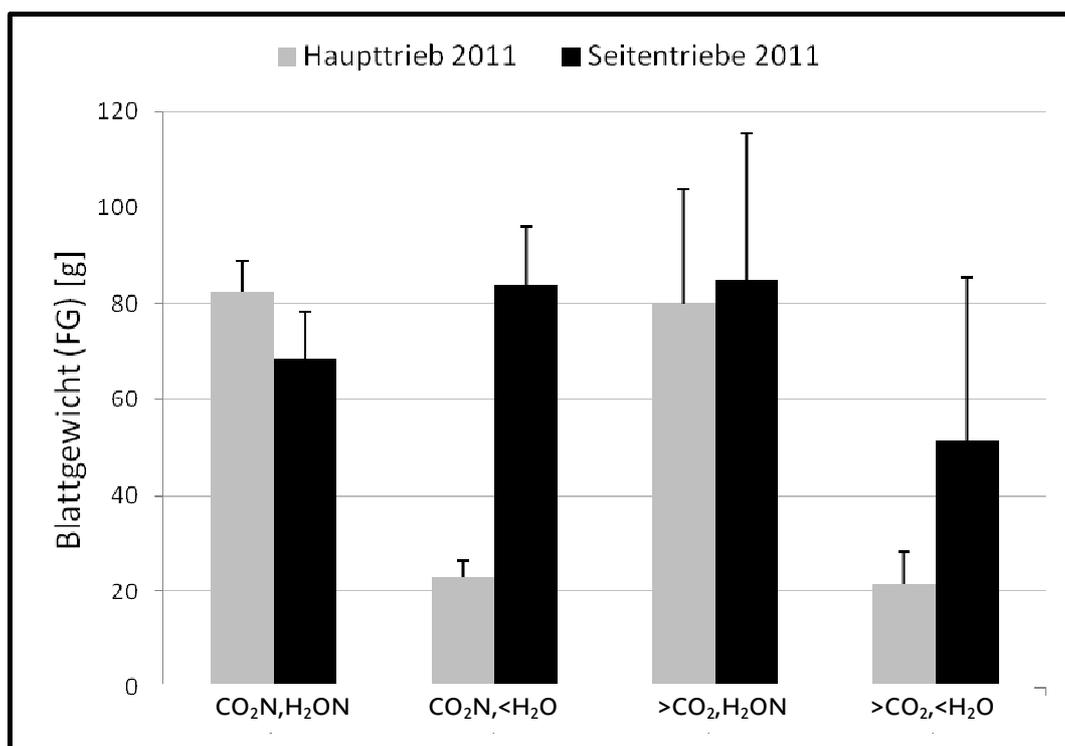


Abb. 3.10: Graphische Darstellung der Messwerte von *P. canescens* zum Blattgewicht, nach Haupttrieb und Seitentriebe getrennt, am Erntetag 28.09.2011 mit Standardabweichungen; normaler CO_2 - Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO_2 - Gehalt = 950 ppm.

So lässt sich beobachten, dass sich das Frischgewicht der Blätter der Seitentriebe nicht signifikant von der Kontrollvariation ($\text{CO}_2, \text{N}, \text{H}_2\text{O}$) unterscheidet und bedingt durch große Abweichungen innerhalb einer Variation die Versuchsbedingungen keinen nachhaltigen Einfluss auf die Seitentriebe haben konnten. Die Haupttriebe hingegen zeigen eine deutliche Reaktion auf den Trockenstress, das Blattfrischgewicht ist zur Ernte 2011 um ca. 80% reduziert.

Der veränderte Kohlendioxidgehalt der Luft hat dabei keinen Einfluss.

3.2.2 *F. sylvatica* 2011

Zunächst soll der Habitus der Versuchspflanzen einen Überblick zur Beschreibung des Phänotyps geben.



Abb. 3.11: Darstellung repräsentativer Pflanzen (2j.) der 4 Versuchsvariationen von *F. sylvatica* am 28.09.2011; (A) = $>CO_2, H_2O$; (B) = CO_2N, H_2O ; (C) = $>CO_2, <H_2O$; (D) = $CO_2N, <H_2O$; Pflanztöpfe: 3L, Höhe = 19,2 cm; Pfeil = Höhenmarkierung 0,5 m; normaler CO_2 - Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO_2 - Gehalt = 950 ppm.

Wie in Abb. 3.11 zu erkennen ist, gibt es keine deutlichen Unterschiede im Phänotyp der Versuchsvariationen der Buchen. So ist durch den variablen Größenunterschied der Bäume der Einfluss der Versuchsbedingungen auf die Blätter kaum zu sehen.

Tab. 3.5: Übersicht zur Auswertung der Ernte von *F. sylvatica* am 28.09.2011 mit Standardabweichungen (n = 8); Anzahl der Blätter = die zum Zeitpunkt der Ernte fest am Baum verbliebenen photosynthetisch aktiven Blätter; normal CO₂ = 385 ppm, erhöht CO₂ = 950 ppm. Student's *t*-Test für die Einzelwerte der Variationen bezogen auf die Kontrollvariante CO₂N,H₂ON, Signifikanz (*) für Werte ≤ 0,05.

		Variation			
		CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
Höhen [cm]	Haupttrieb 09/10	49,5 ± 6,2	51,14 ± 8,7	55,5 ± 13	49 ± 4,6
	Haupttrieb 2011	8,42 ± 6,8	11,64 ± 10,8	13,5 ± 3,1	17,2* ± 5,2
Biomasse (FG)	(ohne Wurzel) [g]	20,54 ± 11	23,5 ± 5,6	24,45 ± 9	25,72 ± 9,9
Stammgewicht	(FG) [g]	16,93 ± 8,8	16,63 ± 4	14,3 ± 0,6	14,02 ±
Wurzelgewicht	[g]	24,9 ± 12,5	33,6 ± 11	34,2 ± 14	33,5 ± 11,5
Blattanzahl	Haupt- und Seitentriebe	76,5 ± 32	70,75 ± 14,3	77,5 ± 3,5	70,5 ± 30,4
Blattgewicht	(FG) [g]	7,65 ± 5,9	6,63 ± 3,6	6,2 ± 1,6	3,98 ± 0,3
mittleres Blattfrischgewicht [g]		0,09 ± 0,04	0,09 ± 0,03	0,08 ± 0,02	0,061 ± 0,03

Die Triebgrößen der Saison 2011 sind unterschiedlich. Auch sind die Blattfärbung als Anzeige für den Chlorophyllgehalt nicht spezifisch einer Versuchsvariation zuzuordnen. Einzig unterschiedlich große Blattflächen (3.4.3), zeigen die phänotypische Anpassung der Bäume an die veränderten Klimaveränderungen im Gewächshaus.

Im Folgenden sind die bei der Ernte am 28.09.2011 erhobenen Daten graphisch dargestellt. Es sei darauf hingewiesen, dass bis auf eine Ausnahme (*), keine Signifikanzen im Variationsvergleich zur Kontrolle bestehen.

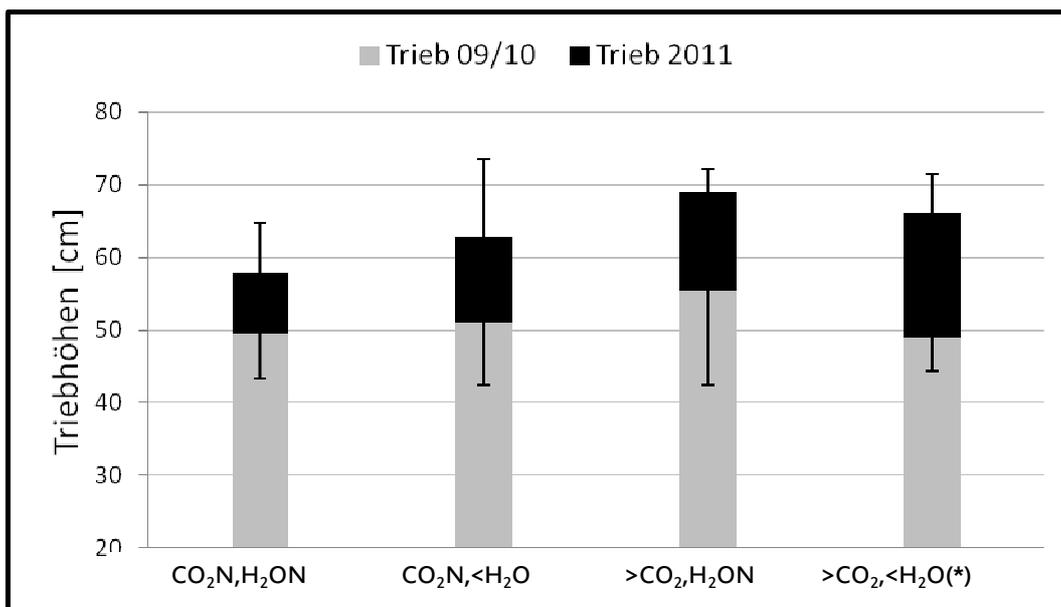


Abb. 3.12: Graphische Darstellung der Messwerte der Sprossgrößen von *F. sylvatica*, unterteilt nach Trieb (Spross) 2009/2010 (Standardabweichungen nach oben ausgerichtet) und Trieb 2011 (Standardabweichungen nach unten ausgerichtet), Erntetag 28.09.2011; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm; Signifikanz zur Kontrolle bei der Sprossgröße 2011 der Variation >CO₂, <H₂O.

Das Vermessen der Sprossabschnitte zur Ernte im September 2011 zeigt eine große Streuung innerhalb der vier Versuchsvariationen. Diese Streuung der Werte verhindert eine zuverlässige Aussage über den Einfluss der Umweltbedingungen auf das Sprosswachstum. Allein die Messwerte der Haupttriebe 2011 der Pflanzen unter erhöhtem Kohlendioxid und verminderter Wasserzufuhr zeigen einen signifikanten (*) Unterschied zur Kontrolle (CO₂N, H₂O N).

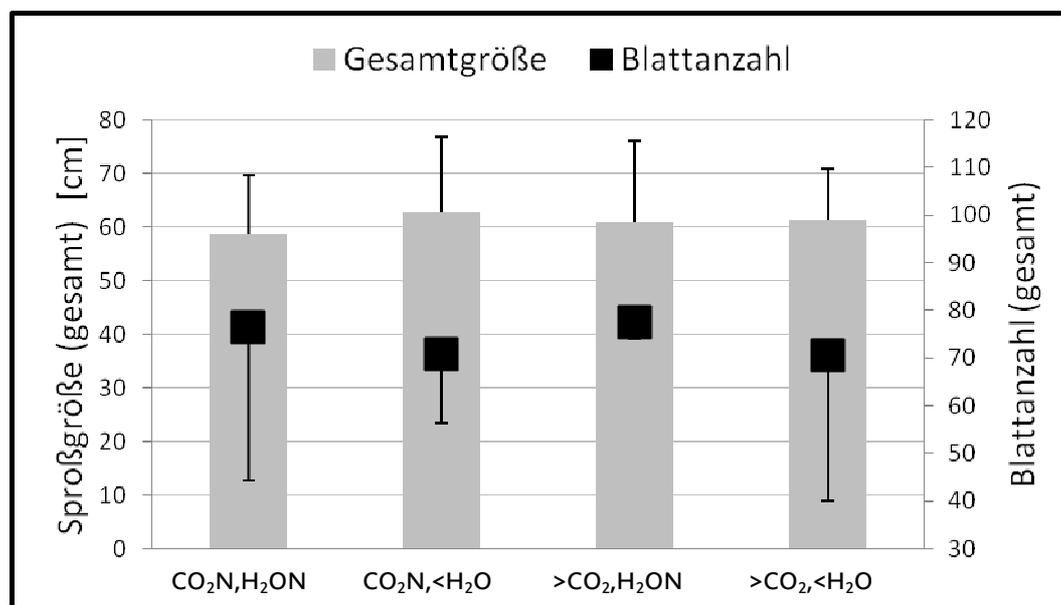


Abb. 3.13: Graphische Darstellung der Messwerte von *F. sylvatica* zur Gesamtgröße des Haupttriebes und der Blattanzahl am Erntetag 28.09.2011 mit Standardabweichungen; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm.

Legt man die Werte der Sprossgrößen zusammen, um einen Bezug der Gesamtgröße der Bäume zur Blattanzahl herzustellen, so lässt sich an den Werten für die Blattanzahl ein möglicher Einfluss des Trockenstress erkennen. Es ist zu beobachten, dass eine verminderte Wasserzufuhr die Anzahl der Blätter zum Zeitpunkt der Ernte am 28.09.2011 reduziert hat. Durch die große Streuung der Werte ist dieser Vergleich aufgrund fehlender Signifikanz nicht zulässig. Auch besteht kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Baumhöhe und Blattanzahl.

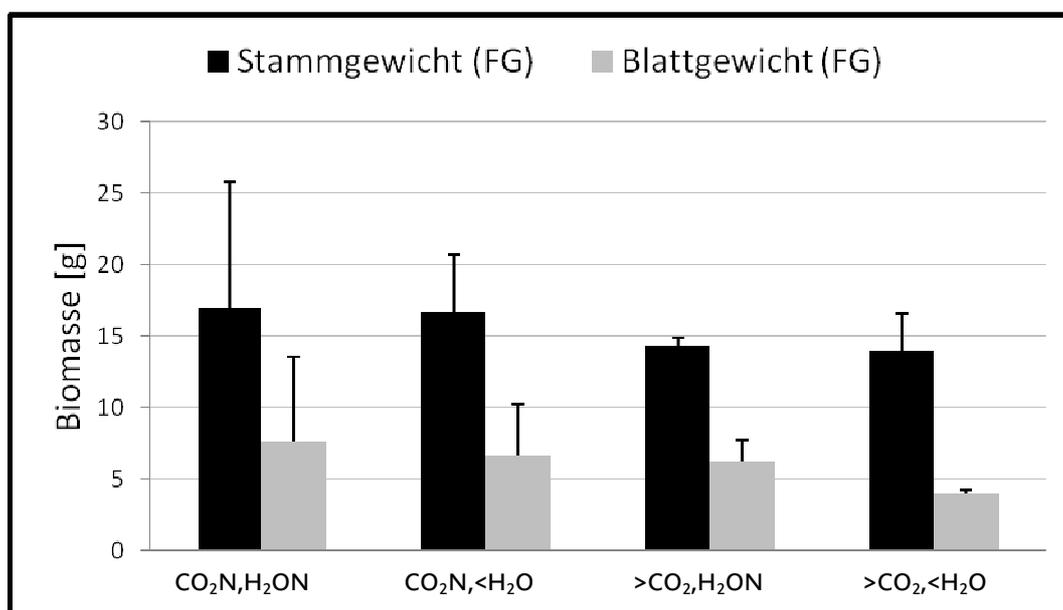


Abb. 3.14: Graphische Darstellung der Messwerte von *F. sylvatica* zum Stamm- und Blattgewicht (Frischgewichte, FG), nicht nach Haupttrieb und Seitentriebe getrennt, am Erntetag 28.09.2011 mit Standardabweichungen; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm.

Die Bestimmung des Wurzelgewichts ergab keine relevanten Signifikanzen.

Im Vergleich zwischen Holz- und Blattgewichten der Buchen zum Erntezeitpunkt im September 2011 ist auch aufgrund der starken Streuung der Werte keine Aussage zu treffen. Die versuchsbedingten Unterschiede zeigen in den Messwerten keine Signifikanz.

3.3 Saisonale Messungen an *Populus x canescens* im Gewächshaus 2010

3.3.1 Auswirkung von Trockenstress und CO₂ auf Gaswechsel und Chlorophyllgehalt

Die Übersicht zur Wasserzufuhr s. Gießpläne im Anhang.

Der Verlauf des Trockenstress bezogen auf die Gaswechsellmessungen kann graphisch wie folgt dargestellt werden:

pro Woche gab es bis zu 2 Tage, an denen den Versuchspflanzen Wasser zugeführt wurde (definierte Mengen s. 2.2.1.1). Der Abstand zwischen zwei Gießtagen beschreibt somit den Verlauf des gesetzten Trockenstress (s. Abb. 3.15). 2010 wurde erst im Juni, einen Monat nach Beginn der CO₂- Begasung im Gewächshaus mit dem Setzen des Trockenstress begonnen und konnte bis Ende September ohne besondere Vorkommnisse fortgeführt werden.

Beginn der CO₂- Begasungen: 2010 am 03.05.; 2011 am 11.05.

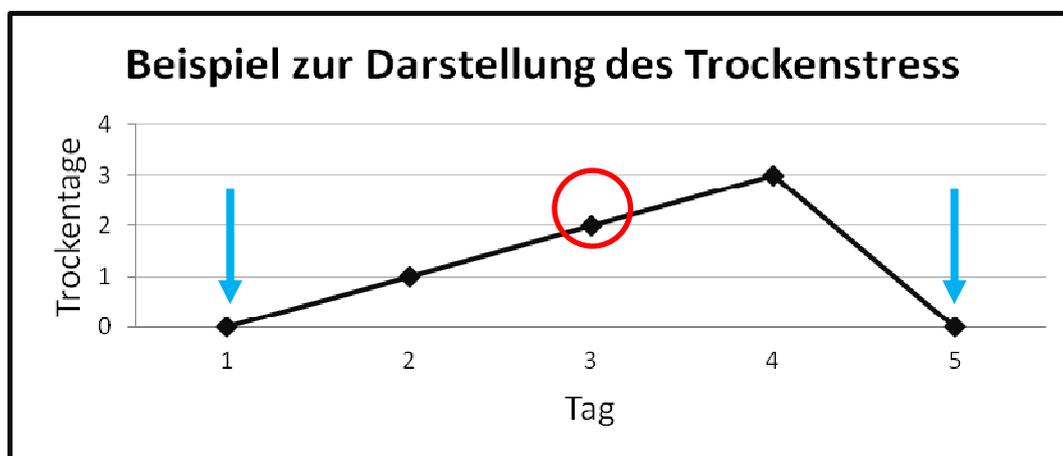


Abb. 3.15: Beispiel zur graphischen Darstellung des gesetzten Trockenstress 2010 und 2011; wenn an Tag 1 und Tag 5 gegossen wurde (blaue Pfeile), liegen 3 Tage dazwischen, an denen keine Wasserzufuhr erfolgte. Diese 3 Trockentage werden am Tag 3 (Messtag, roter Kreis) als „2“ im Graph vermerkt.

Um zu verdeutlichen, dass ein nach Bedarf regulierter Trockenstress nicht gleichmäßig verläuft und die Wasserzufuhr am Tag der Gaswechsellmessungen keinen signifikanten Einfluss auf die Werte haben konnte, werden im Folgenden die Verläufe für 2010 und 2011 graphisch dargestellt:

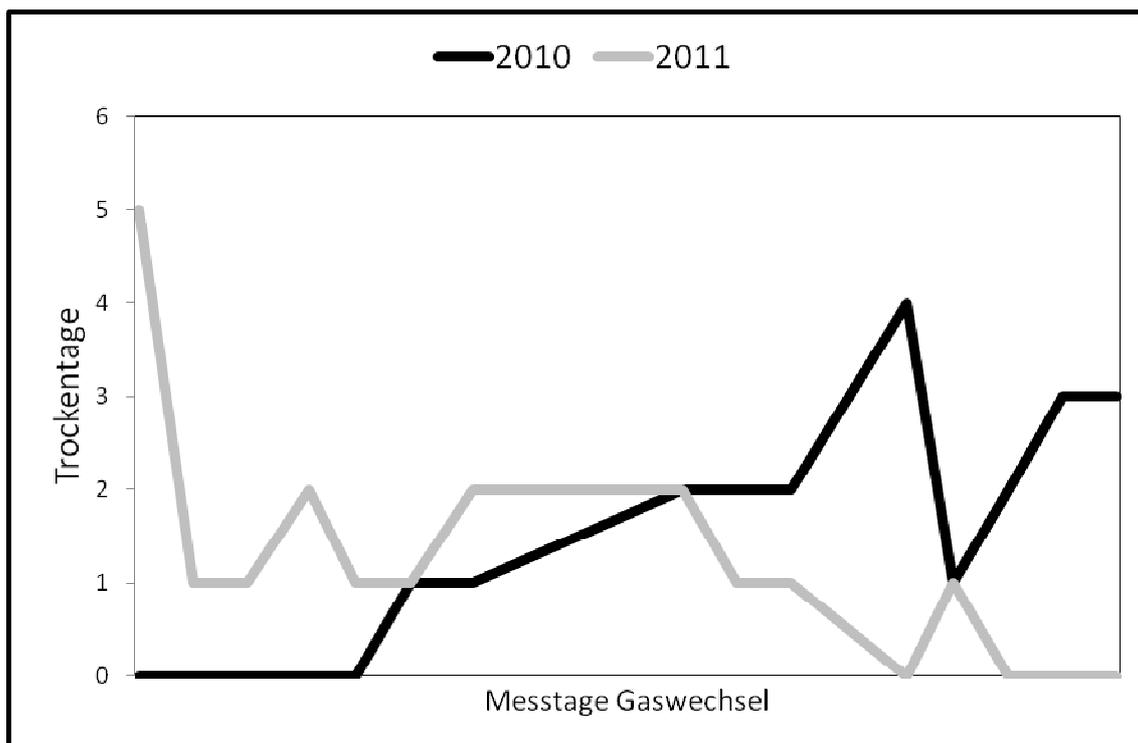


Abb. 3.16: Graphische Darstellung zum Verlauf des gesetzten Trockenstress im Bezug zur Messung des Gaswechsels 2010 und 2011 an *Populus x canescens*; Die Messtage verlaufen für beide Jahre von Mai bis September; zu beachten: 2010 wurde mit dem Setzen des Trockenstress erst Anfang Juni begonnen, 2011 musste dieser dagegen einen Monat vor Ende der Versuche ausgesetzt werden.

Wie beide Verläufe zeigen, kann kein einheitliches Bild der Trockentage im Bezug zum Gaswechsel beschrieben werden, da die Versuchsbäume nach Bedarf (Turgor der Blätter) und nicht nach festem Plan mit Wasser versorgt wurden.

Anzahl der Gieβtage für *P. canescens* im Versuchszeitraum 03.05.-18.10.2010: 73d

Anzahl der Gieβtage für *P. canescens* im Versuchszeitraum 11.05.-27.09.2011: 59d

(Beginn des Versuchszeitraumes = Beginn der CO₂- Begasung).

Zu beachten: der Trockenstress der Pflanzen bezieht sich nicht nur auf das Ausbleiben von Gieβtagen, sondern auch auf die zugeführte Wassermenge am jeweiligen Gieβtag selbst!

3.3.1.1 Gaswechsel im saisonalen Verlauf 2010

Im Folgenden werden die Messwerte der Gaswechselfmessungen für die Photosyntheserate und der Transpiration des CMS- 400 von *Populus x canescens* beschrieben. Die Messungen wurden jede Woche weitestgehend an demselben Messblatt des Baumes durchgeführt. Bei Blattverlust wurde ein vergleichbares Blatt gewählt. Pro Variante wurden 8- 10 Bäume pro Versuchsvariation wöchentlich gemessen. Es liegt keine Unterscheidung in Licht- und Schattenblatt vor.

Tab. 3.6: Gesamtwerteübersicht zur Gaswechselformung mit CMS- 400 an *P. canescens* 2010 mit Standardabweichungen; n = 8- 10; die Photosyntheserate bestimmt sich als CO₂- Aufnahme des Messblattes in einer geschlossenen Gaswechselformung, die Transpiration wird als Wasserdampfabgabe des Probenblattes zum Zeitpunkt der Messung beschrieben; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 770 ppm.; Student's *t*-Test für die Werte des Gesamtmonats bezogen auf die Kontrollvariante CO₂N,H₂O, Signifikanz (*) für Werte ≤ 0,05.

Photosyntheserate JCO ₂ [μmol m ⁻² s ⁻¹]	Mai	Juni	Juli	August	September
CO ₂ N,H ₂ O	10,8 ± 4,1	8,2 ± 2,5	6,4 ± 0,04	7 ± 0,3	5,9 ± 1
CO ₂ N,<H ₂ O	13,1 ± 5,4	8,1 ± 1,1	5,5* ± 0,03	5,6* ± 0,2	5,5 ± 0,4
>CO ₂ ,H ₂ O	18,8 ± 6,8	13,8* ± 3,6	9,2* ± 0,7	11,1* ± 1,3	10,4* ± 0,7
>CO ₂ ,<H ₂ O	14,8 ± 2,7	12,6 ± 3,2	8,6 ± 2,1	9,8* ± 0,4	8,2* ± 1,1
Transpiration GH ₂ O [mmol m ⁻² s ⁻¹]	Mai	Juni	Juli	August	September
CO ₂ N,H ₂ O	0,83 ± 0,4	0,37 ± 0,2	0,36 ± 0,1	0,25 ± 0,02	0,22 ± 0,03
CO ₂ N,<H ₂ O	1,01 ± 0,6	0,37 ± 0,1	0,3 ± 0,1	0,19* ± 0,02	0,21 ± 0,04
>CO ₂ ,H ₂ O	1,04 ± 0,4	0,43 ± 0,2	0,34 ± 0,1	0,26 ± 0,04	0,26 ± 0,03
>CO ₂ ,<H ₂ O	0,81 ± 0,2	0,39 ± 0,2	0,34 ± 0,2	0,23 ± 0,02	0,21 ± 0,05

Zu beachten: für die Werte der Transpiration ist einzig ein Wert bezogen auf die Kontrollvariation signifikant zu unterscheiden (grün markiert).

Um bezogen auf die Photosyntheserate einen Überblick zur Signifikanz der Messungen zu erhalten, sind die Berechnungen für den Student's *t*- Test als Werteübersicht zusammengefasst.

Tab. 3.7: Gesamtübersicht zur Berechnung der Signifikanz der monatlichen Photosyntheseraten von *P. canescens* mittels Student's *t*- Test 2010; Signifikanz (*) für Werte ≤ 0,05; normal normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 770 ppm; Farbmarkierungen s. Erläuterung im Text.

Student's <i>t</i>-Test		Mai	Juni	Juli	August	September
CO ₂ N,H ₂ O = K						
CO ₂ N,<H ₂ O	(K)	0,5	0,96	0,001*	0,002*	0,6
>CO ₂ ,H ₂ O	(K)	0,09	0,04*	0,03*	0,006*	<0,001*
>CO ₂ ,<H ₂ O	(K)	0,16	0,06	0,27	0,001*	0,02*
>CO ₂ ,H ₂ O	CO ₂ N,<H ₂ O	0,23	0,02*	0,02*	0,002*	<0,001*
>CO ₂ ,H ₂ O	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,3	0,6	0,7	0,17	0,03*
CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,6	0,03*	0,17	<0,001*	<0,001*

In dieser Darstellung wird deutlich, dass die Unterschiede der Werte bezogen auf den Trockenstress (rot markiert) weniger klar sind, als die zum erhöhten Kohlendioxidgehalt der Luft. So sind lediglich 3 signifikante Unterscheidungen auf den Trockenstress zu beziehen, hingegen 7 Signifikanzen bezogen auf den erhöhten CO₂- Gehalt (blau markiert). Die ist ein erster Hinweis darauf, dass der erhöhte CO₂- Gehalt der Luft einen stärkeren Einfluss auf die Photosyntheserate hat, als der Trockenstress.

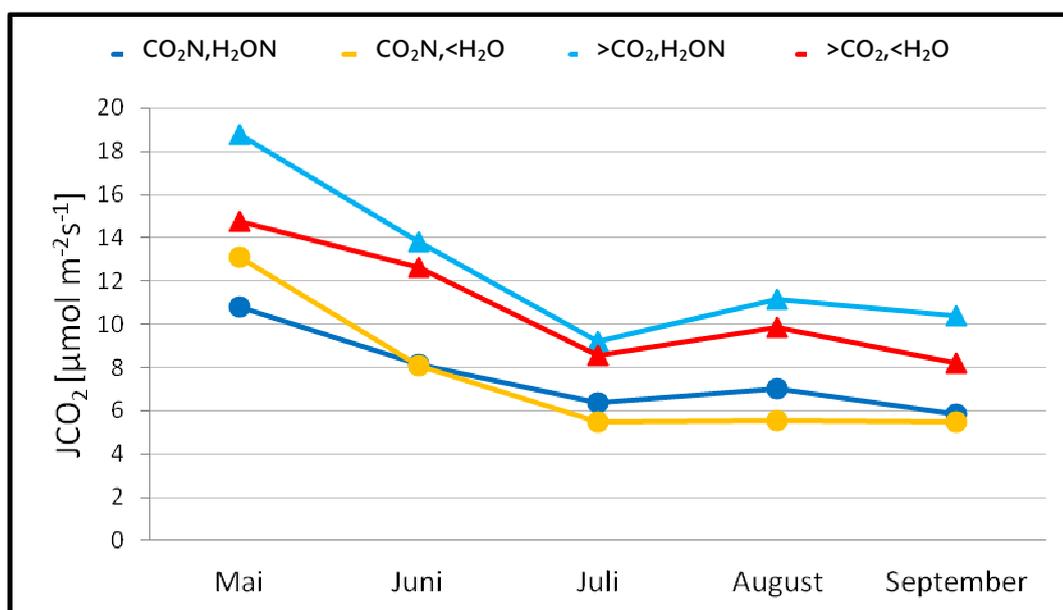


Abb. 3.17: Graphische Darstellung der Messwerte zur Photosyntheserate von *P. canescens* 2010; farbliche Orientierung: rot/gelb = Pflanzen im Trockenstress, hellblau/blau = Kontrollpflanzen; symbolische Orientierung: Kreismarkierung = normaler CO₂- Gehalt der Luft (385 ppm), Dreieckmarkierung = erhöhter CO₂- Gehalt der Luft (770 ppm).

Der Werteverlauf aller 4 Versuchsvariationen nimmt zum Ende der Saison ab, bedingt durch natürliche Blattseneszenz und fallende Werte für den Chlorophyllgehalt.

Die Variationen unter erhöhtem Kohlendioxidgehalt der Luft haben durchgehend höhere CO₂- Aufnahmeraten, unabhängig vom Trockenstress.

Die eingeschränkte Wasserzufuhr bedingt im Bezug auf ihre Kontrolle geringere Werte, deren Verlauf aber nicht über die gesamte Saison relevant zu beschreiben ist.

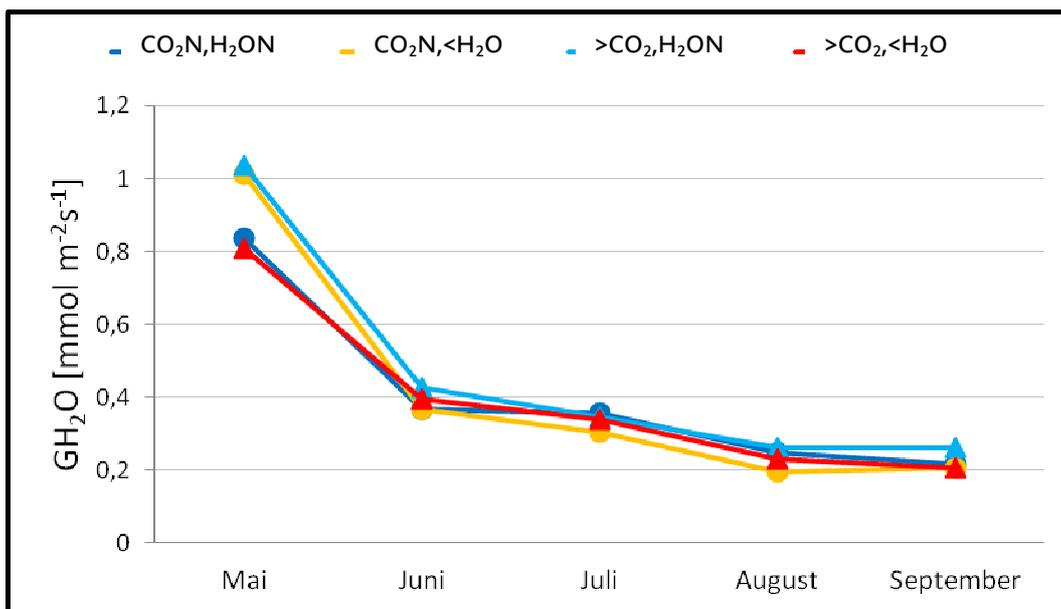


Abb. 3.18: Graphische Darstellung der Messwerte zur Transpiration von *P. canescens* 2010; farbliche Orientierung: rot/gelb = Pflanzen im Trockenstress, hellblau/blau = Kontrollpflanzen; symbolische Orientierung: Kreismarkierung = normaler CO₂- Gehalt der Luft (385 ppm), Dreieckmarkierung = erhöhter CO₂- Gehalt der Luft (770 ppm).

Wie bereits die Werteübersicht zeigen konnte, haben die Versuchsbedingungen keinen Einfluss auf den Verlauf der Transpiration während der Saison 2010 haben können.

3.3.1.2 Chlorophyllgehalt im saisonalen Verlauf 2010

Die wöchentlich durchgeführten nicht- invasiven Messungen des Chlorophyllgehaltes der Blätter mittels Chlorophyllmeter (2.2.2.4) lassen folgenden saisonalen Verlauf 2010 deutlich werden: alle Werte der Versuchsvariationen fallen kontinuierlich ab. Ab Juli 2010 ist zu erkennen, dass die trockengestressten Pflanzen der Kontrollkammer (CO₂N, <H₂O) durchgehend den höchsten Chlorophyllgehalt besitzen. Zum Ende der Saison (September 2010) beinhalten beide Trockenstress-Variationen einen signifikant höheren Chlorophyllgehalt als ihre Kontrollen, sowie die Trockenstress-Variation unter normalem atmosphärischem CO₂ einen signifikant höheren Gehalt besitzt, als ihre Vergleichsvariation bei erhöhtem CO₂- Gehalt der Luft.

Tab. 3.8: Gesamtwerteübersicht des *Chlorophyll Concentration Index* (CCI) zur Messung des Chlorophyllgehaltes an *P. canescens* 2010 mit Standardabweichungen; gemessen wurde an einem Messblatt mittlerer Baumhöhe (Source), Anzahl der Bäume pro Variante (n) = 10; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 770 ppm; Student's *t*-Test für die Werte des Gesamtmonats bezogen auf die Kontrollvariante CO₂N,H₂ON, Signifikanz (*) für Werte ≤ 0,05.

SPAD- Werte <i>P.canescens</i> , (Source) 2010				<i>t</i> -Test
Juni	02.06.2010	17.06.2010	30.06.2010	Juni
CO ₂ N,H ₂ ON	44,6 ± 4,1	42,26 ± 4,2	37,95 ± 3,4	(Kontrolle)
CO ₂ N,<H ₂ O	42,41 ± 1,8	39,11 ± 2,5	33,31 ± 3,0	0,37
>CO ₂ ,H ₂ ON	43,49 ± 3,3	40,56 ± 4,9	35,16 ± 4,8	0,58
>CO ₂ <H ₂ O	44,65 ± 2,1	40,56 ± 6,4	33,25 ± 4,0	0,67
Juli	07.07.2010	14.07.2010	22.07.2010	Juli
CO ₂ N,H ₂ ON	33,2 ± 3,6	30,24 ± 3,9	27,48 ± 3,3	(Kontrolle)
CO ₂ N,<H ₂ O	28,1 ± 4,1	30,29 ± 4,9	30,27 ± 5,5	0,69
>CO ₂ ,H ₂ ON	30,63 ± 3,8	26,7 ± 3,4	24,9 ± 2,8	0,28
>CO ₂ <H ₂ O	26,2 ± 4,8	25,03 ± 3,9	23,8 ± 2,7	0,04*
August	04.08.2010	15.08.2010	keine Messung	August
CO ₂ N,H ₂ ON	23,12 ± 2,9	21,47 ± 3,5		(Kontrolle)
CO ₂ N,<H ₂ O	27,38 ± 5,9	25,31 ± 7,7		0,09
>CO ₂ ,H ₂ ON	20,55 ± 1,8	19,01 ± 1,6		0,15
>CO ₂ <H ₂ O	22 ± 2,9	19,46 ± 4,2		0,41
September	01.09.2010	15.09.2010	22.09.2010	September
CO ₂ N,H ₂ ON	15,6 ± 4,0	13,72 ± 3,0	13,07 ± 4,5	(Kontrolle)
CO ₂ N,<H ₂ O	26,19 ± 7,7	24,75 ± 8,8	23,45 ± 9,2	<0,001*
>CO ₂ ,H ₂ ON	14,07 ± 1,7	12,37 ± 3,5	12,51 ± 4,4	0,28
>CO ₂ <H ₂ O	19,13 ± 5,7	20,52 ± 8,1	19,77 ± 7,0	<0,001*

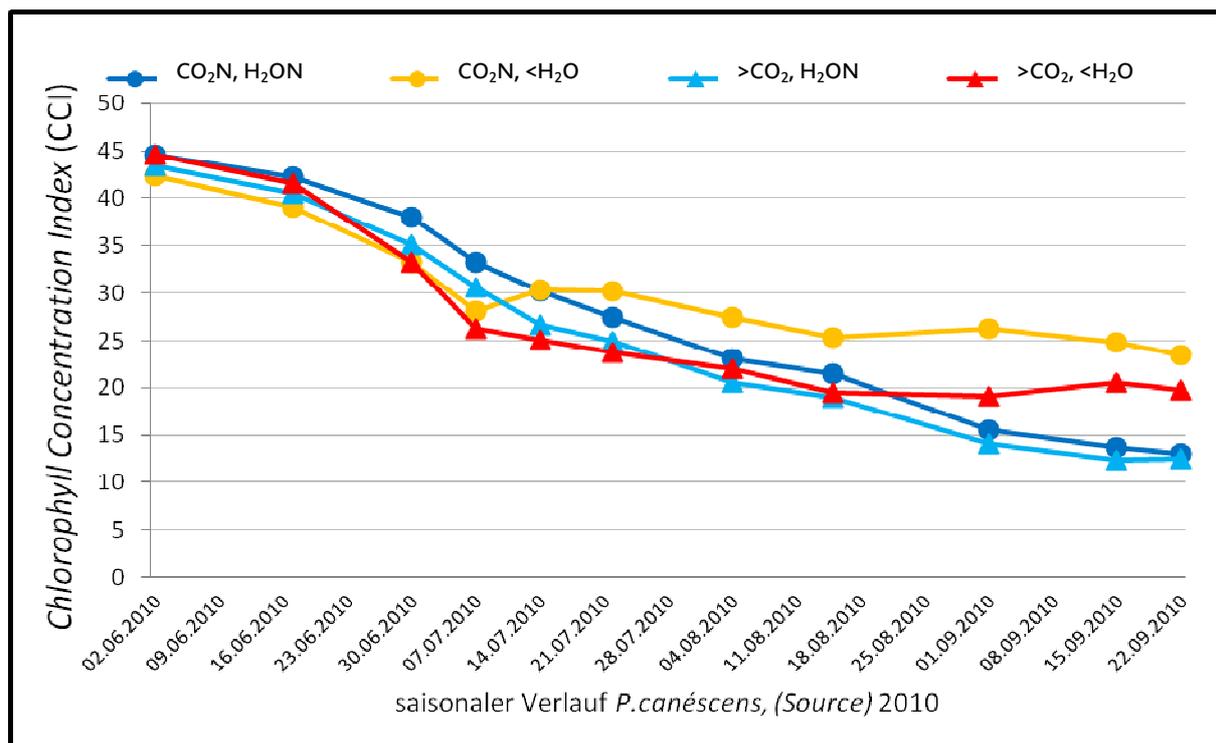


Abb. 3.19: Graphische Darstellung der Messwerte des *Chlorophyll Concentration Index* (CCI) zur Messung des Chlorophyllgehaltes an *P. canescens* im saisonalen Verlauf 2010; farbliche Orientierung: rot/gelb = Pflanzen im Trockenstress, hellblau/blau = Kontrollpflanzen; symbolische Orientierung: Kreismarkierung = normaler CO₂-Gehalt der Luft (385 ppm), Dreieckmarkierung = erhöhter CO₂-Gehalt der Luft (770 ppm).

Somit ist in Bezug auf den Chlorophyllgehalt der Blätter von *P. canescens* im Jahr 2010 zusammenfassend zu sagen, dass ein erhöhter CO₂-Gehalt der Luft (770 ppm) nur dann einen Einfluss nahm, wenn zusätzlich eine eingeschränkte Wasserversorgung der Pflanze vorlag. Der Unterschied der Kontrollpflanzen mit normaler Wasserversorgung zeigt im September keinen signifikanten Unterschied im CCI, bezogen auf eine veränderte Kohlendioxidkonzentration der Klimakammern. (Keine Signifikanz der „roten Werte“ untereinander, keine Signifikanz der „blauen Werte“ untereinander)

3.3.2 Zunahme des Stammdurchmessers (Dendrometer)

Da beide Bäume in ihrem Stammdurchmesser nur hinsichtlich der Variation normale Wasserzufuhr/Trockenstress untersucht wurden, kann für die Saison 2010 kein Bezug zur veränderten Gaszusammensetzung der Luft hergestellt werden.

Die Bäume zur Datenerhebung mittels Dendrometer wurden zufällig ausgewählt und besitzen nicht denselben Startdurchmesser zu Beginn der Messungen.

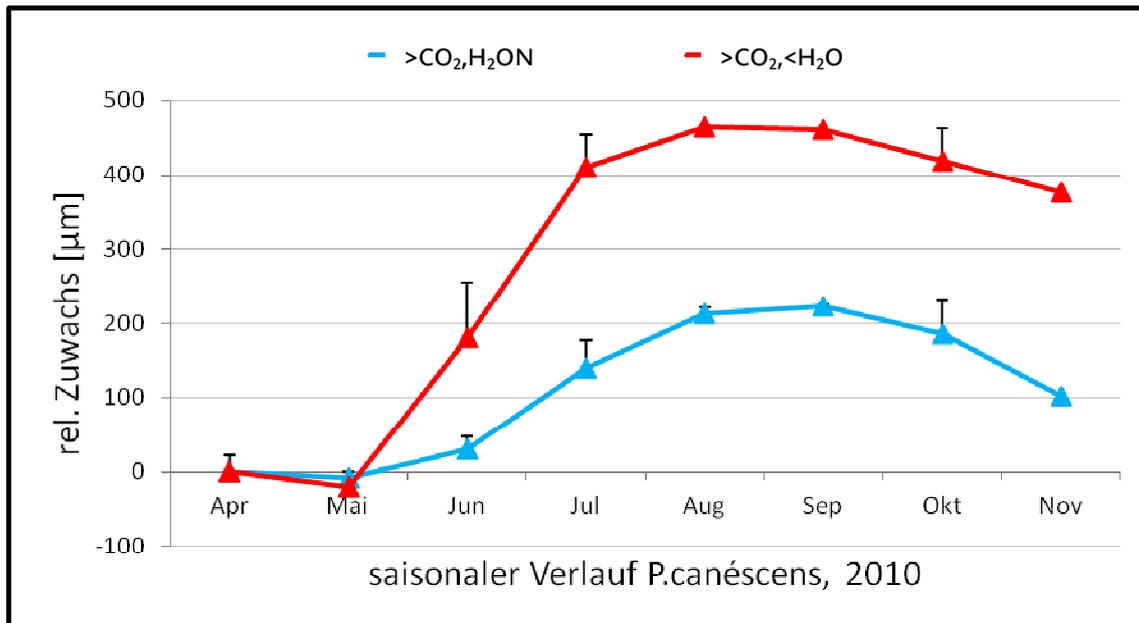


Abb. 3.20: Graphische Darstellung relativen Zuwachsrates des Stammdurchmessers an *P. canescens* mit Standardabweichungen im saisonalen Verlauf 2010; farbliche Orientierung: rot = Pflanzen im Trockenstress, hellblau = Kontrollpflanzen; symbolische Orientierung: Dreieckmarkierung = erhöhter CO₂-Gehalt der Luft (770 ppm); Messungen erfolgten im Abstand von 10 min.

Beide Datensätze sind signifikant unterschiedlich. Die Standardabweichungen ergeben sich aus den fortlaufend erhobenen Datensätzen, gemittelt auf einen Monatswert. Auffällig ist, dass beide Datensätze jeweils im Juli und Oktober 2010 große Standardabweichungen besitzen.

Das Beenden der Messungen im November 2010 erfolgte unabhängig von den Messwerten.

Setzt man beide Datensätze in ein relatives Verhältnis zueinander bleiben der Anstieg der Werteverläufe 2010 und auch deren signifikanter Unterschied gleich. Die relative Steigung der Graphen soll zeigen, dass beide Versuchsvariationen nicht gleichmäßig zunehmen.

Eine Abnahme der Prozentangaben bedeutet keine Abnahme im Stammdurchmesser, sondern ein verminderter Anstieg der Zunahme.

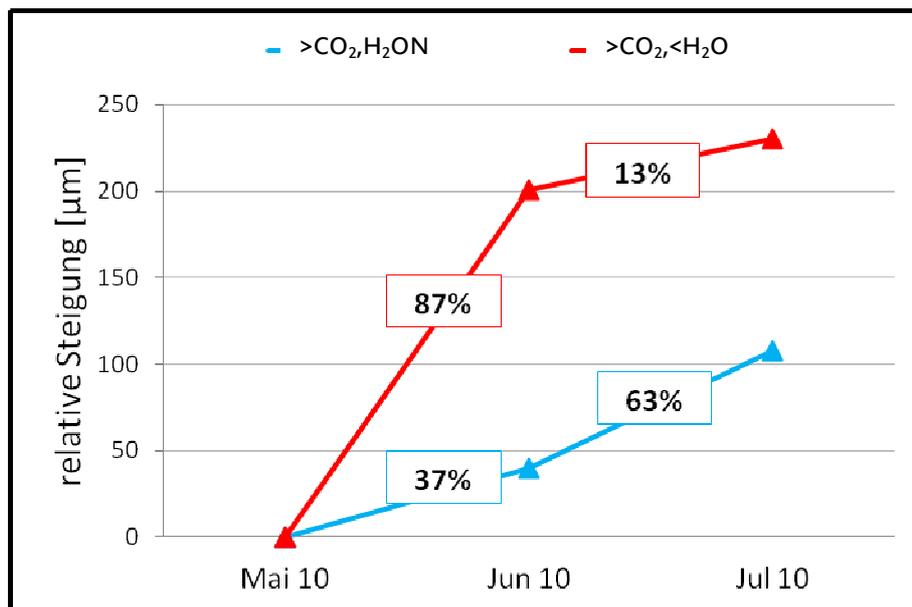


Abb. 3.21: Graphische Darstellung der relativen und prozentualen Steigerung des Stammdurchmessers an *P. canescens* im Monatsvergleich Mai-Juni-Juli 2010; farbliche Orientierung: rot = Pflanzen im Trockenstress, hellblau = Kontrollpflanzen; symbolische Orientierung: Dreieckmarkierung = erhöhter CO₂-Gehalt der Luft (770 ppm). Die prozentuale Steigerung der Datensätze ermittelt sich aus dem Bezug zum Vormonat; Messungen des Dendrometers erfolgten im Abstand von 10 min.

Der Werteverlauf von Mai bis Juli 2010 zeigt bei beiden Versuchsvariationen den deutlichsten Anstieg. Der Baum unter Trockenstress zeigt von Mai auf Juni 2010 einen Anstieg von 87%, der Baum mit normaler Wasserversorgung hingegen 37%, was einen Unterschied von 50% ergibt. Danach drehen sich diese Verhältnisse um und die Variation unter Trockenstress hat von Juni auf Juli 2010 mit nur 13% relativer Anstiegsrate ebenso 50% weniger, als der Vergleichsbaum mit 63%.

3.3.3 Dendrometerschwankungen im Bezug zum Trockenstress Juli 2010

Das verwendete Durchmesserdendrometer zeichnet in Abhängigkeit der Umweltbedingungen eine Zunahme des Stammdurchmessers auf. Das bedeutet, dass Schwankungen im Wassergehalt des Stammes ebenso registriert werden, wie der Holzzuwachs und der Zunahme der Biomasse. Um beschreiben zu können, wie eine verminderte Wasserzufuhr Einfluss auf den Stammdurchmesser und die Zunahme an Biomasse hat, ist es notwendig in den Messwerten das Verhältnis aus Wassergehalt und Holzzuwachs abschätzen zu können. Aus diesem Grund ist eine Betrachtung der hochauflösenden Werte des Dendrometers von Vorteil.

Um die Datensätze des Dendrometers (Messungen alle 10 Minuten) und die der Bodenfeuchtesensoren (Messungen alle 60 Minuten) vergleichen zu können, sind nur die stündlichen Messdaten der Dendrometer- Datensätze verwendet worden.

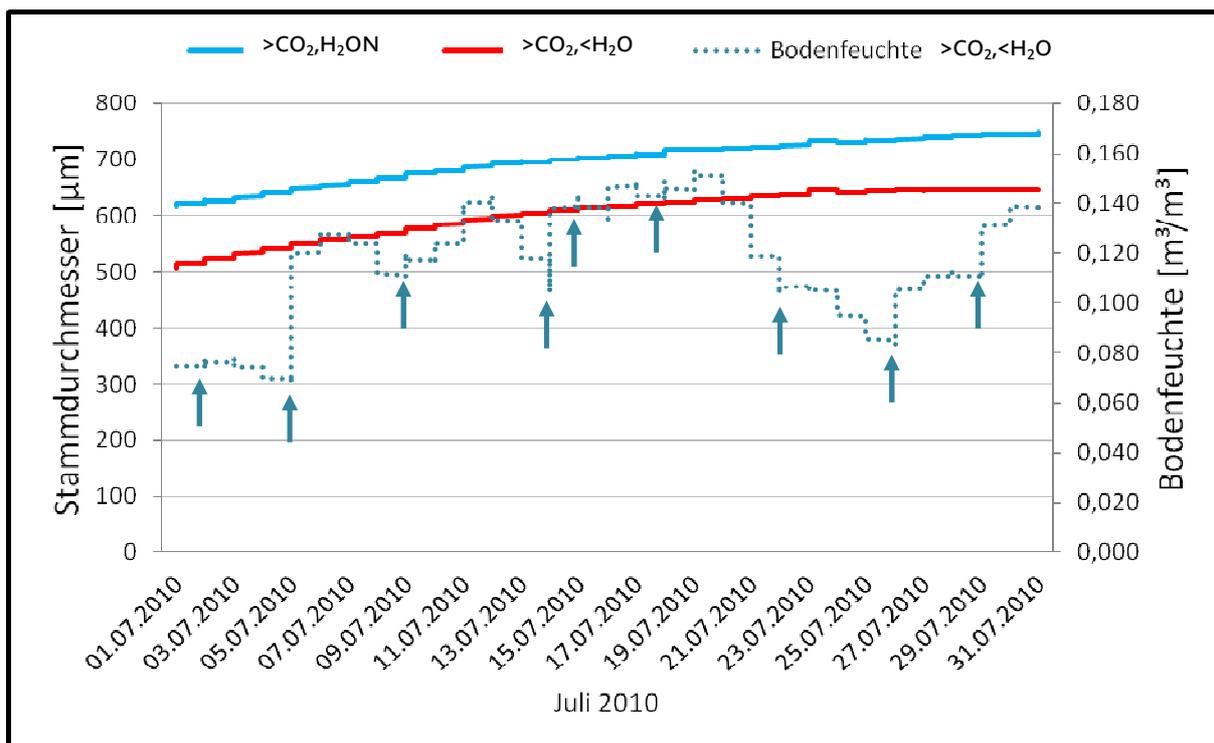


Abb. 3.22: Graphische Darstellung der Messwerte des Dendrometers zur Messung des Stammdurchmessers an *P. canescens*, sowie der Sensordaten für die Bodenfeuchte im Monatsverlauf Juli 2010; farbliche Orientierung: rot = Pflanzen im Trockenstress, hellblau = Kontrollpflanzen; erhöhter CO_2 - Gehalt der Luft = 770 ppm, Pfeilmarkierungen = Gießtage. Messungen erfolgten im Abstand von 60 min (Dendrometer und Bodenfeuchte).

Ein genauer Blick auf die Situation im Monat der höchsten Steigungsraten (Juli 2010), ermöglicht durch die hochauflösenden Messungen der Dendrometer- und Bodenfeuchtesensoren, zeigt die Schwankungen des Wassergehaltes im Stamm durch den Trockenstress, in Abhängigkeit der Tage, an denen den Pflanzen Wasser zugeführt wurde (Gießtage, Pfeilmarkierungen).

Wie in der graphischen Darstellung zu erkennen ist, entwickeln sich die Steigungsraten im Stammdurchmesser weitgehend unabhängig vom Wasserangebot. Minimale Veränderungen im Stammdurchmesser zum Zeitpunkt einer Wasserzufuhr beeinflussen den Verlauf der Wertezunahme nicht.

Um nochmals zu verdeutlichen, dass eine Wasserzufuhr bei beiden Versuchsvariationen keine Unregelmäßigkeit in der Steigungsrate der Dendrometer bedingte, zeigt ein Auszug über drei Messtage aus den Datensätzen im Juli 2010 das Ausmaß der Schwankungen der Dendrometerdaten, bezogen auf eine Wasserzufuhr.

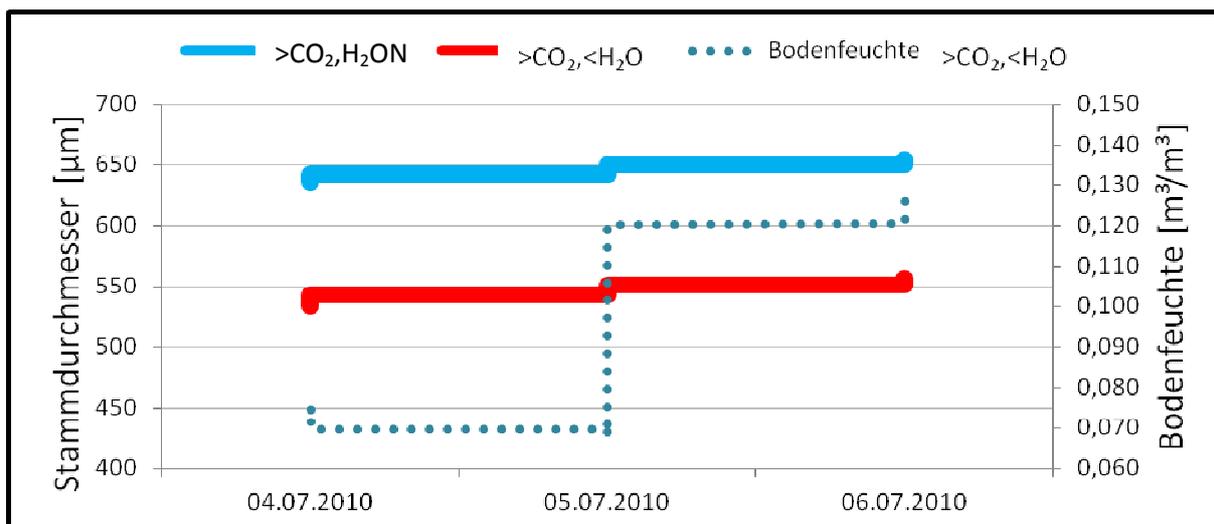


Abb. 3.23: Graphische Darstellung der Messwerte des Dendrometers zur Messung des Stammdurchmessers an *P. canescens*, sowie der Sensordaten für die Bodenfeuchte im Drei- Tage- Verlauf im Juli 2010; farbliche Orientierung: rot = Pflanzen im Trockenstress, hellblau = Kontrollpflanzen; erhöhter CO₂- Gehalt der Luft = 770 ppm. Messungen erfolgten im Abstand von 60 min (Dendrometer und Bodenfeuchte). Am 05.07.2010 gegen 11 Uhr mittags erfolgte eine Wasserzufuhr.

Gegossen wurde am 05.07.2010 gegen 11 Uhr mittags, der Bodensensor (gepunktete Linie) springt in diesem Bereich von 0,086 m³/m³ auf 0,103 m³/m³.

Die Sensoren des Dendrometers erfassen diese Änderung der äußeren Bedingungen etwa gegen 17 Uhr am Nachmittag, die Messwerte springen dort von 547,7 µm auf 549,7 µm. Diese Wertänderungen sind signifikant aber für den saisonalen Steigungsverlauf unbedeutend.

Tab. 3.9: Einblick in die Messdatensätze von Dendrometer (Stammdurchmesser in μm) und Bodensensor (Bodenfeuchte in m^3/m^3) der Versuchsvariation $>\text{CO}_2, <\text{H}_2\text{O}$ zum Zeitpunkt der Wasserzufuhr am 05.07.2010 gegen 11 Uhr; Messungen erfolgten im Abstand von 60 min; erhöhter CO_2 - Gehalt = 770 ppm; Signifikanz (*) für Werte $\leq 0,05$.

Datum	Uhrzeit	Bodenfeuchte [m^3/m^3]	Stammdurchmesser [μm]
05.07.2010	10:00:00	0,068	546,9
05.07.2010	11:00:00	0,086	547
05.07.2010	12:00:00	0,103*	546,3
05.07.2010	13:00:00	0,108	546,5
05.07.2010	14:00:00	0,111	547,6
05.07.2010	15:00:00	0,112	547,6
05.07.2010	16:00:00	0,113	547,7
05.07.2010	17:00:00	0,114	549,7*
05.07.2010	18:00:00	0,115	549,7

Der Bodensensor reagiert mit einer Werteänderung etwa zeitgleich zur Wasserzufuhr. Das Wasser wird von der Versuchspflanze aufgenommen und über den Transpirationssog in den Stamm geleitet, wo der Sensor des Dendrometers ca. 6h später den Wassertransport über eine signifikante Zunahme im Stammdurchmesser registriert.

3.4 Saisonale Messungen an *Populus x canescens* und *Fagus sylvatica* im Gewächshaus 2011

3.4.1 Auswirkung von Trockenstress und CO₂ auf Gaswechsel und Chlorophyllgehalt

Die für *P. canescens* relevante Darstellung des Trockenstress, bezogen auf die Messtage des Gaswechsels 2011 ist im Zusammenhang mit der Saison 2010 bereits dargestellt worden (s. Abb. 3.16).

Für *Fagus sylvatica* wurde eine Wasserzufuhr ebenfalls nach Bedarf gegeben (2.2.2.1). Jedoch haben die Versuchspflanzen an anderen Tagen Wasser erhalten und werden daher getrennt von den Pappeln beschrieben. Allgemein ist zu sagen, dass die Buchen weniger Gieβtage benötigten, als die Pappeln, erklärbar durch weit weniger Blattmaterial und Biomasse.

Anzahl der Gieβtage für *F. sylvatica* im Versuchszeitraum 11.05.-27.09.2011: 50d

(Beginn des Versuchszeitraumes = Beginn der CO₂- Begasung)

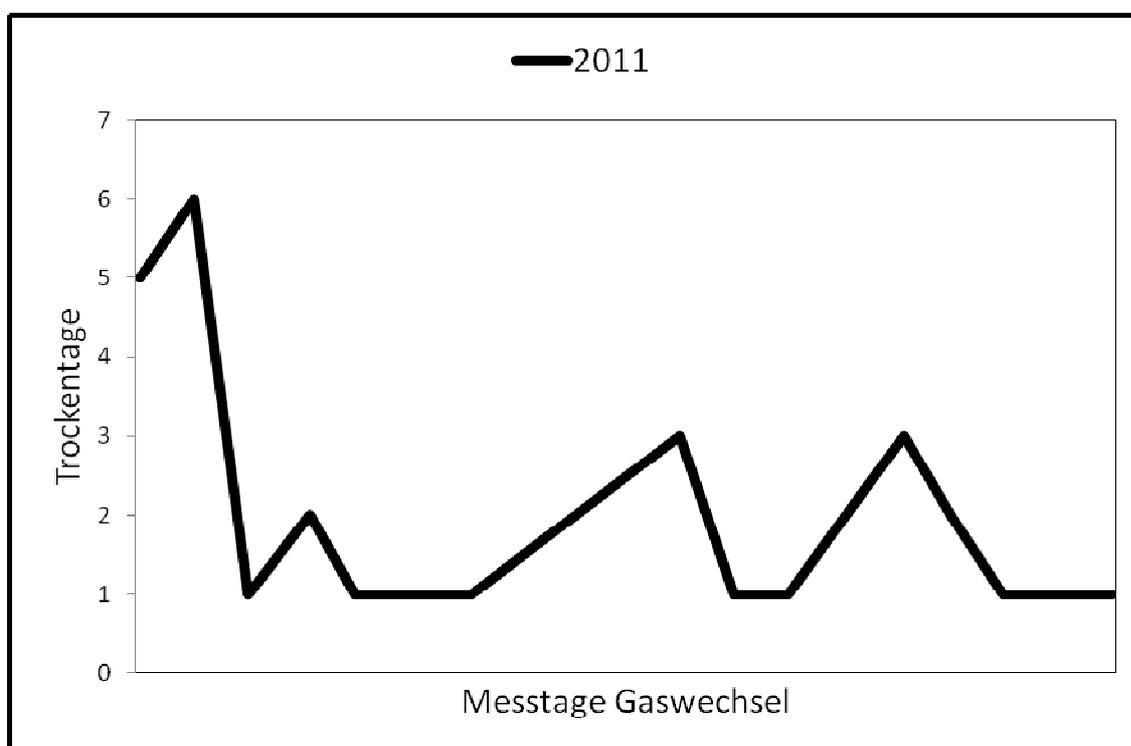


Abb. 3.24: Graphische Darstellung zum Verlauf des gesetzten Trockenstress im Bezug zur Messung des Gaswechsels 2011 an *Fagus sylvatica*; Die Messtage verlaufen von Mai bis September.

Zu beachten: der Trockenstress der Pflanzen bezieht sich nicht nur auf das Ausbleiben von Gieβtagen, sondern auch auf die zugeführte Wassermenge am jeweiligen Gieβtag selbst!

3.4.1.1 Gaswechsel von *P. canescens* im saisonalen Verlauf 2011

Im Jahr 2011 ist nach Sink- und Sourceblatt unterschieden worden. Somit ergeben sich pro Baum 2 Messungen die Woche. Dabei wurde das Messblatt nicht markiert und jede Woche ein anderes gewählt. Es liegt keine Unterscheidung in Licht- und Schattenblatt vor.

Nachfolgend sollen die Berechnungen zur Signifikanz und die graphischen Darstellungen für 4 verwendete Datensätze der Messungen Aufschluss über den Einfluss der Versuchsbedingungen auf den Gaswechsel geben, dabei soll zunächst der Vergleich Sink- Source im Vordergrund stehen. Die Datensätze sind folgende:

Netto- Photosyntheserate = berechnet aus CO₂- Aufnahme rate [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$],

Transpiration = Abgabe von H₂O (als Wasserdampf) in [$\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$],

stomatäre Leitfähigkeit = Konduktivität in [$\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$],

interner CO₂ = interzelluläre CO₂- Konzentration in [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$].

Tab. 3.10: Übersicht zur Berechnung der Signifikanz der Gaswechselfmessungen von *P. canescens* 2011 mittels Student's *t*- Test. Signifikanz für Werte $\leq 0,05$ (grün markiert); zur Berechnung wurden alle Monatsmittelwerte der Saison einer Versuchsvariation gegeneinander verglichen, Kontrolle (K) = CO₂N,H₂ON; n = 10 Pflanzen pro Variation in 2-5 Messungen pro Monat; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm.

Sink		Photosyntheserate	st.		
			Leitfähigkeit	interner CO ₂	Transpiration
CO ₂ N,<H ₂ O	(K)	0,72	0,25	0,39	0,17
>CO ₂ ,H ₂ ON	(K)	0,49	0,83	0,0005	0,95
>CO ₂ ,<H ₂ O	(K)	0,19	0,56	0,07	0,41
>CO ₂ ,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	0,16	0,17	<0,001	0,16
>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,34	0,45	0,44	0,41
CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,06	0,67	0,11	0,64
Source		Photosyntheserate	st.		
			Leitfähigkeit	interner CO ₂	Transpiration
CO ₂ N,<H ₂ O	(K)	0,04	0,02	0,39	0,01
>CO ₂ ,H ₂ ON	(K)	0,74	0,18	0,001	0,18
>CO ₂ ,<H ₂ O	(K)	0,63	0,04	0,04	0,03
>CO ₂ ,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	0,26	0,08	0,003	0,05
>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,52	0,14	0,24	0,13
CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,03	0,82	0,03	0,77

Wie in Tab. 3.10 zu erkennen ist, zeigen sich für die Source- Blätter der Variationen im saisonalen Verlauf deutlich mehr signifikante Unterschiede, bezogen auf die Versuchsbedingungen.

Dabei beschreibt sich für den Trockenstress bei normalem CO₂- Gehalt der Luft im Vergleich zur Kontrolle eine für fast alle Datensätze durchgehende Signifikanz (unterstrichene Werte).

Auch zeigen sich für die Variationen unter erhöhtem CO₂- Gehalt der Luft mehr signifikante Werteverläufe bezogen auf den inneren Kohlendioxidgehalt der Blätter. Der Trockenstress scheint keinen Einfluss zu haben (rot markierte Werte).

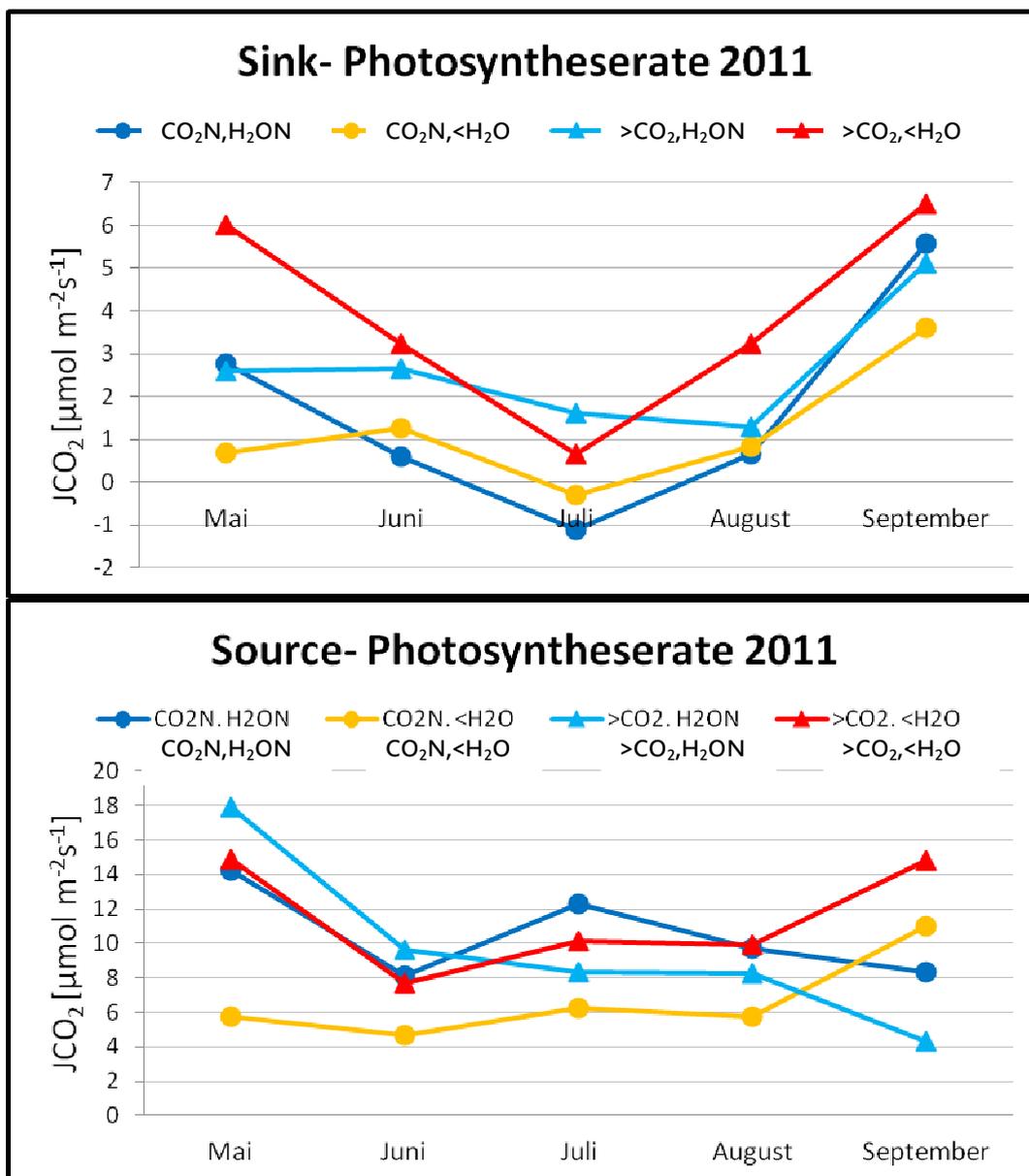


Abb. 3.25: Graphische Darstellung der Messwerte zur Photosyntheserate von *P. canescens* 2011; unterteilt in Sink (sich entwickelnde Blätter) und Source (vollentwickelte Blätter); farbliche Orientierung: rot/gelb = Pflanzen im Trockenstress, hellblau/blau = Kontrollpflanzen; symbolische Orientierung: Kreismarkierung = normaler CO₂- Gehalt der Luft (385 ppm), Dreieckmarkierung = erhöhter CO₂- Gehalt der Luft (950 ppm).

Der Verlauf der Werte beider Blättentwicklungsstufen ist saisonal vergleichbar unregelmäßig. Es ist kein deutlich steter Abfall der Werte durch fortschreitende Blattseneszenz erkennbar. Der Anstieg der Werte der Sink- Blätter zum Ende der Saison erklärt sich durch eine fortschreitend rasche Entwicklung zum Source- Blatt, mit steigendem Chlorophyllgehalt. Am Ende der Saison zeigt die Versuchsvariation unter erhöhtem CO₂ und Trockenstress beiderseits, für Sink und Source, die höchsten Photosyntheserate, dessen Verlauf aber nicht gleichmäßig ist.

Eine erhöhte CO₂- Aufnahmerate der Versuchsvariationen unter erhöhtem CO₂- der Luft ist nicht signifikant zu beschreiben.

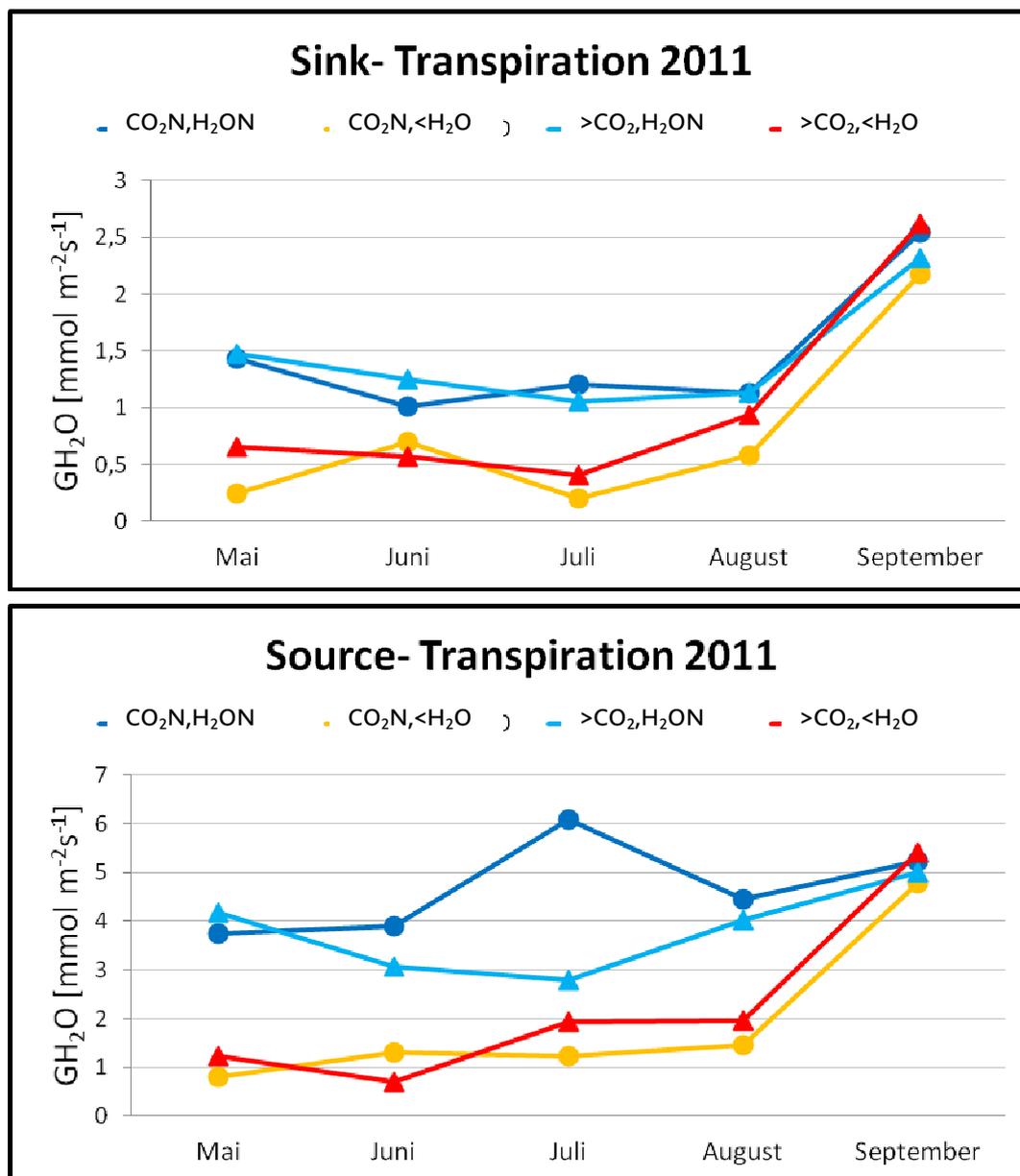


Abb. 3.26: Graphische Darstellung der Messwerte zur Transpiration von *P. canescens* 2011; unterteilt in Sink (sich entwickelnde Blätter) und Source (vollentwickelte Blätter); farbliche Orientierung: rot/gelb = Pflanzen im Trockenstress, hellblau/blau = Kontrollpflanzen; symbolische Orientierung: Kreismarkierung = normaler CO₂- Gehalt der Luft (385 ppm), Dreieckmarkierung = erhöhter CO₂- Gehalt der Luft (950 ppm).

Die Darstellungen der Messwerte zur Transpiration zeigen eine deutliche Trennung der Variationen bezogen auf den Trockenstress. Eine eingeschränkte Wasserzufuhr führt demnach konstant zu einer verminderten Transpiration, für Sink- und Sourceblätter. Der erhöhte CO₂- Gehalt der Luft hat keinen signifikanten Einfluss auf diese Werteentwicklung.

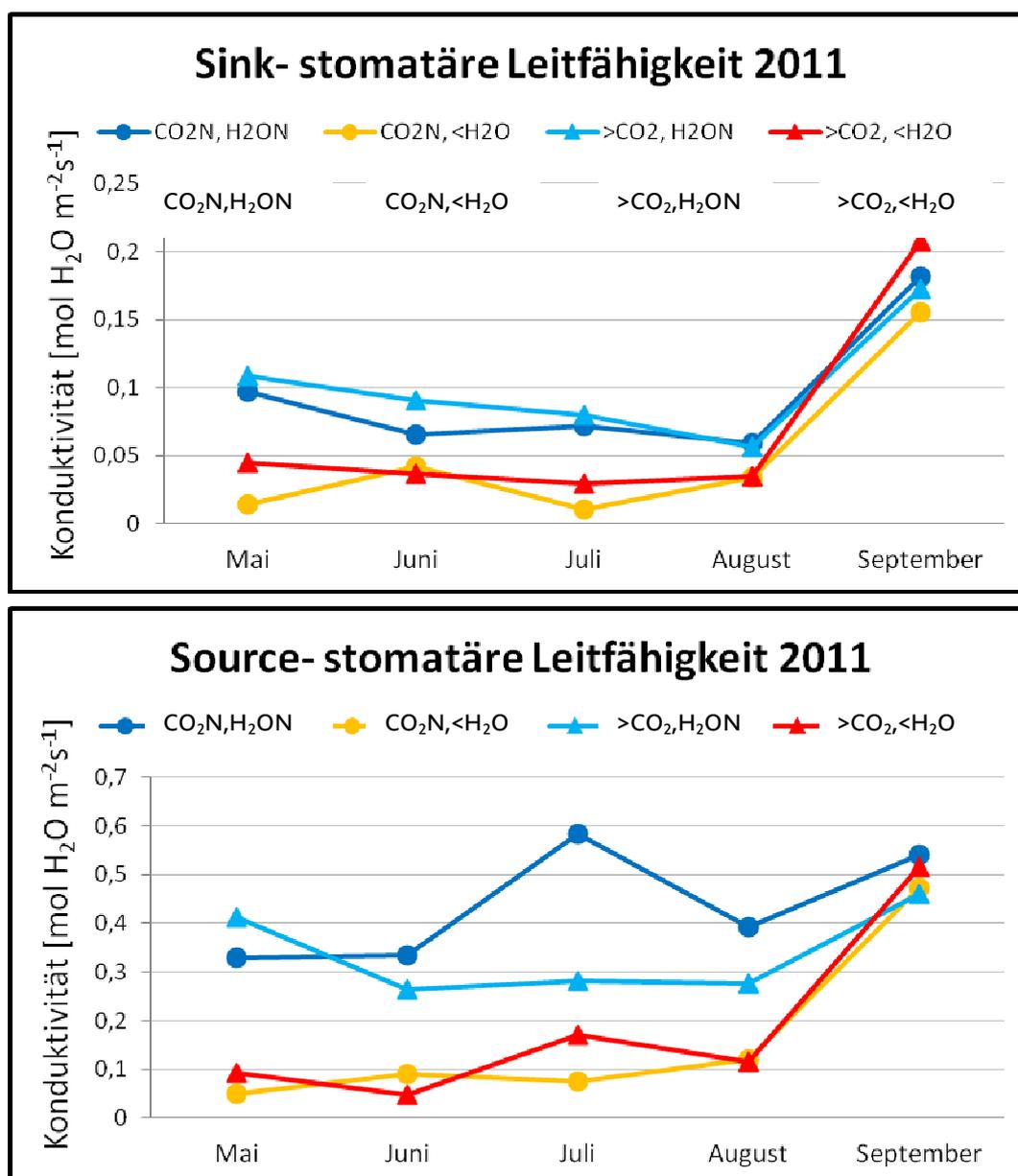


Abb. 3.27: Graphische Darstellung der Messwerte zur stomatären Leitfähigkeit von *P. canescens* 2011; unterteilt in Sink (sich entwickelnde Blätter) und Source (vollentwickelte Blätter); farbliche Orientierung: rot/gelb = Pflanzen im Trockenstress, hellblau/blau = Kontrollpflanzen; symbolische Orientierung: Kreismarkierung = normaler CO₂- Gehalt der Luft (385 ppm), Dreieckmarkierung = erhöhter CO₂- Gehalt der Luft (950 ppm).

Die Darstellung der stomatären Leitfähigkeiten bestätigt die Werteentwicklung der Transpiration bei Sink- und Sourceblättern. Auch hier zeigen sich für die Pflanzen unter Trockenstress konstant verminderte Werte, unabhängig vom CO₂.

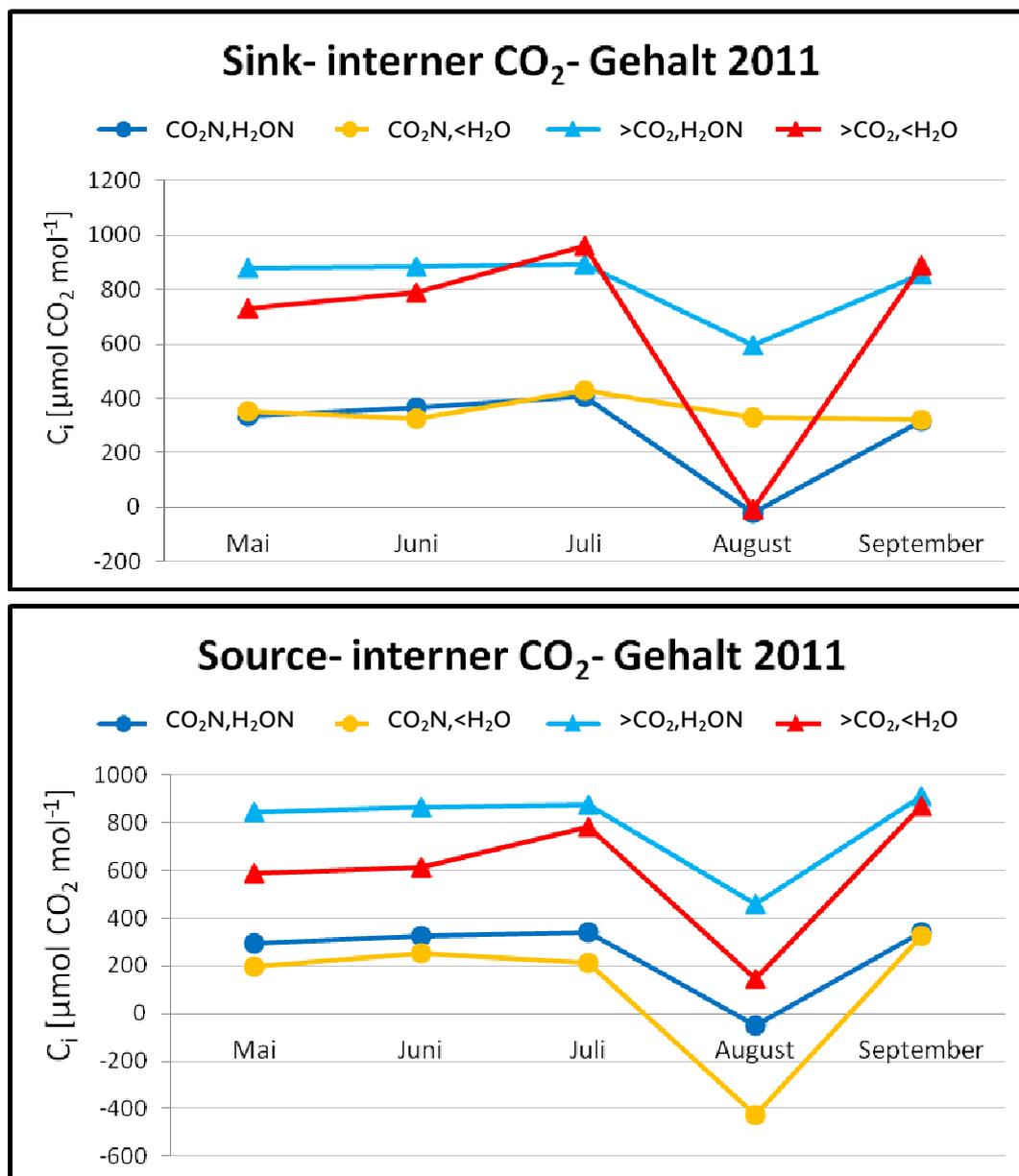


Abb. 3.28: Graphische Darstellung der Messwerte zum internen CO₂- Gehalt von *P. canescens* 2011; unterteilt in Sink (sich entwickelnde Blätter) und Source (vollentwickelte Blätter); farbliche Orientierung: rot/gelb = Pflanzen im Trockenstress, hellblau/blau = Kontrollpflanzen; symbolische Orientierung: Kreismarkierung = normaler CO₂- Gehalt der Luft (385 ppm), Dreieckmarkierung = erhöhter CO₂- Gehalt der Luft (950 ppm).

Auch für den inneren CO₂- Gehalt der Blätter bestätigen die Darstellungen die Berechnungen zur Signifikanz: die Versuchsvariationen unter erhöhtem CO₂- Gehalt der Luft haben durchgehend höhere Werte, wobei die Schwankungen bei den Sink- Blättern deutlicher sind. Zu beachten: die scheinbar verminderten Werte für die jeweiligen Variationen mit eingeschränkter Wasserzufuhr, sind nicht signifikant (s. Tab. 3.10, rot markierte Werte).

3.4.1.2 Gaswechsel von *F. sylvatica* im saisonalen Verlauf 2011

Analog zur Versuchsreihe mit *P. canescens*, sollen die Berechnungen zur Signifikanz und graphischen Darstellungen für 4 verwendete Datensätze der Messungen Aufschluss über den Einfluss der Versuchsbedingungen auf den Gaswechsel geben.

Die Datensätze sind folgende:

Netto- Photosyntheserate = berechnet aus CO₂- Aufnahme rate [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$],

Transpiration = Abgabe von H₂O (als Wasserdampf) in [$\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$],

stomatäre Leitfähigkeit = Konduktivität in [$\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$],

interner CO₂ = interzelluläre CO₂- Konzentration in [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$].

Tab. 3.11: Übersicht zur Berechnung der Signifikanz der Gaswechselfmessungen von *F. sylvatica* 2011 mittels Student's *t*- Test. Signifikanz für Werte $\leq 0,05$ (grün markiert); zur Berechnung wurden alle Monatsmittelwerte der Saison einer Versuchsvariation gegeneinander verglichen, Kontrolle (K) = CO₂N,H₂ON; n = 8 Pflanzen pro Variation in 2-5 Messungen pro Monat; normal CO₂ = 385 ppm, erhöht CO₂ = 950 ppm.

Sink		st.			
		Photosyntheserate	Leitfähigkeit	interner CO ₂	Transpiration
CO ₂ N, _{<} H ₂ O	(K)	0,72	0,87	0,86	0,90
>CO ₂ ,H ₂ ON	(K)	0,98	0,64	0,19	0,37
>CO ₂ ,<H ₂ O	(K)	0,64	0,51	0,22	0,31
>CO ₂ ,H ₂ ON	CO ₂ N, _{<} H ₂ O	0,67	0,71	0,20	0,39
>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,59	0,84	0,98	0,92
CO ₂ N, _{<} H ₂ O	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,88	0,55	0,24	0,33
Source		st.			
		Photosyntheserate	Leitfähigkeit	interner CO ₂	Transpiration
CO ₂ N, _{<} H ₂ O	(K)	0,67	0,80	0,87	0,97
>CO ₂ ,H ₂ ON	(K)	0,31	0,03	0,15	0,03
>CO ₂ ,<H ₂ O	(K)	0,08	0,07	0,16	0,06
>CO ₂ ,H ₂ ON	CO ₂ N, _{<} H ₂ O	0,10	0,03	0,17	0,025
>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,29	0,41	0,99	0,57
CO ₂ N, _{<} H ₂ O	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,021	0,06	0,17	0,06

Wie zuvor für die Pappel auch, beziehen sich die Berechnungen zur Signifikanz mittels Student's *t*- Test auf den gesamten saisonalen Verlauf.

Zunächst ist zu beschreiben, dass für die sich entwickelnden Blätter der Buchen keine signifikanten Verläufe zu berechnen waren, dies bedeutet, dass die Werteentwicklung nicht gleichmäßig verlief und ein Einfluss der Versuchsbedingungen nicht relevant auf die gesamte Saison zu beziehen ist.

Für die Werte der Source- Blätter zeigt sich ein Einfluss des erhöhten CO₂- Gehalt der Luft. Wobei besonders die Kombination aus erhöhtem CO₂ und gesetztem Trockenstress hervorzuheben ist (unterstrichene Werte).

Des Weiteren ist auffällig, dass der interne CO_2 - Gehalt in den Blättern bei keiner Versuchsvariation durch die gegebenen Umweltbedingungen zu beeinflussen war (rote Wertemarkierungen). Dies bedingt sich durch einen Messfehler im August (s. Abb. 3.32). Bei Vernachlässigung dieses Messfehlers ist eine Neuberechnung der Signifikanz erfolgreich gewesen (Werte nicht gezeigt). Somit kann der Einfluss des erhöhten CO_2 auf den erhöhten inneren CO_2 - Gehalt der Bäume bestätigt werden.

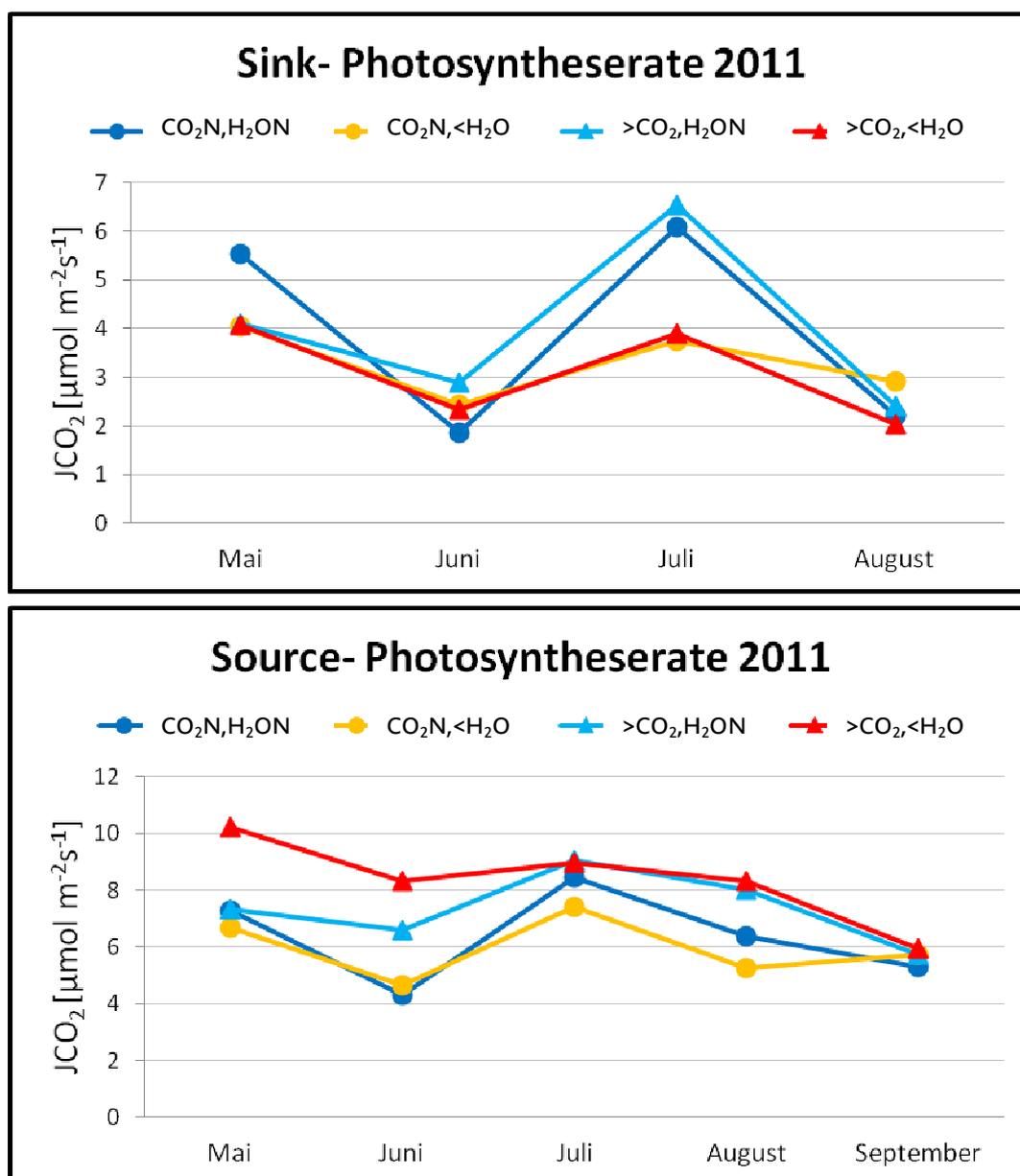


Abb. 3.29: Graphische Darstellung der Messwerte zur Photosyntheserate von *F. sylvatica* 2011; unterteilt in Sink (sich entwickelnde Blätter) und Source (vollentwickelte Blätter); farbliche Orientierung: rot/gelb = Pflanzen im Trockenstress, hellblau/blau = Kontrollpflanzen; symbolische Orientierung: Kreismarkierung = normaler CO_2 - Gehalt der Luft (385 ppm), Dreieckmarkierung = erhöhter CO_2 - Gehalt der Luft (950 ppm).

Bei den Messungen der Sink- Blätter zeigt sich eine Gruppierung der Werte bezogen auf die Wasserzufuhr der Pflanzen. Die scheinbar höheren Photosyntheseraten bei Pflanzen mit normaler Wasserzufuhr sind jedoch nicht signifikant. Der erhöhte CO_2 - Gehalt der Luft hat ebenfalls keinen Einfluss. Die Werteentwicklung der Source- Blätter zeigt konstant höhere Werte der Pflanzen unter erhöhtem CO_2 - Gehalt der Luft, wobei ein signifikanter Einfluss der Versuchsbedingungen nur in der Kombination mit gesetztem Trockenstress zu zeigen ist. Der Abfall der Werte zum Saisonende bezieht sich auf einen sinkenden Chlorophyllgehalt und der natürlichen Blattseneszenz der Bäume.

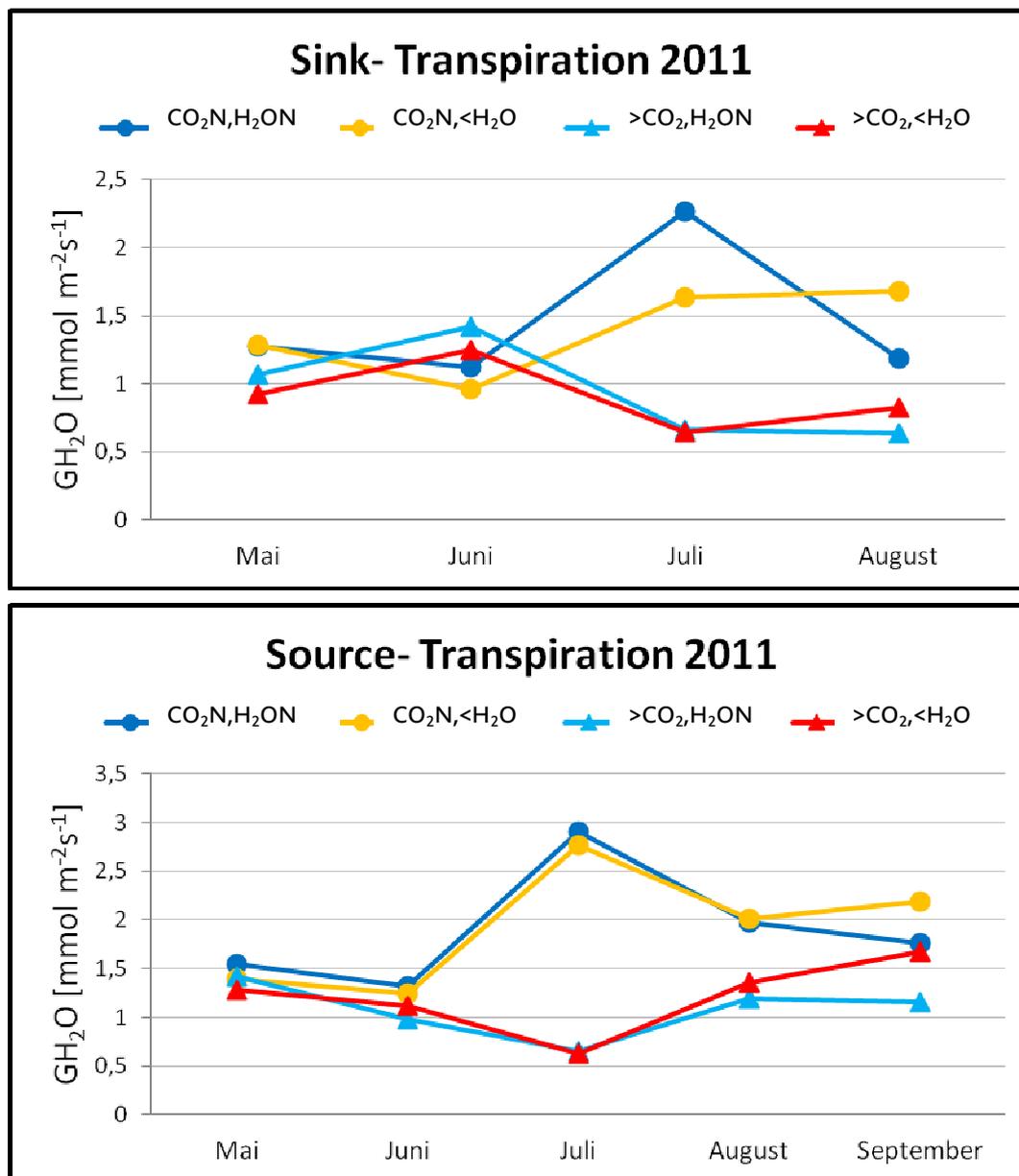


Abb. 3.30: Graphische Darstellung der Messwerte zur Transpiration von *F. sylvatica* 2011; unterteilt in Sink (sich entwickelnde Blätter) und Source (vollentwickelte Blätter); farbliche Orientierung: rot/gelb = Pflanzen im Trockenstress, hellblau/blau = Kontrollpflanzen; symbolische Orientierung: Kreismarkierung = normaler CO_2 - Gehalt der Luft (385 ppm), Dreieckmarkierung = erhöhter CO_2 - Gehalt der Luft (950 ppm).

Die Messwerte der Transpiration zeigen bei Sink- und Source- Blättern eine Aufteilung der Werte bezogen auf den CO₂- Gehalt der Luft; so senkt der steigende Kohlendioxidgehalt die Transpiration der Bäume, insbesondere bei den Source- Blättern auch signifikant über den gesamten saisonalen Verlauf. Diese Werteentwicklung ist unabhängig vom Trockenstress.

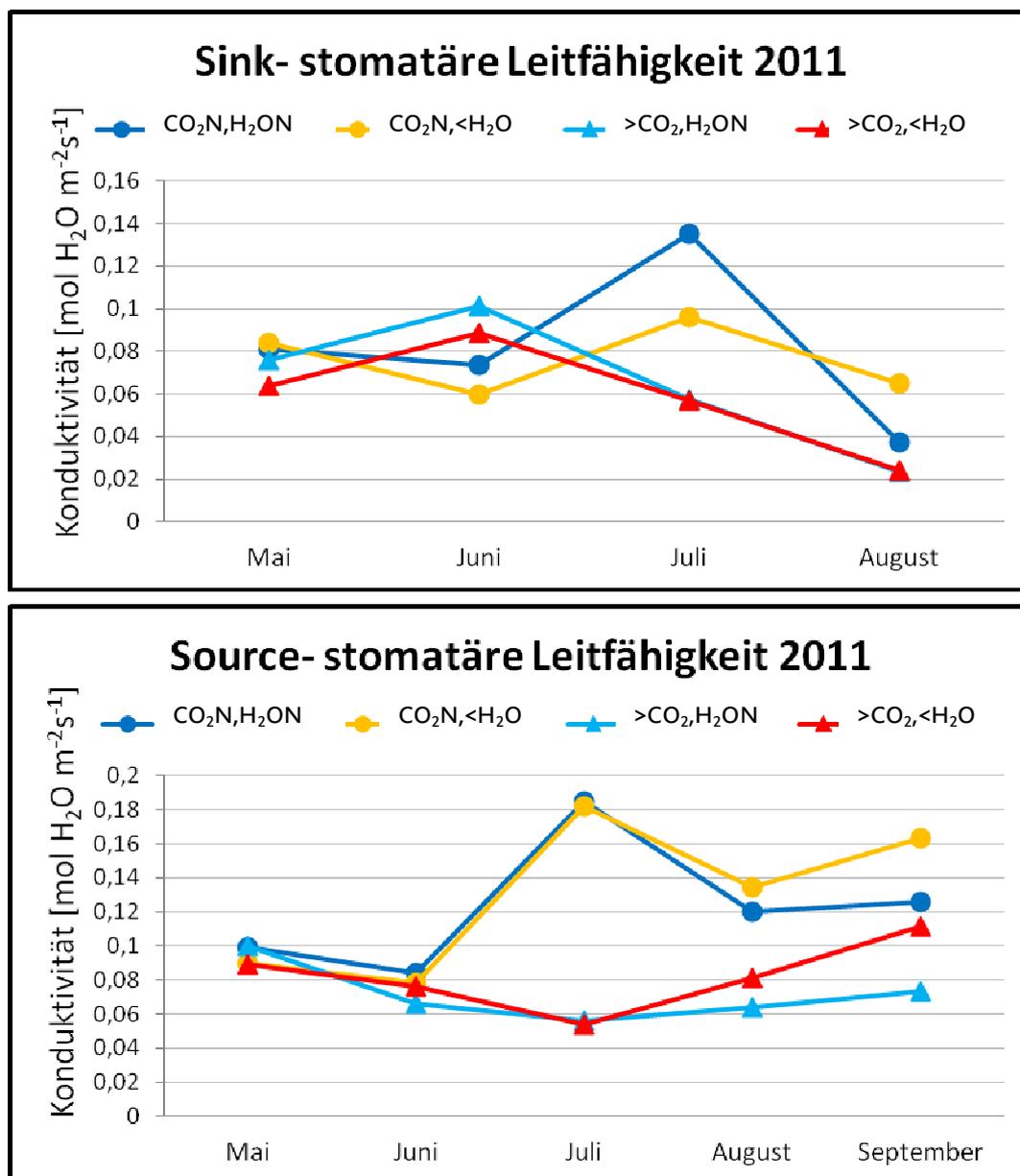


Abb. 3.31: Graphische Darstellung der Messwerte zur stomatären Leitfähigkeit von *F. sylvatica* 2011; unterteilt in Sink (sich entwickelnde Blätter) und Source (vollentwickelte Blätter); farbliche Orientierung: rot/gelb = Pflanzen im Trockenstress, hellblau/blau = Kontrollpflanzen; symbolische Orientierung: Kreismarkierung = normaler CO₂- Gehalt der Luft (385 ppm), Dreieckmarkierung = erhöhter CO₂- Gehalt der Luft (950 ppm).

Wie zuvor bei der Transpiration zeigt sich für die stomatäre Leitfähigkeit, insbesondere für die Source-Blätter, einen signifikanten Einfluss des CO₂ auf die saisonale Werteentwicklung. Die Versuchspflanzen mit normaler Gaszusammensetzung der Luft, haben eine erhöhte stomatäre Leitfähigkeit, im Vergleich zu ihren Kontrollen. Die Wasserzufuhr hat auch hier keinen Einfluss auf diese Werteentwicklung.

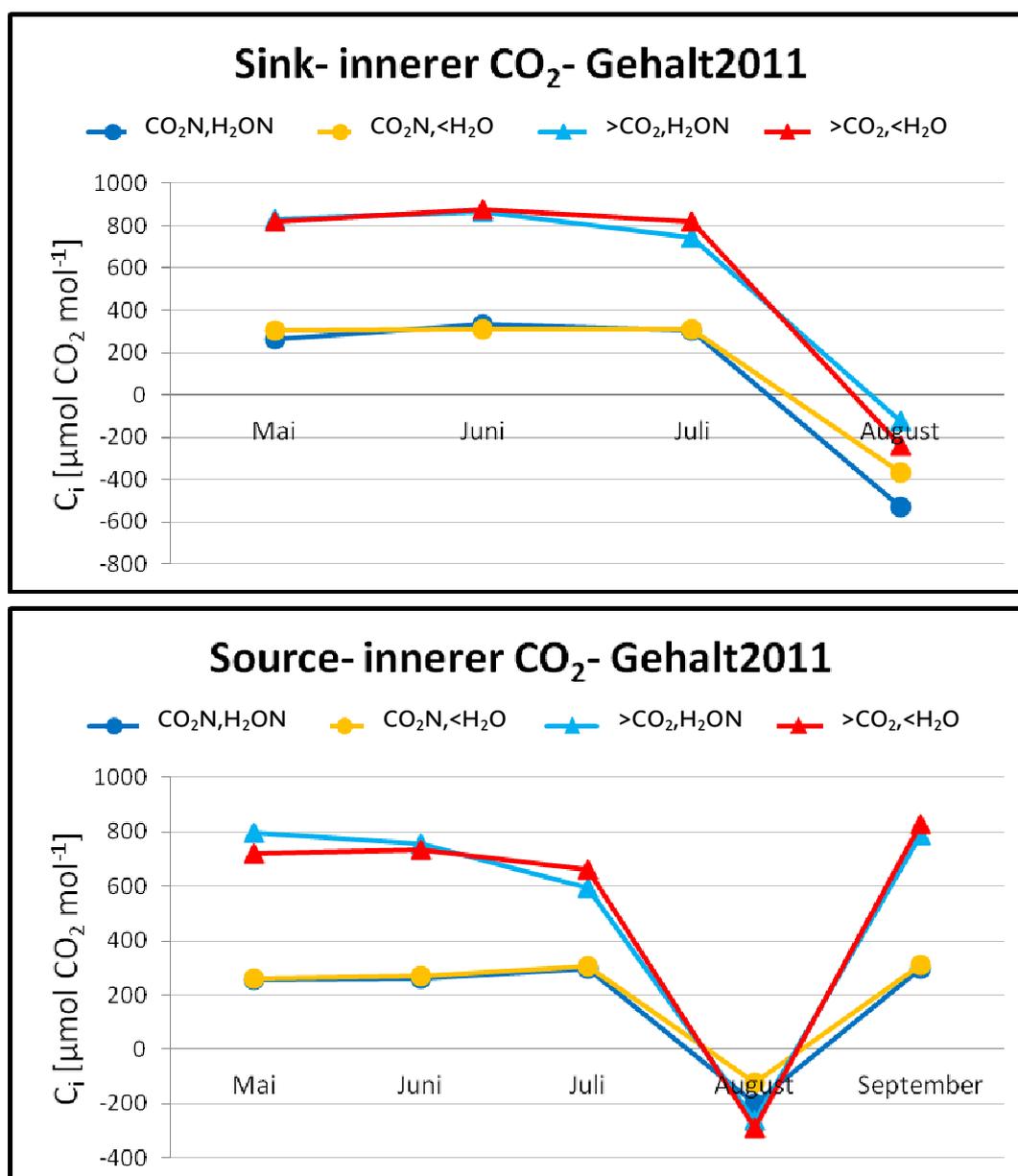


Abb. 3.32: Graphische Darstellung der Messwerte zum inneren CO₂- Gehalt von *F. sylvatica* 2011; unterteilt in Sink (sich entwickelnde Blätter) und Source (vollentwickelte Blätter); farbliche Orientierung: rot/gelb = Pflanzen im Trockenstress, hellblau/blau = Kontrollpflanzen; symbolische Orientierung: Kreismarkierung = normaler CO₂- Gehalt der Luft (385 ppm), Dreieckmarkierung = erhöhter CO₂- Gehalt der Luft (950 ppm).

Die Werteentwicklung zur Messung des inneren CO₂ zeigt einen regelmäßigen saisonalen Verlauf aller Datensätze, unabhängig von der Blattentwicklung. Dabei zeigt sich ein Einfluss des erhöhten CO₂ bezogen auf die Kontrollvariationen. Unabhängig vom Trockenstress ergibt sich ein höherer interner CO₂- Gehalt der Pflanzen, die unter veränderter Gaszusammensetzung der Luft wachsen konnten. Wie in Tab. 3.11 jedoch vermerkt ist, ist keine Signifikanz für den Gesamtverlauf zu berechnen. Dies begründet sich auf den gezeigten Werteabfall aller Variationen im August unter „0“.

3.4.1.3 Chlorophyllgehalt von *P. canescens* im saisonalen Verlauf 2011

Die Messreihen wurden wöchentlich in sich- entwickelnde (Sink) und voll- entwickelte (Source)- Blätter aufgeteilt.

3.2.1.3.1 Source- Blätter

Die nicht- invasiven Messungen des Chlorophyllgehaltes von Source- Blättern mittels Chlorophyllmeter lassen folgende saisonale Verläufe 2011 deutlich werden: alle Werte der Versuchsvariationen haben einen mäßig kontinuierlichen Verlauf, in dem kein deutlicher Abfall zu beobachten ist. Während der gesamten Saison besitzen die Blätter der trockengestressten Pflanzen der Kontrollkammer (CO_2N , H_2O) den höchsten Chlorophyllgehalt. Mit geringen Abweichungen beinhalten beide Trockenstress- Variationen während der gesamten Saison einen höheren Chlorophyllgehalt als ihre Kontrollen, sowie die Trockenstress- Variation unter normalem atmosphärischem CO_2 einen höheren Gehalt, als ihre Vergleichsvariation bei erhöhtem CO_2 - Gehalt der Luft. Eine Signifikanz dieser Unterschiede lässt sich anhand der Septemberwerte nachweisen.

Tab. 3.12: Gesamtwerteübersicht des *Chlorophyll Concentration Index* (CCI) zur Messung des Chlorophyllgehaltes an Source- Blättern von *P. canescens* 2011 mit Standardabweichungen; gemessen wurde an 5-10 Blättern pro Baum (alle Baumhöhen), Anzahl der Bäume pro Variante (n) = 5-10; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm; Student's *t*-Test für die Werte des Gesamtmonats bezogen auf die Kontrollvariante CO₂N,H₂ON, Signifikanz (*) für Werte ≤ 0,05

SPAD- Werte <i>P.canescens</i> , Source 2011						<i>t</i> -Test
Mai	18.05.2011	25.05.2011	keine Messungen			Mai
CO ₂ N,H ₂ ON	39,98 ± 1,2	40,34 ± 2,5				(Kontrolle)
CO ₂ N,<H ₂ O	39,06 ± 2,3	41,02 ± 1,3				0,91
>CO ₂ ,H ₂ ON	37,54 ± 1,6	39,72 ± 2,3				0,30
>CO ₂ ,<H ₂ O	38,2 ± 0,9	39,97 ± 2,4				0,36
Juni	01.06.2011	09.06.2011	15.06.2011	22.06.2011	30.06.2011	Juni
CO ₂ N,H ₂ ON	40,23 ± 1,7	38,66 ± 0,6	38,76 ± 1,2	37,68 ± 1,4	35,83 ± 1,6	(Kontrolle)
CO ₂ N,<H ₂ O	41,46 ± 3,5	40,68 ± 3,0	41,88 ± 1,1	39,28 ± 1,6	37,25 ± 1,8	0,13
>CO ₂ ,H ₂ ON	38,05 ± 2,4	39,41 ± 0,6	37,95 ± 1,0	36,62 ± 2,2	31,3 ± 1,1	0,35
>CO ₂ ,<H ₂ O	38,05 ± 2,4	38,85 ± 2,4	40,43 ± 1,4	37,28 ± 3,3	34,73 ± 2,8	0,76
Juli	08.07.2011	15.07.2011	27.07.2011	keine Messungen		Juli
CO ₂ N,H ₂ ON	keine Messung	36,2 ± 1,5	38,98 ± 0,6			(Kontrolle)
CO ₂ N,<H ₂ O		39,05 ± 0,6	42,55 ± 0,5			0,29
>CO ₂ ,H ₂ ON		32,96 ± 2,1	36,1 ± 3,4			0,28
>CO ₂ ,<H ₂ O		36,96 ± 1,9	41,7 ± 1,5			0,59
August	03.08.2011	10.08.2011	25.08.2011	31.08.2011	keine Messung	August
CO ₂ N,H ₂ ON	39,13 ± 1,0	38,03 ± 1,2	37,43 ± 1,1	37,72 ± 1,8		(Kontrolle)
CO ₂ N,<H ₂ O	42,05 ± 0,6	41,8 ± 2,1	41,78 ± 1,9	40 ± 1,7		<0,001*
>CO ₂ ,H ₂ ON	36,36 ± 2,6	35,07 ± 1,7	34,08 ± 1,7	34,23 ± 2,2		<0,001*
>CO ₂ ,<H ₂ O	40,81 ± 1,7	38,95 ± 4,1	38,08 ± 1,3	35,05 ± 1,9	0,91	
September	07.09.2011	14.09.2011	21.09.2011	keine Messungen		September
CO ₂ N,H ₂ ON	36,33 ± 1,7	35,53 ± 1,3	34,47 ± 2,0			(Kontrolle)
CO ₂ N,<H ₂ O	39,75 ± 2,4	37,98 ± 3,3	41,17 ± 1,1			0,01*
>CO ₂ ,H ₂ ON	32,52 ± 2,8	33,19 ± 2,1	31,61 ± 2,3			0,01*
>CO ₂ ,<H ₂ O	35,98 ± 1,2	36,44 ± 3,1	37,29 ± 2,6			0,16

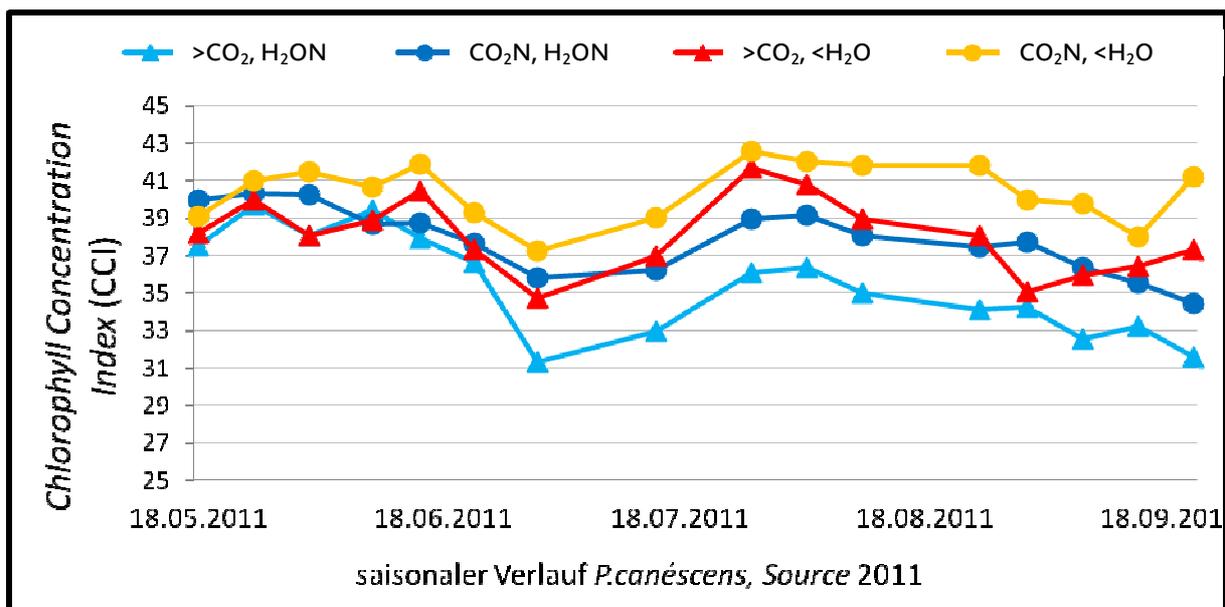


Abb. 3.33: Graphische Darstellung der Messwerte des *Chlorophyll Concentration Index* (CCI) zur Messung des Chlorophyllgehaltes an Source- Blättern von *P. canescens* im saisonalen Verlauf 2011; farbliche Orientierung: rot/gelb = Pflanzen im Trockenstress, hellblau/blau = Kontrollpflanzen; symbolische Orientierung: Kreismarkierung = normaler CO₂- Gehalt der Luft (385 ppm), Dreieckmarkierung = erhöhter CO₂- Gehalt der Luft (950 ppm).

Im saisonalen Verlauf zeigt sich kein eindeutiger Unterschied zwischen den Variationen mit eingeschränkter Wasserzufuhr. Der Einfluss des erhöhten CO₂- Gehaltes der Luft ist hier nicht relevant zu beschreiben (rote/gelbe Graphen).

Dagegen zeigen die Werteverläufe der Variationen mit normaler Wasserzufuhr einen signifikanten Unterschied bezogen auf den Kohlendioxidgehalt der Luft (blaue/hellblaue Graphen) (Im September keine Signifikanz der „roten Werte“ untereinander aber Signifikanz der „blauen Werte“ untereinander).

3.4.1.3.2 Sink- Blätter

Der Übergang von Sink- auf Source- Blatt im September beeinträchtigt den Verlauf des Graphen, sodass in der Darstellung auf diese Werte verzichtet wurde (s. Abb. 3.34).

Tab. 3.13: Gesamtwerteübersicht des *Chlorophyll Concentration Index* (CCI) zur Messung des Chlorophyllgehaltes an Sink- Blättern von *P. canescens* 2011 mit Standardabweichungen; gemessen wurde an 2-6 Blättern pro Baum (Spitzenblätter), Anzahl der Bäume pro Variante (n) = 5-10; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm; Student's *t*-Test für die Werte des Gesamtmonats bezogen auf die Kontrollvariante CO₂N,H₂O, Signifikanz (*) für Werte ≤ 0,05

SPAD- Werte <i>P.canescens</i> , Sink 2011						<i>t</i> -Test
Mai	18.05.2011	25.05.2011				Mai
CO ₂ N,H ₂ O	22,8 ± 0,9	21,81 ± 4,4	keine Messungen			(Kontrolle)
CO ₂ N,<H ₂ O	26,22 ± 1,9	22,51 ± 2,1				0,39
>CO ₂ ,H ₂ O	19,16 ± 2,6	21,26 ± 2,1				0,21
>CO ₂ ,<H ₂ O	23,94 ± 3,7	21,04 ± 2,6				0,91
Juni	01.06.2011	09.06.2011	15.06.2011	22.06.2011	30.06.2011	Juni
CO ₂ N,H ₂ O	19,55 ± 1,2	17,68 ± 1,3	17,32 ± 2,3	17,96 ± 1,5	16,73 ± 1,8	(Kontrolle)
CO ₂ N,<H ₂ O	22,73 ± 0,8	19,45 ± 1,0	19,88 ± 1,0	20,34 ± 1,4	19,92 ± 3,6	0,01*
>CO ₂ ,H ₂ O	18,45 ± 2,1	17,53 ± 1,5	15,15 ± 1,9	16,5 ± 1,6	14,45 ± 1,9	0,14
>CO ₂ ,<H ₂ O	19,7 ± 2,0	20,2 ± 1,5	19,77 ± 1,6	18,42 ± 1,7	18,6 ± 2,7	0,03*
Juli	08.07.2011	15.07.2011	27.07.2011			Juli
CO ₂ N,H ₂ O		17,4 ± 2,3	16,55 ± 1,1	keine Messungen		(Kontrolle)
CO ₂ N,<H ₂ O	keine	15,73 ± 1,4	21,88 ± 1,4			0,61
>CO ₂ ,H ₂ O	Messung	15,9 ± 3,4	18,4 ± 1,8			0,90
>CO ₂ ,<H ₂ O		16,32 ± 2,1	17,65 ± 1,8			0,99
August	03.08.2011	10.08.2011	25.08.2011	31.08.2011		August
CO ₂ N,H ₂ O	16,37 ± 1,2	19,75 ± 1,8	15,85 ± 3,7	16 ± 2,0	keine Messung	(Kontrolle)
CO ₂ N,<H ₂ O	20,43 ± 1,8	20,12 ± 3,1	18,42 ± 3,4	17,45 ± 1,5		0,12
>CO ₂ ,H ₂ O	20,08 ± 1,3	19,2 ± 2,6	15,12 ± 3,8	15,47 ± 1,8		0,77
>CO ₂ ,<H ₂ O	17,8 ± 1,0	16,4 ± 2,5	17,83 ± 1,1	17,65 ± 2,5		0,68
September	07.09.2011	14.09.2011	21.09.2011			September
CO ₂ N,H ₂ O	22,12 ± 3,8	keine Sink- Blätter		keine Messungen		(Kontrolle)
CO ₂ N,<H ₂ O	23,43 ± 2,4					nicht zu
>CO ₂ ,H ₂ O	25,7 ± 4,2					berechnen
>CO ₂ ,<H ₂ O	19,62 ± 4,1					

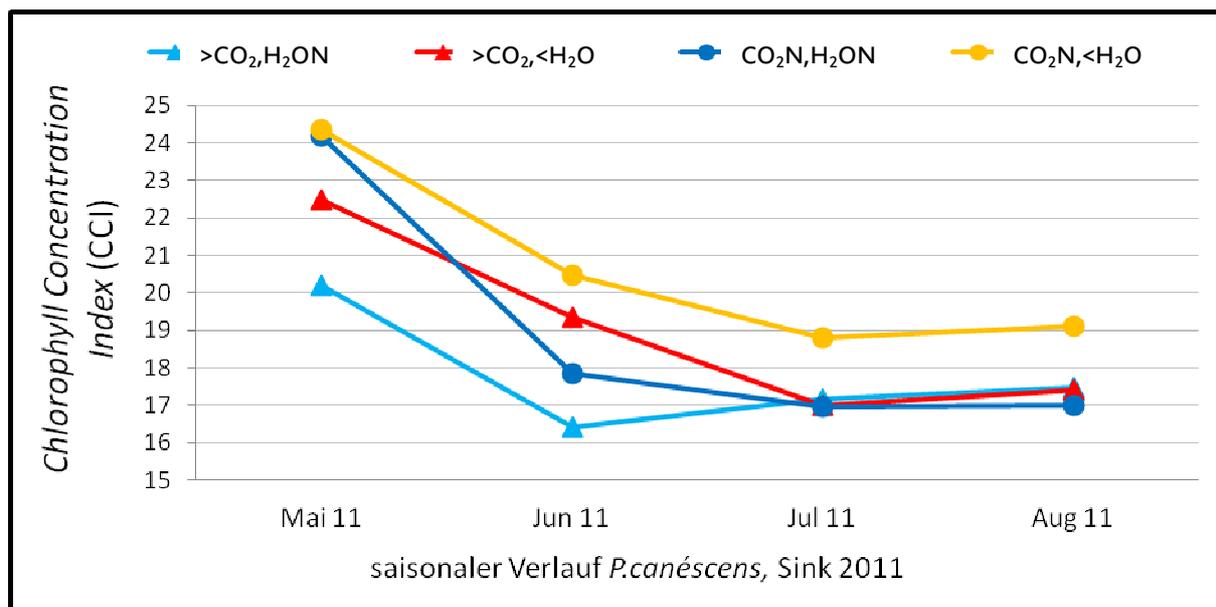


Abb. 3.34: Graphische Darstellung der Messwerte des *Chlorophyll Concentration Index* (CCI) zur Messung des Chlorophyllgehaltes an Sink- Blättern von *P. canescens* im saisonalen Verlauf 2011; farbliche Orientierung: rot/gelb = Pflanzen im Trockenstress, hellblau/blau = Kontrollpflanzen; symbolische Orientierung: Kreismarkierung = normaler CO₂- Gehalt der Luft (385 ppm), Dreieckmarkierung = erhöhter CO₂- Gehalt der Luft (950 ppm).

Die Versuchsvariation der Pflanzen im Trockenstress unter normalem CO₂- Gehalt der Luft zeigt durchgängig die höchste Chlorophyllkonzentration, wobei keiner der Werte für August 2011 einen signifikanten Unterschied zur Kontrolle (CO₂N, H₂ON) aufweist.

Somit kann kein eindeutiger Einfluss, weder veränderter Kohlendioxid- Konzentration der Luft, noch eine eingeschränkte Wasserversorgung, auf den Gehalt an Chlorophyll in sich entwickelnden Blättern junger Pappeln nachgewiesen werden.

3.4.1.4 Chlorophyllgehalt von *F. sylvatica* im saisonalen Verlauf 2011

Mit Hilfe des Chlorophyllmeter wurden die wöchentlichen Messungen zur Darstellung des Chlorophyllgehaltes in sich- entwickelnde (Sink) und voll- entwickelte (Source)- Blätter der Buchen aufgeteilt.

3.4.1.4.1 Source- Blätter

Der saisonale Verlauf der Messwerte zur Bestimmung des *Chlorophyll Concentration Index* (CCI) an Source- Blättern der Buchen zeigt einen unregelmäßigen Verlauf, in dem kein deutlicher Abfall zu beobachten ist. Die Pflanzen mit normaler Wasserversorgung und unter erhöhtem Kohlendioxidgehalt der Luft (>CO₂, H₂ON) haben durchgängig den geringsten Gehalt an Chlorophyll. Die Versuchsvariation unter erhöhtem CO₂ und Trockenstress zeigt im Verlauf keinen signifikanten Unterschied zur Kontrolle.

Tab. 3.14: Gesamtwerteübersicht des *Chlorophyll Concentration Index* (CCI) zur Messung des Chlorophyllgehaltes an Source- Blättern von *F. sylvatica* 2011 mit Standardabweichungen; gemessen wurde an 5-10 Blättern pro Baum (alle Baumhöhen), Anzahl der Bäume pro Variante (n) = 5-8; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm; Student's *t*-Test für die Werte des Gesamtmonats bezogen auf die Kontrollvariante CO₂N,H₂ON, Signifikanz (*) für Werte ≤ 0,05

SPAD- Werte <i>F.sylvatica</i> , Source 2011						<i>t</i> -Test
Mai	18.05.2011	25.05.2011				Mai
CO ₂ N,H ₂ ON	27,42 ± 3,2	29,14 ± 2,9	keine Messungen			(Kontrolle)
CO ₂ N,<H ₂ O	27,1 ± 3,4	29,68 ± 2,1				0,94
>CO ₂ ,H ₂ ON	27,76 ± 2,4	25,82 ± 4,0				0,36
>CO ₂ ,<H ₂ O	29,82 ± 4,6	29,26 ± 4,6				0,29
Juni	01.06.2011	09.06.2011	15.06.2011	22.06.2011	30.06.2011	Juni
CO ₂ N,H ₂ ON	32,25 ± 2,2	33,42 ± 2,7	29,5 ± 1,7	32,86 ± 3,3	32,28 ± 2,8	(Kontrolle)
CO ₂ N,<H ₂ O	31,45 ± 0,6	32,2 ± 1,5	32,04 ± 1,5	31,18 ± 2,7	30,9 ± 2,7	0,50
>CO ₂ ,H ₂ ON	28,17 ± 3,5	25,03 ± 3,9	28,26 ± 3,6	28,68 ± 2,9	27,26 ± 1,9	<0,001*
>CO ₂ ,<H ₂ O	31,3 ± 4,8	31,88 ± 3,4	33,77 ± 3,8	33,18 ± 3,0	32,64 ± 2,9	0,56
Juli	08.07.2011	15.07.2011	27.07.2011			Juli
CO ₂ N,H ₂ ON	keine Messung	33,5 ± 2,1	31,43 ± 2,7	keine Messungen		(Kontrolle)
CO ₂ N,<H ₂ O		29,3 ± 3,2	29,46 ± 3,4			0,09
>CO ₂ ,H ₂ ON		29,03 ± 2,5	29,39 ± 2,1			0,09
>CO ₂ ,<H ₂ O		31,7 ± 3,0	32,17 ± 2,8			0,67
August	03.08.2011	10.08.2011	25.08.2011	31.08.2011		August
CO ₂ N,H ₂ ON	31,12 ± 3,2	30,73 ± 1,8	30,57 ± 3,3	31,15 ± 3,0	keine Messung	(Kontrolle)
CO ₂ N,<H ₂ O	30,08 ± 2,6	27,96 ± 3,6	27,52 ± 2,9	27,07 ± 3,6		<0,001*
>CO ₂ ,H ₂ ON	29,54 ± 3,3	28,16 ± 4,6	26,16 ± 3,7	27,05 ± 2,9		<0,001*
>CO ₂ ,<H ₂ O	32,18 ± 1,7	32,04 ± 2,6	29,54 ± 2,9	29,61 ± 2,6		0,94
September	07.09.2011	14.09.2011	21.09.2011			September
CO ₂ N,H ₂ ON	29,62 ± 2,6	28,56 ± 2,3	29,98 ± 3,6	keine Messungen		(Kontrolle)
CO ₂ N,<H ₂ O	26,66 ± 4,2	28,11 ± 3,0	27,37 ± 3,2			0,03*
>CO ₂ ,H ₂ ON	25,72 ± 3,7	24,55 ± 3,9	23,43 ± 5,4			<0,001*
>CO ₂ ,<H ₂ O	28,43 ± 2,3	26,91 ± 2,7	25,52 ± 3,2			0,06

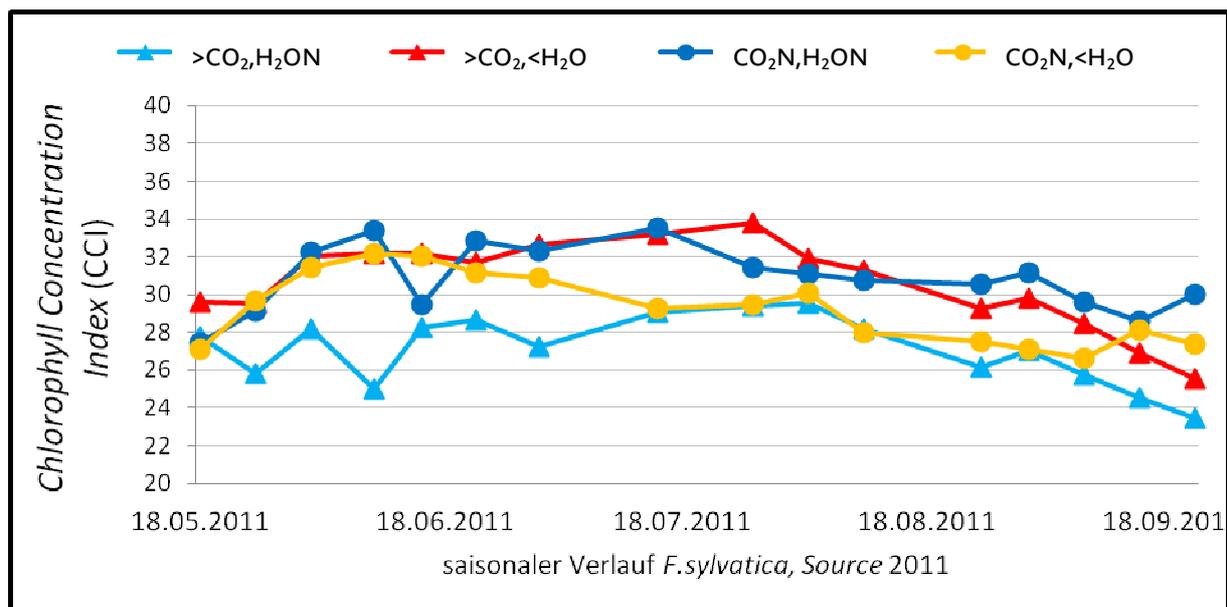


Abb. 3.35: Graphische Darstellung der Messwerte des *Chlorophyll Concentration Index* (CCI) zur Messung des Chlorophyllgehaltes an Source- Blättern von *F. sylvatica* im saisonalen Verlauf 2011; farbliche Orientierung: rot/gelb = Pflanzen im Trockenstress, hellblau/blau = Kontrollpflanzen; symbolische Orientierung: Kreismarkierung = normaler CO₂- Gehalt der Luft (385 ppm), Dreieckmarkierung = erhöhter CO₂- Gehalt der Luft (950 ppm).

Betrachtet man die Werte zum Ende der Saison (September 2011), so zeigt weder der erhöhte Kohlendioxidgehalt der Luft, noch die eingeschränkte Wasserversorgung einen eindeutigen Einfluss auf den Gehalt an Chlorophyll in voll entwickelten Blättern von *F. sylvatica*.

3.4.1.4.2 Sink- Blätter

Der Übergang von Sink- auf Source- Blatt war im September weit fortgeschritten und keine neuen Sink- Blätter an den Bäumen mehr verfügbar.

Die Messungen des Chlorophyllgehaltes sich entwickelnder Blätter von *F. sylvatica* bestätigen den nicht eindeutigen Verlauf voll entwickelter Blätter der Saison 2011.

Tab. 3.15: Gesamtwerteübersicht des *Chlorophyll Concentration Index* (CCI) zur Messung des Chlorophyllgehaltes an Sink- Blättern von *F. sylvatica* 2011 mit Standardabweichungen; gemessen wurde an 2- 8 Blättern pro Baum (Spitzenblätter), Anzahl der Bäume pro Variante (n) = 5-8; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm; Student's *t*-Test für die Werte des Gesamtmonats bezogen auf die Kontrollvariante CO₂N,H₂O, Signifikanz (*) für Werte ≤ 0,05

SPAD- Werte <i>F.sylvatica</i> , Sink 2011						<i>t</i> -Test	
Mai		18.05.2011	25.05.2011			Mai	
CO ₂ N,H ₂ O	15,7 ± 4,0	18,42 ± 5,2	keine Messungen			(Kontrolle)	
CO ₂ N,<H ₂ O	16,6 ± 7,5	18,62 ± 8,6				0,77	
>CO ₂ ,H ₂ O	18,42 ± 7,2	19,47 ± 6,2				0,32	
>CO ₂ ,<H ₂ O	13,67 ± 4,4	18,52 ± 5,8				0,76	
Juni		01.06.2011	09.06.2011	15.06.2011	22.06.2011	30.06.2011	Juni
CO ₂ N,H ₂ O	12,57 ± 6,7	15,34 ± 4,2	15,16 ± 3,4	15,96 ± 4,7	15,25 ± 9,5	(Kontrolle)	
CO ₂ N,<H ₂ O	18,87 ± 7,0	11,83 ± 2,8	16,4 ± 5,7	13,8 ± 4,2	16,3 ± 3,1	0,67	
>CO ₂ ,H ₂ O	20,2 ± 5,9	13,12 ± 8,3	9,05 ± 0,5	12,82 ± 5,5	10,44 ± 3,0	0,41	
>CO ₂ ,<H ₂ O	16,9 ± 8,5	14,64 ± 4,9	9,12 ± 1,8	12,38 ± 7,3	10,86 ± 3,1	0,20	
Juli		08.07.2011	15.07.2011	27.07.2011			Juli
CO ₂ N,H ₂ O		21,12 ± 2,0	22,52 ± 2,7	keine Messungen			(Kontrolle)
CO ₂ N,<H ₂ O	keine	17,15 ± 7,5	14,3 ± 0,3				0,06
>CO ₂ ,H ₂ O	Messung	18,08 ± 4,5	18,58 ± 4,2				0,04*
>CO ₂ ,<H ₂ O		16,4 ± 3,2	15,29 ± 3,8				0,02*
August		03.08.2011	10.08.2011	25.08.2011	31.08.2011		August
CO ₂ N,H ₂ O	23,3 ± 5,9	24,9	keine Sink- Blätter		keine Messung	(Kontrolle)	
CO ₂ N,<H ₂ O	18	19,85 ± 3,9				0,05	
>CO ₂ ,H ₂ O	18,22 ± 3,1	16,85 ± 3,7				0,02*	
>CO ₂ ,<H ₂ O	12,82 ± 4,2	13,45 ± 4,4				<0,001*	
September		07.09.2011	14.09.2011	21.09.2011			September
CO ₂ N,H ₂ O	keine Sink- Blätter			keine Messungen		(Kontrolle)	
CO ₂ N,<H ₂ O						-	
>CO ₂ ,H ₂ O							
>CO ₂ ,<H ₂ O							

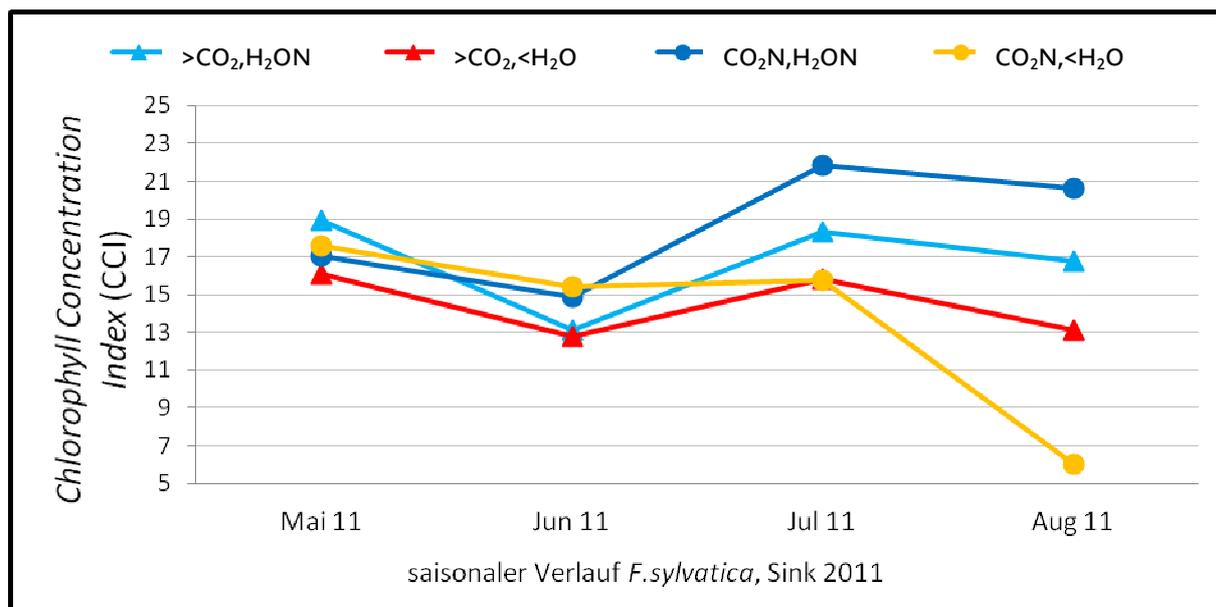


Abb. 3.36: Graphische Darstellung der Messwerte des *Chlorophyll Concentration Index* (CCI) zur Messung des Chlorophyllgehaltes an Sink- Blättern von *F. sylvatica* im saisonalen Verlauf 2011; farbliche Orientierung: rot/gelb = Pflanzen im Trockenstress, hellblau/blau = Kontrollpflanzen; symbolische Orientierung: Kreismarkierung = normaler CO₂- Gehalt der Luft (385 ppm), Dreieckmarkierung = erhöhter CO₂- Gehalt der Luft (950 ppm).

Die Versuchsvariationen sind nur im August 2011 signifikant von den Kontrollpflanzen (CO₂N, H₂O) zu unterscheiden. Für sich entwickelnde Blätter zeigt sich, dass die Pflanzen mit normaler Wasserversorgung einen höheren Chlorophyllgehalt aufweisen. Der veränderte Kohlendioxidgehalt der Luft beschreibt keinen Einfluss auf diese Entwicklung.

3.4.2 Chlorophyllfluoreszenz bei *P. canescens*

Die mittels IMAGING- PAM gemessene Chlorophyllfluoreszenz wurde über eine Versuchsdauer von 10 Minuten gemessen. Drei Bäume pro Versuchsvariation wurden nach <15 min Dunkeladaption in den Messkopf eingespannt, die maximal mögliche Chlorophyllfluoreszenz (F_m) über einen absättigenden Lichtimpuls (*Saturating Light Pulse*) ermittelt und fortlaufend alle 12 Sekunden der Verlauf der photochemischen Energie aufgezeichnet.

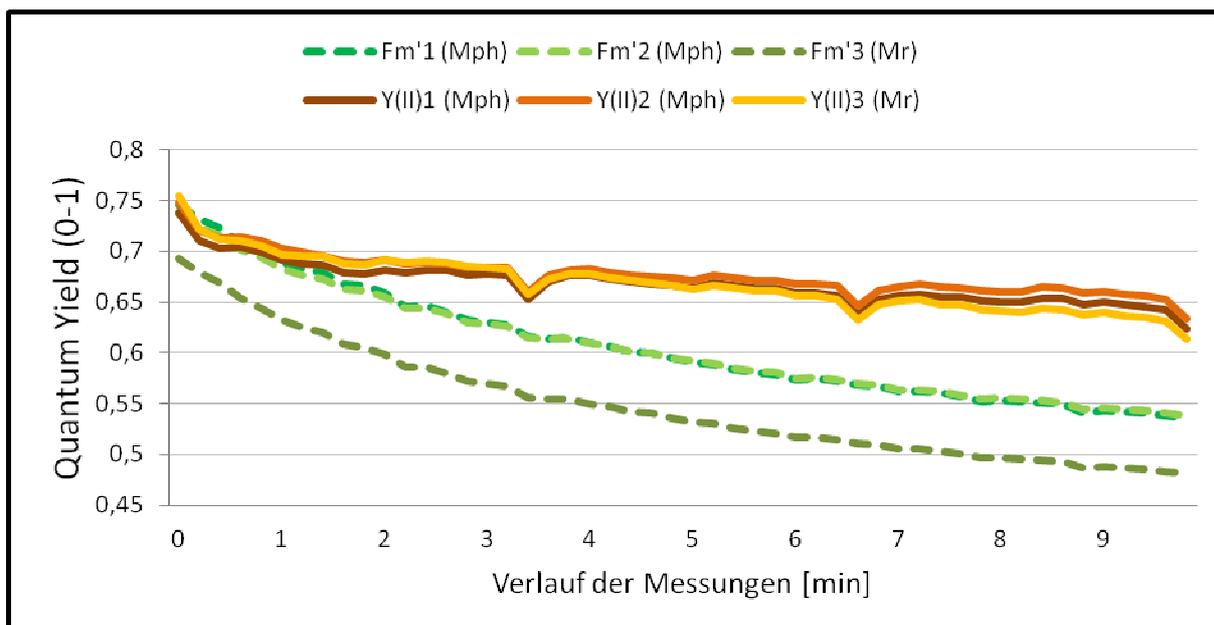


Abb. 3.37: Graphische Darstellung einer exemplarischen Source- Messung an *P. canescens* (>CO₂, <H₂O) im Juli 2011; die drei Messbereiche eines Blattes sind als Mesophyllbereich (Mph) und Bereich der Mittelrippe (Mr) bezeichnet; Werte zur Chlorophyllfluoreszenz (Fm') = grüne Farbmarkierung, gestrichelte Linien; Werte zur PSII- Effizienz = rötliche Farbmarkierung, durchgehende Linien; normaler CO₂- Gehalt der Luft = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt der Luft = 950 ppm

Diese zur Anschauung gewählte Darstellung der Werte im Verlauf einer Messung an einem Source-Blatt zeigt, wie die Pflanze nach der Dunkeladaption zu Beginn der Lichtsetzung eine erhöhte PSII-Leistung zeigt (Y(II)), die Reaktionszentren des Systems aktiviert wurden und die überschüssige Lichtenergie abgeleitet wird. Dies ist an den ebenfalls hohen Werten der Chlorophyllfluoreszenz (Fm') zu erkennen. Im Verlauf der Messungen relativiert sich die Leistung des Photosystems, die Reaktionen der Photosynthese laufen, mit Schwankungen, kontinuierlich ab. Bis zur stetigen Sättigung der Reaktionssysteme kann immer mehr Lichtenergie effizient für die Lichtreaktion genutzt werden, gleichbedeutend mit einem Abfall der Chlorophyllfluoreszenz.

Um für alle Versuchsvariationen einheitlich eine saisonale Darstellung zu ermöglichen, wurden die Messwerte der drei Bereiche des Blattes im Verlauf für Fm' und Y(II) gemittelt (s. Anhang S. v).

3.4.2.1 Gesamtwertebetrachtung

Im Folgenden sind die gemittelten Werte einer 10 minütigen Messung, nach Monaten getrennt, für je drei Bäume pro Versuchsvariation, graphisch dargestellt.

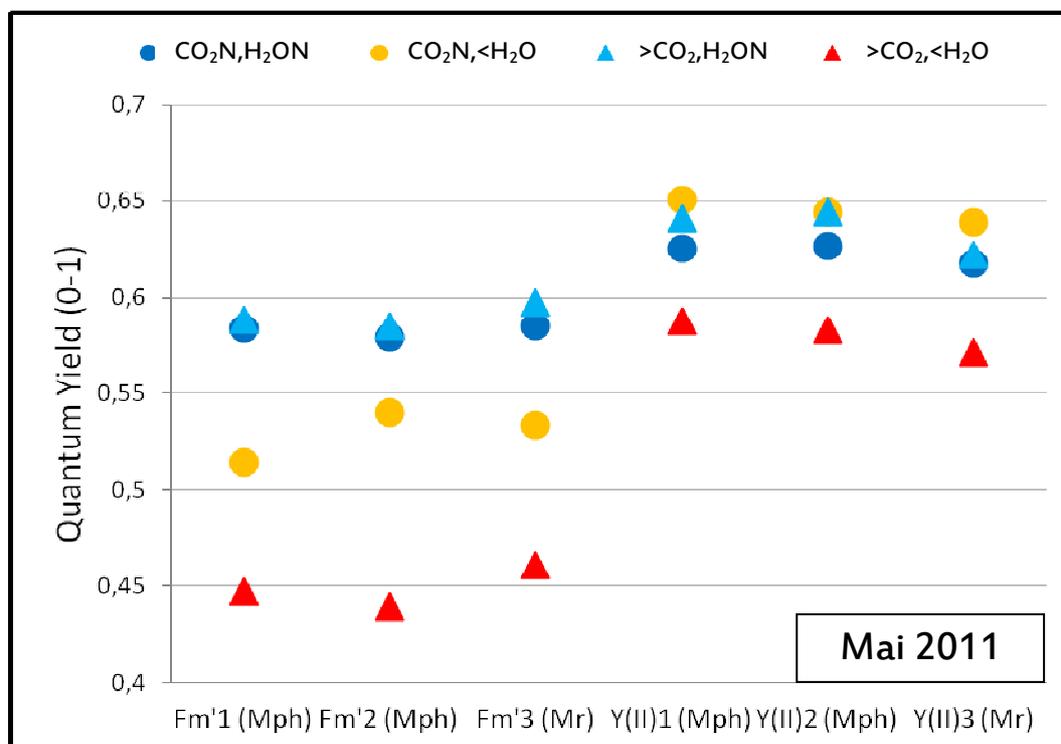


Abb. 3.38: Graphische Darstellung zur Messung mit IMAGING- PAM an Source- Blättern von *P. canescens*, Mai 2011; Fm' = Chlorophyllfluoreszenz, Y(II) = Effizienz des Photosystem II; Messblätter unterteilt in drei Messbereiche: 1,2 = Mesophyllbereich (Mph), 3 = Bereich der Mittelrippe (Mr); 3 Bäume pro Versuchsvariation (n = 3); farbliche Orientierung: rot/gelb = Pflanzen im Trockenstress, hellblau/blau = Kontrollpflanzen; symbolische Orientierung: Kreismarkierung = normaler CO₂- Gehalt der Luft (385 ppm), Dreieckmarkierung = erhöhter CO₂- Gehalt der Luft (950 ppm).

Zum Saisonbeginn im Mai 2011 zeigt sich deutlich, dass für die Versuchspflanzen mit normaler Wasserzufuhr (bläuliche Farbmarkierungen) die Werte für die Photosyntheseleistung (Y(II)) und die Werte für die Chlorophyllfluoreszenz (Fm') nicht weit auseinander liegen. Dies bedeutet, dass viel Energie vom vorhandenen Chlorophyll aufgenommen und genutzt werden konnte aber eben so viel überschüssige Energie zum Schutz der Photosysteme auch abgeleitet werden muss. Dies beschreibt keine optimale Nutzung der verfügbaren Lichtenergie.

Beide Versuchsvariationen mit eingeschränkter Wasserzufuhr (rötliche Farbmarkierungen) zeigen in diesem Verhältnis einen größeren Abstand der Werteblocke (s. Abb. 2.10 S. 34) und eine bessere Nutzung der aufgenommenen Energie. Da in beiden Fällen die Werte für die Fluoreszenz unter denen der Kontrollvariationen liegen, ist zu erkennen, dass weit weniger überschüssige Energie zum Schutz der Systeme abgegeben werden musste.

Die Pflanzen unter erhöhtem Kohlendioxid und Trockenstress ($>CO_2, <H_2O$) zeigen im Mai den größten Abstand der Werteblocke Fm' und $Y(II)$: relativ geringe Werte für die Chlorophyllfluoreszenz bei ähnlich hohen Werten für die Photosyntheseleistung (im Vergleich zu den Kontrollvariationen). Eine Signifikanz für die Messreihen im Mai bezieht sich nur auf die Versuchsvariationen mit eingeschränkter Wasserzufuhr, der erhöhte Kohlendioxidgehalt der Luft hatte keinen Einfluss auf die Messwerte (s. Anhang, Tab. 6).

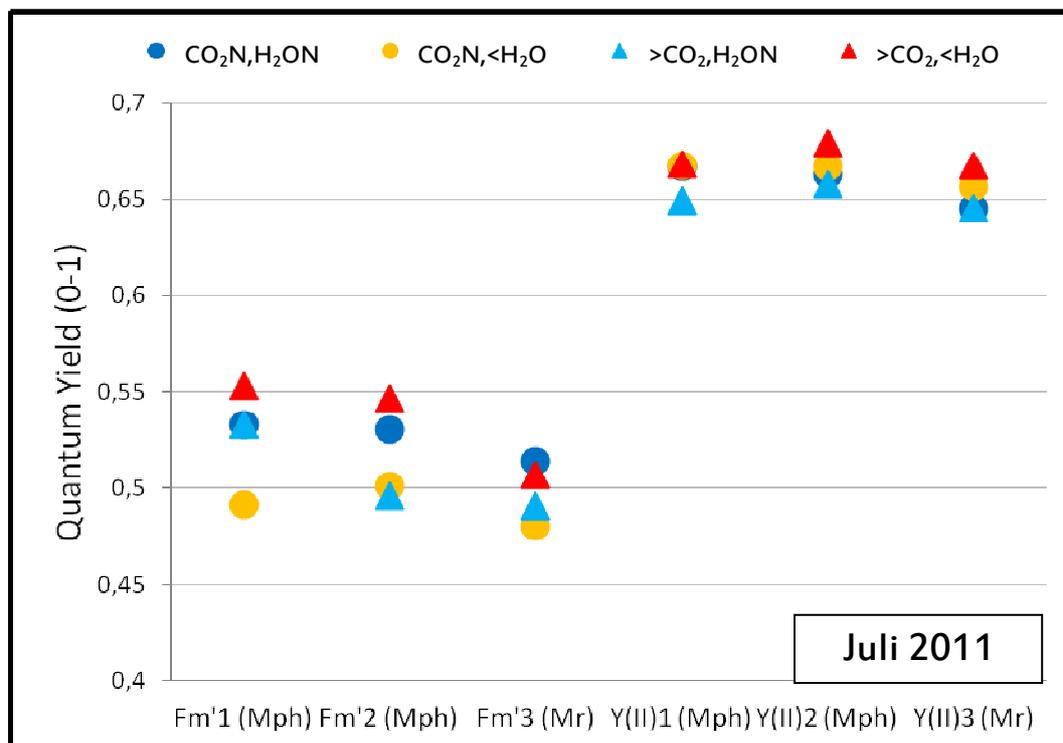


Abb. 3.39: Graphische Darstellung zur Messung mit IMAGING- PAM an Source- Blättern von *P. canescens*, Juli 2011; Fm' = Chlorophyllfluoreszenz, $Y(II)$ = Effizienz des Photosystem II; Messblätter unterteilt in drei Messbereiche: 1,2 = Mesophyllbereich (Mph), 3 = Bereich der Mittelrippe (Mr); 3 Bäume pro Versuchsvariation ($n = 3$); farbliche Orientierung: rot/gelb = Pflanzen im Trockenstress, hellblau/blau = Kontrollpflanzen; symbolische Orientierung: Kreismarkierung = normaler CO_2 - Gehalt der Luft (385 ppm), Dreieckmarkierung = erhöhter CO_2 - Gehalt der Luft (950 ppm).

Die Messungen im Juli 2011 zeigen eine Relativierung der Unterschiede zwischen den Versuchsvariationen. Die Verhältnisse aus abgegebener Energie (Fm' , Chlorophyllfluoreszenz,) und genutzter Lichtenergie ($Y(II)$, Effizienz des Photosystems II) nähern sich innerhalb der Variationen an, die effektive Nutzung der Energie ist erhöht, die Abgabe überschüssiger und nicht zu nutzender und somit schädlicher Energie herabgesetzt. Dies beschreibt für alle Versuchsvariationen zur Saisonmitte eine optimale Nutzung der verfügbaren Lichtenergie.

Signifikante Unterschiede zwischen den Versuchsvariationen gibt es nur für die Chlorophyllfluoreszenz der Variante $CO_2N, <H_2O$.

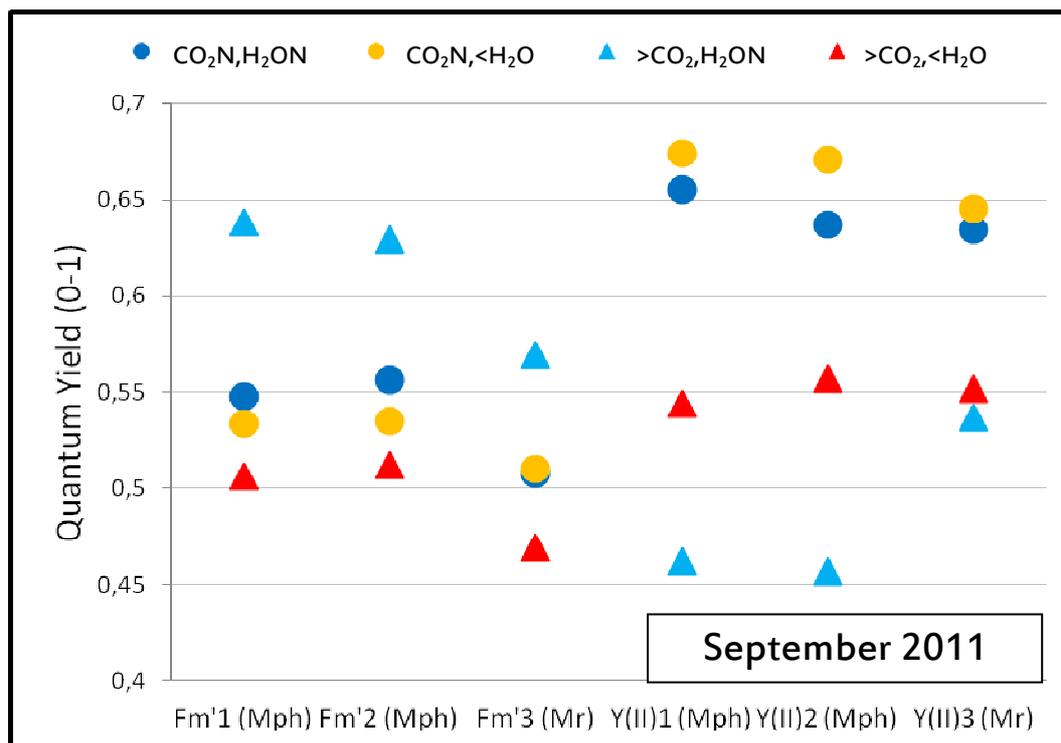


Abb. 3.40: Graphische Darstellung zur Messung mit IMAGING- PAM an Source- Blättern von *P. canescens*, September 2011; Fm' = Chlorophyllfluoreszenz, Y(II) = Effizienz des Photosystem II; Messblätter unterteilt in drei Messbereiche: 1,2 = Mesophyllbereich (Mph), 3 = Bereich der Mittelrippe (Mr); 3 Bäume pro Versuchsvariation (n = 3); farbliche Orientierung: rot/gelb = Pflanzen im Trockenstress, hellblau/blau = Kontrollpflanzen; symbolische Orientierung: Kreismarkierung = normaler CO₂- Gehalt der Luft (385 ppm), Dreiecksmarkierung = erhöhter CO₂- Gehalt der Luft (950 ppm).

Zum Ende der Saison liegen die Verteilungen für die Versuchsvariationen, bezogen auf Chlorophyllfluoreszenz und effektiver Lichtnutzung für die Photosynthese weit auseinander. Die Chlorophyllfluoreszenz ist wieder erhöht, dies bedeutet, dass weniger Lichtenergie aktiv genutzt werden kann und mehr Energieüberschuss vorhanden ist (vermehrt Schäden am System durch weniger verfügbares Chlorophyll durch natürliche Blattseneszenz).

Auffällig ist, dass die Pflanzen unter erhöhtem CO₂ (Dreiecksmarkierungen) mehr Energie abgegeben haben (Fm') als aktiv genutzt werden konnte (Y(II)).

Signifikanzen der Werte für diese Variationen bestätigen dies (s. Anhang, Tab. 6).

Die Variationen unter normalem Kohlendioxidgehalt haben im Vergleich zum Juli 2011 nur einen gering reduzierten Wert für die Effizienz der Photosysteme.

Die Variationen unter normalem Kohlendioxidgehalt haben im Vergleich zum Juli 2011 nur einen gering reduzierten Wert für die Effizienz der Photosysteme. Die gleichzeitige Erhöhung der Fluoreszenz bestätigt jedoch die fortschreitend abnehmende Aufnahme der nutzbaren Lichtenergie.

Das Verhältnis aus absorbiertem Sonnenlicht und ungenutzter überschüssiger Lichtenergie, als Fluoreszenz abgegeben (s. Abb. 2.10 S. 34), zeigt, ob die gegebenen Umweltbedingungen einen Einfluss auf die Physiologie der Versuchspflanzen hatten (s. Anhang, Tab. 7).

Um dieses Verhältnis graphisch darstellen und erklären zu können, wurden die Messwerte Fm'(1,2,3) und Y(II)(1,2,3) gemittelt und voneinander abgezogen (Y(II) - Fm').

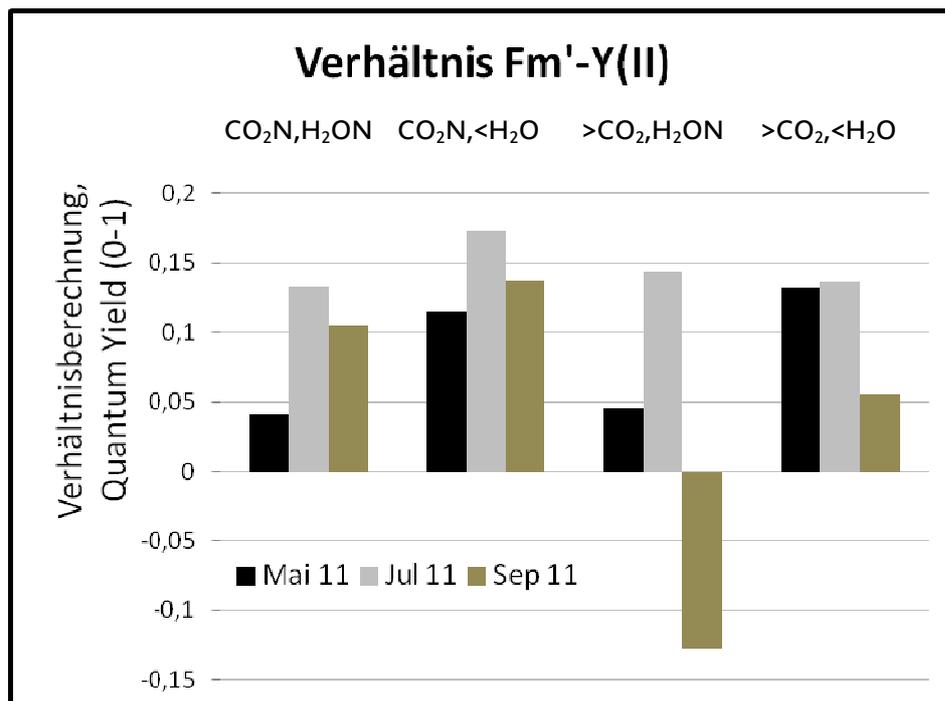


Abb. 3.41: Graphische Darstellung der Verhältnisse aus absorbiertes und photosynthetisch genutzter Lichtenergie ($Y(II) = \text{Mittelwert aus } Y(II)_{1+2+3}$) und als Chlorophyllfluoreszenz ($Fm' = \text{Mittelwert aus } Fm'_{1+2+3}$) abgegebene, überschüssige Energie. Das Verhältnis berechnet sich aus $Y(II)-Fm'$; $n = 3$; normaler CO_2 - Gehalt der Luft = 385 ppm, erhöhter CO_2 - Gehalt der Luft = 950 ppm; je höher der Wert, desto effektiver die Nutzung der Lichtenergie für die Photosynthese und desto weniger Chlorophyllfluoreszenz.

Die Messungen zur maximal möglichen Effizienz des Photosystems II via IMAGING- PAM sind unabhängig vom Licht der Klimakammer. Die Lichtimpulse haben bei jeder Messung denselben Wert. Saisonbedingte Veränderungen der Lichtverhältnisse hatten keinen Einfluss auf die Messungen!

Der Blick auf die berechneten Verhältnisse aus absorbiertes Energie und emittierter Chlorophyllfluoreszenz zeigt eine zu erwartende Steigerung der Aufnahme der Lichtenergie zur Nutzung für die Lichtreaktion der Photosynthese vom Anfang der Saison im Mai, zur Saisonmitte im Juli. Dies bestätigen die Werte für die Chlorophyllkonzentration der Blätter.

Zum Ende der Saison sinkt der Chlorophyllgehalt der Blätter; dies bedeutet weniger Photosysteme, weniger Reaktionszentren und somit eine reduzierte Möglichkeit zur Aufnahme von Licht.

Je höher der Wert im Verhältnis, desto mehr Energie wird genutzt und desto weniger Energieabgabe zum Schutz vor Schäden. Betrachtet man die Werte im Bezug auf die Versuchsvariationen, so ist erkennbar, dass die Pflanzen mit eingeschränkter Wasserzufuhr im Vergleich zu ihren Kontrollen zu Beginn der Saison mehr Energie nutzen konnten und die Effizienz der Photosynthese gesteigert ist. Dieser Einfluss des Trockenstress relativiert sich zur Saisonmitte und steigert sich wieder zum Ende im September.

Dies bedeutet, dass die Pappeln im Trockenstress, im Vergleich zur Kontrolle, zum Anfang und zum Ende der Saison 2011 eine gesteigerte Photosyntheseaktivität zeigten.

Der veränderte Kohlendioxidgehalt der Luft zeigt keinen Einfluss auf das Verhältnis aus absorbiertem Licht und emittierter Chlorophyllfluoreszenz.

Um bestätigen zu können, dass die gezeigten Ergebnisse der Messungen der Chlorophyllfluoreszenz mittels IMAGING- PAM nicht primär vom Chlorophyllgehalt der Blätter abhängig sind, sondern von den Klimabedingungen der Kammern, soll anhand der Versuchsvariation $>CO_2, <H_2O$ für den Verlauf Mai-Juli 2011 gezeigt werden, dass die Messungen an Sink- und Sourceblättern signifikant unterschiedlich sind.

Tab. 3.16: Werteübersicht zur Gegenüberstellung von IMAGING- PAM- Messungen und des *Chlorophyll-Concentration- Index* (CCI) an Sink- und Source- Blättern der Variation $>CO_2, <H_2O$ im Mai und Juli 2011 mit Standardabweichungen. Normaler CO_2 - Gehalt der Luft = 385 ppm, erhöhter CO_2 - Gehalt der Luft = 950 ppm; n = 3; Student's *t*-Test für die Gesamtwerte einer Verlaufsmessung, Signifikanz (*) für Werte $\leq 0,05$.

$>CO_2, <H_2O$	Source	Sink	Source	Sink
	Mai 11	Mai 11	Jul 11	Jul 11
Fm'	0,45* \pm 0,01	0,53* \pm 0,01	0,53* \pm 0,03	0,39* \pm 0,01
Y(II)	0,585 \pm 0,01	0,58 \pm 0,01	0,67* \pm 0,01	0,64* \pm 0,01
CCI	39,1 \pm 1,2	22,5* \pm 2	39,3 \pm 3,3	16,9* \pm 1

Der Chlorophyllgehalt der Sink- Blätter ist in beiden Vergleichsmonaten signifikant von dem der Source- Blätter zu unterscheiden. Der Gehalt der Source- Blätter bleibt beinahe gleich, bei den Sink- Blättern vermindert sich der Messwert zur Saisonmitte.

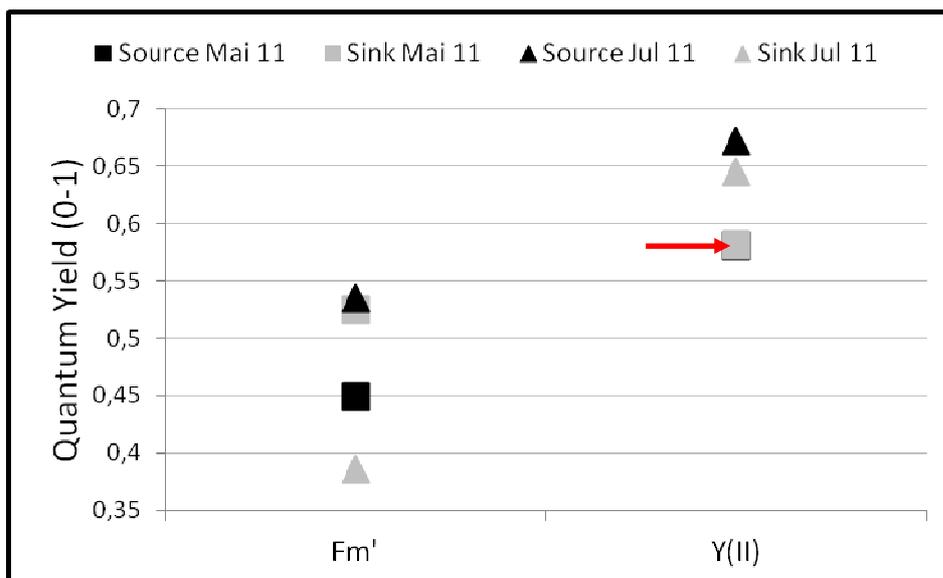


Abb. 3.42: Graphische Darstellung der Messungen an IMAGING- PAM zum Vergleich Sink- Source für Mai und Juli 2011 (keine Unterteilung in Mesophyllbereich und Bereich der Mittelrippe); *P. canescens*, Versuchsvariation $>CO_2, <H_2O$; Fm' = Chlorophyllfluoreszenz, $Y(II)$ = Effizienz des Photosystem II; farbliche Orientierung: schwarz = Source, grau = Sink; symbolische Orientierung: Viereck = Mai, Dreieck = Juli; normaler CO_2 - Gehalt der Luft = 385 ppm, erhöhter CO_2 - Gehalt der Luft = 950 ppm; roter Pfeil s. Beschreibung im Text.

Die Messwerte für $Y(II)$ bei Sink und Source für Mai (roter Pfeil) sind sich trotz signifikant unterschiedlichem Chlorophyllgehalt sehr ähnlich, was ebenfalls als Hinweis darauf gesehen wird, dass die Messungen der Photosystem- Effizienz nicht primär vom Chlorophyllgehalt abhängig sind. Ebenso zeigt sich für einen geringen Chlorophyllgehalt der Sink- Blätter im Juli eine signifikant erhöhte Effizienz des Photosystems.

3.4.2.2 Unterscheidung der Messbereiche

Die Messbereiche eines Blattes wurden zur Datenerfassung in zwei Mesophyllbereiche und den Bereich der Mittelrippe aufgeteilt. Die Mittelrippe eines Blattes besteht aus Transportgefäßen, umgeben von Mesophyllgewebe. Die Transportgefäße und deren umgebende Zellen enthalten keine Chloroplasten. Die Unterscheidung dieser drei Bereiche ergab keine Auffälligkeiten bezogen auf die erhobenen Datensätze zur Chlorophyllfluoreszenz. Der Bereich der Mittelrippe hat aufgrund des niedrigeren Chlorophyllgehaltes geringere Werte gezeigt. Diese Werteunterschiede beziehen sich demnach auf die Anatomie, die vorangegangenen Versuchsbedingungen und ihr Einfluss auf die Physiologie sind hier nicht relevant zu beschreiben.

3.4.3 Digitale Erfassung der Blattflächen von *P. canescens* und *F. sylvatica* 2011

Die nach Abschluss der Ernte im September 2011 vermessenen Blattflächen von Pappel und Buche zeigen folgende Messwerte:

Tab. 3.17: Übersicht zur digitalen Erfassung der Blattflächen von *P.canescens* (HT = Haupttrieb) und *F.sylvatica* September 2011 mit Standardabweichungen, n = 5; Student's *t*- Test: Signifikanz (*) für Werte $\leq 0,05$; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm.

[cm ²]	CO ₂ N, H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
<i>P.canescens</i>, HT 2011	3425,1 ± 202,6	1009,5* ± 160,3	3601,7 ± 604,3	902,3* ± 363,1
<i>F.sylvatica</i>	441,5 ± 305,9	248,9 ± 189,2	421,9 ± 208,9	487,9 ± 195,7

Die eingeschränkte Wasserzufuhr reduziert die Blattflächen signifikant um mehr als die Hälfte der Werte. Der erhöhte CO₂- Gehalt der Luft hat keinen Einfluss, auch nicht in Kombination zum Trockenstress.

Aufgrund der großen Standardabweichungen zeigen sich keine zu berechnenden Signifikanzen für die Werte von *F. sylvatica*.

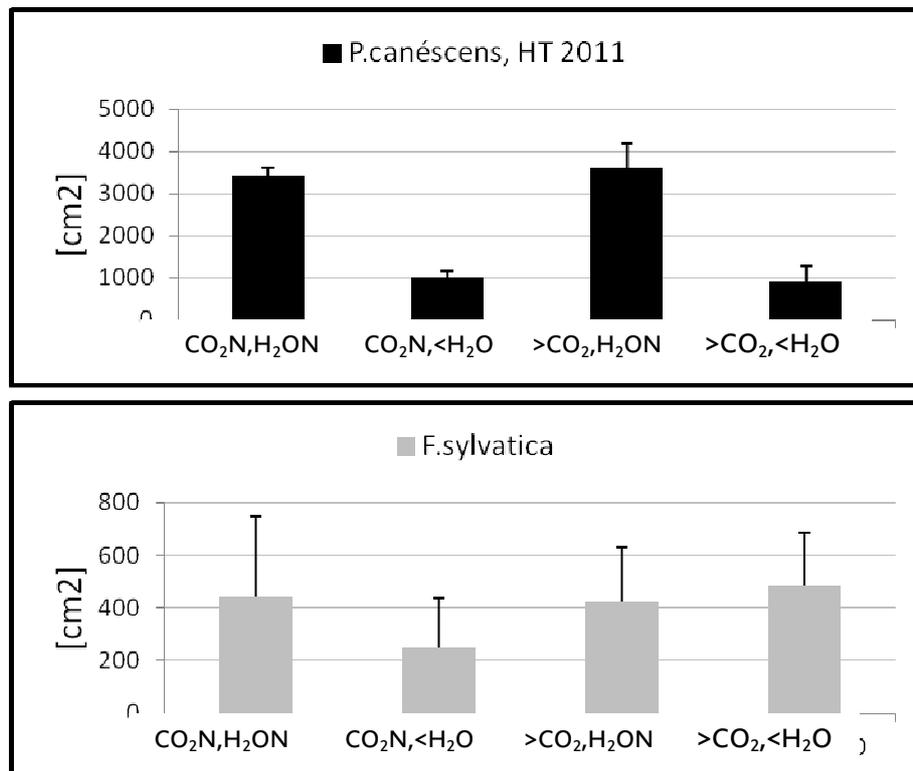


Abb. 3.43: Graphische Darstellung der Messwerte zur Blattflächenmessung mittels Li-COR LI- 3000C von *P. canescens* und *F.sylvatica* 2011; aufgrund der unterschiedlichen Anzahl der Seitentriebe bei *P. canescens* wurden nur die Blätter der Haupttriebe (ohne Seitentriebe) vermessen.

Der hemmende Effekt des CO₂ auf die Blattflächenreduktion des Trockenstress der Buche ist im Trend zwar deutlich, jedoch statistisch nicht verifizierbar.

3.4.4 Blattseneszenz bei Trockenstress von *P. canescens*

Während der Saison 2011 wurde in den Klimakammern des Gewächshauses das Laub der Bäume, die über eine eingeschränkte Wasserzufuhr unter Trockenstress gesetzt wurden, eingesammelt, getrocknet und gewogen. Die Versuchsvariationen mit normaler Wasserzufuhr wurden dabei nicht berücksichtigt.

Die gleichzeitig mit dem Gaswechsel aufgezeichneten Lichtintensitäten zeigen einen gleichmäßigen Abfall in den Klimakammern.

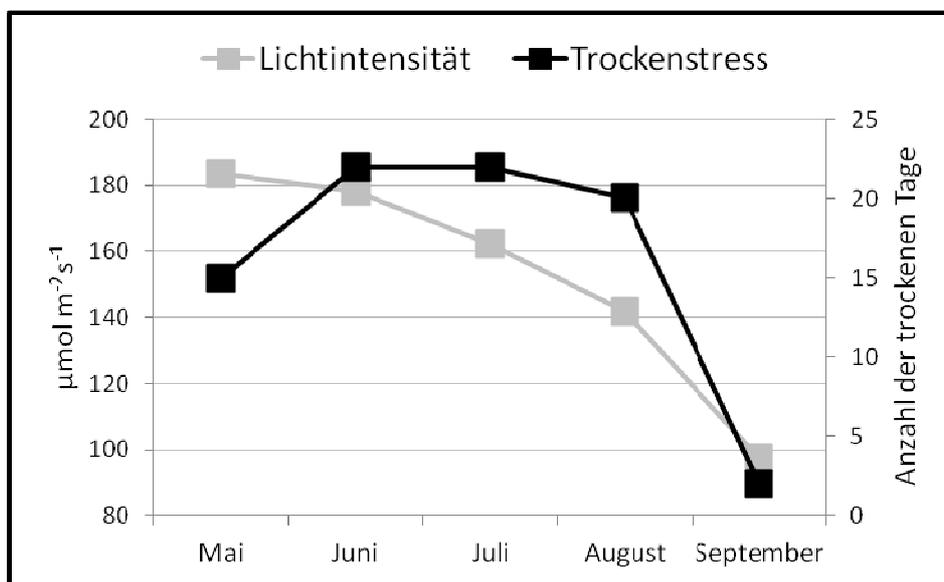


Abb. 3.44: Graphische Darstellung der Lichtintensität im Gewächshaus als Monatsmittel und der Anzahl der Trockentage (Verlauf des Trockenstress) der Saison 2011; Lichtintensitäten gemessen über externen Quantum-Sensor des LI-COR 6400XT.

Die in den Klimakammern des Gewächshauses über den Tagesverlauf aufgezeichneten Lichtintensitäten zeigen, dass die Intensitäten des Sonnenlichtes stetig sinken. Bei den Messungen wurde darauf geachtet, den Sensor nicht mit Blattmaterial zu überschatten. Die Regulierung der Wasserzufuhr wurde während der Saison den Bedürfnissen der Pflanzen angepasst.

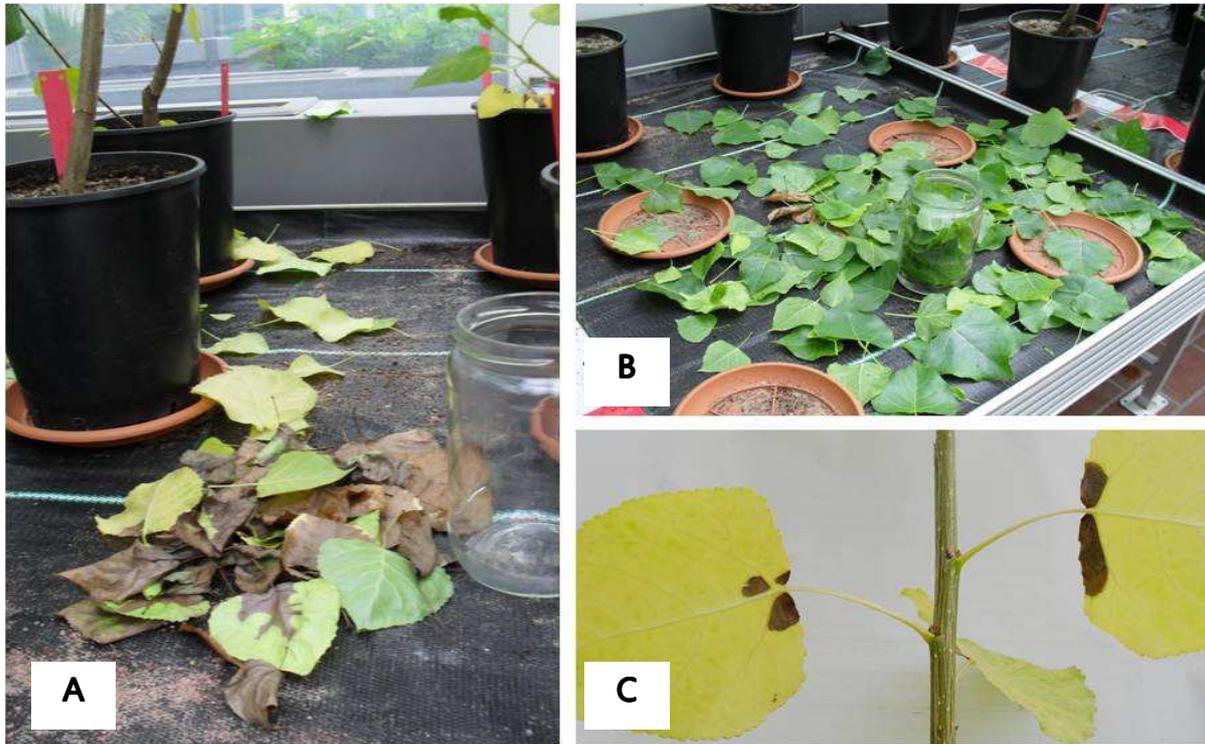


Abb. 3.45: Darstellung der Sammlung von abgeworfenem Blattmaterial von *P. canescens* im Trockenstress in den Klimakammern, Saison 2011. (A) Der Zustand der abgeworfenen Blätter, bezogen auf ihren Versorgungszustand, variiert stark. (B) Auch funktionelle Source- Blätter, mit vergleichbar hohem Chlorophyllgehalt abszissieren und (C) teilweise verblieben Blätter bis zum vollständigen Abbau des Chlorophyll noch fest am Baum.

Von Mai bis September 2011 sind in den Kammern die abgeworfenen Blätter der Bäume unter Trockenstress gesammelt worden. Nach vollständiger Trocknung im Wärmeschrank wurde das Trockengewicht ermittelt.

Die Gesamtsummen der Trockengewichte betragen bei $\text{CO}_2\text{N}, <\text{H}_2\text{O} = 69,17 \text{ g}$, bei $>\text{CO}_2, <\text{H}_2\text{O} = 78,4 \text{ g}$. Die Variation unter erhöhtem Kohlendioxidgehalt der Luft hat somit insgesamt mehr Blattmaterial abgeworfen. Beide Wertereihen sind saisonal nicht signifikant voneinander zu unterscheiden.

Tab. 3.18: Werteübersicht der zeitnah ermittelten Chlorophyllkonzentration (CCI), der Trockengewichte zur Sammlung abszissierter Blätter und deren prozentuale Differenz von *P. canescens* unter Trockenstress von Mai bis September 2011; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm.

Datum 2011	Chlorophyllgehalt (CCI)		Trockengewicht [g]		Differenz
	CO ₂ N, _{<} H ₂ O	>CO ₂ ,<H ₂ O	CO ₂ N, _{<} H ₂ O	>CO ₂ ,<H ₂ O	[%]
18./23.05.	39,06	38,2	2,13	0,38	82,16
25./30.05.	41,02	39,97	0,66	0,23	78,14
09./10.06.	40,68	38,85	1,02	4,85	78,14
22.06.	39,28	37,28	0,87	2,62	67,64
15./19.07.	39,05	36,96	5,64	2,44	56,77
03./05.08.	42,05	40,81	3	0,53	82,39
25./23.08.	41,78	38,95	1,87	5,08	63,12
31.08.	40	35,05	46,66	33,72	27,73
21./19.09.	41,17	37,29	7,32	28,55	74,35

Die prozentuale Differenz gibt an, inwiefern beide Variationen sich in den Trockengewichten der abszissierten Blätter unterscheiden. Da die Menge des Laubes der Sammlungen teilweise gegenläufig war (rot markierte Werte), ist eine Relativierung beider Wertmengen notwendig um sie mit den Versuchsbedingungen vergleichen zu können.

Setzt man diese Relativierung mit den Werten des Chlorophyllgehaltes in ein Verhältnis, so ist deutlich, dass die generelle Seneszenz beider Varianten und der abnehmende Chlorophyllgehalt der Blätter korrelieren.

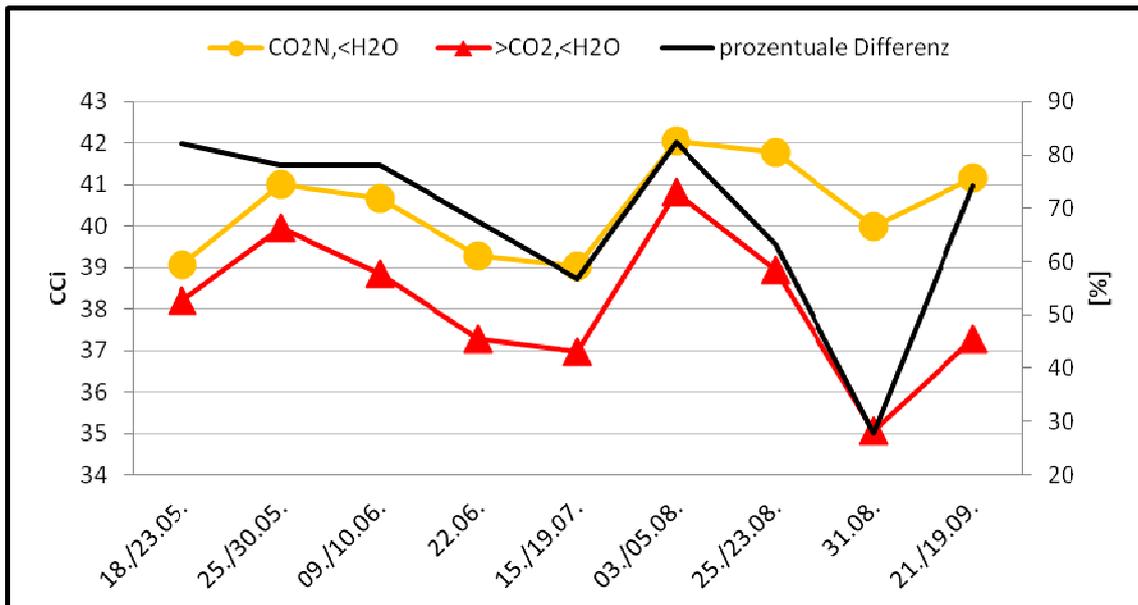


Abb. 3.46: Graphische Darstellung der Korrelation zwischen dem Chlorophyllgehalt der Blätter (CCi) und der Seneszenz beider Versuchsvariationen unter Trockenstress (prozentuale Differenz [%]) von *P. canescens*, 2011; farbliche Orientierung: rot/gelb = Pflanzen im Trockenstress; symbolische Orientierung: Kreismarkierung = normaler CO₂- Gehalt der Luft (385 ppm), Dreieckmarkierung = erhöhter CO₂- Gehalt der Luft (950 ppm).

Nach Verlust der Blattflächen kam es zum Ende der Saison bei beiden Trockenstressvariationen vermehrt zur Ausbildung neuer Blätter.

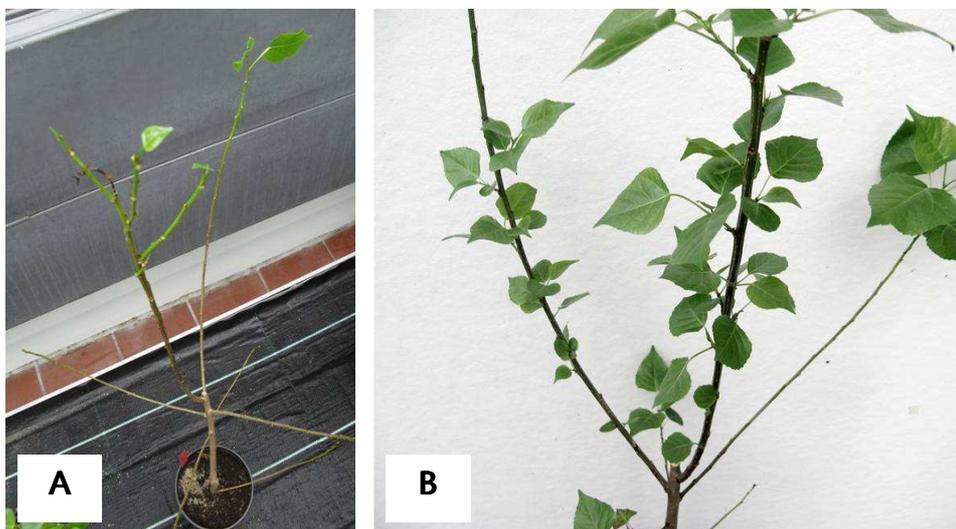


Abb.3.47: Darstellung der vermehrten Neubildung von Blättern einer Versuchspflanze der Variation CO₂N,<H₂O (*P. canescens*) nach starker Abszission, 2011; (A) Aufnahme vom 31.08.2011, fast vollständiger Verlust aller photosynthetisch aktiver Blätter aufgrund des akuten Trockenstress; (B) Aufnahme vom 22.09.2011, Neubildung zahlreicher Blätter an Haupt- und Seitentrieben; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm.

Zum September verstärkte sich die Abszission der Blätter bei Bäumen unter Trockenstress erheblich. Wie in Abb. 3.47 zu erkennen ist, warfen einige Bäume fast vollständig ihr gesamtes Blattmaterial ab. Um für den September noch weitere Daten sammeln zu können, wurde für mehrere Tage der Trockenstress ausgesetzt (s. Abb. 3.16; 3.44). Die dadurch wieder normal verlaufende Wasserzufuhr sorgte für einen Neuaustrieb von Blattknospen. Die verstärkte Kohlenstoff- Aufnahme führte in diesen letzten Tagen der Saison 2011 auch zu einem verstärkten Holzzuwachs, sichtbar in lichtmikroskopischen Aufnahmen (Daten nicht gezeigt).

3.4.5 Zunahme des Stammdurchmessers bei *P. canescens*

Die Bäume zur Datenerhebung mittels Dendrometer wurden zufällig ausgewählt und besitzen nicht denselben Startdurchmesser zu Beginn der Messungen. Die Versuchsbäume der Saison 2011 sind nicht beschnitten worden, alle Seitentriebe blieben erhalten

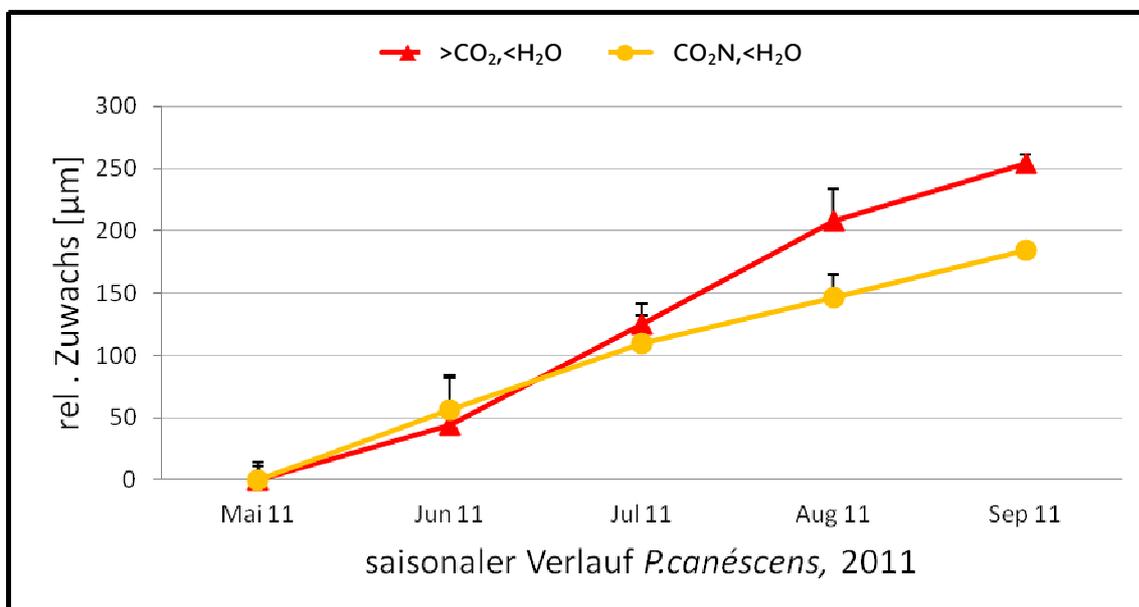


Abb. 3.48: Graphische Darstellung relativen Zuwachsrates des Stammdurchmessers an *P. canescens* mit Standardabweichungen im saisonalen Verlauf 2011; farbliche Orientierung: rot/gelb = Pflanzen im Trockenstress; symbolische Orientierung: Kreismarkierung = normaler CO₂- Gehalt der Luft (385 ppm), Dreieckmarkierung = erhöhter CO₂- Gehalt der Luft (950 ppm).

Beide Datensätze dieser Variationen signifikant unterschiedlich. Beide Sensoren zeichneten im Monatsverlauf 2011 eine gleichmäßige Zunahme der Stammdurchmesser auf.

Auffällig ist, dass die Versuchsvariation mit erhöhtem CO₂- Gehalt der Luft größere Standardabweichungen zeigt. Die Sensoren wurden unabhängig vom Werteverlauf zur Ernte der Versuchspflanzen im September vom Stamm entfernt.

Setzt man beide Datensätze in ein relatives Verhältnis zueinander und ermittelt die prozentuale Steigung, zeigt sich deutlich, wie weit sich die Versuchsvariationen im Steigungsverlauf unterscheiden.

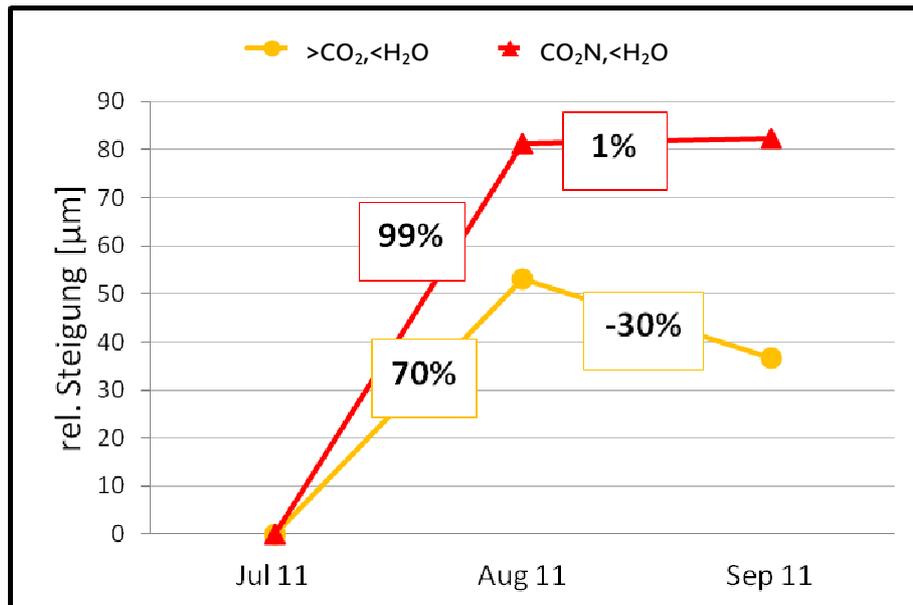


Abb. 3.49: Graphische Darstellung der relativen und prozentualen Steigerung des Stammdurchmessers an *P. canescens* im Monatsvergleich Juli-August-September 2011; farbliche Orientierung: rot/gelb = Pflanzen im Trockenstress; symbolische Orientierung: Kreismarkierung = normaler CO₂- Gehalt der Luft (385 ppm), Dreieckmarkierung = erhöhter CO₂- Gehalt der Luft (950 ppm). Die prozentuale Steigerung der Datensätze ermittelt sich aus dem Bezug zum Vormonat; Messungen des Dendrometers erfolgten im Abstand von 10 min.

Eine Abnahme der Prozentangaben der Versuchsvariation CO₂N,<H₂O bedeutet keine Abnahme im Stammdurchmesser, sondern ein verminderter Anstieg der Zunahme. Der Verlauf zeigt, dass der Stammdurchmesser im August, im Gegensatz zur Vergleichsvariation, weniger (-30%) zugenommen hatte als im Juli.

3.4.6 Dendrometerschwankungen im Bezug zum Trockenstress 2011

Das verwendete Durchmesserdendrometer zeichnet in Abhängigkeit der Umweltbedingungen eine Zunahme des Stammdurchmessers auf. Das bedeutet, dass Schwankungen im Wassergehalt des Stammes ebenso registriert werden, wie der Holzzuwachs und der Zunahme der Biomasse.

Um beschreiben zu können, wie eine verminderte Wasserzufuhr Einfluss auf den Stammdurchmesser und die Zunahme an Biomasse hat, ist es notwendig in den Messwerten das Verhältnis aus Wassergehalt und Holzzuwachs abschätzen zu können. Um die Datensätze des Dendrometers (Messungen alle 10 Minuten) und die der Bodenfeuchtesensoren (Messungen alle 60 Minuten) vergleichen zu können, sind nur die stündlichen Messdaten der Dendrometer- Datensätze verwendet worden.

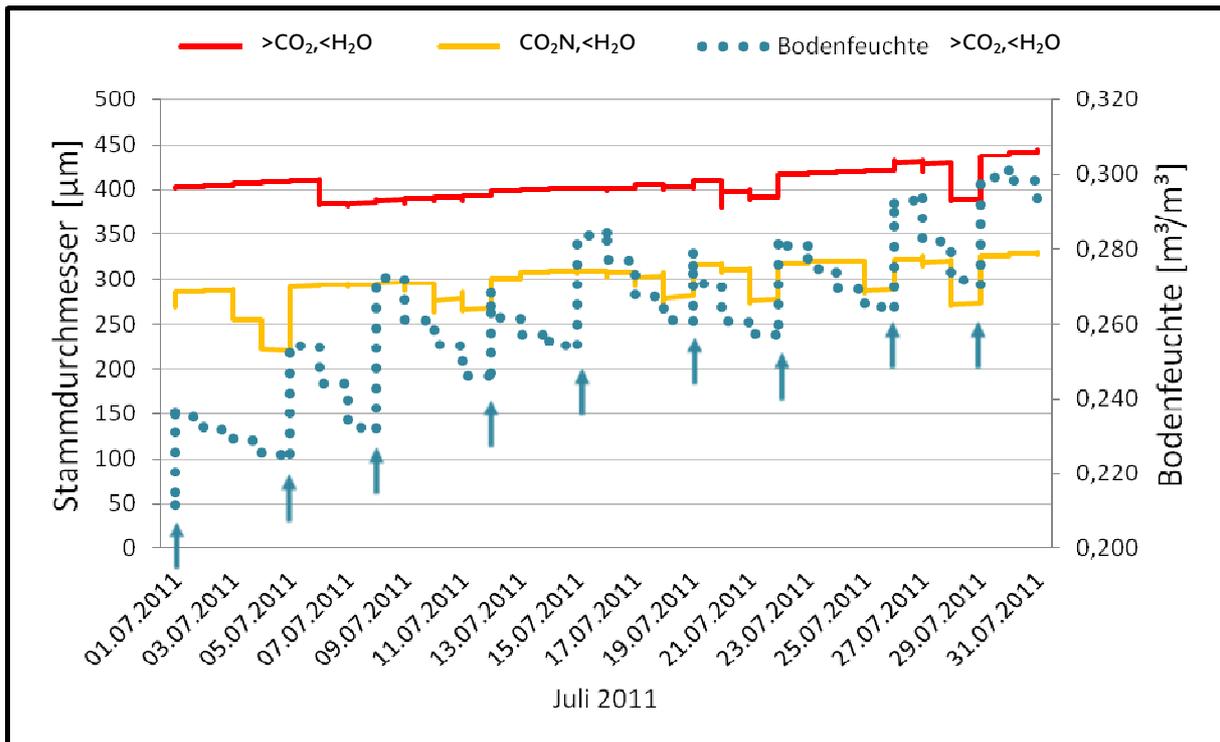


Abb. 3.50: Graphische Darstellung der Messwerte des Dendrometers zur Messung des Stammdurchmessers an *P. canescens*, sowie der Sensordaten für die Bodenfeuchte im Monatsverlauf Juli 2011; farbliche Orientierung: rot/gelb = Pflanzen im Trockenstress; normaler CO₂- Gehalt der Luft = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt der Luft = 950 ppm, Pfeilmarkierungen = Giebtage. Messungen erfolgten im Abstand von 60 min (Dendrometer und Bodenfeuchte).

Ein genauer Blick auf die Situation im Monat der höchsten Steigungsraten (Juli 2011), ermöglicht durch die hochauflösenden Messungen der Dendrometer- und Bodenfeuchtesensoren, zeigt die Schwankungen des Wassergehaltes im Stamm durch den Trockenstress, in Abhängigkeit der Tage, an denen den Pflanzen Wasser zugeführt wurde (Giebtage, Pfeilmarkierungen).

Wie in der graphischen Darstellung (Abb. 3.50) zu erkennen ist, entwickeln sich die Steigungsraten im Stammdurchmesser abhängig vom Wasserangebot, wobei die Versuchsvariation mit erhöhtem CO₂- Gehalt der Luft weniger stark auf eine eingeschränkte Wasserzufuhr reagiert. Veränderungen im Stammdurchmesser zum Zeitpunkt einer Wasserzufuhr beeinflussen den Verlauf der Wertezunahme.

Um nochmals zu verdeutlichen, dass die Versuchsvariationen unterschiedlich stark auf die Wasserzufuhr reagiert haben, zeigt ein Auszug über drei Messtage aus den Datensätzen im Juli 2011 das Ausmaß der Schwankungen (Abb. 3.51).

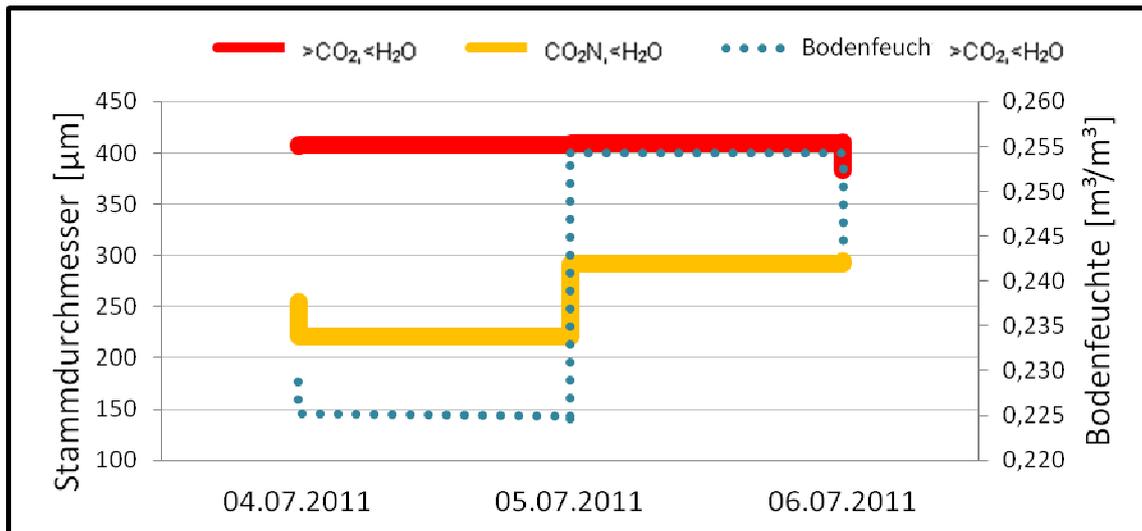


Abb. 3.51: Graphische Darstellung der Messwerte des Dendrometers zur Messung des Stammdurchmessers an *P. canescens*, sowie der Sensordaten für die Bodenfeuchte im Drei-Tage-Verlauf im Juli 2011; farbliche Orientierung: rot/gelb = Pflanzen im Trockenstress; normaler CO_2 -Gehalt der Luft = 385 ppm, erhöhter CO_2 -Gehalt der Luft = 950 ppm. Messungen erfolgten im Abstand von 60 min (Dendrometer und Bodenfeuchte). Am 05.07.2011 gegen 8 Uhr morgens erfolgte eine Wasserzufuhr.

Gegossen wurde am 05.07.2011 gegen 8 Uhr morgens, der Bodensensor springt in diesem Bereich von $0,239 \text{ m}^3/\text{m}^3$ auf $0,246 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Die Sensoren des Dendrometers der Versuchsvariation $\text{CO}_2\text{N}_1, <\text{H}_2\text{O}$ erfassen diese Änderung der äußeren Bedingungen etwa eine Stunde später, die Messwerte springen dort signifikant von $232,3 \mu\text{m}$ auf $254,7 \mu\text{m}$.

Bei der Vergleichsvariation unter erhöhtem CO_2 ist eine signifikante Wertänderung im Stammdurchmesser erst am Abend nach 21 Uhr zu beobachten. (s. Tab. 3.19)

Tab. 3.19: Einblick in die Messdatensätze von Dendrometer (Stammdurchmesser in μm) und Bodensensor (Bodenfeuchte in m^3/m^3) der Versuchsvariation $>\text{CO}_2, <\text{H}_2\text{O}$ zum Zeitpunkt der Wasserzufuhr am 05.07.2011 gegen 7 Uhr; Messungen erfolgten im Abstand von 60 min; Normal $\text{CO}_2 = 385 \text{ ppm}$, erhöht $\text{CO}_2 = 950 \text{ ppm}$. Signifikanz (*) für Werte $\leq 0,05$.

Datum	Uhrzeit	Bodenfeuchte [m^3/m^3]	Stammdurchmesser $\text{CO}_2\text{N}, <\text{H}_2\text{O}$ [μm]	Stammdurchmesser $>\text{CO}_2, <\text{H}_2\text{O}$ [μm]
05.07.2011	07:00:00	0,227	220,7	408,3
05.07.2011	08:00:00	0,239	220,7	408,3
05.07.2011	09:00:00	0,246*	232,3	408,3
05.07.2011	10:00:00	0,251	254,7*	408,3
05.07.2011	11:00:00	0,253	270,6	408,2
05.07.2011	12:00:00	0,254	280,5	408,2
05.07.2011	13:00:00	0,255	284,5	408,2
05.07.2011	14:00:00	0,255	287	408,2
05.07.2011	15:00:00	0,255	288,4	408,2
05.07.2011	16:00:00	0,255	289,1	408,2
05.07.2011	17:00:00	0,255	289,7	408,2
05.07.2011	18:00:00	0,254	289,7	408,2
05.07.2011	19:00:00	0,254	290,4	408,2
05.07.2011	20:00:00	0,254	291,1	408,2
05.07.2011	21:00:00	0,254	291,1	408,9
05.07.2011	22:00:00	0,254	291,8	409,2*
05.07.2011	23:00:00	0,254	291,8	409,5

Der Bodensensor reagiert mit einer Werteänderung etwa zeitgleich zur Wasserzufuhr. Das Wasser wird von der Versuchspflanze aufgenommen und über den Transpirationssog in den Stamm geleitet, wo der Sensor des Dendrometers zeitversetzt (ca. 12h später) den Wassertransport über eine signifikante Zunahme im Stammdurchmesser registriert.

Unterschiede in den Zeitspannen, ab wann Änderungen der Bodenfeuchte auch vom Dendrometer aufgezeichnet werden, können 2011 anhand der Variationen unterschieden werden.

3.5 Lichtmikroskopische Auswertung von *Populus x canescens* 2010

3.5.1 Quantitativer Holzzuwachs, digitale Messungen zur Jahrringbreite und der Markausdehnung

Der saisonale Holzzuwachs unter gegebenen Versuchsbedingungen im Jahr 2010 konnte nach Abschluss der Ernte an in 70%igen Ethanol konservierten Proben ermittelt werden. Die Messungen erfolgten digital mit entsprechenden Programmen zur Analyse und Auswertung gefärbter lichtmikroskopischer Dünnschnitte.

Darstellung und Definition der definierten Abschnitte: Abb. 2.17, S. 42.

Tab. 3.20: Gesamtwerteübersicht zur digitalen Vermessung des saisonalen Holzzuwachses an *P. canescens* 2010 mit Standardabweichungen; n = 3; Student's *t*- Test bezogen auf Kontrollvariation: Signifikanz (*) für Werte $\leq 0,05$; Abschnitt 2 wurde nachträglich aufgearbeitet und vermessen; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 770 ppm.

2010	Probenbereich Abschnitt	Jahrringbreite [mm]	Markdurchmesser [mm]
CO ₂ N, H ₂ O	1	1,81 ± 0,37	-
	2	2,91 ± 0,2	1,6 ± 0,4
CO ₂ N, <H ₂ O	1	0,76* ± 0,24	-
	2	1,53* ± 0,36	1,7 ± 0,01
>CO ₂ , H ₂ O	1	1,47 ± 0,19	-
	2	2,79 ± 0,09	2,2 ± 0,2
>CO ₂ , <H ₂ O	1	0,81* ± 0,13	-
	2	1,85* ± 0,09	1,7 ± 0,2

In beiden Abschnitten zeigt die eingeschränkte Wasserzufuhr im Bezug zur Kontrollvariante signifikante Unterschiede auf das Holzwachstum.

Tab. 3.21: Übersicht zum Student's t - Test für Werte der Jahrringbreiten in Abschnitt 1 und 2 von *P. canescens* 2010; n = 3, Signifikanz (*) für Werte $\leq 0,05$, normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 770 ppm.

Abschnitt 1		
Variation	bezogen auf	t -Test
CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	0,01*
CO ₂ N,H ₂ ON	>CO ₂ ,H ₂ ON	0,01*
CO ₂ N,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,23
>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,45
CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,01*
Abschnitt2		
Variation	bezogen auf	t -Test
CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	0,001*
CO ₂ N,H ₂ ON	>CO ₂ ,H ₂ ON	0,54
CO ₂ N,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,001*
>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,002*
CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,21

Im ersten Abschnitt hat erhöhtes CO₂ und Trockenstress jeweils einen Einfluss auf die Jahrringbreite zeigen können, sowie die Kombination aus beiden (grüne Wertemarkierung)

Anders zeigt die Statistik im zweiten Abschnitt, dass erhöhtes CO₂ allein keinen Einfluss auf den Holzzuwachs hatte (rote Wertemarkierung).

Dies ist auf der graphischen Darstellung nicht deutlich erkennbar und vermutlich aufgrund der Standardabweichungen zu definieren.

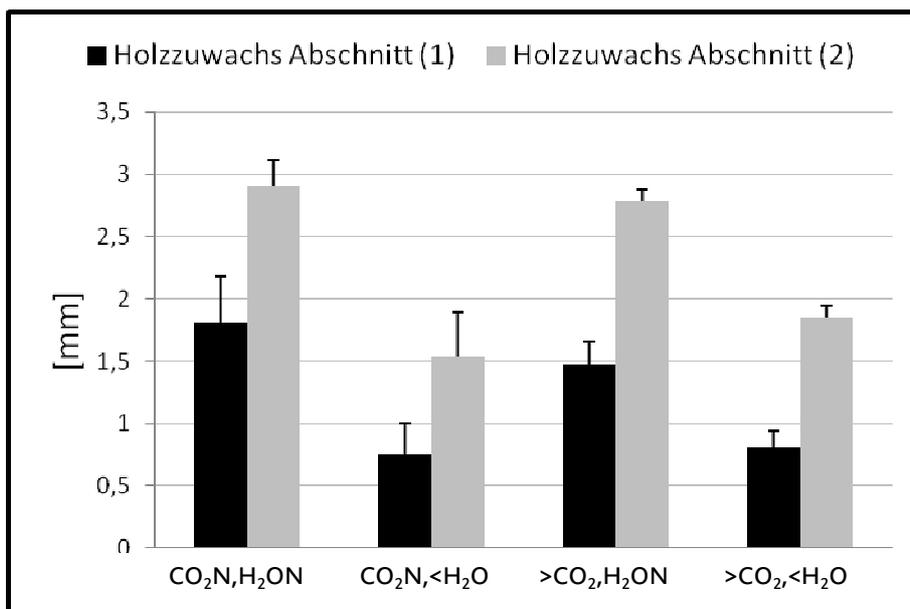


Abb. 3.52: Graphische Darstellung zur Jahringbreite von *P. canescens* 2010 mit Standardabweichungen; n = 3, normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 770 ppm.

Im Vergleich beider Abschnitte zeigt sich weiterhin, dass sich die Reduzierung des Holzzuwachses unter Trockenstress und erhöhtem Kohlendioxid zwar vermindert, dies aber lediglich im ersten Abschnitt aufgrund der geringeren Standardabweichung relevant zu beschreiben ist

Die Vermessungen zum Markdurchmesser im Abschnitt 2 haben keine signifikanten Unterschiede für die Versuchsbedingungen zeigen können.

3.5.2 Relative Gefäßanzahl und rel. Gefäßgrößen von *P. canescens*

Durch die Relativierung der Gefäßgrößenvermessung ist es möglich, die Ergebnisse von 2010 und 2011 trotz Unterschiede im Versuchsaufbau und der Messmethode miteinander zu vergleichen. Dabei bezieht sich der Vergleich jeweils nur auf die jeweilige Kontrolle. Diese ist als Sollwert mit 100% gleichgesetzt, der dazugehörige Standardfehler der Messungen auf 1%.

Die Auszählung und Vermessung der Gefäße an gefärbten Dünnschnitten zeigt folgende Ergebnisse:

Tab. 3.22: Werteübersicht zur Auszählung der Holzgefäße von *P. canescens* 2010; gezeigt sind die relativen Werte der Zählungen, bezogen auf die Kontrollvariation (100%), mit Standardabweichungen (Kontrolle = 1); normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 770 ppm.

<i>P. canescens</i> 2010	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
rel. Gefäßanzahl [%]	100 ± 1	184,5* ± 31,8	96,4 ± 4,7	157,2 ± 12,4

Die Signifikanz der Unterschiede zwischen den Variationen wurde an den absoluten (tatsächlich gezählten) Werten berechnet, nicht an den relativen Werten. Einzig für den Bezug der Kontrolle auf die Variation unter erhöhtem CO₂ und normaler Wasserzufuhr ergab sich kein signifikanter Unterschied (*) in der Auszählung der Gefäße, was darauf hinweist, dass ein erhöhter CO₂- Gehalt der Luft ohne zusätzlichen Trockenstress keinen Einfluss auf die Anzahl der Gefäße hat.

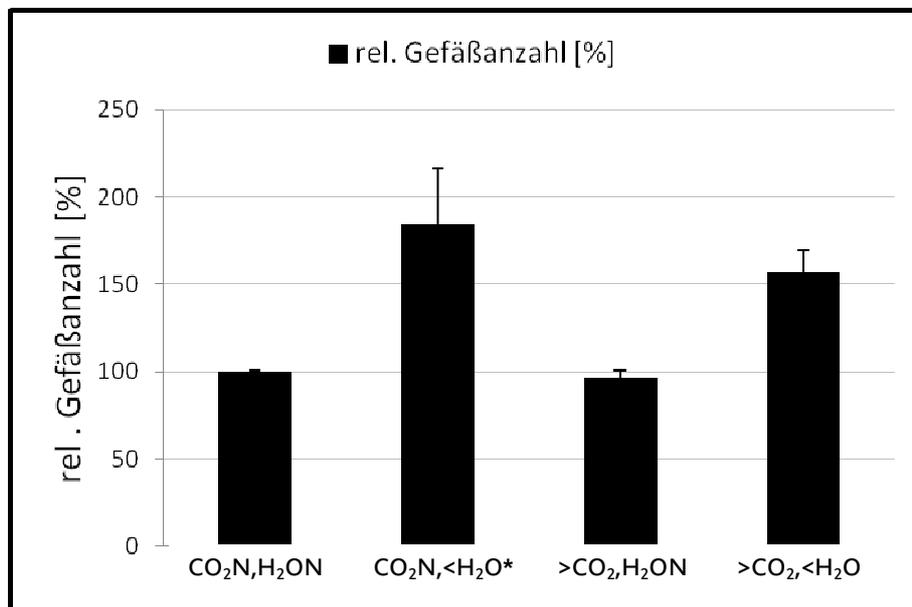


Abb. 3.53: Graphische Darstellung zur Auszählung der Holzgewächse an *P. canescens* 2010; gezeigt sind die relativen Werte der Zählungen, bezogen auf die Kontrollvariation (100%), mit Standardabweichungen (Kontrolle = 1), n = 3; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 770 ppm.

Die graphische Darstellung zeigt deutlich, dass unter Trockenstress die Anzahl der Gefäße im Holz zunimmt. Die Werte für beide Variationen unter Trockenstress sind ebenfalls signifikant unterschiedlich, sodass gesagt werden kann, dass ein erhöhter Kohlendioxidgehalt der Luft die Zunahme in der Gefäßanzahl (Gefäßdichte) hemmt.

Tab. 3.23: Werteübersicht zur Gefäßgrößenvermessung von *P. canescens* 2010 via WinCell; gezeigt sind die relativen Werte der Messungen, bezogen auf die Kontrollvariation (100%), mit Standardabweichungen (Kontrolle = 1), sowie die Größe der kleinsten gemessenen Gefäße der Versuchsvariationen; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 770 ppm.

<i>P. canescens</i> 2010	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
rel. Gefäßgröße [%]	100 ± 1	81,5 ± 1,8	109,6 ± 0,5	99,6 ± 0,8
kleinste Gefäße [mm²]	0,308	0,239	0,350	0,342

Die Signifikanz der Unterschiede zwischen den Variationen wurde an den absoluten (tatsächlich gemessenen) Werten des Programmes berechnet, nicht an den relativen Werten. Einzig für den Bezug der Kontrolle auf die Variation unter erhöhtem CO₂ und Trockenstress ergab sich kein signifikanter Unterschied in der Vermessung der Gefäßgrößen, was wiederholt darauf hinweist, dass ein erhöhter CO₂- Gehalt der Luft den Einfluss des Trockenstress bezogen auf die Gefäßgröße hemmt (ähnlich wie bei der Gefäßanzahl).

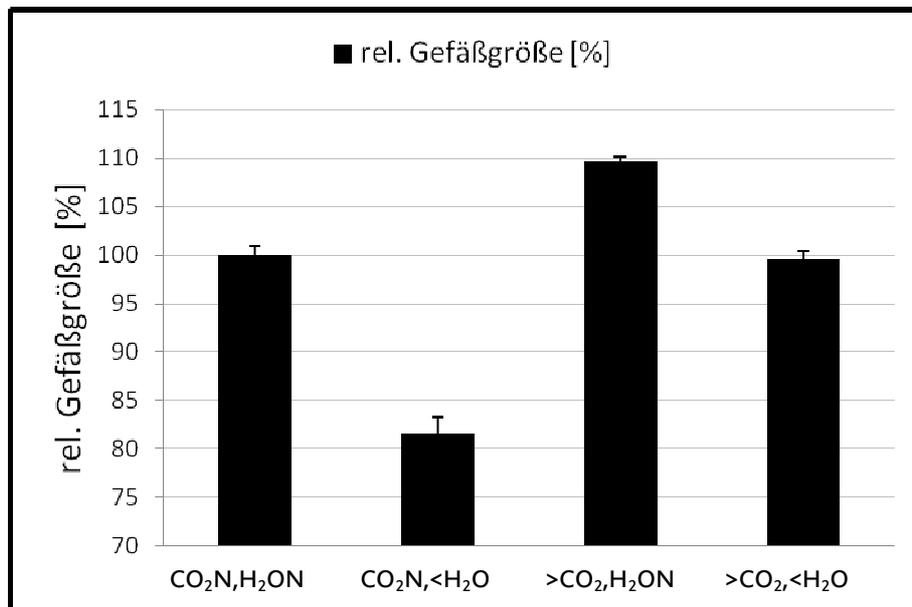


Abb. 3.54: Graphische Darstellung zur Vermessung der Gefäßgrößen von *P. canescens* 2010; gezeigt sind die relativen Werte der Messungen, bezogen auf die Kontrollvariation (100%), mit Standardabweichungen (Kontrolle = 1); normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 770 ppm.

Wie den Messwerten und der Darstellung zu entnehmen ist, zeigt die Versuchsvariation unter erhöhtem Kohlendioxidgehalt der Luft mit zusätzlich eingeschränkter Wasserzufuhr (>CO₂,<H₂O) sehr ähnlich große Gefäßgrößen, wie die Kontrollvariation (CO₂N,H₂ON).

Tab. 3.24: Werteübersicht zur Größenverhältnisberechnung an *P. canescens* 2010 via WinCell; gezeigt sind die relativen Werte der Messungen, bezogen auf die Kontrollvariation (100%), mit Standardabweichungen (Kontrolle = 1); L = Länge des Gefäßes, B = Breite des Gefäßes; Student's *t*- Test bezogen auf Kontrollvariation: Signifikanz (*) für Werte $\leq 0,05$; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 770 ppm.

<i>P. canescens</i> 2010	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
rel. Gefäßgrößenverhältnis L/B [%]	100 ± 1	95,5* ± 1,9	92,7* ± 1,1	93,6* ± 0,4

Das relative Gefäßgrößenverhältnis gibt an, welche Form die Gefäße haben. Dabei werden die Länge und die Breite der Gefäße zueinander ins Verhältnis gesetzt. Zeigt dieses Verhältnis einen großen Wert, sind die Gefäße länger als breit. Ist der Verhältnis- Wert geringer, sind die Gefäße im Holz rundlicher. Die Signifikanz der Unterschiede zwischen den Variationen wurde an den absoluten (tatsächlich gemessenen) Werten des Programmes berechnet, nicht an den relativen Werten. So ergeben sich für alle Größenverhältnisse im Bezug zur Kontrollvariation signifikante Unterschiede.

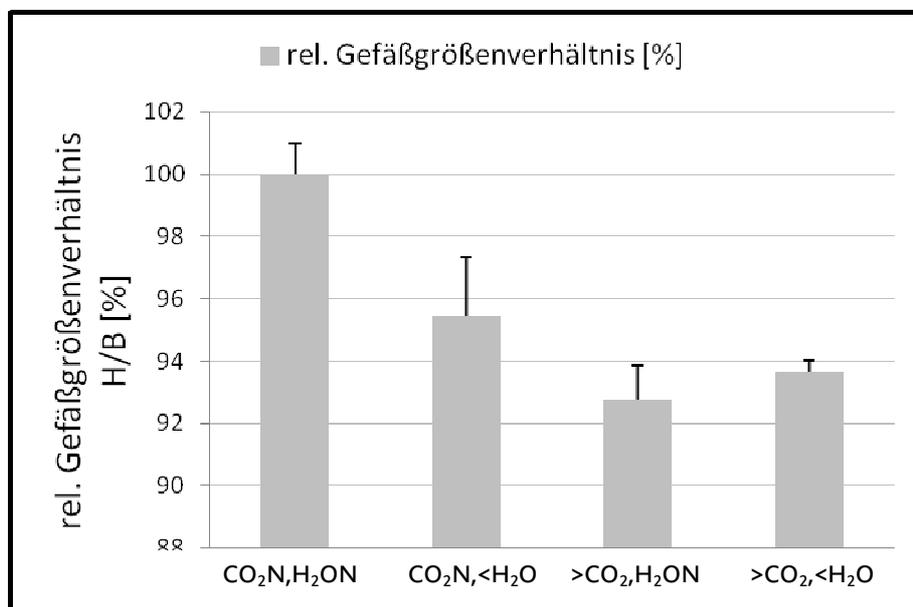


Abb. 3.55: Darstellung der relativen Größenverhältnisse der via WinCell vermessenen Gefäße im Holz von *P. canescens* 2010; das Programm misst das Verhältnis aus Länge und Breite der Gefäße. Ein starkes Verhältnis zeigt, dass die Gefäße eher länglich sind, hingegen ein schwaches Verhältnis auf runde Gefäße hinweist; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 770 ppm.

Der Unterschied im Verhältnis von Länge und Breite der Gefäße der beiden Variationen unter erhöhtem CO₂ ist nicht signifikant. Somit kann nicht bestätigt werden, dass ein erhöhter CO₂- Gehalt der Luft einen Einfluss auf die Gefäßform haben könnte.

3.5.3 Messungen zur Rohdichte von *P. canescens*

Nach Abschluss der Ernte Ende September 2010 wurden 3 Versuchspflanzen pro Variation zur Bestimmung der Rohdichte gewählt. Die tangentialen Dünnschnitte aus dem Bereich 5 cm über dem Topfboden getrocknet und zylindrische Bereiche aus dem Holz gestanzt.

Tab. 3.25: Werteübersicht zur Berechnung der Rohdichte von *P. canescens* 2010 mit Standardabweichungen; n = 3; keine Signifikanzen nachgewiesen; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 770 ppm.

2010	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
Rohdichte [mg/mm³]	1,547 ± 0,22	1,368 ± 0,14	1,425 ± 0,22	1,498 ± 0,23

Nach Berechnung der Rohdichte konnten für keine der Versuchsbedingungen signifikante Einflüsse auf die Rohdichte des Holzes nachgewiesen werden.

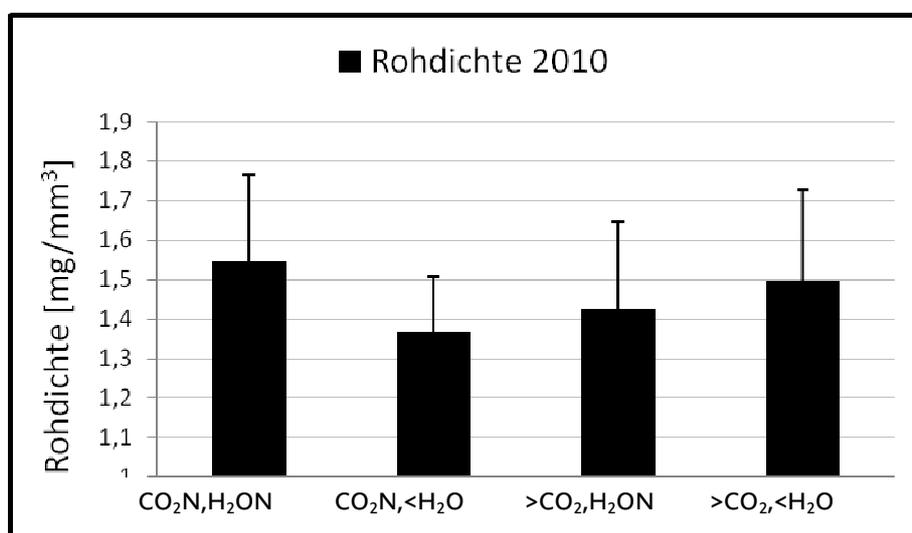


Abb. 3.56: Graphische Darstellung zur Rohdichte von *P. canescens* 2010 mit Standardabweichungen; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 770 ppm.

Die Kontrollvariation mit normalem Kohlendioxidgehalt der Luft und normaler Wasserzufuhr zeigt entgegen den Erwartungen die höchsten Werte zur Rohdichte. Bei Pflanzen unter Trockenstress scheint sie sich zu verringern. Erhöht sich der CO₂- Gehalt der Luft, steigt die Rohdichte und verstärkt sich nochmals, wenn zusätzlich ein Trockenstress wirkt.

Da für die Zählung der Gefäße ein signifikant zu beschreibender Einfluss von Trockenstress auf die Anzahl der Gefäße ermittelt werden konnte, wird der Trend in den Werten zur Rohdichte bestätigt.

3.6 Lichtmikroskopische Auswertung von *Populus x canescens* 2011

3.6.1 Quantitativer Holzzuwachs, digitale Messungen zur Jahrringbreite und der Markausdehnung

Der saisonale Holzzuwachs unter gegebenen Versuchsbedingungen im Jahr 2011 konnte nach Abschluss der Ernte an in 70%igen Ethanol konservierten Proben ermittelt werden. Die Messungen erfolgten digital mit entsprechenden Programmen zur Analyse und Auswertung gefärbter lichtmikroskopischer Dünnschnitte.

Darstellung und Definition der definierten Abschnitte: Abb. 2.17, S. 42.

Tab. 3.26: Gesamtwerteübersicht zur digitalen Vermessung des saisonalen Holzzuwachses an *P. canescens* 2011 mit Standardabweichungen; n = 3; Student's *t*- Test bezogen auf Kontrollvariation: Signifikanz (*) für Werte $\leq 0,05$; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm.

2011	Probenbereich Abschnitt	Jahrringbreite [mm]	Markdurchmesser [mm]
CO ₂ N, H ₂ ON	2	3,27 ± 0,24	1,89 ± 0,12
	3	2,2 ± 0,23	2,06 ± 0,18
CO ₂ N, <H ₂ O	2	1,73* ± 0,26	1,88 ± 0,22
	3	1,25* ± 0,21	1,77* ± 0,15
>CO ₂ , H ₂ ON	2	3,22 ± 0,14	2,18 ± 0,1
	3	2,22 ± 0,23	1,87 ± 0,16
>CO ₂ , <H ₂ O	2	1,76* ± 0,22	2,17 ± 0,18
	3	1,41* ± 0,17	1,7* ± 0,1

In beiden Abschnitten zeigt die eingeschränkte Wasserzufuhr im Bezug zur Kontrollvariante signifikante Unterschiede auf das Holzwachstum.

Tab. 3.27: Übersicht zum Student's *t*- Test für Werte der Jahrringbreiten in Abschnitt 2 und 3 von *P. canescens* 2011; n = 3, Signifikanz (*) für Werte $\leq 0,05$, normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm.

Abschnitt 2		
Variation	bezogen auf	<i>t</i> - Test
CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	0
CO ₂ N,H ₂ ON	>CO ₂ ,H ₂ ON	0,86
CO ₂ N,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O	0
>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O	0
CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,75
Abschnitt 3		
Variation	bezogen auf	<i>t</i> - Test
CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	0
CO ₂ N,H ₂ ON	>CO ₂ ,H ₂ ON	0,9
CO ₂ N,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O	0
>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,1
CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,01

Die Gesamtübersicht zur statistischen Verifizierung der Einflüsse der Versuchsbedingungen zeigt, dass in Abschnitt 2 der erhöhte Kohlendioxidgehalt der Luft allein keinen signifikanten Einfluss auf die Jahrringbreite hatte (rot markierte Werte- Gegenüberstellung). Und auch im dritten Abschnitt wird gezeigt, dass nur die Kombination aus Trockenstress und CO₂ das Holzwachstum beeinflusst (grüne Werte- Gegenüberstellung).

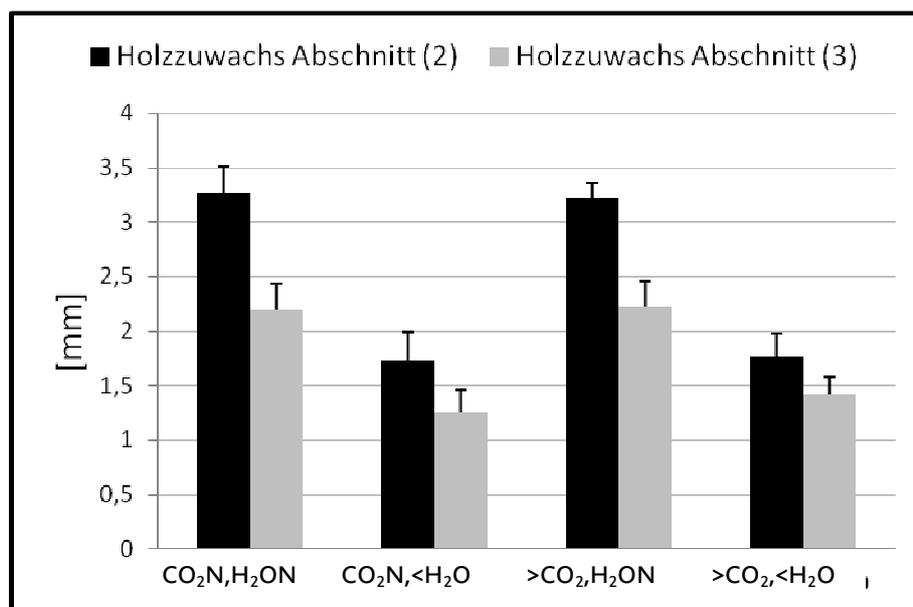


Abb.3.57: Graphische Darstellung zur Jahrringbreite von *P. canescens* 2011 mit Standardabweichungen; n = 3, normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm.

Im Vergleich beider Abschnitte zeigt sich weiterhin, dass sich die Reduzierung des Holzzuwachses unter Trockenstress und erhöhtem Kohlendioxid vermindert, dies aber lediglich im dritten Abschnitt relevant zu beschreiben ist.

Die Vermessung der Markdurchmesser zeigt ebenfalls nur im Bezug auf den Trockenstress relevante Unterschiede, die jedoch nur im dritten Abschnitt auch signifikant sind. Eine Veränderung des Kohlendioxidgehaltes der Luft hatte keinen Einfluss auf den Markdurchmesser 2011.

3.6.2 Relative Gefäßanzahl und rel. Gefäßgrößen von *P. canescens*

Alle nachfolgenden Ergebnisse beziehen sich auf Vermessungen im Abschnitt 2 von *P. canescens* der Saison 2011 (s. Abb. 2.17, S. 42.).

Durch die Relativierung Gefäßgrößenvermessung ist es möglich, die Ergebnisse von 2010 und 2011 trotz Unterschiede im Versuchsaufbau und der Messmethode miteinander zu vergleichen. Dabei bezieht sich der Vergleich jeweils nur auf die jeweilige Kontrolle. Diese ist als Sollwert mit 100% gleichgesetzt, der dazugehörige Standardfehler der Messungen auf 1%.

Die Auszählung und Vermessung der Gefäße an gefärbten Dünnschnitten zeigt folgende Ergebnisse:

Tab. 3.28: Werteübersicht zur Auszählung der Holzgefäße von *P. canescens* 2011; gezeigt sind die relativen Werte der Zählungen, bezogen auf die Kontrollvariation (100%), mit Standardabweichungen (Kontrolle = 1); normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm.

<i>P. canescens</i> 2011	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
rel. Gefäßanzahl [%]	100 ± 1	215,6 ± 1,3	79,7 ± 0,7	199,9 ± 1,1

Die Signifikanz der Unterschiede zwischen den Variationen wurde an den absoluten (tatsächlich gezählten) Werten berechnet, nicht an den relativen Werten und ergab einzig für den Vergleich beider Variationen unter Trockenstress keinen bezeichnenden Unterschied (Werte nicht gezeigt).

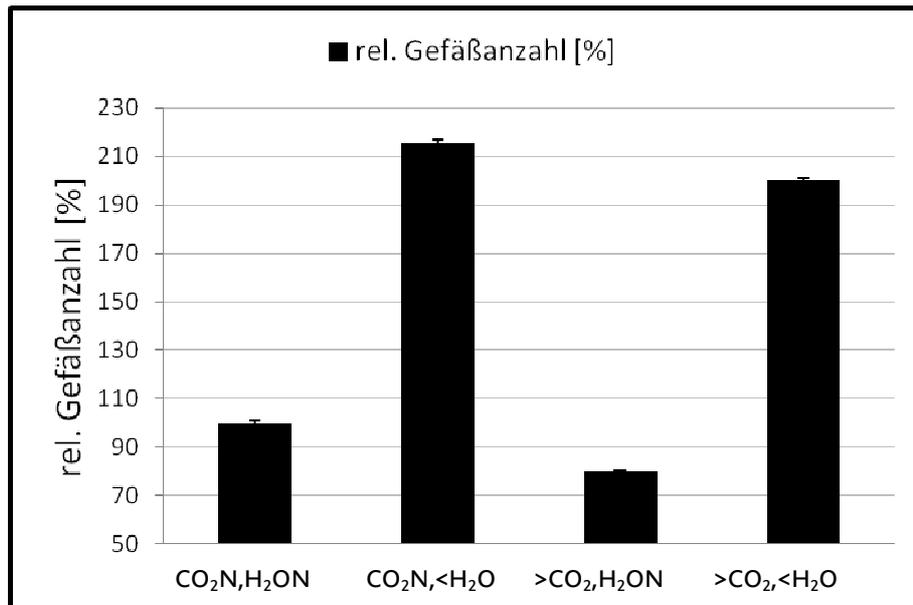


Abb. 3.58: Graphische Darstellung zur Auszählung der Holzgewächse an *P. canescens* 2011; gezeigt sind die relativen Werte der Zählungen, bezogen auf die Kontrollvariation (100%), mit Standardabweichungen (Kontrolle = 1), n = 3; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm.

Wie die Graphik zeigt, erhöht sich mit eingeschränkter Wasserzufuhr die Anzahl der Holzgefäße signifikant. Ein zusätzlich erhöhter Kohlendioxidgehalt der Luft scheint diese Entwicklung zu hemmen, wobei dieser Einfluss nicht signifikant zu zeigen ist.

Tab. 3.29: Werteübersicht zur Gefäßgrößenvermessung von *P. canescens* 2011 via ZENlite; gezeigt sind die relativen Werte der Messungen, bezogen auf die Kontrollvariation (100%), mit Standardabweichungen (Kontrolle = 1), sowie die Variabilität der Gefäßgröße innerhalb einer Variante und die Größe der kleinsten gemessenen Gefäße der Versuchsvariationen; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm.

<i>P. canescens</i> 2011	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
rel. Gefäßgröße [%]	100 ± 1	65,9 ± 0,8	108,2 ± 4	56,4 ± 1,3
Variabilität [mm²]	0,29	0,56	0,56	0,31
kleinste Gefäße [mm²]	0,492	0,428	0,49	0,293

Die Variabilität in [mm²] gibt an, wie unterschiedlich die Größe der Gefäße innerhalb einer Variante ist. Da alle Versuchsvariationen im selben Bereich des saisonalen Holzzuwachses vermessen wurden, sind Einflüsse von Früh- und Spätholz auszuschließen. Hierbei zeigt sich, dass die vorherrschenden Versuchsbedingungen keinen signifikanten Einfluss auf die Variabilität der Gefäßgrößen innerhalb einer Variante hatte.

Die Signifikanz der Unterschiede der Gefäßgrößen zwischen den Variationen wurde an den absoluten (tatsächlich gemessenen) Werten des Programms berechnet, nicht an den relativen Werten.

Tab. 3.30: Übersicht zum Student's *t*- Test für Werte der Gefäßgrößenvermessung von *P. canescens* 2011; n = 3, Signifikanz (*) für Werte $\leq 0,05$, normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm.

Abschnitt 2		
Variation	bezogen auf	t-Test
CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	0,001
CO ₂ N,H ₂ ON	>CO ₂ ,H ₂ ON	0,5
CO ₂ N,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,001
>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,01
CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,1

Wie die Übersicht zur Berechnung der Signifikanzen zeigt, hat die Erhöhung des Kohlendioxidgehaltes der Luft allein keinen Einfluss auf die Werte zur Gefäßgrößenvermessung (rot markiert).

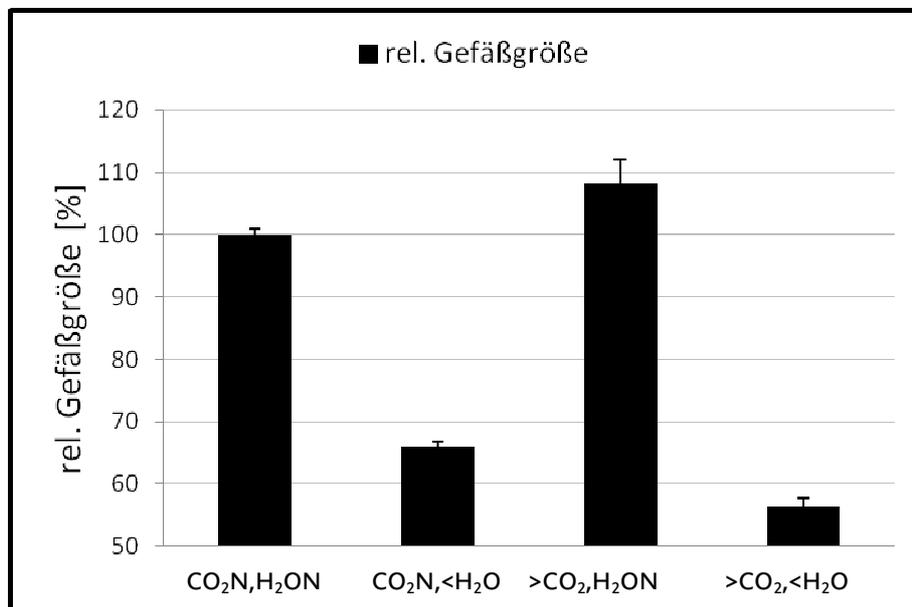


Abb. 3.59: Graphische Darstellung zur Vermessung der Gefäßgrößen von *P. canescens* 2011; gezeigt sind die relativen Werte der Messungen, bezogen auf die Kontrollvariation (100%), mit Standardabweichungen (Kontrolle = 1); normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm.

Die Darstellung der Messwerte zeigt deutlich, dass die eingeschränkte Wasserzufuhr zur Reduzierung der Gefäßgrößen geführt hat. Auch zeigt sich, dass die Erhöhung des CO₂ die Gefäße zwar vergrößert, dieser Einfluss jedoch nicht signifikant ist (s. Tab. 3.29).

Da ein erhöhter Kohlendioxidgehalt der Luft in Kombination mit Trockenstress die Reduzierung der Gefäßgröße verstärkt, ist in der Graphik ersichtlich, aber aufgrund der Messwerte und deren Standardabweichungen ebenfalls nicht signifikant.

3.6.3 Messungen zur Rohdichte von *P. canescens*

Nach Abschluss der Ernte Ende September 2011 wurden 4 Versuchspflanzen pro Variation zur Bestimmung der Rohdichte gewählt. Die tangentialen Dünnschnitte aus dem Bereich der ersten 5 cm des Haupttriebes getrocknet und zylindrische Bereiche aus dem Holz gestanzt.

Tab. 3.31: Werteübersicht zur Berechnung der Rohdichte von *P. canescens* 2011 mit Standardabweichungen; n = 4; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm.

2011	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
Rohdichte [mg/mm³]	1,177 ± 0,21	1,361 ± 0,2	1,163 ± 0,3	1,024 ± 0,21

Für die Werte zur Rohdichte ist ein signifikanter Unterschied zwischen den Versuchsvariationen CO₂N,<H₂O und >CO₂,<H₂O festzustellen (Berechnung nicht gezeigt) und somit ein Einfluss des erhöhten CO₂ auf trockengestresste Bäume, bezogen auf die Rohdichte des Holzes.

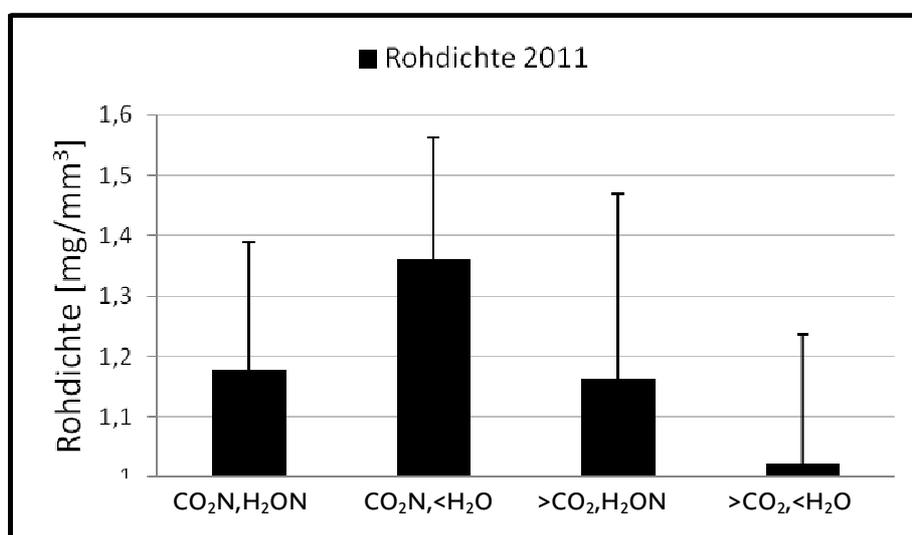


Abb. 3.60: Graphische Darstellung zur Rohdichte von *P. canescens* 2011 mit Standardabweichungen; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm.

Die Werte der Saison 2011 entsprechen im Verlauf der Erwartung, dass sich die Dichte bei Pflanzen unter Trockenstress gegenüber der Kontrollvariante erhöht. Der erhöhte Kohlendioxidgehalt der Luft wirkt sich hingegen im Haupttrieb nicht auf die Rohdichte aus. Die Pflanzen unter erhöhtem CO₂ und gleichzeitigem Trockenstress besitzen die geringste Rohdichte, was auf eine gegenseitige Hemmung der Effekte hinweisen könnte.

3.6.4 Analysen zur Blattmorphologie an Source- Blättern

Mitte August 2011 sind bei Pappel Blattproben entnommen worden, um die Blattmorphologie im Bezug auf die gegebenen Versuchsbedingungen zu untersuchen.

Es wurde nicht nach Licht- und Schattenblättern unterteilt, da kein Sonnenlicht direkt in die Klimakammern auf die Bäume gelangte und diese mehrmals in der Woche in ihren Positionen verändert wurden.

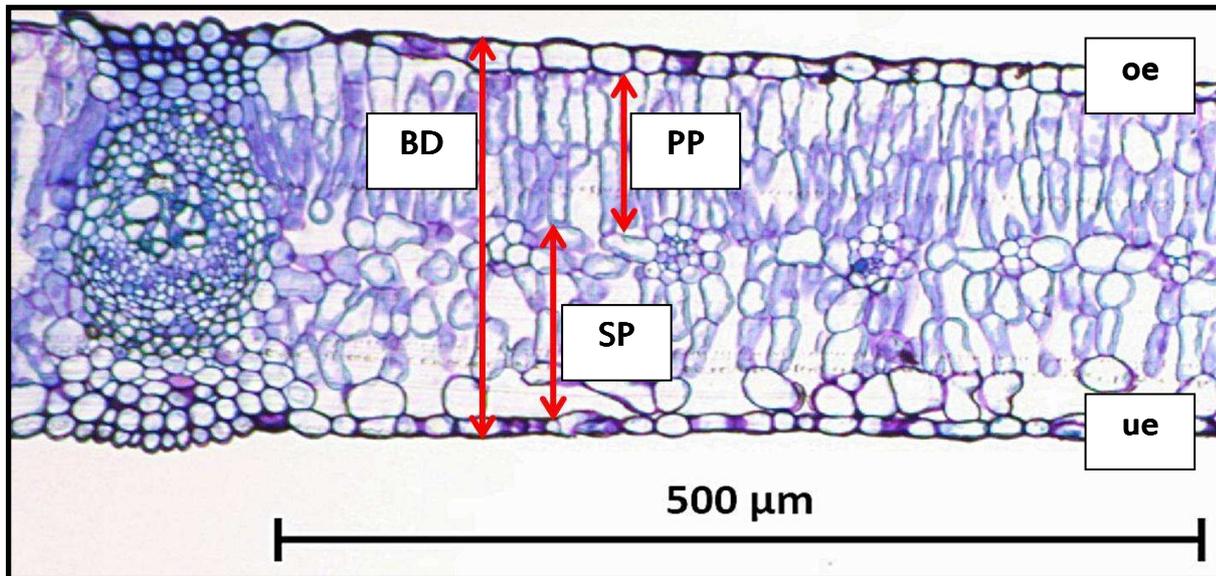


Abb. 3.61: Darstellung zur Analyse von Blattquerschnitten an *P. canescens* 2011; der in Kunststoff (Kulzer) fixierte Querschnitt (2 μm) eines Laubblattes, gefärbt mit Toluidinblau O, wird bei 20facher Vergrößerung vermessen. Die Blattdicke (BD) misst sich von oberer (oe) bis unterer Epidermis (ue), das Schwammparenchym (SP) von unterer Epidermis bis zum Kontakt mit Zellen des Palisadenparenchym (PP, zweireihig), die Zellen des PP dementsprechend vom Kontakt zum SP bis zur oberen Epidermis. Abstände gemessen in [μm].

Pro Versuchsvariation wurden 4 Bäume gewählt. Im Palisadenparenchym von *P. canescens* sind zwei übereinander liegende Zellreihen vorhanden.

Tab. 3.32: Werteübersicht zur Gewebevermessung an *P. canescens* 2011 in [μm]; PP = Palisadenparenchym, SP = Schwammparenchym; Blattdicke, PP und SP wurden direkt vermessen (ZEN 2011 und Axio Vision, Carl Zeiss, Oberkochen/ Deutschland), die Dicke der (oberen und unteren) Epidermis berechnet sich aus Blattdicke abzüglich PP und SP; n = 4; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm. Student's *t*-Test für die Werte des Gesamtmonats bezogen auf die Kontrollvariante CO₂N,H₂ON, Signifikanz (*) für Werte ≤ 0,05.

Variante	Blattdicke	Epidermis	Dicke PP	Dicke SP
CO ₂ N,H ₂ ON	189,7 ± 9,3	30 ± 3,2	76,8 ± 3,7	82,9 ± 5,2
CO ₂ N,<H ₂ O	203,6* ± 15,5	24,9* ± 3,3	83,8 ± 6,6	94,9* ± 10,1
>CO ₂ ,H ₂ ON	206,6* ± 15,2	28,9 ± 3	84,9 ± 8,6	92,7* ± 5,9
>CO ₂ ,<H ₂ O	183,9 ± 8,4	28,7 ± 3	78,2 ± 3,9	76,9 ± 3,9

Die Signifikanzen der Messungen sind nicht ausschließlich auf den Trockenstress bezogen. So zeigt sich, dass die Variation unter erhöhtem Kohlendioxid und normaler Wasserzufuhr ($>CO_2, H_2O$) im Vergleich zur Kontrolle eine deutlich vergrößerte Blattdicke aufweist.

Nachfolgend sind die ermittelten Werte, nach Geweben getrennt, graphisch dargestellt.

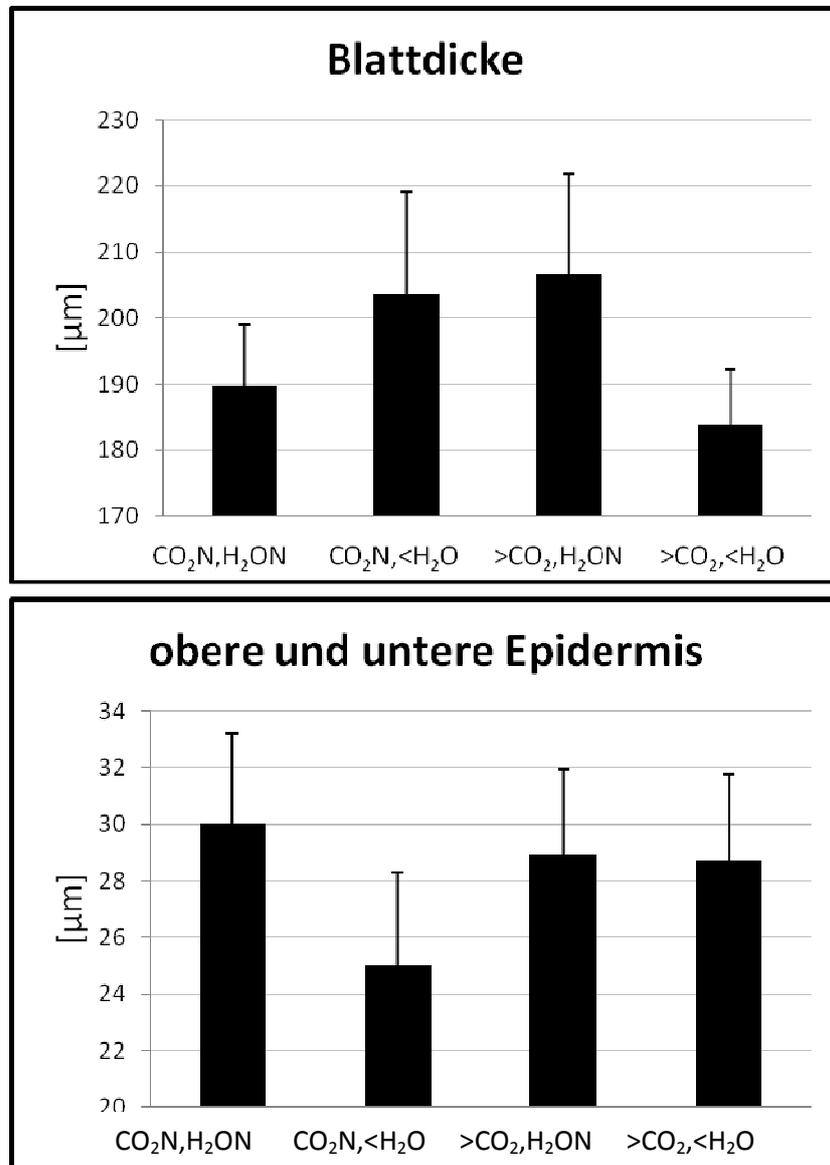


Abb. 3.62: graphische Darstellungen der Messungen zur Morphologie der Blattdicke und der Epidermis an *P. canescens* August 2011 mit Standardabweichungen; normaler CO_2 - Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO_2 - Gehalt = 950 ppm.

Die Blattdicke der Blätter bei normaler Gaszusammensetzung der Luft erhöht sich, sobald die Pflanzen einem Trockenstress ausgesetzt sind. Jedoch zeigt einzig diese Versuchsvariation einen signifikanten Einfluss des Trockenstress auf die Dicke der Epidermiszellen, die sich stark reduziert. Dieser Einfluss der Wasserzufuhr auf die Epidermis ist bei Erhöhung des Kohlendioxidgehaltes der Luft nicht sichtbar.

Die Versuchsvariation unter erhöhtem CO_2 und normaler Wasserzufuhr zeigt ebenfalls eine Verdickung der Blätter. Der zusätzlich zum Kohlendioxid gesetzte Trockenstress führt, anders als bei normalem CO_2 -Gehalt der Luft, hingegen nicht zu einer starken Zunahme der Zellgrößen. Beide Effekte zusammen wirken sich hemmend auf die Gewebevergrößerung aus.

Die Messwerte ergeben für beiden Variationen des veränderten Kohlendioxidgehaltes der Luft keine signifikanten Veränderungen bezogen auf die Epidermis, was auf einen erhöhten Einfluss der Versuchsbedingungen auf die Anatomie der Parenchyme hinweist.

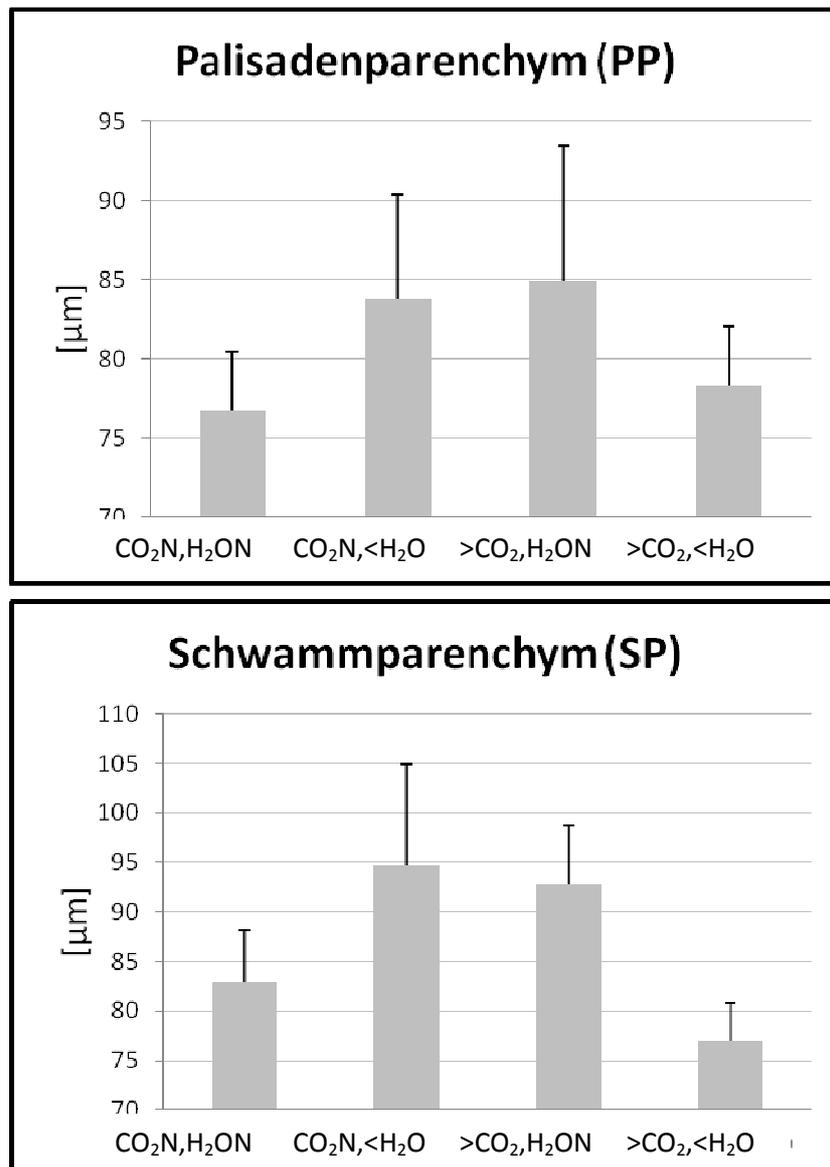


Abb. 3.63: graphische Darstellungen der Messungen zur Blattmorphologie der Parenchyme an *P. canescens* August 2011 mit Standardabweichungen; normaler CO_2 -Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO_2 -Gehalt = 950 ppm.

Im Bezug auf die Anatomie der Parenchyme zeigt sich ebenfalls, dass die Zellen beider Parenchyme unter normalem CO_2 und Trockenstress vergrößert sind, diese Zellvergrößerung hingegen gehemmt wird, sobald sich die Gaszusammensetzung der Luft ändert.

Somit beschreibt sich für die Blattmorphologie von *P. canescens* bezogen auf Blattdicke des Blattes, Epidermiszellen und die parenchymatische Zellen im Blattinneren ein hemmender Effekt des Kohlendioxids bei gleichzeitigem Trockenstress (s. Anhang Tab. 8, 9, S. vi).

3.7 Lichtmikroskopische Auswertung von *Fagus sylvatica* 2011

3.7.1 Quantitativer Holzzuwachs, digitale Messungen zur Jahrringbreite und der Markausdehnung

Der saisonale Holzzuwachs unter gegebenen Versuchsbedingungen im Jahr 2011 konnte nach Abschluss der Ernte an in 70%igen Ethanol konservierten Proben ermittelt werden. Die Messungen erfolgten digital mit entsprechenden Programmen zur Analyse und Auswertung gefärbter lichtmikroskopischer Dünnschnitte.

Darstellung und Definition der definierten Abschnitte: Abb. 2.17, S. 42.

Tab. 3.33: Gesamtwerteübersicht zur digitalen Vermessung des saisonalen Holzzuwachses an *F. sylvatica* 2011 mit Standardabweichungen; $n = 3$; Student's t - Test ergibt keine signifikanten Werteunterschiede; normaler CO_2 -Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO_2 - Gehalt = 950 ppm.

2011	Probenbereich Abschnitt	Jahrringbreite [mm]	Markdurchmesser [mm]
$\text{CO}_2\text{N}, \text{H}_2\text{ON}$	1	$0,316 \pm 0,15$	$0,524 \pm 0,09$
$\text{CO}_2\text{N}, <\text{H}_2\text{O}$	1	$0,374 \pm 0,04$	$0,472 \pm 0,11$
$>\text{CO}_2, \text{H}_2\text{ON}$	1	$0,454 \pm 0,33$	$0,531 \pm 0,07$
$>\text{CO}_2, <\text{H}_2\text{O}$	1	$0,759 \pm 0,28$	$0,511 \pm 0,03$

Die bereits am Phänotyp beschriebene Variabilität der Buchen innerhalb einer Versuchsvariation zeigt sich auch in den Auswertungen der Lichtmikroskopie. Die Standardabweichungen der Messungen zum saisonalen Holzzuwachs 2011 zeigen keine signifikanten Einflüsse der Versuchsbedingungen, weder im Holz noch im Mark.

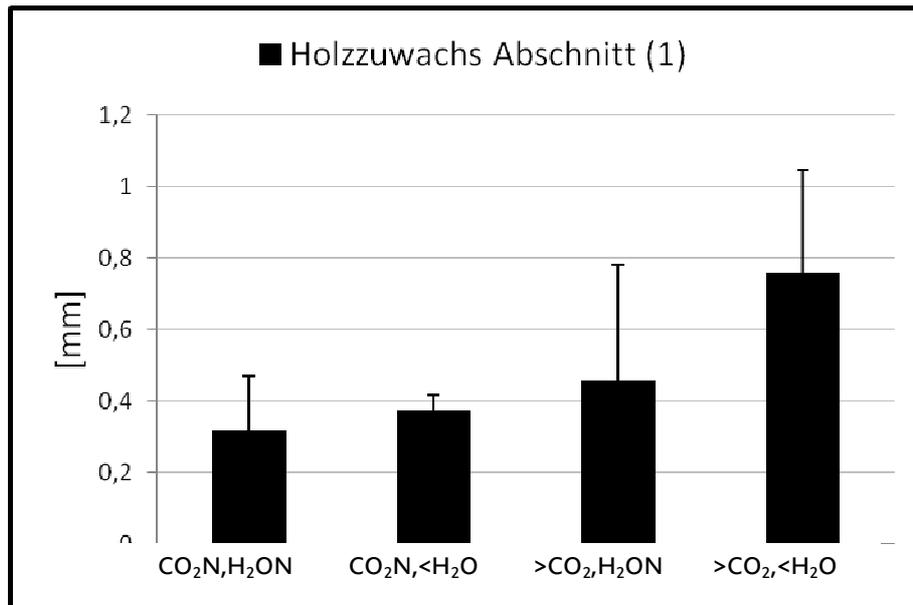


Abb. 3.64: Graphische Darstellung zur Jahrringbreite von *F. sylvatica* 2011 mit Standardabweichungen; n = 3, normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm.

Die Darstellung der Messwerte zeigt des Weiteren deutlich eine untypische Werteaufstellung, bezogen auf die eingeschränkte Wasserzufuhr der Versuchspflanzen.

3.7.2 Analysen zur Blattmorphologie an Source- Blättern von *F. sylvatica*

Mitte August 2011 sind bei Buche Blattproben entnommen worden, um die Blattmorphologie im Bezug auf die gegebenen Versuchsbedingungen zu untersuchen.

Es wurde nicht nach Licht- und Schattenblättern unterteilt, da kein Sonnenlicht direkt in die Klimakammern auf die Bäume gelangte und diese mehrmals in der Woche in ihren Positionen verändert wurden.

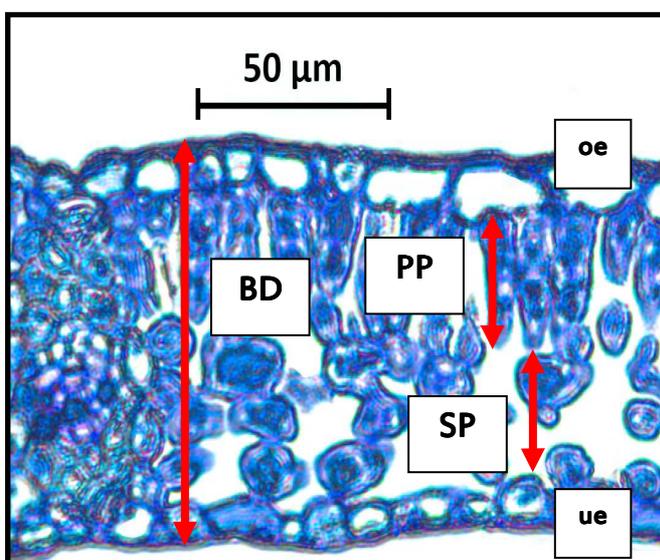


Abb. 3.65: Darstellung zur Analyse von Blattquerschnitten an *F. sylvatica* 2011; der in Kunststoff (Kulzer) fixierte Querschnitt (4 μm) eines Laubblattes, gefärbt mit Toluidinblau O, wird bei 40facher Vergrößerung (Auflicht) vermessen. Die Blattdicke (BD) misst sich von oberer (oe) bis unterer Epidermis (ue), das Schwammparenchym (SP) von unterer Epidermis bis zum Kontakt mit Zellen des Palisadenparenchym (PP, einreihig), die Zellen des PP dementsprechend vom Kontakt zum SP bis zur oberen Epidermis. Abstände gemessen in [μm].

Pro Versuchsvariation wurden 4 Bäume gewählt.

Im Palisadenparenchym von *F. sylvatica* ist eine Zellreihe vorhanden.

Tab. 3.34: Werteübersicht zur Gewebevermessung an *F. sylvatica* 2011 in [μm]; PP = Palisadenparenchym, SP = Schwammparenchym; Blattdicke, PP und SP wurden direkt vermessen (*ZEN 2011* und *Axio Vision*, Carl Zeiss, Oberkochen/ Deutschland), die Dicke der (oberen und unteren) Epidermis berechnet sich aus Blattdicke abzüglich PP und SP; n = 4; normaler CO_2 - Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO_2 - Gehalt = 950 ppm. Student's *t*-Test für die Werte des Gesamtmonats bezogen auf die Kontrollvariante $\text{CO}_2\text{N}, \text{H}_2\text{O}$, Signifikanz (*) für Werte $\leq 0,05$.

Variante	Blattdicke	Epidermis	Dicke PP	Dicke SP
$\text{CO}_2\text{N}, \text{H}_2\text{O}$	$83,5 \pm 6$	$16,4 \pm 2,3$	$33,2 \pm 1,9$	$33,8 \pm 5,7$
$\text{CO}_2\text{N}, < \text{H}_2\text{O}$	$85,7 \pm 6$	$18,1 \pm 2,1$	$35,3 \pm 5,9$	$32,3 \pm 2,9$
$> \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$	$98^* \pm 5,6$	$20,3^* \pm 2,9$	$35,9^* \pm 1,8$	$41,7^* \pm 5,8$
$> \text{CO}_2, < \text{H}_2\text{O}$	$89,9 \pm 3,2$	$20^* \pm 0,5$	$36,7^* \pm 3,6$	$33,2 \pm 0,7$

Alle Messwerte der Variation unter erhöhtem CO_2 und normaler Wasserversorgung sind im Vergleich zur Kontrolle gestiegen.

Nachfolgend sind die ermittelten Werte, nach Geweben getrennt, graphisch dargestellt.

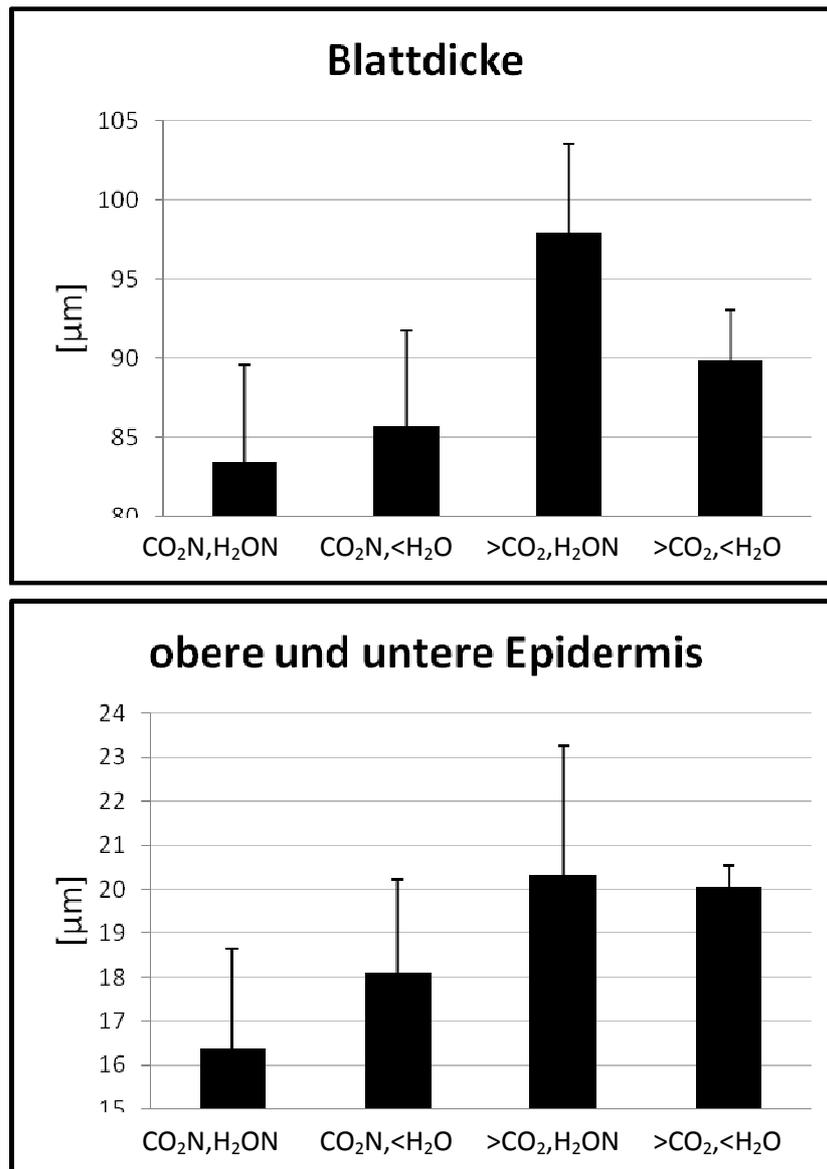


Abb. 3.66: graphische Darstellungen der Messungen zur Blattmorphologie der Blattdicke und der Epidermis an *F. sylvatica* August 2011 mit Standardabweichungen; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm.

Wie in den graphischen Darstellungen zu erkennen ist, sind sowohl die Blattdicke, als auch die Epidermiszellen unter erhöhtem Kohlendioxidgehalt der Luft stark vergrößert.

Nicht signifikant ist hingegen die Zellvergrößerung bei Pflanzen mit eingeschränkter Wasserzufuhr. Die Blattdicke der Blätter bei normaler Gaszusammensetzung der Luft erhöht sich, sobald die Pflanzen einem Trockenstress ausgesetzt sind.

Diese Zellvergrößerung, bedingt durch den Trockenstress, wird in den Epidermiszellen vom Kohlendioxid gehemmt, bezogen auf die Blattdicke sogar verhindert.

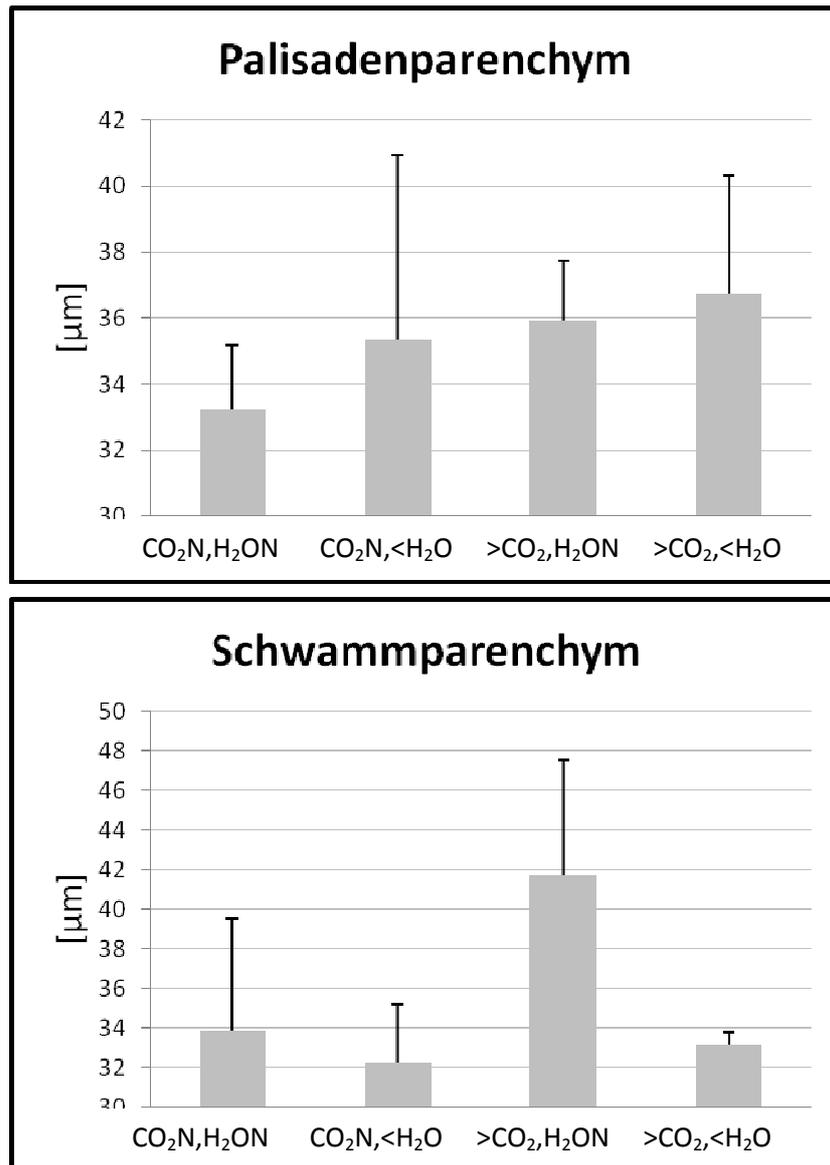


Abb. 3.67: graphische Darstellungen der Messungen zur Blattmorphologie der Parenchyme an *F. sylvatica* August 2011 mit Standardabweichungen; normaler CO_2 - Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO_2 - Gehalt = 950 ppm.

Aufgrund der Abweichungen sind für die Messungen der Dicke im Palisadenparenchym einzig die Variationen unter erhöhtem Kohlendioxid im Unterschied zur Kontrolle signifikant. In den Zellen des Schwammparenchyms zeigt sich kein signifikanter Effekt des erhöhten Kohlendioxids auf die Blattmorphologie der Pflanzen. Beide Variationen des Trockenstress zeigen ähnlich geringe Zellgrößen. Die Vergrößerung der Zellen bei Pflanzen mit normaler Wasserzufuhr ist hingegen auch hier signifikant.

3.8 Elementanalyse durch Pyrolyse

Die durch Pyrolyse aufgetrennten Bestandteile der gemahlten Pflanzenproben zeigen folgende Messwerte:

Tab. 3.35: Gesamtwerteübersicht zur Elementaranalyse von Wurzeln aus 2010 und 2011 von *P. canescens* und *F. sylvatica* mit Standardabweichungen; die Wurzeln wurden im Topf getrocknet, aus Haupt und Feinwurzelbereichen Stücke herausgetrennt und gemahlen; n = 4; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm; erhöhter CO₂- Gehalt = 770 ppm (2010) bzw. 950 ppm (2011)

<i>P. canescens</i>		CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
Kohlenstoff [%]	2010	44,64 ± 0,5	44,09 ± 0,5	45,36 ± 0,2	44,73 ± 0,4
	2011	46,19 ± 0,4	45,94 ± 0,5	43,13 ± 0,3	42,69 ± 0,7
Stickstoff [%]	2010	0,37 ± 0,02	0,48 ± 0,1	0,35 ± 0,02	0,45 ± 0,05
	2011	0,66 ± 0,08	1,14 ± 0,3	0,6 ± 0,06	0,88 ± 0,1
<i>F. sylvatica</i>		CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
Kohlenstoff [%]	2011	44,72 ± 0,7	45,02 ± 0,4	45,32 ± 0,3	45,09 ± 0,2
Stickstoff [%]	2011	0,63 ± 0,1	0,58 ± 0,01	0,65 ± 0,1	0,51 ± 0,1

Um einen detaillierten Überblick zur Signifikanz der Werte dieser Messungen zu erhalten, sind die Variationen mittels Student's t- Test miteinander verglichen worden.

Tab. 3.36: Gesamtübersicht zur Berechnungen des Student's *t*- Test der Messwerte zur Elementaranalyse, Wurzelproben von Pappel und Buche = 4 pro Variante (n = 4); Signifikanz (*) für Werte $\leq 0,05$; normaler CO₂-Gehalt = 385 ppm; erhöhter CO₂- Gehalt = 770 ppm (2010) bzw. 950 ppm (2011); Wertemarkierungen s. Text.

<i>P. canescens</i> 2010		<i>t</i>- Test	
CO ₂ N,H ₂ ON	(K)	Kohlenstoff	Stickstoff
CO ₂ N,<H ₂ O	(K)	0,17	0,09
>CO ₂ ,H ₂ ON	(K)	0,04*	0,18
>CO ₂ ,<H ₂ O	(K)	0,8	0,02*
>CO ₂ ,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	0,004*	0,06
>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,03*	0,01*
CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,09	0,64
<i>P. canescens</i> 2011		<i>t</i>- Test	
CO ₂ N,H ₂ ON	(K)	Kohlenstoff	Stickstoff
CO ₂ N,<H ₂ O	(K)	0,48	0,02*
>CO ₂ ,H ₂ ON	(K)	<0,001*	0,25
>CO ₂ ,<H ₂ O	(K)	0,0001*	0,02*
>CO ₂ ,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	<0,001*	0,01*
>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,29	0,005*
CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,0003*	0,16
<i>F. sylvatica</i> 2011		<i>t</i>- Test	
CO ₂ N,H ₂ ON	(K)	Kohlenstoff	Stickstoff
CO ₂ N,<H ₂ O	(K)	0,46	0,46
>CO ₂ ,H ₂ ON	(K)	0,15	0,8
>CO ₂ ,<H ₂ O	(K)	0,35	0,10
>CO ₂ ,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	0,24	0,42
>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,22	0,13
CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,<H ₂ O	0,78	0,02*

Diese Übersicht zeigt für die Pappelproben aus 2010, dass bei zwei der verglichenen Variationen keine Signifikanz berechnet werden konnte, weder im Kohlen- noch im Stickstoffgehalt (rot markierte Werte). Umgekehrt konnten für zwei Datensätze im Jahr 2011 für beide Elemente eine Signifikanz gezeigt werden (grün markierte Werte).

Die Berechnungen der Datensätze für die Buchenproben zeigt eine Signifikanz, ein Einfluss der Versuchsbedingungen auf den Gehalt von Kohlen- und Stickstoff in den Wurzeln kann damit nicht beschrieben werden.

Bei der Darstellung der Messwerte für *P. canescens* ist darauf zu achten, dass die Wurzeln beider Jahre unterschiedlich behandelt und zur Messung verschiedene Probe- Einwaagen verwendet wurden (umgerechnet auf prozentualen Stoffgehalt).

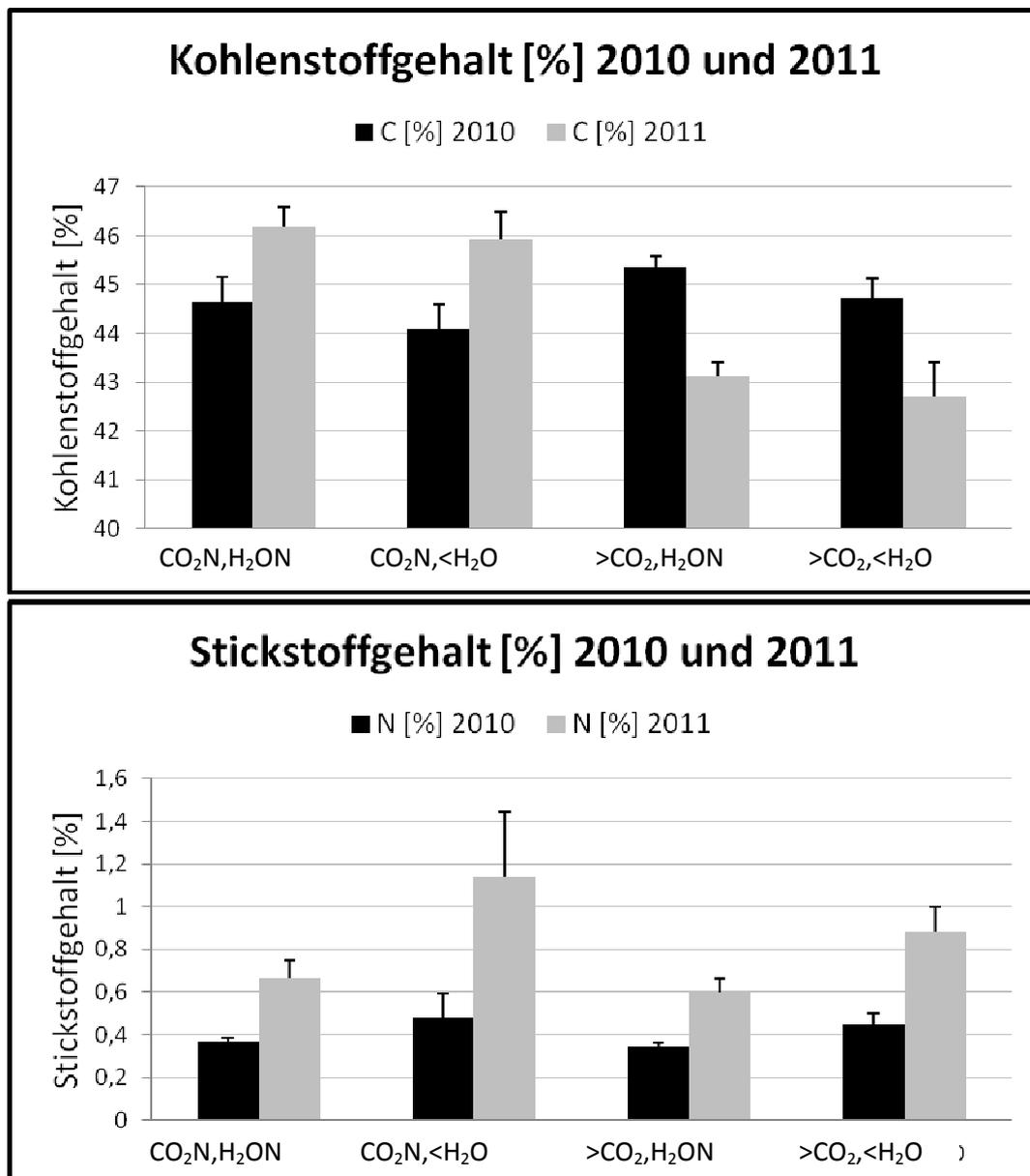


Abb. 3.68: Graphische Darstellungen der Elementaranalyse von *P. canescens* 2010 und 2011; mittels Pyrolyse ermittelter prozentualer Gehalt an Kohlenstoff (C) und Stickstoff (N), n = 4, normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm; erhöhter CO₂- Gehalt = 770 ppm (2010) bzw. 950 ppm (2011)

Wie im Vergleich der Kohlenstoff- Werte zu beschreiben ist, erhöht sich 2010 der prozentuale Gehalt in den Wurzeln mit steigendem Kohlendioxidgehalt der Luft. Für die Wurzeln der Saison 2011 ist dies nicht so. Dort zeigen die Wurzeln unter erhöhtem CO₂ signifikant geringere Werte. Beide Datensätze zeigen einen Effekt bezogen auf die Kombination aus erhöhtem CO₂ und Trockenstress, der eine Reduzierung des Kohlenstoffs beschreibt. Dies ist aufgrund der Standardabweichung jedoch nur 2010 auch signifikant.

Der Vergleich der beiden Versuchsjahre bezogen auf den Stickstoffgehalt zeigt, dass 2011 in den Wurzeln mehr Stickstoff angereichert wurde. Auch ist ein signifikanter Einfluss des Trockenstress deutlich, indem eine eingeschränkte Wasserzufuhr den Stickstoffgehalt in den Wurzeln erhöht (unterstrichene Werte). Für die Saison 2010 ist dies aufgrund der Standardabweichung nur in Kombination mit erhöhtem CO₂ zutreffend.

Des Weiteren wurden Proben der getrockneten abzisierten Blätter von *P. canescens* (s. 3.4.4) zur Pyrolyse eingereicht. Diese Blattproben von Bäumen unter Trockenstress sollen zeigen, ob der erhöhte CO₂- Gehalt der Luft einen Einfluss auf das C/N- Verhältnis hatte.

Tab. 3.37: Gesamtwerteübersicht zur Elementaranalyse von Blättern von *P. canescens* unter Trockenstress 2011 mit Standardabweichungen; die wöchentlich gesammelten abzisierten Blätter wurden getrocknet und pyrolysiert ; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm; erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm.

Kohlenstoff [%]	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,<H ₂ O
Mai	41,16 ± 0,3	39,5 ± 0,4
Juni	41,6 ± 0,2	42,2 ± 0,1
Juli	41,4 ± 0,2	40,5 ± 0,1
August	42,7 ± 0,1	41,9 ± 0,4
September	41,7 ± 0,1	41,4 ± 0,01
Stickstoff [%]	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,<H ₂ O
Mai	1,24 ± 0,03	1,01 ± 0,05
Juni	1,04 ± 0,03	0,86 ± 0,01
Juli	1,29 ± 0,02	0,83 ± 0,02
August	2,35 ± 0,1	1,23 ± 0,01
September	1,57 ± 0,03	0,71 ± 0,02

Mittels Student's *t*- Test konnte für den Stickstoffgehalt über die Gesamtwerte der Saison ein signifikanter Werteunterschied beider Versuchsvariationen nachgewiesen werden. Für den Kohlenstoffgehalt hingegen nicht.

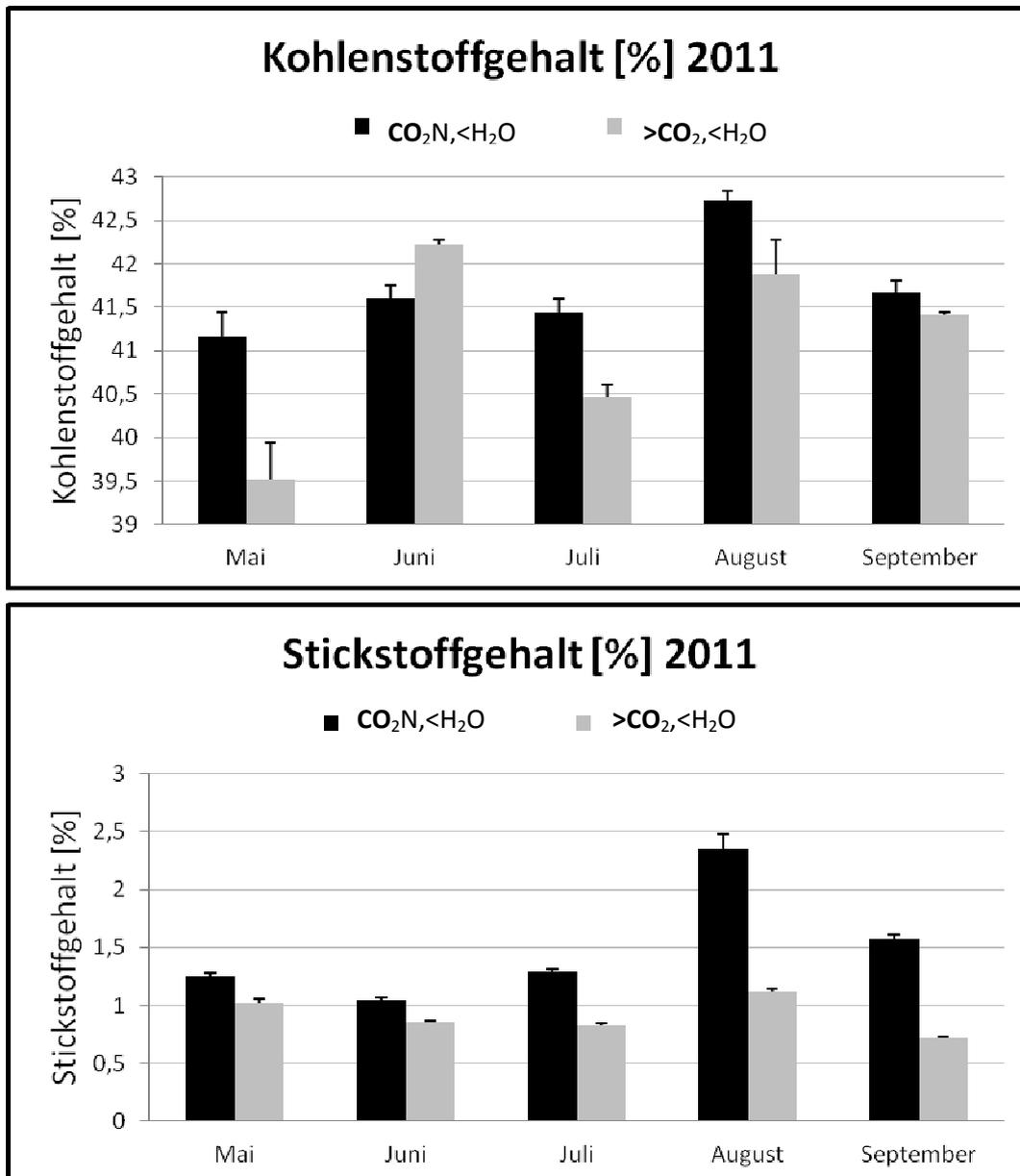


Abb. 3.69: Graphische Darstellungen der Elementaranalyse von Blattproben von *P. canescens* unter Trockenstress 2011; mittels Pyrolyse ermittelter prozentualer Gehalt an Kohlenstoff (C) und Stickstoff (N), normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm; erhöhter CO₂- Gehalt = 950 ppm.

Der erhöhte CO₂- Gehalt der Luft bewirkt einen signifikant geringeren Stickstoffgehalt in den abzierten Blättern trockengestresster Bäume. Unter normalem Kohlendioxidgehalt zeigen die Blattproben einen saisonalen Trend, der mit dem Chlorophyllgehalt der Blätter korreliert (s. Abb. 3.46). Die Analysen zum Kohlenstoffgehalt zeigen keine Korrelationen. Die geringeren Werte für die Bäume unter erhöhtem CO₂ sind saisonal nicht signifikant.

4. Diskussion

Die vorliegende Arbeit thematisiert den Einfluss eines erhöhten Kohlendioxid- Gehaltes der Luft und dem durch eine eingeschränkte Wasserzufuhr auftretenden Trockenstress an Pappel und Buche. Beide Faktoren beschreiben prognostizierte Umweltveränderungen im Zuge des globalen Klimawandels. Die durchgeführten Versuche und Messungen beziehen sich dabei jeweils auf die Einflüsse beider einzelner Faktoren und auf einem möglichen Effekt, sobald CO₂ und Trockenstress zusammen wirken.

Die Versuche wurden an jungen Pappeln und Buchen durchgeführt, die von April/Mai bis September in Klimakammern im Gewächshaus unter kontrollierten Bedingungen wachsen konnten. Die bedeutendsten Ergebnisse aus 2 Versuchsjahren werden im Folgenden zusammengefasst und im Bezug zur aktuellen Literatur diskutiert.

4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Um den Einfluss der Versuchsbedingungen auf die Pflanzen übergreifend und schlüssig beschreiben zu können, sind nachfolgend alle relevanten Ergebnisse beider Versuchsjahre aufgelistet. Der Verweis auf nicht signifikante Messergebnisse soll zeigen, dass trotz fehlender statistischer Verifizierung ein Trend zu beobachten ist, der einen Hinweis auf ein mögliches Ergebnis geben kann.

Nicht signifikante Messwerte, die auch keinen Verlaufstrend beschreiben können, werden hier nicht erneut beschrieben.

Tab.4.1: Zusammenfassung der Ergebnisse zum Phänotyp, nach Versuchsreihen und Versuchsbedingungen getrennt; sign. = signifikant; HT = Haupttrieb, ST = Seitentrieb; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 770 ppm (2010), 950 ppm (2011)

Versuchsreihe		1) erhöhter CO ₂ - Gehalt	2) Trockenstress	1) + 2)	Kapitel
Phänotypisierung	Pappel	keine relevante Signifikanz	reduziert Baumhöhe, Blattgewicht, Blattanzahl, Stamm- und Wurzelgewicht, Höhenumfang der Wurzelballen, HT stärker betroffen als ST	durch 1) verminderte Wirkung von 2) nicht sign.; Größe, Wurzel- und Stammgewicht vermindert reduziert	3.1, 3.2
	Buche	keine relevante Signifikanz	keine relevante Signifikanz	keine relevante Signifikanz	3.2.2
Blattflächen	Pappel	kein Einfluss	reduziert Blattflächen um mehr als die Hälfte	kein Effekt	3.4.3
	Buchen	kein Einfluss	Reduktion der Blattfläche	durch 1) verminderte Wirkung von 2) nicht sign.	3.4.3
Blattseneszenz	Pappel			erhöhte Blattseneszenz saisonal nicht sign.	3.4.4

Wie sich für alle erhobenen Daten zur Ernte der Pappeln und Buchen in beiden Versuchsjahren zeigt, hat der erhöhte CO₂- Gehalt der Luft allein keinen signifikanten Einfluss. Der vielfach beschriebene Einfluss des CO₂ auf ein vermehrtes Wachstum und eine beschleunigte Entwicklung durch Anregung der Spitzenmeristeme (TAYLOR *et al.*, 2003) kann im Phänotyp der Pappeln und Buchen nicht gezeigt werden.

Der gesetzte Trockenstress hingegen wirkt sich in allen Bereichen der Massenbestimmung aus. Die Biomassen, Frisch- und Trockengewichte sowie die Blattflächen sind stark reduziert.

Zusätzlich kann gesagt werden, dass sich diese Reduktion der Biomassen stärker auf die Haupt- als auf die Seitentriebe auswirkte. Der Einfluss der Versuchsbedingungen auf den Phänotyp wirkt jedoch unabhängig von der Beschneidung der Bäume (s. Abb. 4.1). So sind 2010 und 2011 durch die unterschiedlichen Versuchsabläufe zwar keine Massenangaben und Messwerte direkt zu vergleichen, die Aussagen zum Einfluss der Versuchsgrößen hingegen schon.

Die Phänotypisierung der Buchen zum Ende der Saison 2011 zeigt kein homogenes Ergebnis. Die Pflanzen waren von Beginn der Saison und im Verlauf, bis zum Ende innerhalb ihrer Variationen sehr unterschiedlich. Dadurch ergaben sich in fast allen Messungen sehr große Standardabweichungen, die z.T. auch keine Aussagen über einen möglichen Trend zulassen.

Anhand der Auswertung zur Vermessung der Wurzelballen der Pappeln 2010, ist signifikant zu beschreiben, wie die Klimabedingungen auf die Pflanzen eingewirkt haben. Der Einfluss des erhöhten CO₂ könnte im Feinwurzelwachstum zu beschreiben sein. Dass unter Trockenstress das Feinwurzelwachstum angeregt wird, ist bekannt (BIBIKOVA, GILROY, 2003).

Das optisch dichter wirkende Wurzelwerk durch verstärktes Feinwurzelnwachstum konnte jedoch nicht vermessen und statistisch nicht ausgewertet werden. Der erhöhte CO_2 - Gehalt allein konnte somit für Pappel- und Buchenwurzeln nicht als Einflussgröße beschrieben werden.

Der gesetzte Trockenstress hingegen verursacht bei den Pappelwurzeln eine deutlich reduzierte Biomasse. Diese Reduktion wird durch zusätzlich erhöhtes CO_2 der Luft hingegen aufgehoben. Dieser hemmende Effekt des CO_2 auf zusätzlich wirkenden Trockenstress konnte vielfach gezeigt und statistisch bestätigt werden.

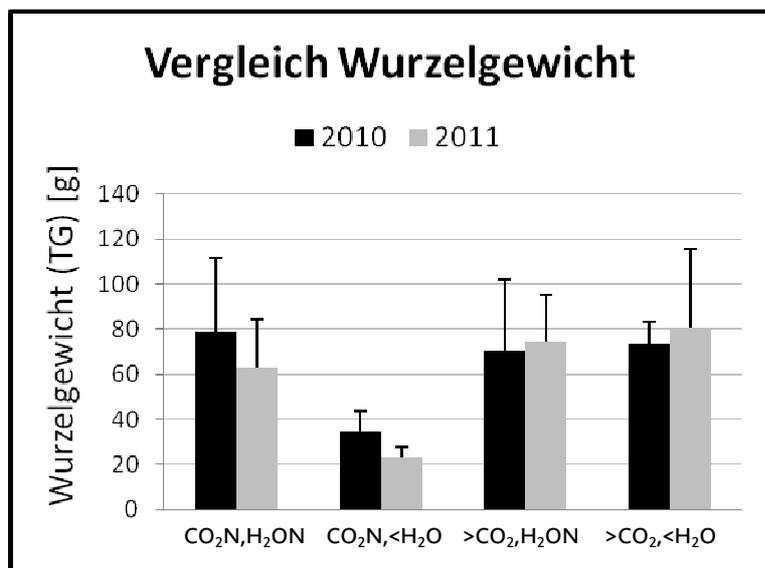


Abb.4.1: Graphische Darstellung der Wurzelgewichte (Trockengewicht, TG) von *P. canadensis* 2010 und 2011 im Vergleich, n = 6; normaler CO_2 -Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO_2 -Gehalt = 770 ppm (2010), 950 ppm (2011).

Wie beispielhaft in der graphischen Darstellung gezeigt wird, kann trotz starker Standardabweichungen ein Trend gezeigt werden. Eine eingeschränkte Wasserzufuhr reduziert die Biomasse, zusätzlich wirkendes CO_2 hemmt diese Reduktion. Dieser Effekt beschreibt sich für den Phänotyp der Pflanzen, sowie für die Holzanatomie und die Blattmorphologie (s. Tab 4.4; 4.5).

Die Interaktionen zwischen Wurzeln und Boden zeigen sich nicht nur im Bezug auf mikrobiologische Diversität, sondern auch in der Elementaranalyse. Das über die Blätter aufgenommene Kohlendioxid findet sich als Kohlenstoff im Boden wieder (STRAND *et al.*, 2008). Dabei konnte bereits gezeigt werden, dass der im Boden aufgenommene Kohlenstoff primär durch Pilze umgesetzt wird und deren Produkte im Anschluss durch Bakterien. Eine Erhöhung des CO_2 der Luft verändert auch die Artenzusammensetzung der Mikrobiologie im Bereich der Wurzeln. (DRIGO *et al.*, 2007, 2010). Vermehrtes Bakterien- und Pilzwachstum und die Entwicklung der Mikrofauna durch Ausbreitung des Wurzelsystems durch veränderte Klimabedingungen hat somit Einfluss auf das gesamte Ökosystem des Bodens.

Diese ökologischen Interaktionen sind in Versuchen im Gewächshaus nicht realistisch umzusetzen. Sie spielen in der Gesamtbetrachtung jedoch eine wichtige Rolle. Wie in Tab. 4.7 gezeigt wird, haben Elementaranalysen zum Kohlen- und Stickstoffgehalt der Wurzeln kein eindeutiges Ergebnis zeigen können. Dadurch sind Rückschlüsse auf eventuelle Veränderungen der Mikrobiologie nicht zulässig.

Um eine Aussage darüber treffen zu können, ob ein veränderter Kohlendioxidgehalt der Luft einen Einfluss auf die Blattseneszenz bei Bäumen unter Trockenstress hat, wurde das abgeworfene Blattmaterial beider Trockenstress- Variationen getrocknet und das Gewicht bestimmt. Anhand dessen, dass auch Blätter abgeworfen wurden, welche im Vergleich zu funktionellen Source- Blättern derselben Pflanze keinen Unterschied im Chlorophyllgehalt aufweisen (überprüft mit Chlorophyllmeter, s. Kapitel 3.4.4), ist erkenntlich, dass ein Abbau des Chlorophyll nicht die Ursache für eine Seneszenz gewesen sein kann. Ein Einfluss des erhöhten CO₂ der Luft konnte jedoch auch nicht bestätigt werden.

Der Trockenstress der Bäume führt dazu, dass das wenige zur Verfügung stehende Wasser für die Photosynthese zur Versorgung aller Zellen im ganzen Baum ausreichen muss. Die Blattflächen passen sich an, indem sie sich verkleinern und weniger Transpiration zur Kühlung der Blattoberflächen nötig ist. Saisonale Blattseneszenz ist genetisch vorbestimmt und abhängig vom Energiegehalt der Pflanze. Diese steuert licht- und temperaturabhängig über Phytohormone die Abszission der Blattorgane (ADDICOTT, 1970). Beobachtungen zur Blattseneszenz erfordern eine zeitnahe Betrachtung der Chlorophyll-Degradation in den Blättern der Pflanze. Die verkürzten Tage und die somit verringerte Lichtzufuhr ist Hauptfaktor für die Initiation der Seneszenz der Blätter zum Ende der Wachstumsperiode. Dies bestätigten genaue Bestimmung der Zeitpunkte für das Einsetzen der Blattseneszenz durch KESKITALO *et al.* (2005). Es gibt Hinweise darauf, dass der Abbau des Chlorophyll (Abtransport von Nahrungs- und Speicherstoffen) im saisonalen Verlauf zeitnah zur Abszission der Blätter verläuft (BLACK *et al.*, 2001). Die fallenden Temperaturen beschleunigen den Vorgang (FRACHEBOUD *et al.*, 2009). Eine verfrühte Blattseneszenz verkürzt den Kohlenstoffumsatz der Pflanze, das Wachstum der laufenden Saison wird limitiert. Tritt sie verspätet auf, verursachen Frostschäden einen Verlust an Nähr- und Speicherstoffen, welcher sich in der kommenden Saison negativ auf das Wachstum auswirkt (NÄSHOLM *et al.*, 1998). Auch weist das Verblassen der Blattfarbe auf die Rückgewinnung organischer Bestandteile hin, in der Magnesium, Kalium, Phosphor und Stickstoff aus dem Blatt abtransportiert und werden (ESCHRICH *et al.*, 1988) und im Spross gespeichert werden, wo sie im Frühjahr für den Austrieb neuer Blätter remobilisiert werden können (BLACK *et al.*, 2001). Der selektive Transport von Elementen verbraucht Energie, dessen Einsatz ebenfalls ökonomisch angepasst sein muss.

Das optimale Einsetzen der Blattseneszenz bedingt somit eine Anpassung an die Umweltbedingungen. Pflanzen mit eingeschränkter Wasserzufuhr müssen demnach ihren Speicherstofftransport unabhängig von der Lichtzufuhr individuell regulieren. Oxydativer Stress, der durch limitierte Lichtzufuhr und dem Abtransport der Speicherstoffe aus den Blättern verursacht wird, verstärkt die Prozesse.

An jungen Pappeln der Art *P. deltoides* wurden ebenfalls Langzeitversuche zum erhöhten Kohlendioxidgehalt in Kombination mit Trockenstress durchgeführt. 2010 konnte gesagt werden, dass der Blattverlust unter erhöhtem CO₂ und Trockenstress erhöht ist, im Bezug zur prozentualen Blattfläche jedoch kein Unterschied zu den Kontrollen festgestellt wurde (BOBICH *et al.*, 2010). Dies konnte in den vorliegenden Ergebnissen nicht direkt bestätigt werden.

Tab.4.2: Zusammenfassung der Ergebnisse der Gaswechselformen, nach Versuchsreihen und Versuchsbedingungen getrennt; sign. = signifikant; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 770 ppm (2010), 950 ppm (2011).

Versuchsreihe		1) erhöhter CO ₂ - Gehalt	2) Trockenstress	1) + 2)	Kapitel
Netto- Photosynthese, CO₂- Aufnahme	Pappel	2010: erhöhte CO ₂ - Aufnahme; 2011: nicht durchgehend sign.	keine relevante Signifikanz	2010: reduzierte CO ₂ - Aufnahme im Vgl. zu 1); 2011: erhöhte CO ₂ - Aufnahme im Vgl. zu 1)	3.3.1.1, 3.4.1.1
	Buche	keine relevante Signifikanz	Reduktion der CO ₂ - Aufnahme nicht sign.	2011: erhöhte CO ₂ - Aufnahme im Vgl. zu 1) nicht sign.	3.4.1.2
Transpiration	Pappel	keine relevante Signifikanz	2010: keine relevante Signifikanz; 2011: verminderte Transpiration (Sink, Source)	keine relevante Signifikanz	3.3.1.1, 3.4.1.1
	Buche	2011: vermindert Transpiration	kein Einfluss	keine relevante Signifikanz	3.4.1.2
stomatäre Leitfähigkeit	Pappel	keine relevante Signifikanz	verminderte st. Leitfähigkeit (Sink, Source)	keine relevante Signifikanz	3.4.1.1
	Buche	vermindert st. Leitfähigkeit (Sink, Source)			3.4.1.2
Interner CO₂- Gehalt	Pappel	2011: erhöht intrazellulären CO ₂ - Gehalt (Sink, Source)	kein Einfluss	2) vermindert erhöhter CO ₂ - Gehalt nicht sign.	3.4.1.1
	Buche	2011: erhöht intrazellulären CO ₂ - Gehalt (Sink, Source)	kein Einfluss	kein Effekt	3.4.1.2

Die Nettophotosyntheserate einer Pflanze beschreibt die um ihre eigene Dissimilation verminderte Assimilationsleistung. Dabei wird die Menge an organischer Substanz berechnet, die nach Abzug des Eigenverbrauchs für die Atmung zum Aufbau der Pflanze übrig bleibt. Diese Berechnung geschieht über die CO₂- Aufnahme des Messblattes (s. 2.2.1.2) und beschreibt lediglich den Netto- CO₂- Austausch der Pflanze und ihrer Umgebungsluft. Da für keiner der beiden Versuchsjahre durch Blattverlust, Insektenbefall und Beschneidung der Bäume genau beschrieben werden kann, wie viel Kohlenstoff aufgenommen und umgesetzt wurde, gibt es keinen Anspruch auf Vollständigkeit, bezogen auf die Gesamt- Assimilation.

Die Diffusion des Kohlendioxids aus der Luft in den Chloroplasten ist durch eine Vielzahl von Widerständen behindert. Der Übergang aus der gasförmigen in die flüssige Phase beschreibt den Weg durch die Interzellularen, die Zellwände und das Plasmalemma, die Chloroplasten(doppel)membran, das Cytosol und das Stroma. Die Leitfähigkeit des Mesophyll (g_m) beschreibt die Leitfähigkeit des CO_2 in den Interzellularen und wird berechnet aus Netto- Photosyntheserate (A), der interzellulären CO_2 -Konzentration C_i und der CO_2 -Konzentration in den Chloroplasten C_c . g_m gilt als limitierender Faktor der CO_2 - Diffusion. Dieser ist u.a. messbar mittels J- Methode. FLEXAS *et.al.* (2007) konnte damit zeigen, dass ein erhöhter CO_2 - Gehalt die Leitfähigkeit im Mesophyll herabsetzt. Diese Ergebnisse variieren jedoch mit der Methode.

In der vorliegenden Arbeit hätte mit dieser Methode nicht gearbeitet werden können, da sie in den Berechnungen Umweltfaktoren, die einen Einfluss auf die Photorespiration haben (z.B. Trockenstress, Frost), nicht berücksichtigen kann. Weiterhin wurde von derartigen Berechnungen Abstand genommen, da für fast alle Berechnungsmodelle von einem gleichmäßigen *Steady- State* z.B. der Blätter ausgegangen werden muss. Sobald nicht sicher ist, alle Stomata eines Blattes über die gesamte Fläche im gleichen Zustand sind, erhöht sich die Fehlerquote der Berechnungen (PONS *et al.*, 2009). Es ist bekannt, dass bei Buchen die Empfindlichkeit der Stomata unter erhöhtem CO_2 abnimmt (HEATH, 1998). Es ist nicht nachzuweisen, ob dieser Einfluss für alle Blätter des gesamten Baumes in gleichem Maß zutrifft. Somit können die gezeigten Ergebnisse der Gaswechsellmessungen lediglich Hinweise auf den Einfluss der Versuchsbedingungen geben. Die Verteilung der Öffnungsweiten der Stomata kann statistisch für eine Pflanzenart an einem Standort vorhergesagt werden. Abweichungen von den in diese Berechnungen eingehenden Werten (z.B. durch Insekten- oder Pilzbefall) müssen vernachlässigt werden. Somit weisen derartige Berechnungen auch nur auf mögliche Verlaufstrends hin, ohne einen Anspruch auf Vollständigkeit im natürlichen System.

Die Daten zur Netto- Photosynthese zeigen, dass die CO_2 - Aufnahme unter erhöhtem Kohlendioxidgehalt der Luft auch erhöht ist. Dies kann 2011 nicht signifikant über den gesamten saisonalen Verlauf beschrieben werden, ist im Trend aber deutlich. Der gesetzte Trockenstress hat lediglich bei den Buchen auch zu einer Reduktion der Aufnahme geführt, bei den Pappeln zeigte sich keine relevante Signifikanz. Auch zeigt die Kombination aus CO_2 und Trockenstress in beiden Jahren kein einheitliches Ergebnis. Im Trend ist jedoch zu erkennen, dass die Kombination beider Klimafaktoren die CO_2 - Aufnahme ebenfalls erhöht.

Der saisonale Verlauf der Transpiration ist bei Pappel und Buche ebenfalls nicht einheitlich gewesen. So zeigt der erhöhte CO_2 - Gehalt der Luft eine Reduktion der Transpiration bei den Buchen, bei Pappel hingegen nicht. Die Pappeln reduzieren ihre Transpiration aber unter Trockenstress. Dies war bei den Buchen so nicht zu beschreiben (Vgl. Korrelation zur Blattmorphologie, Tab. 4.5).

Beide Baumarten zeigen keinen Effekt des CO_2 in Kombination zum Trockenstress. Diese Ergebnisse werden 2011 durch die Messungen der stomatären Leitfähigkeit (g_s) bestätigt. Die Messung des intrazellulären CO_2 - Gehaltes der Blätter (C_i) 2011 zeigen erwartungsgemäß einen höheren Gehalt, sobald die Versuchspflanzen einem erhöhten CO_2 - Gehalt der Luft unterliegen. Der gesetzte Trockenstress wirkt sich nicht signifikant auf die Daten aus.

Dass die Beschneidung der Bäume einen Einfluss auf den Gaswechsel haben kann, wird aufgrund der Datensätze zur Transpiration vermutet werden. Die absoluten Werte der Transpiration liegen 2010 (beschnittene Pappeln) zwischen 1- 0,2 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Die Werte der unbeschnittenen Bäume 2011 liegen zwischen 6- 0,8 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (Source). Die absoluten Werte der CO_2 - Aufnahme rate hingegen sind ähnlich (2010: 18,8- 5,5 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$; 2011: 17,9- 4,3 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$).

Da keine Daten zur Spaltöffnungsichte (Anzahl der Stomata/ cm^2) vorliegen, kann nicht beschrieben werden, ob die Ergebnisse dahingehend im Zusammenhang stehen.

Tab.4.3: Zusammenfassung der Ergebnisse der Dendrometer- Datenerfassung, nach Versuchsbedingungen getrennt; sign. = signifikant; normaler CO_2 - Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO_2 - Gehalt = 770 ppm (2010), 950 ppm (2011)

Versuchsreihe		1) erhöhter CO_2 - Gehalt	2) Trockenstress	1) + 2)	Kapitel
Dendrometer, Stammdurchmesser	Pappel	2011: größere Standard-abweichungen	2010: Wasserzufuhr hat keinen Einfluss auf Steigungsraten, 2011: Wasserzufuhr verursacht Schwankungen der Steigungsraten	2010: verstärkte Zunahme; Wasserzufuhr 6h später registriert; 2011: verstärkte Zunahme erst ab Juli, weniger starke Reaktion auf Wasserzufuhr (ca. 12h später registriert)	3.3.2, 3.3.3, 3.4.4, 3.4.5

Im Versuchsjahr 2010 wurden die Sensoren über den Erntezeitpunkt hinaus bis November am Baum belassen. So konnte graphisch dargestellt werden, dass der Wasserhaushalt der Pflanze einen erheblichen Einfluss auf die Werteentwicklung des Stammdurchmessers hat. Der Abfall der Steigungswerte zum Ende der Saison bedingt sich durch die Abnahme der Blattflächen durch natürliche Blattseneszenz und des dadurch reduzierten Transpirationssogs. Im Stamm wird weniger Wasser aufgenommen, der Stammdurchmesser reduziert sich.

Durch die Messungen des Stammdurchmessers können Vermutungen hinsichtlich der Wasseraufnahme gemacht werden. Diese wurden jedoch nicht durch direkte Messungen des Wasserpotentials in Stamm und Blättern bestätigt.

Das mehr Blattmaterial unter Trockenstress auch gleichzeitig immer eine erhöhte Transpiration bedeutet, wird hier widerlegt: die Stomata können durch mehr CO_2 - Aufnahme in kürzerer Zeit länger am Tag geschlossen bleiben, die Transpiration ist signifikant reduziert (s. Tab. 4.2). So verzögert sich die Wasseraufnahme im Spross um mehrere Stunden.

In Abhängigkeit von der Blattfläche zeigt sich im Stammdurchmesser hier ein Einfluss durch die Beschneidung der Bäume. Es wird vermutet, dass die Haupttriebe 2010 ohne Seitenäste dem Transpirationssog weniger unterlegen waren, als die Bäume 2011. Das bedeutet: 2011 mehr Äste = mehr Blätter = erhöhte Transpiration, die verstärkt reduziert werden muss = verspätete Wasseraufnahme am Abend.

Es kann jedoch nicht nachgewiesen werden, ob diese verstärkt reduzierte Transpiration 2011 an dem nochmals erhöhten CO_2 - Gehalt von 770 ppm auf 950 ppm (18,9 % mehr) lag. Die Wahrscheinlichkeit ist aber gegeben, dass beide Faktoren, die Beschneidung und die zusätzliche Erhöhung, zusammen wirken.

2011 reagierte der Sensor des Dendrometers unter erhöhtem CO_2 ca. 12h später auf die Wasserzufuhr am Morgen (6h später als beim beschnittenen Vergleichsbaum im Jahr 2010). 2010 konnten die beschnittenen Bäume bereits zum frühen Abend ihre Transpiration wieder erhöhen und das Wasser aufnehmen.

Die fehlende Beschneidung der Bäume ist ebenfalls eine mögliche Begründung, warum der Versuchsbaum 2011 bei normalem CO_2 - Gehalt der Luft ($\text{CO}_2\text{N}, < \text{H}_2\text{O}$) mit starken Schwankungen auf eine Wasserzufuhr reagierte. Die vermehrt geöffneten Stomata sorgten für einen starken Transpirationssog und einem zeitnahem plötzlichen Anstieg im Stammdurchmesser. Da hier keine zeitversetzte Wasseraufnahme registriert wurde, bestätigt dies die Annahme, dass der erhöhte CO_2 - Gehalt und die dadurch reduzierte Transpiration generell die Ursache für eine späte Wasseraufnahme am Abend war.

Tab.4.4: Zusammenfassung der Ergebnisse der Holzanatomie, nach Versuchsreihen und Versuchsbedingungen getrennt; sign. = signifikant; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 770 ppm (2010), 950 ppm (2011)

Versuchsreihe		1) erhöhter CO ₂ - Gehalt	2) Trockenstress	1) + 2)	Kapitel
Jahrringbreiten, Holzzuwachs	Pappel	1. Abschnitt 2010: reduzierter Holzzuwachs; 2. Abschnitt 2010 und 2011 kein Einfluss	1. und 2. Abschnitt 2010: verminderter Holzzuwachs; 2. und 3. Abschnitt 2011: verminderter Holzzuwachs	1. Abschnitt 2010: 1) mindert den Einfluss von 2); 3. Abschnitt 2011: 1) mindert den Einfluss von 2)	3.5.1, 3.6.1
	Buche	keine relevante Signifikanz	keine relevante Signifikanz	keine relevante Signifikanz	
Markdurchmesser	Pappel	kein Einfluss	kein Einfluss	kein Einfluss	3.5.1, 3.6.1
	Buche	keine relevante Signifikanz	keine relevante Signifikanz	keine relevante Signifikanz	
Gefäßanzahl	Pappel	2010: kein Einfluss; 2011: vermindert Gefäßanzahl	erhöht Gefäßanzahl	vermindert erhöhte Gefäßanzahl	3.5.2, 3.6.2
Gefäßgrößen	Pappel	2010: erhöht Gefäßgröße; 2011 kein Einfluss	reduziert Gefäßgröße	2010: 1) hemmt Einfluss von 2), Größen ähnlich denen der Kontrollvariation (bei geringerer Jahrringbreite); 2011: 1) hemmt 2) nicht sign.	3.5.2, 3.6.2
Gefäßform	Pappel	kein Einfluss	Gefäße werden rundlicher	1) hemmt Effekt von 2) nicht sign.	3.5.2, 3.6.2
Rohdichte		kein Einfluss	2010: verringert Rohdichte nicht sign.; 2011: erhöht Rohdichte	1) hemmt 2) nicht sign.; 2011: Rohdichte stark reduziert	3.5.3, 3.6.3

Der saisonale Zuwachs wurde in beiden Versuchsjahren an 2 Bereichen des Hauptstross untersucht (Abb. 4.2), somit können für beide Jahre eine Aussage für zwei unterschiedlich junge Holzbereiche getroffen werden.

Im ersten Abschnitt, 5 cm über dem Erdboden (3 vorhandene Jahrringe), konnte 2010 kein Zuwachsverstärkender Einfluss des CO₂ analysiert werden. Dieser Bereich stammt von beschnittenen Pappeln und beschreibt entgegen der Erwartung eine leichte Reduktion der Jahrringbreite unter erhöhtem CO₂. In den Folgeabschnitten 2 und 3 (Haupttrieb 2010/2011, nur der saisonale Zuwachs der jeweiligen Saison, keine Jahrringe), konnte kein Einfluss beschrieben werden.

Das ein erhöhter CO₂-Gehalt der Luft als Kohlenstoffquelle wirkt und dadurch immer ein vermehrtes Holzwachstum verursacht, wird nicht mehr unabhängig vom Versuchsablauf bestätigt (KÖRNER *et al.*, 2005; KÖRNER, 2006). Dies konnte in beiden Versuchsjahren 2010 und 2011 ebenfalls gezeigt werden.

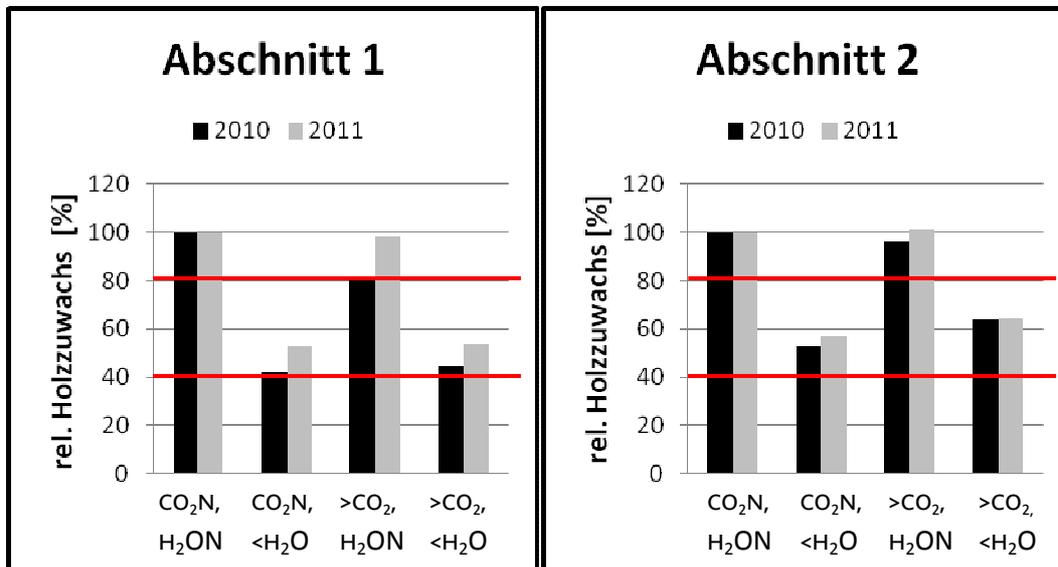


Abb.4.2: Graphische Darstellung des relativen Holzzuwachs [%] von *P.canescens* 2010 und 2011 im Vergleich; Kontrollvariation = 100%; Abschnitt 1 = 5 cm über Erdboden (3 Jahrringe vorhanden), Abschnitt 2 = 5 cm im Bereich des HT der jeweiligen Saison (1 Jahrring vorhanden); normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 770 ppm (2010), 950 ppm (2011).

In dieser Gegenüberstellung sieht man deutlich, dass der gesetzte Trockenstress erwartungsgemäß in beiden Jahren und in allen Abschnitten des Baumes ähnlich großen Einfluss hatte. Dies zeigt sich für den Einfluss des CO₂ nicht.

2010 zeigen die unbeschnittenen Bäume im 2. Abschnitt eine stärkere Reaktion als im 1. Abschnitt. Der Holzzuwachs nimmt im jüngeren Sprossbereich unter erhöhtem CO₂ mehr zu, als im älteren. Dieser Einfluss zeigt sich 2011 an den unbeschnittenen Bäumen nicht.

Des Weiteren ist der Effekt des CO₂ in Kombination zum Trockenstress (>CO₂, <H₂O) im jüngeren Holzabschnitt beider Jahre stärker. Die Ursache dafür, dass die Messwerte für 2011 größer sind als 2010, liegt in der Beschneidung der Bäume.

Dieser hemmende Einfluss des erhöhten Kohlendioxidgehaltes der Luft auf die Folgen einer eingeschränkten Wasserzufuhr zeigt sich in allen analysierten Bereichen der Holz Anatomie und bestätigt die Ergebnisse der Phänotypisierung (s. Tab 4.1).

Im Jahr 2010 zeigt die Versuchsvariation unter erhöhtem CO₂- Gehalt der Luft mit zusätzlich eingeschränkter Wasserzufuhr (>CO₂, <H₂O) sehr ähnlich große Gefäßgrößen, wie ihre Kontrollvariation (CO₂N, H₂ON). Die Anzahl der Gefäße unter Trockenstress ist hingegen erhöht. Bedenkt man die stark reduzierte Jahrringbreite bei Bäumen unter Trockenstress, ist es zu erklären, warum diese Varianten sich in ihrer Gefäßanzahl und auch der Form stark unterscheiden. Unter Trockenstress reduziert sich die Streckung der Zellen, sie werden rundlicher.

Die Rohdichte des Holzes erhöht sich durch die Ausbildung vieler kleiner Gefäße und der Reduktion der Hohlräume (= Erhöhung der Gefäßanzahl + Reduzierung der Größe). Dies ist 2011 durch den gesetzten Trockenstress signifikant genauso zu beschreiben gewesen. CO₂ allein hatte einen gegenläufigen Einfluss auf die Holzanatomie und in Kombination mit Trockenstress einen hemmenden Effekt.

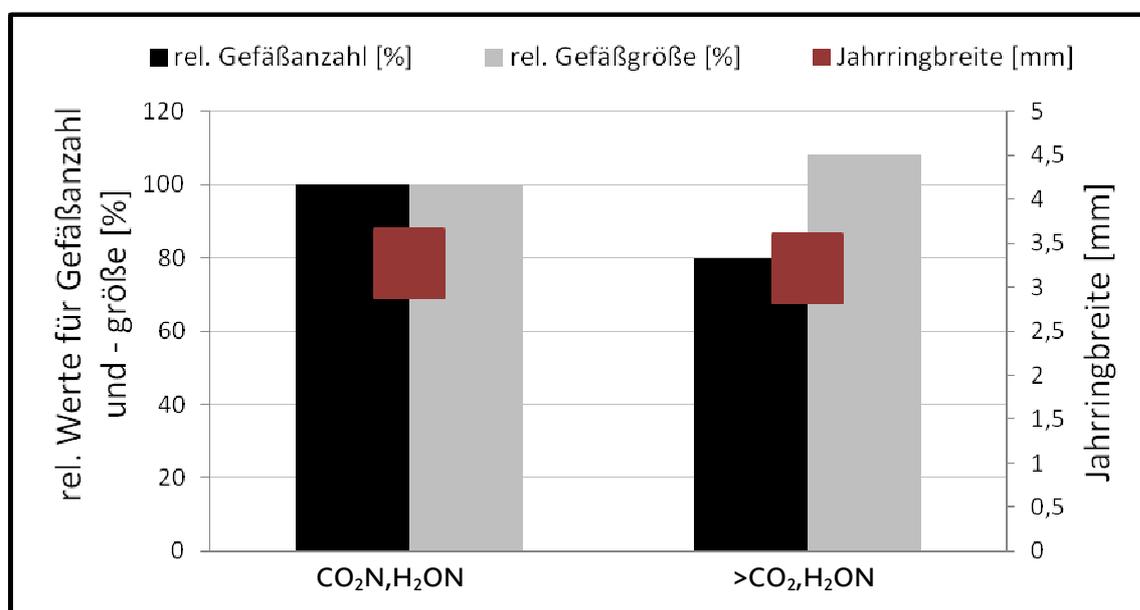


Abb.4.3: Graphische Darstellung der relativen Gefäßanzahl [%] im Vergleich mit der relativen Gefäßgröße [%], im Bezug zur Jahringbreite [mm] von *P.canescens* 2011; Kontrollvariation = 100%; Abschnitt 2 = 5 cm im Bereich des HT der jeweiligen Saison (1 Jahrring vorhanden); normaler CO₂-Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂-Gehalt = 950 ppm.

Diese zusammenfassende graphische Darstellung soll zeigen, dass bei vergleichbarer Jahringbreite (3,2- 3,3 mm) der erhöhte CO₂- Gehalt die Gefäßanzahl reduziert, die Gefäßgröße hingegen erhöht. In einem vergleichbaren Projekt konnte gezeigt werden, dass Pappeln (*P. deltoides*) unter erhöhtem CO₂ eine geringere Rohdichte des Holzes aufweisen, als ihre Kontrollen (BOBICH *et al.*, 2010). Dies wurde in dieser Arbeit für beide Versuchsjahre nicht signifikant bestätigt, obwohl die Holzanatomie diesem Trend entspricht (s. Abb. 4.3).

Dass im Jahr 2010 zuvor trotz verringerter Gefäßgrößen keine eindeutig erhöhte Rohdichte unter Trockenstress analysiert werden konnte, wird damit erklärt, dass 2010 auch kein Einfluss des CO₂ auf die Gefäßanzahl zu beschreiben war.

Tab.4.5: Zusammenfassung der Ergebnisse zur Blattmorphologie, nach Versuchsbedingungen getrennt; sign. = signifikant; PP = Palisadenparenchym, SP = Schwammparenchym; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 770 ppm (2010), 950 ppm (2011)

Versuchsreihe		1) erhöhter CO ₂ - Gehalt	2) Trockenstress	1) + 2)	Kapitel
Blattmorphologie	Pappel	Blattdicke und Breite PP nimmt zu	Blattdicke nimmt zu, Breite der Epidermis nimmt ab, Breite PP und SP nimmt zu	1) hemmt 2)	3.6.4
	Buche	Blattdicke, Breite der Epidermis, PP und SP nimmt zu	Blattdicke und Breite der Epidermis nimmt nicht sign. zu	1) hemmt 2)	3.7.2

Die Verdickung der vorhandenen Blattzellen unter Trockenstress ermöglicht eine vergleichsweise hohe Photosyntheserate bei reduzierter Blattfläche. Kohlendioxid bewirkt ebenfalls eine Vergrößerung der Zellen. Beide Effekte zusammen wirken in den Blattzellen jedoch nicht additiv.

Die direkte Ausmessung einzelner Zellen ermöglicht eine detaillierte Beschreibung, welche Zellgewebe im Blatt einen Einfluss der Versuchsbedingungen erfahren haben.

So wird zunächst deutlich, dass Pappeln und Buchen unterschiedlich reagieren: die Buchen zeigten eine Verbreiterung der Epidermis unter erhöhtem CO₂, die Pappeln hingegen nicht. Dafür hat der Trockenstress keine Wirkung auf die Parenchyme der Buchen, die Zellen vom Palisaden- und Schwammparenchym der Pappeln werden länger, die Gewebe verbreitern sich (Vgl. Tab. 4.2: CO₂ reduziert bei den Buchen die Transpiration, bei den Pappeln nicht; Trockenstress reduziert die Transpiration der Pappeln, bei den Buchen zeigte sich kein Einfluss). Somit korrelieren die Ergebnisse der gemessenen Transpiration mit den Messungen zu Blattmorphologie:

ein möglicher Einfluss der reduzierten Transpiration auf die Breite der Epidermis der Buchen unter erhöhtem CO₂, sowie eine Wirkung der reduzierten Transpiration durch Trockenstress auf das parenchymatische Blattgewebe bei Pappeln.

Die veränderte Gaszusammensetzung der Luft sorgt bei beiden Baumarten für eine Vergrößerung der Blattdicke und für ein vergrößertes Palisadenparenchym. Sowohl für Pappel, als auch für Buche gilt, dass der erhöhte CO₂- Gehalt der Luft sich hemmend auf die Folgen des Trockenstress auswirkt (Vgl. Phänotypisierung, Tab. 4.1; Holzanatomie, Tab. 4.4)

Eine Analyse der Menge an Chlorophyll (Gehalt/mg) und des prozentualen Gehaltes an Interzellularen im Blatt hätte eventuell weitere Aufschlüsse auf den Einfluss der Versuchsbedingungen geben können. Durch *in vivo*- Messungen des Chlorophyllgehaltes und der Chlorophyllfluoreszenz konnte gezeigt werden, dass der erhöhte CO₂- Gehalt keine Wirkung auf die Menge an Chlorophyll im Blatt und deren Photosyntheseleistung hat (Tab. 4.6).

Das die Blätter (Sink, Source; Pappel und Buche) unter erhöhtem CO₂ jedoch mehr intrazelluläres CO₂ besitzen, konnte mittels Gaswechselanalysen gezeigt werden (Tab. 4.2). Somit wäre zu vermuten, dass die Größe der Atemhöhle und der Interzellularen mit steigendem CO₂ der Luft ebenfalls steigt.

Tab.4.6: Zusammenfassung der Ergebnisse zur Chlorophyll- Physiologie, nach Versuchsreihen und Versuchsbedingungen getrennt; sign. = signifikant; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 770 ppm (2010), 950 ppm (2011)

Versuchsreihe		1) erhöhter CO ₂ - Gehalt	2) Trockenstress	1) + 2)	Kapitel
Chlorophyllgehalt, CC _i	Pappel	2010: keine relevante Signifikanz	2010: erhöht CC _i ; 2011 erhöhter CC _i saisonal nicht sign. (Sink, Source)	2010: verminderte Erhöhung des CC _i durch 2) nicht sign.	3.3.1.2, 3.4.1.3
	Buche	2011: verminderter CC _i saisonal nicht sign. (Sink, Source)	kein Einfluss	kein Effekt	3.4.1.4
Chlorophyllfluoreszenz	Pappel	Mai, Juli 2011: kein Einfluss; September: erhöhte Fluoreszenz	Mai 2011: geringe Fluoreszenz, bessere Nutzung der Lichtenergie; Juli 2011: gering erhöhte Fluoreszenz, September 2011: geringe Fluoreszenz, bessere Nutzung der Lichtenergie;	keine relevante Signifikanz	3.4.2

Die Messungen des Chlorophyllgehaltes 2011 an sich entwickelnden Blättern der Pappeln bestätigen den Verlauf der voll entwickelten Blätter der Saison. Die Versuchsbedingungen haben somit auf junge Sink- Blätter denselben Einfluss, wie auf ältere Source- Blätter. Dies kann aufgrund der Standardabweichungen für die Buchen nicht über die gesamte Saison relevant beschrieben werden.

Die Ergebnisse des CC_i der Buche bestätigt die Messungen der Blattdicke, wo gezeigt wurde, dass die Versuchsbedingungen keinen signifikanten Einfluss auf die chlorophyllhaltigen Parenchyme hatten, sondern nur auf die Epidermis. Eine Blattverdickung der Buchen durch erhöhtes CO₂ führte auch nicht zu einer Erhöhung des Chlorophyllgehaltes auf die vermessene Blattfläche.

Diese Erkenntnis verneint die Vermutung, dass eine Blattdicken- abhängige Messung fehlerhafte Gehalts- Werte zeigen könnte. Die Erhöhung des Chlorophyllgehaltes der Bäume unter Trockenstress ist demnach kein falsch- verrechneter Abhängigkeitswert aufgrund veränderter Blattdicke.

Ob dieser erhöhte Chlorophyllgehalt einen Mengenbezug hat oder ob gleiche Mengen auf weniger Raum im Blatt zusammenliegen, konnte nicht gezeigt werden.

Dies ist in der Frage nach Effektivität der vorhandenen Mengen aber auch zweitrangig. Die Messungen der Chlorophyllfluoreszenz zeigen, dass unter Trockenstress eine verbesserte Nutzung der Lichtenergie möglich ist. Die stomatäre Leitfähigkeit ist unter Trockenstress herabgesetzt (Sink, Source, Pappel und Buche, Tab. 4.2). Folglich können die Blätter unter Trockenstress das einfallende Licht, ohne zusätzlich CO₂ aufnehmen zu müssen, besser für die Photorespiration nutzen. Die Messungen für die Pflanzen unter veränderter Gaszusammensetzung bestätigen, dass erhöhtes CO₂ sich eher störend auf die Photosyntheseleistung wirkt.

Kürzlich konnte anhand genexpressiver Untersuchungen gezeigt werden, dass sich ein gesetzter Trockenstress auf die Entwicklung der Chloroplasten auswirkt. Die Chlorophyll- Biosynthese von 6-Tage jungen Reis- Keimlingen wurde unter Trockenstress erheblich gestört und beteiligte Enzyme in ihrer Expression inhibiert (DALAL, TRIPATHY, 2012). Eine gehemmte Biosynthese des Chlorophyll konnte in der vorliegenden Arbeit durch die *in vivo*- Messungen des Chlorophyllgehalt und der Chlorophyllfluoreszenz nicht bestätigt werden.

Untersuchungen zur Chlorophyllfluoreszenz bei der Kuhbohne (*Vigna unguiculata*) haben gezeigt, dass Trockenstress die Netto- Photosynthese und die Fluoreszenz linear zur Bodenfeuchte reduziert (SINGH, RAJA REDDY, 2011). Dass der Trockenstress sich bei den Pappeln nicht signifikant auf die Netto-Photosynthese auswirken konnte, wurde in Tab. 4.2 bereits gezeigt.

Diese Vergleiche zu *P. canescens* geben einen Hinweis darauf, dass die Trockentoleranz dieser Hybride für die durchgeführten Versuche ergebnisbeschreibend sein könnte.

Weiterhin zeigt sich, dass im Gegensatz zur Holzanatomie und Blattmorphologie, sich in der Physiologie kein signifikant hemmender Effekt des CO₂ auf die Folgen des Trockenstress zeigt.

Tab.4.7: Zusammenfassung der Ergebnisse der Pyrolyse, nach Versuchsbedingungen getrennt; sign. = signifikant; C = Kohlenstoff, N = Stickstoff; normaler CO₂- Gehalt = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt = 770 ppm (2010), 950 ppm (2011)

Versuchsreihe		1) erhöhter CO ₂ - Gehalt	2) Trockenstress	1) + 2)	Kapitel
C/N- Gehalt der Wurzeln	Pappel	2010: erhöht C- Gehalt; 2011: reduziert C- Gehalt; kein Einfluss auf N- Gehalt	2010: reduziert C- Gehalt; 2011: kein Einfluss; erhöht N- Gehalt	2010: 1) hemmt 2) (2011 nicht sign.); im N- Gehalt keine relevante Signifikanz	3.8
	Buche	keine relevante Signifikanz	keine relevante Signifikanz	reduzierter Stickstoffgehalt	3.8
C/N- Gehalt abzissierter Blätter unter Trockenstress	Pappel	reduziert Stickstoffgehalt			3.8

Die gegensätzlichen Messungen zum Kohlenstoffgehalt in den Wurzeln 2010 und 2011 lassen die Vermutung zu, dass die Beschneidung der Bäume essentiellen Einfluss auf den Nährstoffgehalt der Wurzeln hat. Dieses Verhältnis könnte sich für die Nährstoffspeicherung in oberirdischen Geweben umkehren. So wird erwartet, dass die unbeschnittenen Bäume 2011 einen erhöhten C- Gehalt im Holz zeigen. Chemische Analysen zu dieser Aussage sind in Planung und werden im Anschluss an diese Arbeit erfolgen.

Es ist bekannt, dass Pflanzen unter erhöhtem CO₂ geringere Stickstoffkonzentrationen in verschiedenen Geweben aufweisen. Dies bedingt ein größeres C/N- Verhältnis. Für die Blattproben kann dies auch signifikant bestätigt werden, in den Wurzeln der Pappeln und Buchen hingegen nicht. Allerdings zeigt sich bei den Buchen eine Reduzierung, sobald der erhöhte CO₂- Gehalt in Kombination mit Trockenstress wirkt. Diese Reduzierung ist bei den Pappeln im Trend auch zu beschreiben, in den Messwerten jedoch nicht signifikant.

Diese Messungen der Elemente in Wurzeln und abzissierten Blättern könnten einen Hinweis auf mögliche Folgen für die Nährstoffzusammensetzung im Boden geben. Diese Zusammensetzung bedingt folglich die mikrobiologische (Arten-) Zusammensetzung und hat einen Einfluss auf die Mikrofauna im Wurzelbereich des Baumes. Wie bereits im Zusammenhang zur Phänotypisierung erläutert, sind diese Voraussagen zur Bodenökologie für Gewächshausversuche nur schwer zu realisieren.

4.2 Zielsetzung der Arbeit

Der künstlich gesetzte Trockenstress bei Pappel und Buche war so organisiert, dass er zu keiner Zeit lebensbedrohlich für die Pflanze wurde. Mit diesem konstanten Wassermangel sollte eine physiologische Reaktion provoziert werden, deren Ablauf und Resultate bereits bekannt sind.

Vor diesem bekannten Hintergrund wurde nun die Kombination aus Trockenstress und erhöhtem CO₂ als doppelte Umweltbelastung gesetzt, um einen möglichen Effekt des Kohlendioxids auf die Einflüsse des Wassermangels zu untersuchen.

Folgenden Fragestellungen wurde nachgegangen:

4.2.1 Welche Einflüsse beschreiben sich für die veränderten Klimabedingungen auf makroskopischer und mikroskopischer Ebene?

Die makroskopische Betrachtung der Versuchspflanzen beider Jahre zeigt, dass ein erhöhter CO₂-Gehalt der Luft allein keine Auswirkungen auf den Phänotyp hatte. Es konnten keine relevanten Einflüsse auf die Baumhöhen, Blattflächen, Wurzelformen und -größen und auf die Trocken- und Frischgewichte beschrieben werden.

Die lichtmikroskopische Auswertung der Proben bestätigt dies (mit Ausnahme der Gefäßgrößen 2010) für die Holzanatomie. Die Blattmorphologie hingegen wird von der veränderten Gaszusammensetzung der Luft unmittelbar beeinflusst. So verdicken sich die Blätter bei Pappel und Buche, mit unterschiedlichem Einfluss auf die Gewebetypen.

Die eingeschränkte Wasserzufuhr zeigt in allen genannten analysierten Bereichen der Makro- und Mikroskopie bei Pappel und Buche signifikante Einflüsse in Form von Massereduktionen.

Die Kombination aus erhöhtem CO₂ und Trockenstress zeigt in fast allen Bereichen einen hemmenden Effekt des Kohlendioxids auf die Folgen des Trockenstress. Die Massereduktionen sind im Bezug zur Kontrollvariation CO₂N,_<H₂O weniger stark ausgeprägt.

Die Versuche bezogen auf die Gaszusammensetzung der Luft sind im 2. Versuchsjahr modifiziert worden. Im Jahr 2010 ist eine doppelte CO₂-Konzentration im Bezug zur derzeitigen Normalkonzentration gewählt worden. (2010 = 388 ppm; Quelle:

<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>), die für technische Vorgaben der Klimakammer auf 385 abgerundet wurde. Demnach beträgt der doppelte Wert 770 ppm, der als Sollwert für die Begasung eingestellt werden konnte.

Im Folgejahr 2011 wurde nochmals eine Erhöhung dieser Gaszusammensetzung angestrebt und die technisch mögliche Höchstgrenze der Klimakammern genutzt, um einen Sollwert von 950 ppm zu erreichen (+ 18,9 %).

Dieser Wert entspricht dem ungefähr 2,5fachen des derzeit normalen CO₂-Gehaltes der Luft. Ob diese Modifizierung einen Einfluss auf die Versuchspflanzen hatte, kann jedoch nicht eindeutig bestimmt werden, da die Pappeln im Jahr 2011 nicht beschnitten worden sind und ein direkter Wertevergleich zum Vorjahr nicht möglich ist. (s. 4.2.5).

4.2.2 Hat ein erhöhter Kohlendioxidgehalt der Luft einen signifikanten Einfluss auf die Folgen einer eingeschränkten Wasserzufuhr?

Ein hemmender Effekt des CO₂ auf die Folgen des Trockenstress konnte im Phänotyp der Pappeln gezeigt werden. Im Trend auch in den Untersuchungen zur Blattseneszenz, wo erhöhtes CO₂ einen verstärkten Blattverlust verursachte.

Die Netto- Photosyntheserate bei Pappel und Buche wurde in der Kombination beider Klimaeinflüsse verändert (2010 leicht erhöht, 2011 leicht reduziert). Auch zeigte sich ein Trend zum verminderten intrazellulären CO₂- Gehalt, der jedoch statistisch nicht verifiziert werden konnte.

Am deutlichsten zeigt sich der Effekt jedoch in den Auswertungen zur Holzanatomie. Der durch Trockenstress verursachte Massenverlust konnte durch das erhöhte CO₂ gehemmt werden (s. Abb. 4.2). Im umgekehrten Verhältnis kam es unter Trockenstress zu Verdickungen der Zellen im Blattgewebe. Diese Verdickungen wurden durch zusätzliches Kohlendioxid ebenfalls signifikant gehemmt.

In den Auswertungen zur Pyrolyse zeigte sich auch, dass beide Klimaeinflüsse in der Buche den Stickstoffgehalt der Wurzeln reduzierten. Der Trend zur Hemmung des Trockenstress konnte im C/N-Verhältnis auch für die Wurzeln der Pappeln beschrieben werden.

Hingegen zeigen die Daten zur Chlorophyll- Physiologie keinen Effekt des erhöhten CO₂ auf eine eingeschränkte Wasserzufuhr. Dort konnten weder im Gehalt, noch in der Fluoreszenz deutliche Signifikanzen berechnet werden.

Die Frage, ob eine Hemmung der Folgen des Trockenstress für den Baum positiv oder negativ ausfallen, kann nur vermutet werden. Dass ein erhöhter CO₂- Gehalt der Luft als Störfaktor für die Photosynthese zu beschreiben ist, wurde mittels Chlorophyllfluoreszenz nachgewiesen. Anatomische und morphologische Anpassungen an gegebene Umweltbedingungen sind nicht zwingend reversibel, jedoch zeigte sich 2011 nach Beendigung des Trockenstress im September, dass sich die Holzgefäße wieder normaler Größe und Form ausbilden. Diese Anpassungen an sich ändernde Verhältnisse der Bodenfeuchte funktionieren jedoch nur, solange die Stomata unmittelbar auf Änderungen eingehen und durch Öffnung der Schließzellen einen Transpirationssog ermöglichen können. Diese Anpassung der Öffnungszustände an einen Wassermangel könnte durch eine veränderte Gaszusammensetzung der Luft jedoch gestört werden.

Langzeitfolgen der Veränderten Anatomie durch den hemmenden Effekt des CO₂ auf die Anpassungen der Gefäße im Trockenstress sind vielfach unbekannt.

Die Auswertungen der Dendrometer- Daten haben gezeigt, dass die späte Öffnung der Stomata am Abend zu einer sprunghaften Wasseraufnahme führen kann. Diese unkontrollierte Wasseraufnahme kann zu Embolien in den Holzgefäßen führen. Luftblasen in den Leitbündeln würden den Transport erheblich stören und könnten Versorgungsschäden verursachen.

In ähnlichen Versuchen mit Pappeln (*Populus tremula x alba*) im Bereich Klimawandel wurde eine gleichzeitige Behandlung der Pflanzen mit erhöhtem CO₂ und Ozon untersucht. Dort konnte gezeigt werden, dass CO₂ und Ozon gegenläufige Effekte haben (im Bezug auf Wachstum, Biomasse, Kambial-

Aktivität und Zellwanddicken im Holz). Der Gehalt an Lignin wurde bei gleichzeitiger Behandlung hingegen gefördert (RICHET *et al.*, 2012). Somit konnte in vergleichbaren Untersuchungen ein Einfluss des CO₂ auf gleichzeitig gesetzten Stress nachgewiesen werden.

Der Vergleich von Ozon und Trockenstress ist in diesem Zusammenhang jedoch nicht diskutabel. Wie einleitend erwähnt (s. 10), ist eine Veränderung der Gaszusammensetzung der Luft nicht lokal, sondern global zu betrachten. Ortsgebundene Anpassungen an Standorte sind nicht artübergreifend.

An Robinien wurde 2011 der Effekt des Trockenstress im Bezug auf Pilzbefall untersucht. Trockenstress begünstigte die Ausbreitung des Pilzes (mündliche Mitteilung A. Aslam). Es ist zu vermuten, dass eine zusätzliche Begasung der Bäume mit CO₂ dieser Entwicklung entgegen wirken kann.

Sobald CO₂ in Kombination mit einer weiteren Stress- Komponente wirkt, hat es einen hemmenden oder fördernden Effekt auf die Pflanze. Analysen einer möglichen veränderten Stressantwort von Bäumen auf Pilz- oder Insektenbefall wird im Zusammenhang zum globalen Klimawandel ebenfalls von großer wirtschaftlicher Bedeutung sein.

4.2.3 Inwiefern passt sich die Physiologie den Versuchsbedingungen an?

In den Messungen zum Stammdurchmesser an *P. canescens* konnte gezeigt werden, dass eine reduzierte Transpiration der Blätter die bedeutendste Reaktion darstellt. Pflanzen unter Trockenstress senken ihre stomatare Leitfähigkeit. Auch zeigt sich in einigen Messungen ein Einfluss des CO₂ auf die Transpiration. Dies jedoch nicht zwingend über die gesamte Saison und bei Pappel und Buche gleichermaßen.

Der gesetzte Trockenstress führte in beiden Versuchsjahren mikro- und makroskopisch bei Pappel und Buche zu signifikanten Veränderungen. Diese Anpassung an die eingeschränkte Wasserzufuhr ermöglicht eine Optimierung der Physiologie unter gegebenen Umständen. Wie unter 4.2.2 erwähnt, kann der erhöhte CO₂- Gehalt der Luft auf diese Optimierung einen störenden Einfluss haben.

Weiterführende Berechnungen zum Gaswechsel der Versuchspflanzen wurden nicht durchgeführt. Diese Berechnungen verlangen einen *Steady- State* der stomatären Leitfähigkeit und gleiche biochemische Zustände in allen Blättern des Baumes. Da dies anhand der vorliegenden Daten nicht nachzuweisen ist, wären die Ergebnisse dieser Berechnungen rein spekulativ und würden ebenfalls nur mögliche Trends beschreiben.

Es kann jedoch gesagt werden, dass sich die Kombination aus Trockenstress und CO₂ bei Pappel mehr auf die Anatomie, als auf die Physiologie ausgewirkt hat. Es wird vermutet, dass dies im Zusammenhang mit der Trockentoleranz von *P. canescens* steht.

4.2.4 Ist eine artübergreifende Anpassung junger Bäume auf diese Klimaveränderung zu beschreiben?

Zum Nachteil aller durchgeführten Messungen waren bei den Buchen die Unterschiede im Phänotyp von Beginn der Saison 2011 an sehr unterschiedlich. Nur für sehr wenige Messungen konnten Daten ermittelt werden, die statistisch auch auszuwerten waren.

Ein direkter Vergleich der Pappeln und Buchen ist somit nicht aussagekräftig.

Dahingegen haben jedoch die lichtmikroskopischen Auswertungen zur Blattmorphologie bedeutende Unterschiede beider Baumarten zeigen können.

So war bei *F. sylvatica* nicht das chlorophyllhaltige parenchymatische Gewebe in den Blättern verändert, sondern die Breite der Epidermis. Diese Veränderung konnte bei Pappel so nicht gezeigt werden. Dort war der Einfluss auf die Parenchyme deutlich. Es wird vermutet, dass sich diese Unterschiede auf eine Korrelation zur Transpiration begründen, die ebenfalls bei beiden Arten unterschiedlich sind.

Nimmt man diese Ergebnisse als Hinweis darauf, dass beide Baumarten sich bereits morphologisch unterschiedlich an Umweltveränderungen anpassen, sind physiologische Unterschiede zu erwarten.

4.2.5 Wie wirkt sich eine Beschneidung der Versuchsbäume auf die Ergebnisse aus und ist eine Annäherung an natürliche Wachstumsbedingungen erstrebenswert?

In der ersten Versuchsreihe 2010 wurde mit Bäumen gearbeitet, deren Habitus durch Beschneidung der Seitenäste und Entfernung neuer Triebe künstlich verändert wurde. Diese Veränderung hatte den Vorteil, die Einflüsse der Versuchsbedingungen distinkt auf den Hauptpross des Baumes wirken zu lassen. In der Folgesaison 2011 wurde auf diese Beschneidung der Pappeln verzichtet, um den Habitus möglichst natürlich zu belassen und die künstlichen Versuchsbedingungen dahingehend naturnaher und realistischer zu gestalten. Wie sich anhand einiger beschriebener Resultate zeigte, war diese Veränderung des Versuchsablaufes in ergebnisgestaltend, in anderen Bereichen nicht.

Die Auswertungen zum Phänotyp zeigten keine besonders auffälligen Reaktionen auf die Beschneidung der Bäume. Die unterschiedlichen Biomassen beider Jahre sind zwar nicht miteinander zu vergleichen, jedoch zeigte sich, dass die Versuchsbedingungen in beiden Jahren eine ähnliche Wirkung hatten.

Das bedeutet, dass die Untersuchung von Einflüssen des Klimas auf junge Bäume nicht primär von einer Beschneidung abhängig ist.

Seitenäste bedeuten mehr Blattmaterial und somit eine verstärkte Transpiration. Dass diese unter gegebenen Versuchsbedingungen, insbesondere dem Trockenstress beeinflusst war, sollte hingegen berücksichtigt werden!

Insofern sollte im Vorfeld der Untersuchungen abgeschätzt werden, ob eine Beschneidung der Bäume ergebnisgestaltend werden könnte.

Wenn dies nicht im Vordergrund steht, ist eine Beschneidung der Bäume, sodass nur der Haupttrieb des jeweiligen Versuchsjahres übrig bleibt, empfehlenswert.

Die experimentelle Handhabung ist verbessert und es wird eine Vergleichbarkeit geschaffen. Da nicht vorhergesagt werden kann, wie viele Seitentriebe ausgebildet werden, würde die Standardabweichung innerhalb der Variationen bei Nicht- Beschneidung zusätzlich negativ einwirken.

Eine Annäherung an natürliche Wachstumsbedingungen ist bei Versuchen im Gewächshaus nicht ohne Einschränkungen möglich. Die Ergebnisse derartiger Versuchsreihen werden niemals ohne weitere Fragestellungen auf natürliches Baumwachstum in freier Umwelt übertragbar sein. Daher ist eine Annäherung nur dann sinnvoll, wenn auch Faktoren wie z.B. Bodenstruktur, Mikrobiologie und Konkurrenz wirksam mit einbezogen werden können.

4.3 Die Reaktion des Organismus auf seine Umwelt

Wie bereits beschrieben, können Versuche aus dem Gewächshaus nicht ohne weitere Fragestellungen zu beantworten, auf natürliche Umweltbedingungen übertragen werden. In freier Natur unterliegt ein Baum den Bedingungen an seinem Standort und muss sich zu jeder Zeit daran anpassen können.

Analysen zum Nährstoffverbrauch der Versuchspflanzen wurden nicht durchgeführt. Da das Wurzelsystem im Pflanztopf nur eingeschränkt wachsen kann, sind Aussagen über vermehrtes Wachstum der Wurzeln nicht eindeutig.

Ein verstärktes Wurzelwachstum würde zu verstärkter Bodennutzung führen und den Umsatz verfügbarer Nährstoffe erhöhen. Dies bedeutet auch eine verstärkte Wasseraufnahme und dadurch Verstärkung des Trockenstress und eine Reduzierung der verfügbaren Nährstoffe im Boden.

Unter natürlichen Bedingungen würde die Ausdehnung des Wurzelsystems jedoch auch eine Vermehrung der Mikroorganismen bedeuten, die eine erhöhte Umsatzrate im Bezug auf Stickstoff bedingen. (CEULEMANS *et al.*, 1999)

Dieser Natürliche Kreislauf der Nährstoffzufuhr im Boden konnte unter gegebenen Versuchsbedingungen nicht dargestellt werden.

Die chemischen Analysen der getrockneten Blätter von Bäumen unter Trockenstress könnten einen Hinweis darauf geben, wie sich die Nährstoffzusammensetzung im Boden verhalten könnte. Das abfallende Laub wird zersetzt und die Inhaltsstoffe, inklusive dem aufgenommenen CO₂, verbleiben im Ökosystem. Wie sich infolge dessen ein Umsatz des Kohlenstoff im Boden gestaltet, konnte bereits mittels Isotopenanalyse gezeigt werden (DRIGO *et al.*, 2010)

Anorganischer Kohlenstoff ist als Primärsubstrat für RuBisCO und in der Umwandlung zum organischen Bestandteil des Kohlenstoffkreislaufs in der Photosynthese zuerst der CO₂- Aufnahme im Blatt unterlegen. Abhängig von dieser Aufnahme gestalten sich Umsatzraten, Holzbildung, Biomasseproduktion und Ausbreitung der Pflanze an ihrem Standort.

Ergebnisse und Meinungen darüber, welche Faktoren zu welchem Zeitpunkt limitierend auf die Physiologie wirken, gehen auseinander. So gilt u.a. RuBisCO als limitierender Faktor zur CO₂- Aufnahme (Akklimationseffekt).

Es ist anzumerken, das bekannte Theorien zur Limitierung der Photosynthese unter erhöhtem CO₂ in Versuchen mit Pflanzen in Topfböden und natürlichen Böden zu unterscheiden sind. Dieser vielfach beschriebene Akklimationseffekt, der eine Senkung der Photosyntheserate u.a. durch „Down-Regulation“ der RuBisCO beschreibt (FARIA *et al.*, 1996), konnte durch ergänzende Laboranalysen zur Genexpression und zur Enzym- Biochemie nicht untersucht werden. Daher sind Vermutungen zur Anpassung der Pflanzen an die Versuchsbedingungen, bedingt durch eine RuBisCO- abhängige biochemische Stoffwechselphysiologie, nicht auf die vorgestellten Ergebnisse zu beziehen.

Die CO₂- Abhängigkeit der Netto- Photosyntheserate wird bei Pflanzen durch stomatäre Effekte beeinflusst. So ist bei der Unterscheidung von Licht- und Schattenblättern nicht nur die Anzahl der Zellreihen im Palisadengewebe verändert, sondern auch die laterale Diffusion des CO₂ zwischen den Interkostalfeldern im Mesophyllgewebe. Dies betrifft auch Pflanzen, die unter Trockenstress stehen. Auch hat auftretendes Licht auf Blätter, das kurzzeitig die Wasserspaltung und den Elektronentransport stimuliert, Einfluss auf die Entwicklung und die Anpassung der Pflanze an die Versuchsbedingungen. Unter dieser Kurzzeitantwort von Pflanzen auf erhöhtes CO₂ werden jene

Reaktionen verstanden, die keinen Einfluss auf Blattmorphologie, chemische Zusammensetzung, die Blattfläche und die stomatäre Leitfähigkeit hat (WULLSCHLEGER *et. al.*, 1997). Diese Kurzzeitantwort ist in den enorm hohen CO₂- Aufnahmeraten der ersten Messungen zum Gaswechsel zu erkennen.

Durch wöchentliches Rotieren der Pflanzen innerhalb ihres Standortes in den Klimakammern, konnte bei den Pappeln eine Ausbildung von Licht- und Schattenblättern verhindert werden. Bei den Buchen ist dies nicht zuverlässig zu beschreiben. Jedoch fanden sich in den Untersuchungen zur Blattmorphologie bei den Buchen keine Hinweise auf unterschiedliche Blatttypen.

IV. Literaturverzeichnis

- DL. Addicott** (1970): Plant hormones in the control of abscission. *Biological Reviews*, **45**, 485-524.
- M. Arend, J. Fromm** (2007): Seasonal change in the drought response of wood cell development in poplar. *Tree Physiology*, **27**, 985-992.
- C.J. Atkinson, J.M. Taylor** (1996): Effects of elevated CO₂ on stem growth, vessel area and hydraulic conductivity of oak and cherry seedlings. *New Phytol.*, **133**, 617-626.
- G. Barron- Gafford, D. Martens, K. Grieve, K. Biel, V. Kudeyarov, J.E.T. McLain, D. Lipson, R. Murthy** (2005): Growth of Eastern Cottonwoods (*Populus deltoides*) in elevated CO₂ stimulates stand- level respiration and rhizodeposition of carbohydrates, accelerates soil nutrient depletion, yet stimulates above and below ground biomass production. *Glob. Chang. Biol.*, **11**, 1220-1233.
- T. Bibikova, S. Gilroy** (2003) Root hair development. *J Plant Growth Regul*, **21**, 383-415.
- BL. Black, C. Parmentier Line, LH. Fuchigami, GD Coleman** (2001): Ecotypic and genetic variation in poplar bark storage protein gene expression and accumulation. *Tree Physiology*, **21**, 1289-1297.
- E. G. Bobich, G. A. Barron-Gafford, K. G. Rascher, R. Murthy** (2010): Effects of drought and changes in vapour pressure deficit on water relations of *Populus deltoides* growing in ambient and elevated CO₂. *Tree Physiology*, **30**, 866-875.
- T. J. Brodribb, T. S. Field** (2010): Leaf hydraulic evolution led a surge in leaf photosynthetic capacity during early angiosperm diversification. *Ecol. Lett.*, **13**, 175-183, doi: 10.1111/j.1461-0248.2009.01410.x
- L. Cao, G. Bala, K. Caldaira, R. Nemandi, G. Ban- Weiss** (2010): Importance of carbon dioxide physiological forcing to future climate change. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, **107** (21) 9513-9518.
- R. Ceulemans, I.A. Janssens, M.E. Jach** (1999): Effects of CO₂ Enrichment on Trees and Forests: Lessons to be learned in View of Future Ecosystem Studies. *Annals of Botany*, **84**, 577-590.
- V.K. Dalal, B.C. Tripathy** (2012): Modulation of chlorophyll biosynthesis by water stress in rice seedlings during chloroplast biogenesis. *Plant Cell Environ*, Epub ahead of print; doi: 10.1111/j.1365-3040.2012.02520.x.
- L. A. Donovan, H. Maherali, C. M. Caruso, H. Huber, H. de Kroon** (2011): The evolution of the worldwide leaf economics spectrum. *Trends Ecol. Evol.* **26**, 88-95
- B. Drigo, A.S. Pijl, H. Duyts, A. M. Kielak, H.A. Gamper, M.J. Houtekamer, H.T.S. Boschker, P. L.E. Bodelier, A.S. Whiteley, J.A. van Veen, G.A. Kowalchuk** (2010): Shifting carbon flow from roots into associated microbial communities in response to elevated atmospheric CO₂. *PNAS*, **107**, 10938-10942.
- B. Drigo** (2007) Impact of elevated carbon dioxide on the rhizosphere communities of *Carex arenaria* and *Festuca rubra*. *Glob Change Biol*, **13**, 2396–2410.
- W. Eschrich, J. Fromm, S. Essiamah** (1988): Mineral partitioning in the phloem during autumn senescence of beech leaves. *Trees Structure and Function*, **2**, 73-83.

T. Faria, D. Wilkins, R.T. Besford, M. Vaz, J.S. Pereira, M.M. Chaves (1996): Growth at elevated CO₂ leads to down-regulation of photosynthesis and altered response to high temperature in *Quercus suber* L. seedlings. *Journal of Experimental Botany*, **47**, 1755-1761.

C. B. Field, R. B. Jackson, H. A. Mooney (1995): Stomatal response to increased CO₂: implications from the plant to global scale. *Plant, Cell and Environment*, **18**, 1214-1225.

A.H. Fitter, R.K.M. Hay (2002): Environmental physiology of plants. *Academic Press*, 3rd edn., 367p.

J. Flexas, A. Diaz-Espejo, J. Galmes, R. Kaldenhoff, H. Medrano, M. Ribas-Carbo (2007): Rapid variations of mesophyll conductance in response to changes in CO₂ concentration around leaves. *Plant Cell and Environ.*, **30**, 1284-1298.

Y. Fracheboud, V. Luquez, L. Björkén, A. Sjödin, H. Tuominen, S. Jansson (2009): The control of autumn senescence in european aspen. *Plant Physiology*. **149**, 1982-1991.

A.D. Friend (2010): Terrestrial plant production and climate change. Darwin Review, *Journal of Experimental Botany*, **61**, 1293-1309.

B. Genty, J-M. Briantais, NR. Baker (1989): The relationship between quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. *Biochimica et Biophysica Acta*, **990**, 87-92.

C.A. Gunderson, S.D. Wullschlegler (1994): Photosynthetic acclimation in trees to rising atmospheric CO₂: a broader perspective. *Photosynth. Res.*, **39**, 369-388.

U.G. Hacke, J.S. Sperry, W.T. Pockmann, S.D. Davis, K. McCulloh (2001): Trends in wood density and structure are linked to prevention of xylem implosion by negative pressure. *Oecologia*, **126**, 457-461.

J. Heath (1998): Stomata of trees growing under CO₂-enriched air show reduced sensitivity to vapour pressure deficit and drought. *Plant Cell Environ.*, **21**, 1077-1088.

A. A. Hoffman, C. M. Sgro (2011): Climate change and evolutionary adaptation. *Nature*, **470**, 479-485, doi: 10.1038/nature09670.

J. Keskitalo, G. Bergquist, P. Gardström, S. Jansson (2005): A cellular time table of autumn senescence. *Plant Physiology*. **139**, 1635-1648.

C. Körner (2006): Plant CO₂ responses: an issue of definition, time and resource supply. *New Phytol.* **172**, 393-411.

C. Körner, R. Asshoff, O. Bignucolo, S. Hättenschwiler, S.G. Keel, S. Peláez-Riedl, S. Pepin, R.T. Siegwolf, G. Zotz (2005): Carbon flux and growth in mature deciduous forest trees exposed to elevated CO₂. *Science*, **309**; 1360-2.

DM. Kramer, G. Johnson, O. Kiirats, GE. Edwards (2004): New fluorescence parameters for the determination of Q_A redox state and excitation energy fluxes. *Photosynth Res* **79**; 209-218.

- A.D. B. Leakey, J.A. Lau** (2012): Evolutionary context for understanding and manipulating plant responses to past, present and future atmospheric [CO₂]. *Phil. Trans. R. Soc. B* 2012, **367**, 613-629.
- K. Maxwell, G. Johnson** (2000): Chlorophyll fluorescence- a practical guide. *Journal of Experimental Biology*, **345**; pp.659- 668, April 2000.
- T. Näsholm, A. Ekblad, A. Nordin, R. Giesler, M. Högberg, P. Högberg** (1998) Boreal forest plants take up organic nitrogen. *Nature*, **392**, 914-916.
- C. P. Osborne, D. J. Beerling, B. H. Lomax, W. G. Chaloner** (2004): Biophysical constraints on the origin of leaves inferred from the fossil record. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, **101**, 10360-10362.
- T.L. Pons, J. Flexas, S. von Caemmerer, J.R. Evans, B. Genty, M. Ribas-Carbo, E. Brugnolli** (2009): Estimating mesophyll conductance to CO₂: methodology, potential errors and recommendations. *Journal of Experimental Botany*, **60**, 2217-2234.
- N. Richet, D. Afif, K. Tozo, B. Pollet, P. Maillard, F. Huber, P. Priault, J Banvoy, P. Gross, P. Dizengremel, C. Lapierre, P. Perré, M. Cabané** (2012): Elevated CO₂ and/or ozone modify lignifications in the wood of poplars (*Populus tremula x alba*). *Journ. of. Exp. Bot.*, Epub ahead of print; doi: 10.1093/jxb/ers118.
- S.K. Singh, K. Radja Reddy** (2011): Regulation of photosynthesis, fluorescence, stomatal conductance and water-use efficiency of cowpea (*Vigna unguiculata* [L.] Walp.) under drought. *J Photochem Photobiol B*, 105(1); 40-50.
- A.E. Strand, S.G. Pritchard, M.L. McCormack, M.A. Davis, R. Oren** (2008): Irreconcilable differences: Fine-root life spans and soil carbon persistence. *Science*, **319**, 456–458.
- G. Taylor, P.J. Tricker, F.Z. Zhang, V.J. Alston, F. Miglietta, E. Kuzminsky** (2003): Spatial and temporal effects of freeair CO₂ enrichment (POPFACE) on leaf growth, cell expansion and cell production in a closed canopy of poplar. *Plant Physiol*, **131**, 177-85.
- G.C. Topp, J.L. Davis, A.P. Annan** (1980): Elektromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, **16**, Nr. 3, PP. 574-582.
- T. J. Tschaplinsky, G. A. Tuskan, G. M. Gebre, D. E. Todd** (1997): Drought resistance of two hybrid *Populus* clones grown in a large-scale plantation. *Tree Physiology*, **18**, 653-658.
- N. C. Turner** (1979): Drought resistance and adaptation to water deficits in crop plants. *In* Stress Physiology in crop plants. Eds. H. Mussel and R. C. Staples. Wiley-Interscience, New York, pp 181-194.

G. A. Tuskan, S. DiFazio, S. Jansson, J. Bohlmann, I. Grigoriev, U. Hellsten, N. Putnam, S. Ralph, S. Rombauts, A. Salamov, J. Schein, L. Sterck, A. Aerts, R. R. Bhalerao, R. P. Bhalerao, D. Blaudez, W. Boerjan, A. Brun, A. Brunner, V. Busov, M. Campbell, J. Carlson, M. Chalot, J. Chapman, G.-L. Chen, D. Cooper, P. M. Coutinho, J. Couturier, S. Covert, Q. Cronk, R. Cunningham, J. Davis, S. Degroeve, A. Déjardin, C. dePamphilis, J. Detter, B. Dirks, I. Dubchak, S. Duplessis, J. Ehlting, B. Ellis, K. Gendler, D. Goodstein, M. Gribskov, J. Grimwood, A. Groover, L. Gunter, B. Hamberger, B. Heinze, Y. Helariutta, B. Henrissat, D. Holligan, R. Holt, W. Huang, N. Islam-Faridi, S. Jones, M. Jones-Rhoades, R. Jorgensen, C. Joshi, J. Kangasjärvi, J. Karlsson, C. Kelleher, R. Kirkpatrick, M. Kirst, A. Kohler, U. Kalluri, F. Larimer, J. Leebens-Mack, J.-C. Leplé, P. Locascio, Y. Lou, S. Lucas, F. Martin, B. Montanini, C. Napoli, D. R. Nelson, C. Nelson, K. Nieminen, O. Nilsson, V. Pereda, G. Peter, R. Philippe, G. Pilate, A. Poliakov, J. Razumovskaya, P. Richardson, C. Rinaldi, K. Ritland, P. Rouzé, D. Ryaboy, J. Schmutz, J. Schrader, B. Segerman, H. Shin, A. Siddiqui, F. Sterky, A. Terry, C.-J. Tsai, E. Uberbacher, P. Unneberg, J. Vahala, K. Wall, S. Wessler, G. Yang, T. Yin, C. Douglas, M. Marra, G. Sandberg, Y. Van de Peer, D. Rokhsar (2006): The Genome of Black Cottonwood, *Populus trichocarpa* (Torr. & Gray). *Science*, **15**, 1596-1604. doi:10.1126/science.1128691.

J. Uddling, R.M. Teclaw, M.E. Kubiske, K.S. Pregitzer, D.S. Ellsworth (2008): Sap flux in pure aspen and mixed aspen- birch forests exposed to elevated concentration of carbon dioxide and ozone. *Tree Physiol.*, **28**, 1231-1243.

K. R. Wagner, F.W. Ewers, S.D.Davis (1998): Tradeoffs between hydraulic efficiency and mechanical strength in the stem of four co- occurring species of chapperal shrubs. *Oecologia*, **117**, 53-62.

S.D. Wullschleger, R.J. Norby, C.A. Gundersson (1997): Forest trees and their response to atmospheric CO₂ enrichment: a compilation of results. *Am. Soc. of Agr. Spec. Publ.*, **61**, 79-100.

V. Anhang

V.I Tabellen zur Ergebnisdarstellung

V.I.I Gaswechsel

Tab. 1: Gesamtwerteübersicht der monatlichen Messungen zum Gaswechsel mit LI-COR 6400XT an *P. canescens* 2011, unterteilt nach Sink- und Sourceblatt; Photosyntheserate = CO₂-Aufnahmerate [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$], st(omatäre). Leitfähigkeit = Konduktivität in [$\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$], interner CO₂ = interzelluläre CO₂-Konzentration in [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$], Transpiration = Abgabe von H₂O in [$\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]; normal CO₂ = 385 ppm, erhöht CO₂ = 950 ppm.

Mai	Variante			
Sink	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
Photosyntheserate	2,8 ± 2,3	0,7 ± 0,7	2,6 ± 2,9	6 ± 3,9
st. Leitfähigkeit	0,1 ± 0,03	0,02 ± 0	0,1 ± 0,02	0,04 ± 0,02
interner CO ₂	333,3 ± 30,7	352,9 ± 92,7	880,13 ± 41	730,1 ± 120,3
Transpiration	1,43 ± 0,4	0,25 ± 0,1	1,47 ± 0,3	0,66 ± 0,3
Source	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
Photosyntheserate	14,2 ± 2,2	5,7 ± 2,9	17,9 ± 4,2	14,8 ± 9,3
st. Leitfähigkeit	0,33 ± 0,14	0,05 ± 0,03	0,41 ± 0,13	0,09 ± 0,08
interner CO ₂	293,7 ± 30,1	195,2 ± 43	845 ± 26,4	587,9 ± 90,3
Transpiration	3,75 ± 1,3	0,8 ± 0,4	4,2 ± 0,9	1,23 ± 0,9
Juni	Variante			
Sink	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
Photosyntheserate	0,6 ± 0,9	1,3 ± 0,9	2,64 ± 1,97	3,23 ± 2,1
st. Leitfähigkeit	0,07 ± 0,03	0,04 ± 0,01	0,09 ± 0,04	0,04 ± 0,01
interner CO ₂	365 ± 32,6	325,5 ± 33	884,7 ± 35,4	791,7 ± 63,2
Transpiration	1,02 ± 0,38	0,69 ± 0,16	1,25 ± 0,46	0,56 ± 0,18
Source	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
Photosyntheserate	8,1 ± 0,96	4,65 ± 1,7	9,2 ± 1,64	7,66 ± 2,9
st. Leitfähigkeit	0,34 ± 0,07	0,09 ± 0,04	0,26 ± 0,06	0,05 ± 0,03
interner CO ₂	326,5 ± 12,2	253,6 ± 33,1	863,8 ± 16,6	614,4 ± 100,5
Transpiration	3,9 ± 0,6	1,3 ± 0,47	3,07 ± 0,6	0,7 ± 0,46
Juli	Variante			
Sink	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
Photosyntheserate	-1,1 ± 0,9	-0,29 ± 0,2	1,6 ± 2,7	0,67 ± 3,8
st. Leitfähigkeit	0,07 ± 0,02	0,01 ± 0	0,08 ± 0,01	0,03 ± 0,04
interner CO ₂	404,6 ± 17,2	431,2 ± 39,9	892,5 ± 62,9	962,4 ± 245,8
Transpiration	1,2 ± 0,3	0,2 ± 0,07	1,1 ± 0,2	0,4 ± 0,5
Source	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
Photosyntheserate	12,3 ± 3,59	6,23 ± 3,2	8,3 ± 4,1	10,1 ± 3,7
st. Leitfähigkeit	0,58 ± 0,05	0,07 ± 0,07	0,29 ± 0,07	0,17 ± 0,19
interner CO ₂	340,1 ± 9,6	211,3 ± 35,7	877,9 ± 17,5	783,6 ± 149,2
Transpiration	6,1 ± 0,3	1,24 ± 1	2,78 ± 0,4	1,9 ± 1,6

August	Variante			
Sink	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
Photosyntheserate	0,6 ± 2	0,8 ± 1,8	1,3 ± 2,7	3,24 ± 3
st. Leitfähigkeit	0,06 ± 0,02	0,03 ± 0,03	0,06 ± 0,02	0,03 ± 0,01
interner CO ₂	-19,7 ± 531,9	332,3 ± 383,6	594,6 ± 418,5	-8 ± 555,9
Transpiration	1,13 ± 0,4	0,58 ± 0,39	1,13 ± 0,4	0,94 ± 0,5
Source	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
Photosyntheserate	9,7 ± 2	5,7 ± 2,2	8,25 ± 4,5	9,9 ± 4,4
st. Leitfähigkeit	0,39 ± 0,07	0,12 ± 0,07	0,28 ± 0,1	0,12 ± 0,06
interner CO ₂	-48 ± 63,6	-427,7 ± 243	461 ± 172	145,4 ± 607,8
Transpiration	4,46 ± 0,7	1,45 ± 0,7	4 ± 1,5	1,96 ± 1,1
September	Variante			
Sink	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
Photosyntheserate	keine Messungen			
st. Leitfähigkeit				
interner CO ₂				
Transpiration				
Source	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
Photosyntheserate	8,4 ± 0,5	11 ± 1,1	4,27 ± 1,5	14,8 ± 1,1
st. Leitfähigkeit	0,54 ± 0,06	0,47 ± 0,09	0,46 ± 0,06	0,5 ± 0,04
interner CO ₂	342,9 ± 4,6	326,5 ± 4	9,12 ± 4,6	872,4 ± 8,4
Transpiration	5,2 ± 0,7	4,8 ± 0,4	5 ± 0,5	5,4 ± 0,2

Tab. 2: Gesamtwerteübersicht der monatlichen Messungen zum Gaswechsel mit LI-COR 6400XT an *F. sylvatica* 2011, unterteilt nach Sink- und Sourceblatt; Photosyntheserate = CO₂-Aufnahmerate [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$], st(omatäre). Leitfähigkeit = Konduktivität in [$\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$], interner CO₂ = interzelluläre CO₂-Konzentration in [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$], Transpiration = Abgabe von H₂O in [$\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]; normal CO₂ = 385 ppm, erhöht CO₂ = 950 ppm.

Mai	Variante			
Sink	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
Photosyntheserate	5,54 ± 2,1	4,04 ± 2,9	4,09 ± 3,3	4,08 ± 5,1
st. Leitfähigkeit	0,08 ± 0,02	0,08 ± 0,02	0,08 ± 0,02	0,06 ± 0,02
interner CO ₂	265,1 ± 33	306,7 ± 46	832,6 ± 82	820,8 ± 133
Transpiration	1,27 ± 0,4	1,28 ± 0,3	1,07 ± 0,3	0,93 ± 0,3
Source	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
Photosyntheserate	7,28 ± 0,8	6,69 ± 1,4	7,3 ± 4,7	10,2 ± 4,2
st. Leitfähigkeit	0,1 ± 0,02	0,09 ± 0,01	0,1 ± 0,03	0,09 ± 0,03
interner CO ₂	255,3 ± 23,4	259,4 ± 16,6	769,2 ± 94	722,2 ± 85,8
Transpiration	1,54 ± 0,3	1,39 ± 0,2	1,4 ± 0,4	1,28 ± 0,5

Juni		Variante			
Sink	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O	
Photosyntheserate	1,86 ± 1,7	2,4 ± 1,2	2,9 ± 1,9	2,34 ± 2	
st. Leitfähigkeit	0,07 ± 0,04	0,06 ± 0,02	0,1 ± 0,05	0,09 ± 0,05	
interner CO ₂	330,6 ± 85	309,8 ± 36	866,7 ± 82	879,7 ± 75	
Transpiration	1,12 ± 0,6	0,96 ± 0,3	1,42 ± 0,7	1,25 ± 0,7	
Source	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O	
Photosyntheserate	4,3 ± 1,4	4,65 ± 1,1	6,6 ± 3,1	8,3 ± 2,3	
st. Leitfähigkeit	0,08 ± 0,02	0,08 ± 0,02	0,07 ± 0,01	0,08 ± 0,03	
interner CO ₂	259,8 ± 26	268,1 ± 18	756,9 ± 74	732,4 ± 52	
Transpiration	1,32 ± 0,2	1,24 ± 0,3	0,98 ± 0,2	1,1 ± 0,4	
Juli		Variante			
Sink	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O	
Photosyntheserate	6,1	3,75 ± 0,3	6,5 ± 4	3,9 ± 2,3	
st. Leitfähigkeit	0,14	0,1 ± 0,03	0,06 ± 0,03	0,06 ± 0,02	
interner CO ₂	304,4	311,3 ± 27,7	746,9 ± 84	818,4 ± 64	
Transpiration	2,26	1,64 ± 0,5	0,66 ± 0,28	0,64 ± 0,19	
Source	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O	
Photosyntheserate	8,5 ± 1,23	7,4 ± 2,2	9,07 ± 2,7	8,95 ± 1	
st. Leitfähigkeit	0,19 ± 0,06	0,18 ± 0,08	0,06 ± 0,04	0,05 ± 0,01	
interner CO ₂	298,9 ± 17,5	306,1 ± 17,8	594,8 ± 164,3	659,4 ± 24,7	
Transpiration	2,9 ± 0,7	2,77 ± 1	0,65 ± 0,4	0,63 ± 0,1	
August		Variante			
Sink	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O	
Photosyntheserate	2,2 ± 0,8	2,9 ± 0,8	2,4 ± 2,5	2,03 ± 2	
st. Leitfähigkeit	0,04 ± 0,004	0,07 ± 0,04	0,02 ± 0,01	0,02 ± 0,005	
interner CO ₂	-530,7 ± 129,5	-369,9 ± 180	-126 ± 627,8	-241,5 ± 534	
Transpiration	1,18 ± 0,2	1,7 ± 0,8	0,64 ± 0,3	0,8 ± 0,2	
Source	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O	
Photosyntheserate	6,37 ± 1,2	5,27 ± 1,6	8 ± 3,3	8,3 ± 2,3	
st. Leitfähigkeit	0,12 ± 0,04	0,13 ± 0,04	0,06 ± 0,03	0,08 ± 0,03	
interner CO ₂	-197 ± 111,7	-123,9 ± 56,8	-261,6 ± 480,3	-287,2 ± 277	
Transpiration	1,98 ± 0,6	2 ± 0,6	1,19 ± 0,5	1,36 ± 0,5	
September		Variante			
Sink	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O	
Photosyntheserate	keine Messungen				
st. Leitfähigkeit					
interner CO ₂					
Transpiration					

Source	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
Photosyntheserate	5,3 ± 1,4	5,73 ± 1,18	5,72 ± 1,78	5,97 ± 2
st. Leitfähigkeit	0,13 ± 0,04	0,16 ± 0,04	0,07 ± 0,02	0,11 ± 0,05
interner CO ₂	297,9 ± 20	311,5 ± 8,4	788,2 ± 37,5	828,3 ± 37
Transpiration	1,76 ± 0,5	2,18 ± 0,4	1,16 ± 0,3	1,67 ± 0,7

V.I.II Dendrometer

Tab. 3: Gesamtwerteübersicht zur relativen Zuwachsrate der Stammdurchmesser von *P. canescens* 2010 und 2011 in [µm]. Der Startwert zu Beginn der Messungen entspricht nicht dem realen Stammdurchmesser, erhobene Datensätze beschreiben lediglich die Zunahme des Durchmessers. die Startwerte wurden „Null“ gesetzt und nachfolgende Werte zu diesem in Bezug; n = 1; normaler CO₂- Gehalt der Luft = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt der Luft = 770 ppm (2010) bzw. 950 ppm (2011).

	2010		2011	
	>CO ₂ , H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O	>CO ₂ ,<H ₂ O	CO ₂ N,<H ₂ O
Apr	0	0	keine Messungen	
Mai	-8,3	-20,3		
Jun	31,3	180,3		
Jul	139,2	410,9	0	0
Aug	212,6	464,4	43,9	56,73
Sep	222,9	460,8	125,3	109,9
Okt	186,3	419,1	207,6	146,6
Nov	102,8	376,7	254,4	184,1

Tab. 4: Monatswerteübersicht der Daten des Dendrometers zur Messung des Stammumfangs an *P. canescens* 2010 mit Standardabweichungen; gemessen wurde kontinuierlich an je einem Baum der Variante (n=1); normaler CO₂- Gehalt der Luft = 385 ppm erhöhter CO₂- Gehalt der Luft = 770 ppm. Student's *t*-Test für die Gesamtwerte aller Messtage, Signifikanz (*) für Werte ≤ 0,05.

Dendrometer- Mittelwerte <i>P. canescens</i> 2010			<i>t</i> -Test
[µm]	>CO ₂ , H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O	(auf Einzelwerte)
Apr	564,13 ± 0,8	181,13 ± 22,9	<0,001*
Mai	555,85 ± 7,9	160,84 ± 13,1	<0,001*
Jun	595,45 ± 17,0	361,39 ± 75,2	<0,001*
Jul	703,38 ± 37,9	592,05 ± 43,1	<0,001*
Aug	776,70 ± 9,5	645,53 ± 2,5	<0,001*
Sep	787,01 ± 1,2	641,88 ± 0,9	<0,001*
Okt	750,39 ± 44,5	600,23 ± 43,7	<0,001*
Nov	666,96 ± 0,4	556,81 ± 0,9	<0,001*

Tab. 5: Monatswerteübersicht der Daten des Dendrometers zur Messung des Stammumfanges an *P. canescens* 2011 mit Standardabweichungen; gemessen wurde kontinuierlich an je einem Baum der Variante (n=1); normaler CO₂- Gehalt der Luft = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt der Luft = 950 ppm. Student's *t*-Test für die Gesamtwerte aller Messtage, Signifikanz (*) für Werte ≤ 0,05.

Dendrometer- Mittelwerte <i>P. canescens</i> 2011			<i>t</i> -Test (auf Einzelwerte)
[μm]	CO ₂ N, <H ₂ O	>CO ₂ , <H ₂ O	
Mai	191,45 ± 13,9	288,59 ± 11,5	<0,001*
Jun	248,19 ± 24,9	332,55 ± 39,7	<0,001*
Jul	301,33 ± 22,2	413,89 ± 16,4	<0,001*
Aug	338,01 ± 18,9	496,22 ± 26,4	<0,001*
Sep	375,49 ± 3,6	542,94 ± 7,1	<0,001*

V.I.III Imaging PAM

Tab. 6: Gesamtübersicht zur saisonalen Messung der Chlorophyllfluoreszenz (Fm') und der Effizienz des Photosystem II (Y(II)) mit Standardabweichungen mittels IMAGING- PAM; drei Messbereiche (1,2,3) unterteilt in Mesophyllbereiche (Mph) und Bereich der Mittelrippe (Mr); n = 3; normaler CO₂- Gehalt der Luft = 385 ppm, erhöhter CO₂- Gehalt der Luft = 950 ppm; Student's *t*-Test für die Gesamtwerte einer Verlaufsmessung, Signifikanz (*) für Werte ≤ 0,05.

Mai 11	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
Fm'1 (Mph)	0,58 ± 0,03	0,51* ± 0,12	0,59 ± 0,02	0,45* ± 0,02
Fm'2 (Mph)	0,58 ± 0,03	0,54* ± 0,07	0,59 ± 0,02	0,44* ± 0,02
Fm'3 (Mr)	0,59 ± 0,04	0,53* ± 0,08	0,60 ± 0,01	0,46* ± 0,03
Y(II)1 (Mph)	0,63 ± 0,01	0,65* ± 0,01	0,64 ± 0,02	0,59* ± 0,01
Y(II)2 (Mph)	0,63 ± 0,01	0,65* ± 0,01	0,65 ± 0,01	0,58* ± 0,02
Y(II)3 (Mr)	0,61 ± 0,01	0,64* ± 0	0,62 ± 0,02	0,57* ± 0,01
Jul 11	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
Fm'1 (Mph)	0,53 ± 0,03	0,49* ± 0	0,53 ± 0,08	0,55 ± 0,05
Fm'2 (Mph)	0,53 ± 0,04	0,50* ± 0,01	0,50 ± 0,15	0,55 ± 0,06
Fm'3 (Mr)	0,52 ± 0,02	0,48* ± 0,01	0,50 ± 0,08	0,51 ± 0,04
Y(II)1 (Mph)	0,67 ± 0,01	0,67 ± 0,01	0,65 ± 0,02	0,67 ± 0
Y(II)2 (Mph)	0,66 ± 0,01	0,67 ± 0,01	0,66 ± 0,04	0,68 ± 0
Y(II)3 (Mr)	0,65 ± 0,02	0,66 ± 0,01	0,65 ± 0,03	0,67 ± 0
Sep 11	CO ₂ N,H ₂ ON	CO ₂ N,<H ₂ O	>CO ₂ ,H ₂ ON	>CO ₂ ,<H ₂ O
Fm'1 (Mph)	0,55 ± 0,03	0,53 ± 0,02	0,64* ± 0,01	0,51* ± 0,07
Fm'2 (Mph)	0,56 ± 0,03	0,54 ± 0,02	0,63* ± 0,01	0,51* ± 0,07
Fm'3 (Mr)	0,51 ± 0,02	0,51 ± 0,03	0,57* ± 0,02	0,47* ± 0,04
Y(II)1 (Mph)	0,66 ± 0,01	0,67 ± 0,01	0,46* ± 0,1	0,55 ± 0,17
Y(II)2 (Mph)	0,64 ± 0,03	0,67 ± 0,01	0,46* ± 0,1	0,56 ± 0,15
Y(II)3 (Mr)	0,64 ± 0	0,65 ± 0,01	0,54* ± 0,06	0,55 ± 0,5

Tab. 7: Übersicht zur Berechnung der Verhältnisse aus absorbiertes und photosynthetisch genutzter Lichtenergie ($Y(II)$ = Mittelwert aus $Y(II)_{1+2+3}$) und als Chlorophyllfluoreszenz (Fm' = Mittelwert aus Fm'_{1+2+3}) abgegebene, überschüssige Energie. Das Verhältnis berechnet sich aus $Y(II)-Fm'$; $n = 3$; normaler CO_2 - Gehalt der Luft = 385 ppm, erhöhter CO_2 - Gehalt der Luft = 950 ppm.

Mai 11	CO_2N,H_2ON	$CO_2N,<H_2O$	$>CO_2,H_2ON$	$>CO_2,<H_2O$
Fm'	0,58	0,53	0,59	0,45
Y(II)	0,62	0,65	0,64	0,58
Verhältnis	0,04	0,12	0,05	0,13
Jul 11	CO_2N,H_2ON	$CO_2N,<H_2O$	$>CO_2,H_2ON$	$>CO_2,<H_2O$
Fm'	0,53	0,49	0,51	0,54
Y(II)	0,66	0,66	0,65	0,67
Verhältnis	0,14	0,17	0,14	0,14
Sep 11	CO_2N,H_2ON	$CO_2N,<H_2O$	$>CO_2,H_2ON$	$>CO_2,<H_2O$
Fm'	0,54	0,53	0,61	0,5
Y(II)	0,64	0,66	0,49	0,55
Verhältnis	0,1	0,14	-0,13	0,05

V.I.IV Blattmorphologie

Tab. 8: Gesamtübersicht zur Signifikanz der Messungen zur Blattmorphologie an *P. canescens* 2011; PP = Palisadenparenchym, SP = Schwammparenchym, Epidermis = obere + untere, $n = 4$; normal $CO_2 = 385$ ppm, erhöht $CO_2 = 950$ ppm. Student's t -Test für die Werte des Gesamtmonats bezogen auf die Kontrollvariante CO_2N,H_2ON , Signifikanz (*) für Werte $\leq 0,05$.

Student's t-Test $CO_2N,H_2ON = K$		Blattdicke	Epidermis	Breite PP	Breite SP
$CO_2N,<H_2O$	(K)	0,032*	0,006*	0,154	<0,001*
$>CO_2,H_2ON$	(K)	0,007*	0,592	0,119	<0,001*
$>CO_2,<H_2O$	(K)	0,416	0,697	0,546	0,364
$>CO_2,H_2ON$	$CO_2N,<H_2O$	0,601	0,003*	0,709	0,532
$>CO_2,H_2ON$	$>CO_2,<H_2O$	<0,001*	0,891	0,023*	<0,001*
$CO_2N,<H_2O$	$>CO_2,<H_2O$	0,002*	0,004*	0,031*	<0,001*

Tab. 9: Gesamtübersicht zur Signifikanz der Messungen zur Blattmorphologie an *F. sylvatica* 2011; PP = Palisadenparenchym, SP = Schwammparenchym, Epidermis = obere + untere, $n = 4$; normal $CO_2 = 385$ ppm, erhöht $CO_2 = 950$ ppm. Student's t -Test für die Werte des Gesamtmonats bezogen auf die Kontrollvariante CO_2N,H_2ON , Signifikanz (*) für Werte $\leq 0,05$.

Student's t-Test $CO_2N,H_2ON = K$		Blattdicke	Epidermis	Breite PP	Breite SP
$CO_2N,<H_2O$	(K)	0,375	0,064	0,167	0,420
$>CO_2,H_2ON$	(K)	<0,001*	0,0154*	0,038*	0,041*
$>CO_2,<H_2O$	(K)	0,097	0,0142*	0,021*	0,837
$>CO_2,H_2ON$	$CO_2N,<H_2O$	<0,001*	0,168	0,862	0,002*
$>CO_2,H_2ON$	$>CO_2,<H_2O$	0,095	0,873	0,753	0,063
$CO_2N,<H_2O$	$>CO_2,<H_2O$	0,283	0,156	0,699	0,624

V.II Klimadaten der Versuchskammern Hamburg- Bergedorf 2010 und 2011

Zur Vervollständigung der Daten bezüglich exogener Faktoren konnten für die vorliegende Arbeit aufgezeichnete Messwerte der Klimakammern des Gewächshauses in Bergedorf verwendet werden. Für Rückfragen: O. Rühmann, Techn. Leitung, Tel. +49(40) 73962-251.

Die für diese Arbeit relevanten Zeiträume beziehen sich auf die Tageswerte zwischen 10:30 Uhr und 18:30 Uhr, in denen im Gewächshaus Messungen an den Versuchspflanzen durchgeführt wurden. Zur Darstellung der technischen Gegebenheiten wird eine 24h- Übersicht für den 19. Juli beider Jahre angegeben.

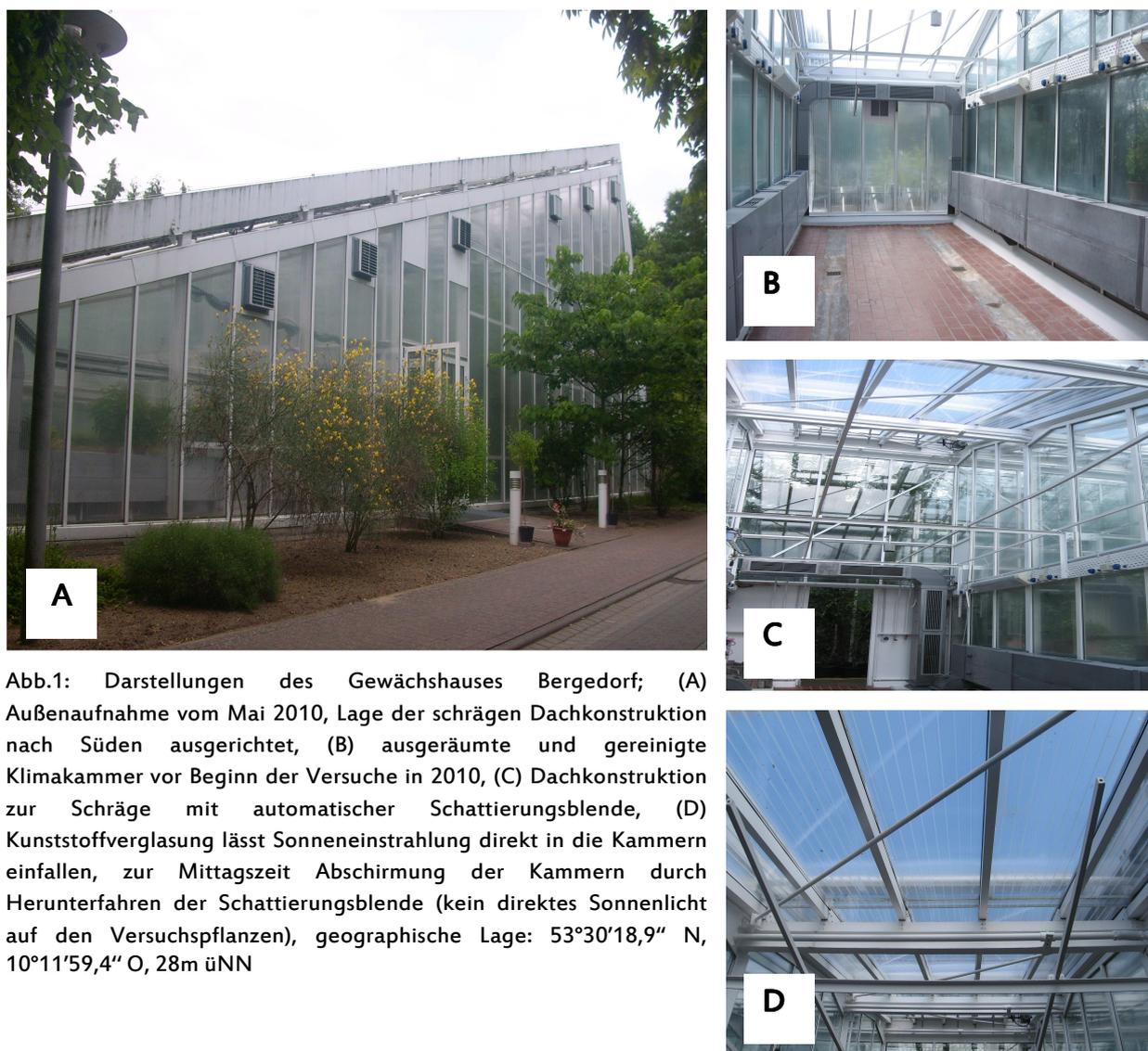


Abb.1: Darstellungen des Gewächshauses Bergedorf; (A) Außenaufnahme vom Mai 2010, Lage der schrägen Dachkonstruktion nach Süden ausgerichtet, (B) ausgeräumte und gereinigte Klimakammer vor Beginn der Versuche in 2010, (C) Dachkonstruktion zur Schräge mit automatischer Schattierungsblende, (D) Kunststoffverglasung lässt Sonneneinstrahlung direkt in die Kammern einfallen, zur Mittagszeit Abschirmung der Kammern durch Herunterfahren der Schattierungsblende (kein direktes Sonnenlicht auf den Versuchspflanzen), geographische Lage: 53°30'18,9" N, 10°11'59,4" O, 28m üNN

Klimadaten Saison 2010

Tab. 10: Übersicht der Gesamtklimadaten der Kammern im Gewächshaus zur Saison 2010. Gezeigt sind die Tageszeiträume von 10:30 Uhr bis 18:30 Uhr. Die Saisonübersicht zeigt die gemittelten Wetterdaten dieser Zeiträume von April bis September 2010 mit Standardabweichungen; K5= Klimakammer 5 mit erhöhtem CO₂-Gehalt (Sollwert: 770 ppm); K6= Kontrollkammer 6 mit normalem CO₂-Gehalt (Sollwert: 385 ppm). Messungen alle 12 Minuten.

Klimadaten 2010	Mai	Juni	Juli	August	September
Außenhelligkeit	15,7 ± 18	29,3 ± 18	29,8 ± 17	17,2 ± 17	15,1 ± 18
Lichtsumme	98,7 ± 101	173,1 ± 109	174,2 ± 104	108,9 ± 85	99,7 ± 92
Raumtemperatur K5	20,4 ± 1,2	22,1 ± 1	22,6 ± 1,3	21,7 ± 0,8	20,9 ± 1,3
Raumfeuchte K5	64,1 ± 9	65,1 ± 9,5	67 ± 12,2	77,6 ± 8,8	71,5 ± 8,1
CO₂ K5	637,2 ± 180	742,8 ± 88,3	776,8 ± 17	769,1 ± 62	754,5 ± 70,5
Raumtemperatur K6	20,6 ± 1,3	22,5 ± 1,2	22,9 ± 1,5	22 ± 0,9	21,5 ± 1,1
Raumfeuchte K6	68,1 ± 6,7	68,4 ± 9,8	68 ± 9,9	76,9 ± 8,2	77,3 ± 9,2
CO₂ K6	358,8 ± 21	368,3 ± 25	372,2 ± 15	381,6 ± 21	417 ± 34

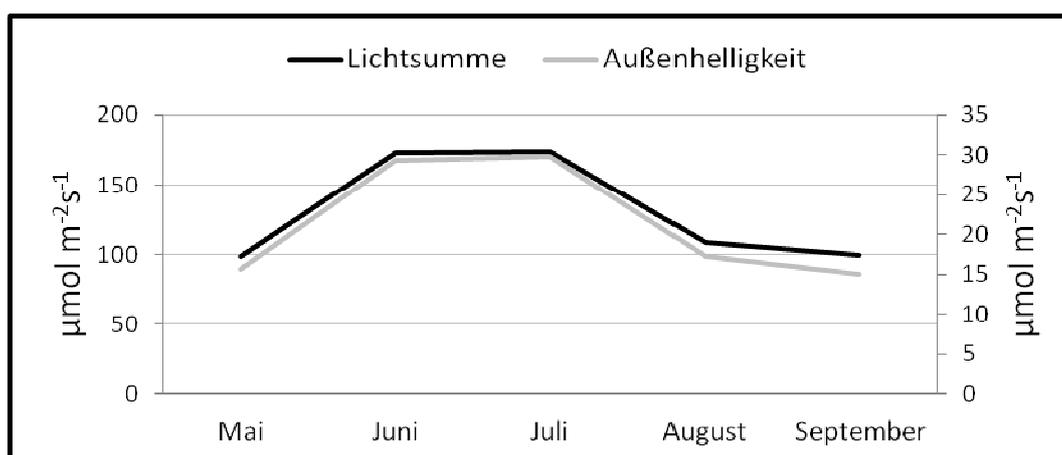


Abb. 2: Graphische Darstellung zu exogenen Lichtfaktoren am Gewächshaus 2010; die Lichtsumme bezieht sich auf die in den Kammern gemessene Lichtintensität in, zu beachten: zur Mittagszeit wurde die Schattierungsblende heruntergefahren; die Außenhelligkeit wird über einen Sensor außen am Haus erfasst, K5 = Klimakammer 5 mit erhöhtem CO₂-Gehalt (Sollwert: 770 ppm); K6 = Kontrollkammer 6 mit normalem CO₂-Gehalt (Sollwert: 385 ppm).

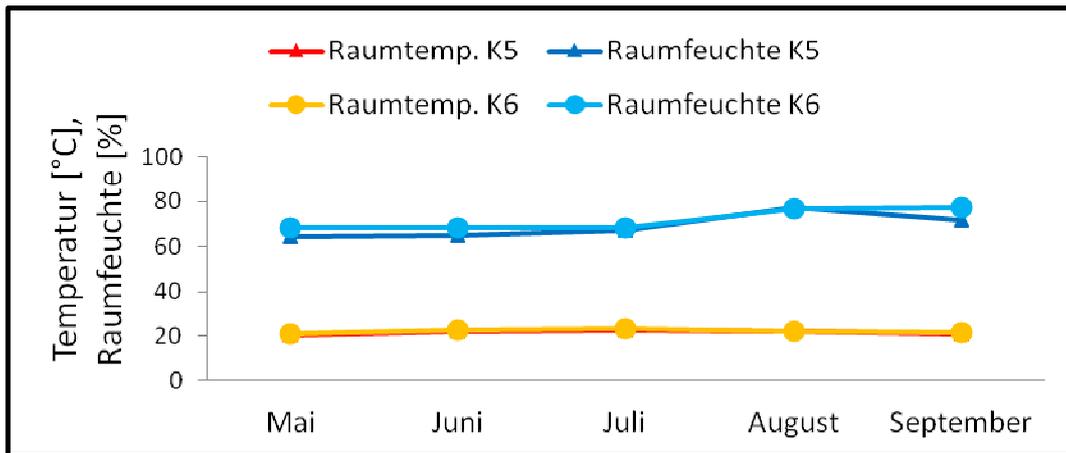


Abb. 3: Graphische Darstellung zur Raumtemperatur und Raumfeuchte in den Kammern des Gewächshauses 2010; Die Temperaturen der Kammern werden über Heizung und Luftkühlung (von außen) stabil gehalten. Die Raumfeuchte wird ebenfalls über Sensoren registriert und über das Einlassen feuchter Luft nach Bedarf stabil gehalten. Die Raumfeuchtezufuhr wurde zum Schutz der technischen Geräte zum Zeitpunkt der Messungen ausgestellt; K5 = Klimakammer 5 mit erhöhtem CO₂- Gehalt (Sollwert: 770 ppm); K6 = Kontrollkammer 6 mit normalem CO₂- Gehalt (Sollwert: 385 ppm).

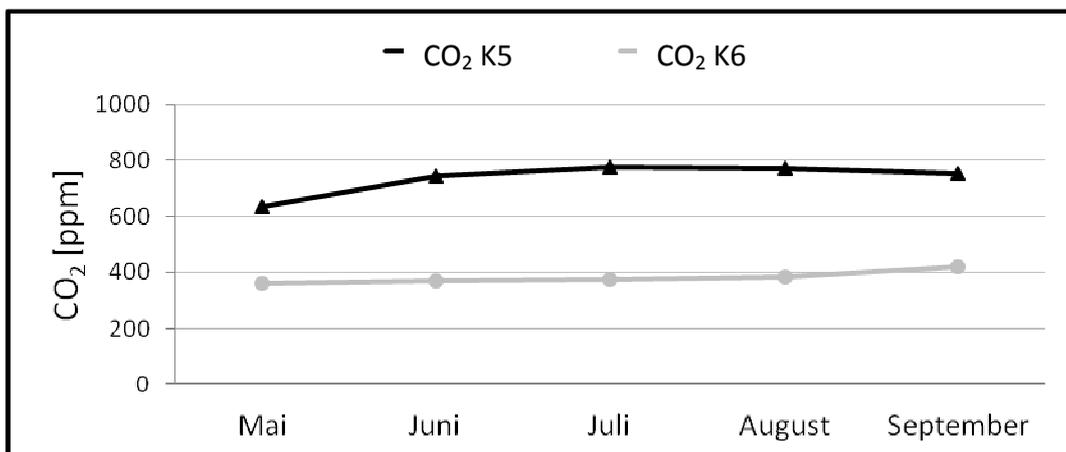


Abb. 4: Graphische Darstellung zum Kohlendioxidgehalt der Luft in den Klimakammern 2010; K5 = Kammer mit erhöhtem CO₂, Sollwert 2011 = 770ppm, Gas über Schlauchsystem von außen in die Kammer eingelassen. K6 = Kontrollkammer ohne zusätzliche CO₂- Begasung, lit. Sollwert für 2011 = 385 ppm.

Zur Darstellung der technischen Abläufe werden im Folgenden gezeigte Daten als 24h- Übersicht gezeigt. Die Messungen erfolgten alle 12 Minuten.

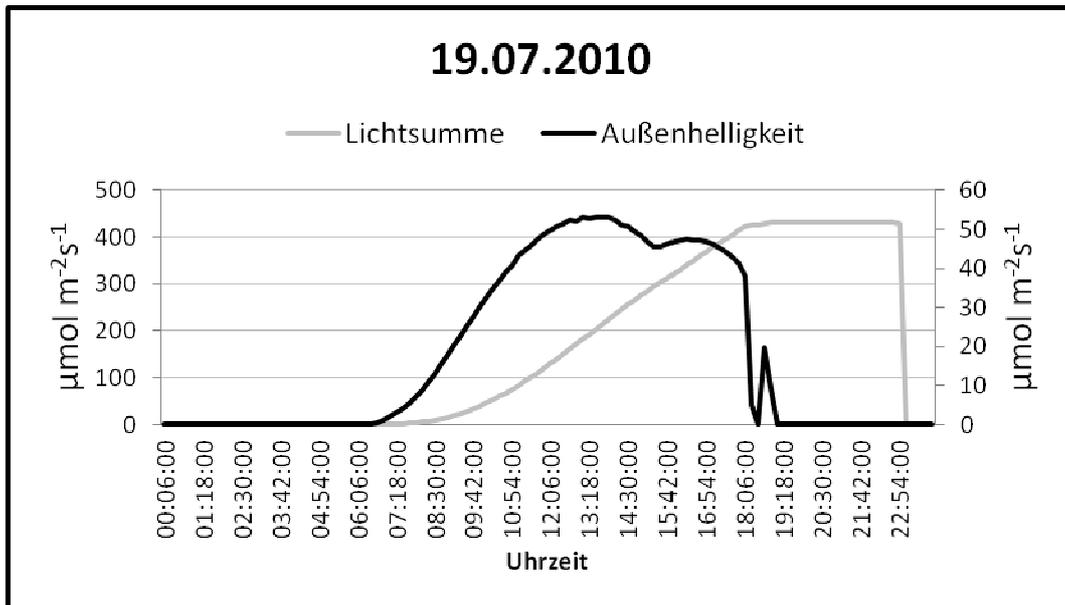


Abb. 5: Darstellung der 24h- Übersicht exogener Lichtfaktoren für den 19. Juli 2010; die Außenhelligkeit schwankt mit der Bewölkung des Tages, die Messungen zur Lichtsumme sind gemittelte Werte, deren Schwankungen dadurch dezimiert wurden. Auch unterliegen die Sensoren zur Lichtsumme nicht der direkten Sonneneinstrahlung.

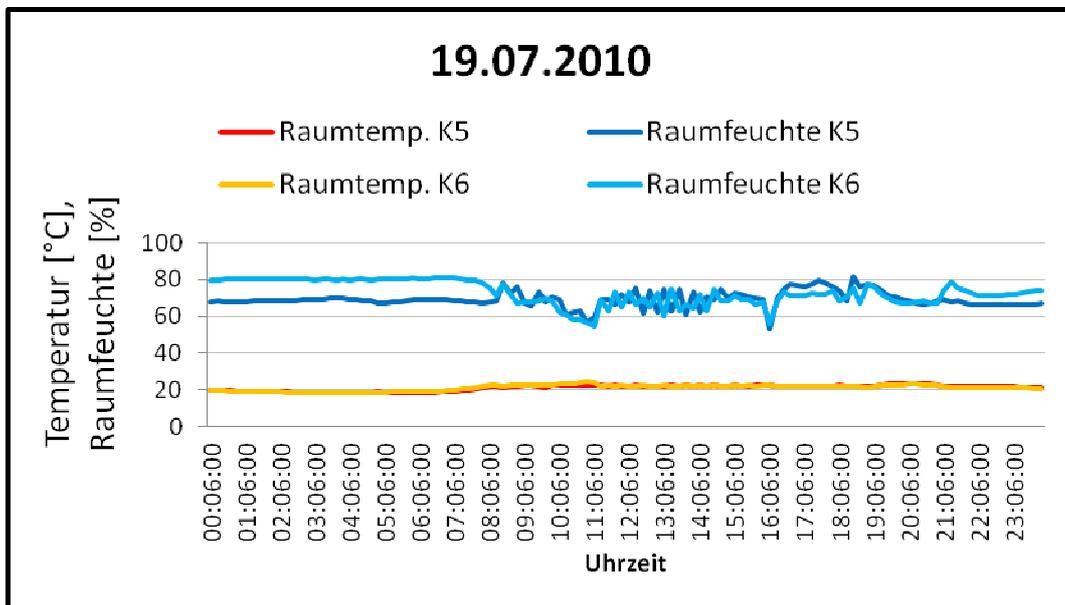


Abb. 6: Graphische Darstellung zur 24h- Messung der Raumtemperatur und Raumfeuchte in den Kammern des Gewächshauses am 19. Juli 2010; die Raumfeuchteschwankungen unterliegen den Schwankungen der Sonneneinstrahlung (mit und ohne Schattierungsblende) und der schwankenden Photosynthese der in den Kammern vorhandenen Versuchspflanzen; K5 = Klimakammer 5 mit erhöhtem CO_2 - Gehalt (Sollwert: 770 ppm); K6 = Kontrollkammer 6 mit normalem CO_2 - Gehalt (Sollwert: 385 ppm).

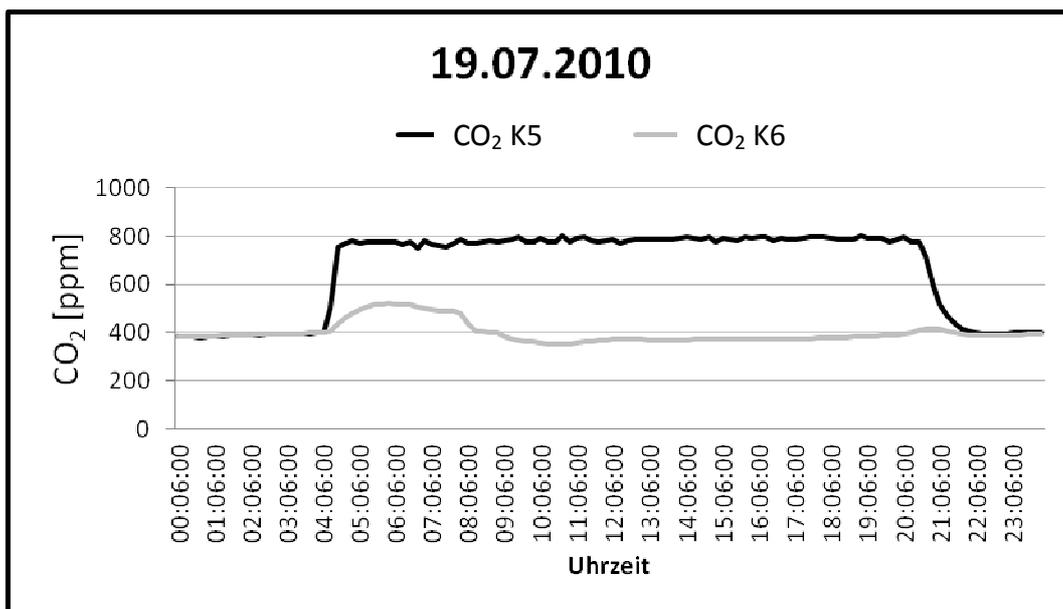


Abb. 7: Graphische Darstellung zur 24h- Übersicht der CO₂- Begasung am 19. Juli 2010. In Klimakammer 5 wird extern über ein Schlauchsystem Kohlendioxid eingebracht, der Sollwert beträgt 770 ppm und wird technisch über die Verknüpfung mit den Sensoren der Klimakammer gehalten. Die Begasung wird über Nacht ausgeschaltet (21:00-04:00 Uhr). Kontrollkammer 6 wird nicht zusätzlich begast und hält sich im Normalwert um 385 ppm.

Klimadaten Saison 2011

Tab. 11: Übersicht der Gesamtklimadaten der Kammern im Gewächshaus zur Saison 2011. Gezeigt sind die Tageszeiträume von 10:30 Uhr bis 18:30 Uhr. Die Saisonübersicht zeigt die gemittelten Wetterdaten dieser Zeiträume von Mai bis September 2011 mit Standardabweichungen; K5 = Klimakammer 5 mit erhöhtem CO₂- Gehalt (Sollwert: 950 ppm); K6 = Kontrollkammer 6 mit normalem CO₂- Gehalt (Sollwert: 385 ppm). Messungen alle 12 Minuten.

Klimadaten 2011	Mai	Juni	Juli	August	September
Außenhelligkeit	18,04 ± 15	21,14 ± 17	14,88 ± 15	16,07 ± 16	15,66 ± 16
Lichtsumme	113,3 ± 79	135,2 ± 90	93,4 ± 85	92,9 ± 82	102,7 ± 81
Raumtemperatur K5	22,24 ± 1,24	22,31 ± 0,99	21,92 ± 0,89	22,09 ± 0,81	22 ± 0,95
Raumfeuchte K5	67,9 ± 14,8	72,2 ± 12,8	77,1 ± 9,4	78,7 ± 10,8	78,4 ± 12,7
CO₂ K5	932,6 ± 126	958,2 ± 21	958,5 ± 14	962,2 ± 13	953,2 ± 25
Raumtemperatur K6	22,52 ± 1,37	22,68 ± 1,25	22,27 ± 1,12	22,31 ± 0,88	22,31 ± 1,15
Raumfeuchte K6	68 ± 12,2	71,8 ± 9,2	73,2 ± 7,9	75,6 ± 8	73,5 ± 10,8
CO₂ K6	383,6 ± 29	382,4 ± 23	382,8 ± 18	838,9 ± 20	401,6 ± 30

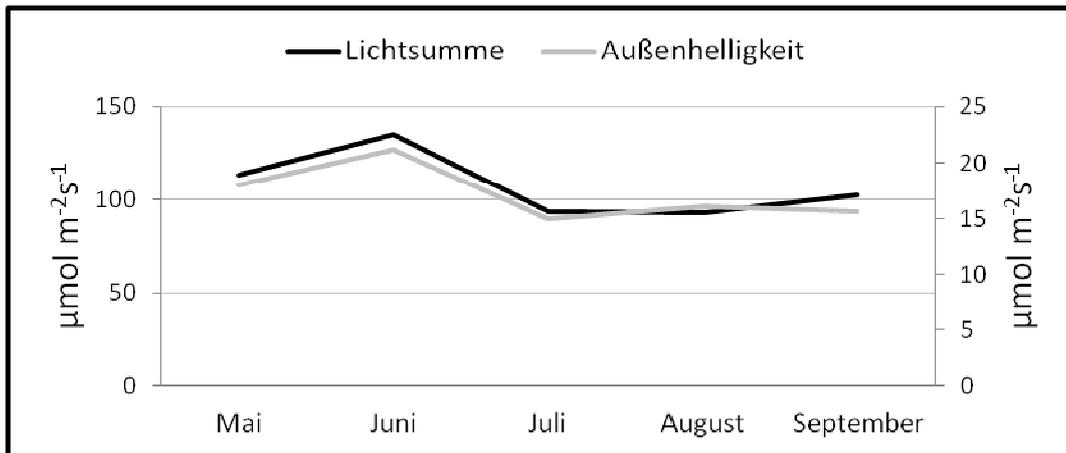


Abb. 8: Graphische Darstellung zu exogenen Lichtfaktoren am Gewächshaus 2011; die Lichtsumme bezieht sich auf die in den Kammern gemessene Lichtintensität in, zu beachten: zur Mittagszeit wurde die Schattierungsblende heruntergefahren; die Außenhelligkeit wird über einen Sensor außen am Haus, K5 = Klimakammer 5 mit erhöhtem CO_2 - Gehalt (Sollwert: 950 ppm); K6 = Kontrollkammer 6 mit normalem CO_2 - Gehalt (Sollwert: 385 ppm).

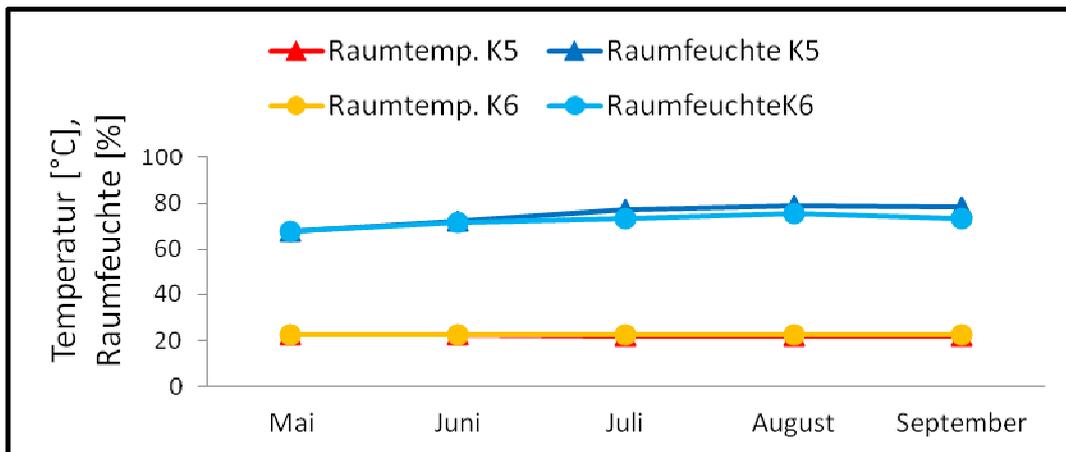


Abb. 9: Graphische Darstellung zur Raumtemperatur und Raumfeuchte in den Kammern des Gewächshauses 2011; Die Temperaturen der Kammern werden über Heizung und Luftkühlung (von außen) stabil gehalten. Die Raumfeuchte wird ebenfalls über Sensoren registriert und über das Einlassen feuchter Luft nach Bedarf stabil gehalten. Die Raumfeuchtezufuhr wurde zum Schutz der technischen Geräte zum Zeitpunkt der Messungen ausgestellt; K5 = Klimakammer 5 mit erhöhtem CO_2 - Gehalt (Sollwert: 950 ppm); K6 = Kontrollkammer 6 mit normalem CO_2 - Gehalt (Sollwert: 385 ppm).

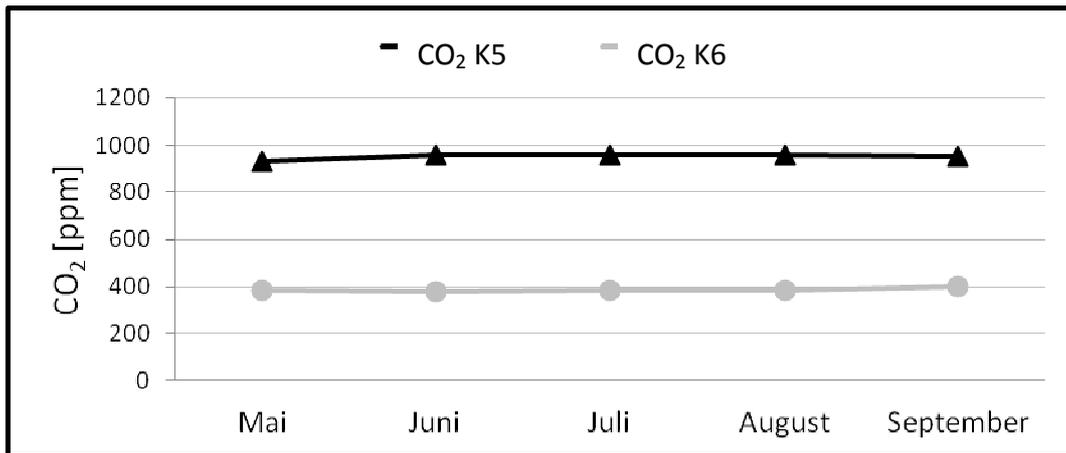


Abb. 10: Graphische Darstellung zum Kohlendioxidgehalt der Luft in den Klimakammern 2011; K5 = Kammer mit erhöhtem CO₂, Sollwert 2011 = 950 ppm, Gas über Schlauchsystem von außen in die Kammer eingelassen. K6 = Kontrollkammer ohne zusätzliche CO₂- Begasung, lit. Sollwert für 2011 = 385 ppm.

Zur Darstellung der technischen Abläufe werden im Folgenden gezeigte Daten als 24h- Übersicht gezeigt. Die Messungen erfolgten alle 12 Minuten.

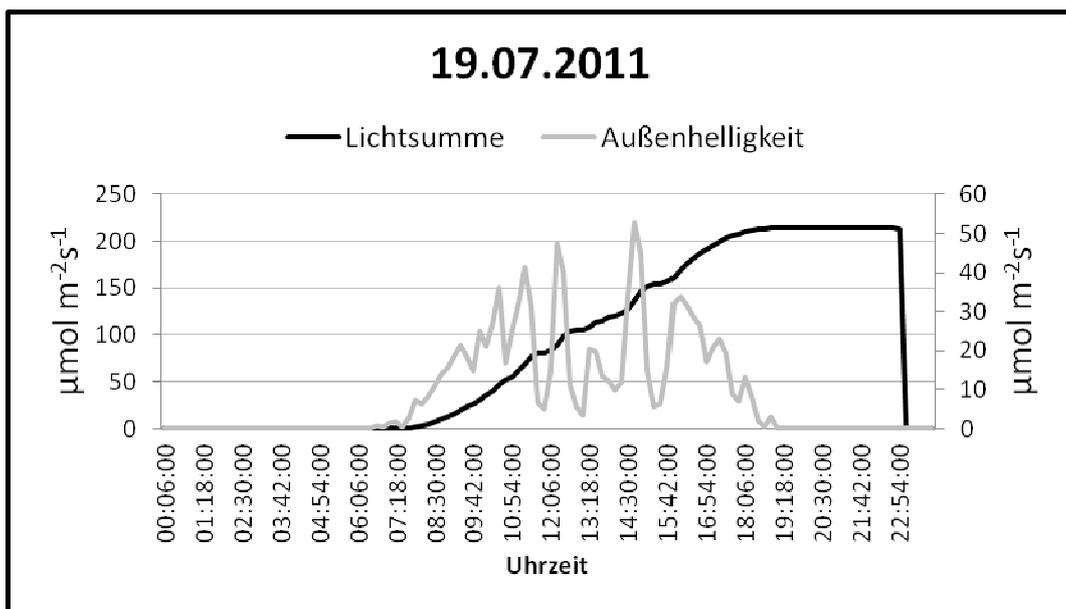


Abb. 11: Darstellung der 24h- Übersicht exogener Lichtfaktoren für den 19. Juli 2011; die Außenhelligkeit schwankt mit der Bewölkung des Tages, die Messungen zur Lichtsumme sind gemittelte Werte, deren Schwankungen dadurch dezimiert wurden. Auch unterliegen die Sensoren zur Lichtsumme nicht der direkten Sonneneinstrahlung.

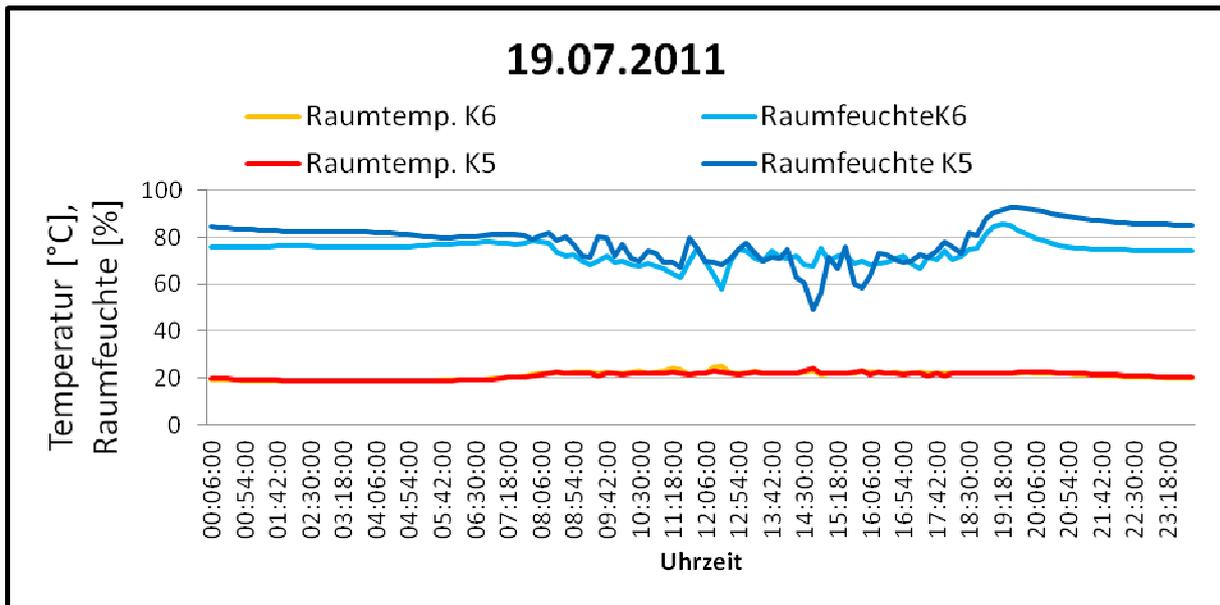


Abb. 12: Graphische Darstellung zur 24h- Messung der Raumtemperatur und Raumfeuchte in den Kammern des Gewächshauses am 19. Juli 2011; die Raumfeuchteschwankungen unterliegen den Schwankungen der Sonneneinstrahlung (mit und ohne Schattierungsblende) und der schwankenden Photosynthese der in den Kammern vorhandenen Versuchspflanzen; K5 = Klimakammer 5 mit erhöhtem CO₂- Gehalt (Sollwert: 950 ppm); K6 = Kontrollkammer 6 mit normalem CO₂- Gehalt (Sollwert: 385 ppm).

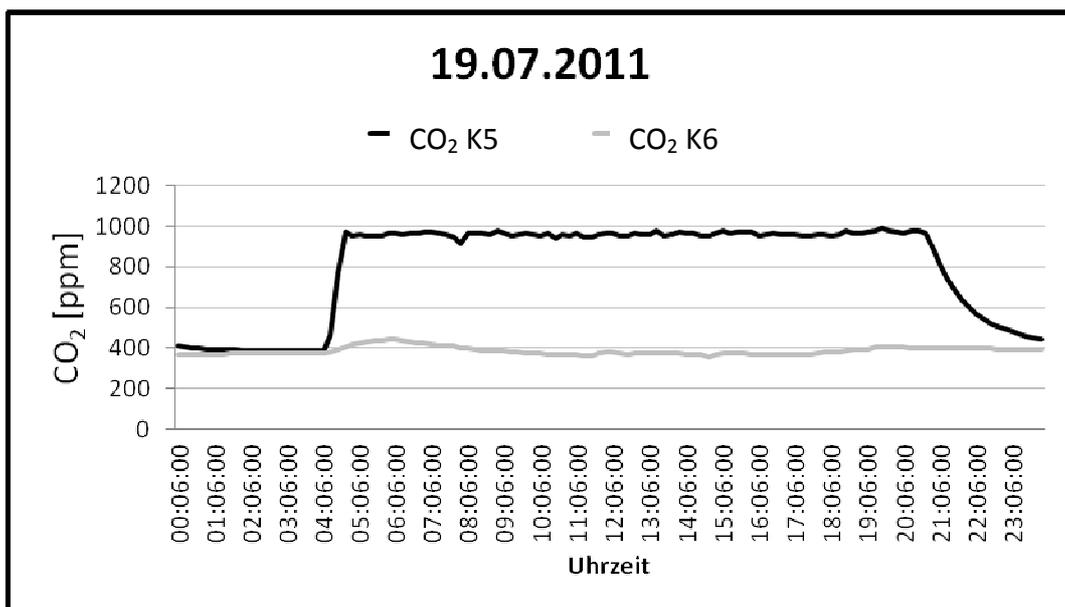


Abb. 13: Graphische Darstellung zur 24h- Übersicht der CO₂- Begasung am 19. Juli 2011. In Klimakammer 5 wird extern über ein Schlauchsystem Kohlendioxid eingebracht, der Sollwert beträgt 950 ppm und wird technisch über die Verknüpfung mit den Sensoren der Klimakammer gehalten. Die Begasung wird über Nacht ausgeschaltet (21:00-04:00 Uhr). Kontrollkammer 6 wird nicht zusätzlich begast und hält sich im Normalwert um 385 ppm.

V.III Wetterdaten Hamburg- Bergedorf 2010 und 2011

Zur Vervollständigung der Daten bezüglich exogener Faktoren konnten für die vorliegende Arbeit aufgezeichnete Messwerte der Wetterstation der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) in Hamburg verwendet werden.

Die Wetterstation befindet sich ca. 700m Luftlinie vom Gewächshaus entfernt in einer Höhe von 40m ü. NN. Dies entspricht nach Angaben von Herrn Peter Krüss nicht den Vorgaben des Deutschen Wetterdienstes, weshalb einige Daten einer Korrektur bedurften. Die Sensoren der Station zeichnen alle 10 Minuten Werte auf. Die für diese Arbeit relevanten Zeiträume beziehen sich auf die Tageswerte zwischen 10:30 Uhr und 18:30 Uhr, in denen im Gewächshaus Messungen an den Versuchspflanzen durchgeführt wurden. Mit Ausnahme der 24h- Übersicht sind alle nachfolgenden Tabellen und Graphen nur auf diese Zeiträume bezogen, Nachtmessungen wurden nicht berücksichtigt.



Abb. 14: Satellitenaufnahme Hamburg-Bergedorf, Google Maps, Abfrage im April 2012; das Gewächshaus in der Leuschnerstraße (A) und die Wetterstation der HAW Hamburg (B) liegen ca. 700m Luftlinie auseinander (roter Pfeil).

Standort der Wetterstation:

HAW Hamburg- Bergedorf (auf dem Dach)

Lohbrügger Kirchstrasse 65

21033 Hamburg;

geographische Länge: 10°11'79,7";

geographische Breite: 53°29'29,9"

Betreuung der Wetterstation und
Herausgabe der Daten:

Dipl. Ing. Peter Krüss,

Department Umwelttechnik,

Labor für Automatisierungstechnik

Lohbrügger Kirchstrasse 65

21033 Hamburg;

peter.kruess@ls.haw-hamburg.de.

Wetterdaten Saison 2010

Tab. 12: Übersicht der Gesamtwetterdaten zur Saison 2010. Die Wetterstation der HAW Hamburg misst alle 10 Minuten, gezeigt sind die Tageszeiträume von 10:30 Uhr bis 18:30 Uhr. Die Saisonübersicht zeigt die gemittelten Wetterdaten dieser Zeiträume von April bis September 2010 mit Standardabweichungen.

Wetterdaten 2010	April	Mai	Juni	Juli	August	September
Temperatur [°C]	11,8 ± 4,1	12,5 ± 3,4	19,5 ± 3,9	24,7 ± 4,8	19,7 ± 3	15,4 ± 2,9
Luftfeuchte [%]	49,9 ± 17,7	60,7 ± 19,6	50,2 ± 15,5	42,5 ± 15,3	64,8 ± 16,8	67 ± 16,6
Luftdruck [hPA]	1018 ± 6,5	1013 ± 6,3	1015 ± 6,2	1015 ± 4,5	1011 ± 5,3	1014 ± 6,7
Niederschlagsmenge [l/m²]	0,004 ± 0,03	0,016 ± 0,15	0,005 ± 0,09	0,004 ± 0,04	0,026 ± 0,15	0,015 ± 0,07
Strahlung [W/sr]	406 ± 216	333 ± 230	522 ± 236	509 ± 214	333 ± 202	258 ± 189
Windgeschwindigkeit [km/h]	4,1 ± 1,5	3,3 ± 1,8	3,2 ± 1,6	3,3 ± 1,4	3,2 ± 1,8	3,7 ± 2
Windrichtung [°]	198 ± 96	206 ± 110	208 ± 103	218 ± 66	204 ± 91	179 ± 96

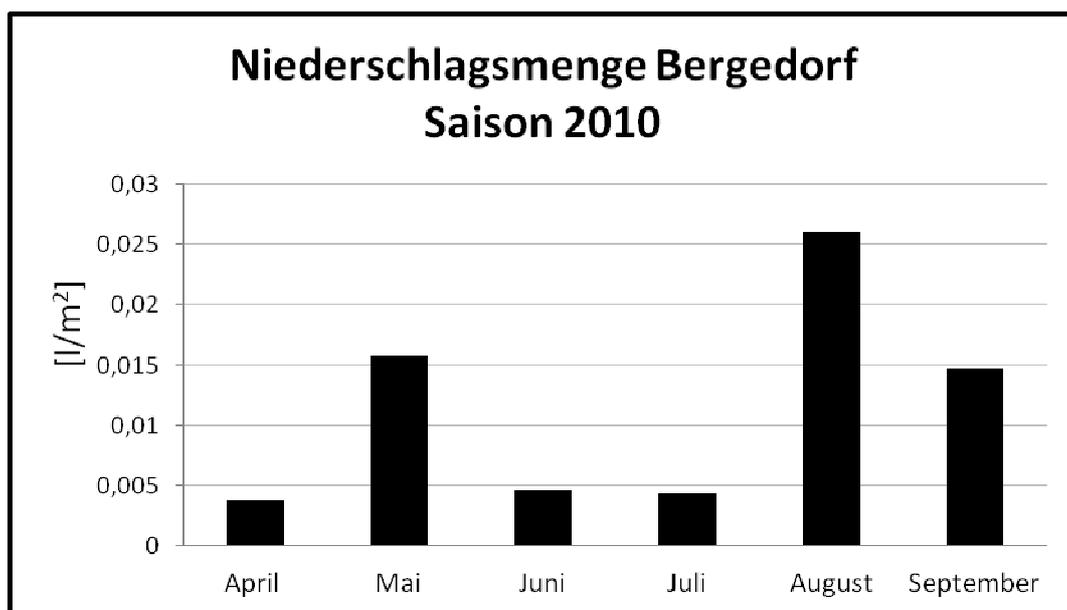


Abb. 15: Graphische Darstellung der Niederschlagsmenge der Saison 2010 in Hamburg- Bergedorf, aufgezeichnet durch die Wetterstation der HAW. Gezeigt sind die gemittelten Tageswerte zwischen 10:30 Uhr und 18:30 Uhr (Datenerhebung alle 10 Minuten) von April bis September 2010.

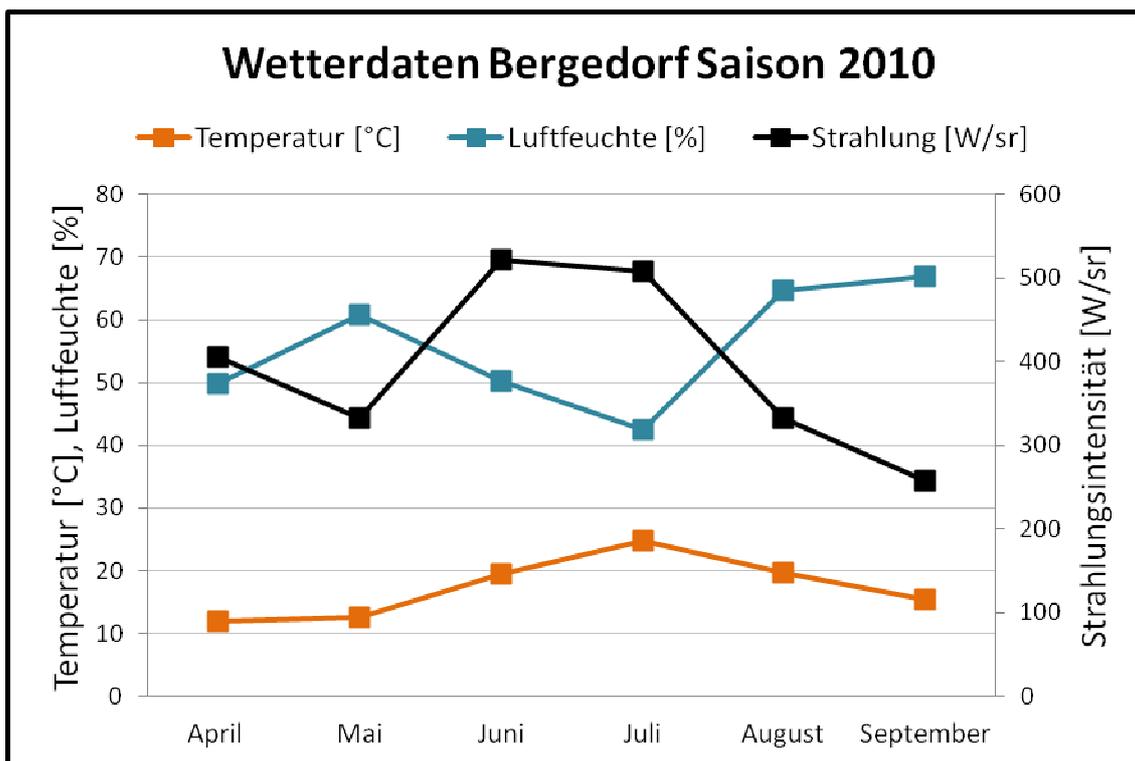


Abb. 16: Graphische Darstellung der Wetterdaten der Saison 2010 in Hamburg- Bergedorf, aufgezeichnet durch die Wetterstation der HAW. Gezeigt sind die gemittelten Tageswerte zwischen 10:30 Uhr und 18:30 Uhr (Datenerhebung alle 10 Minuten) von April bis September 2010.

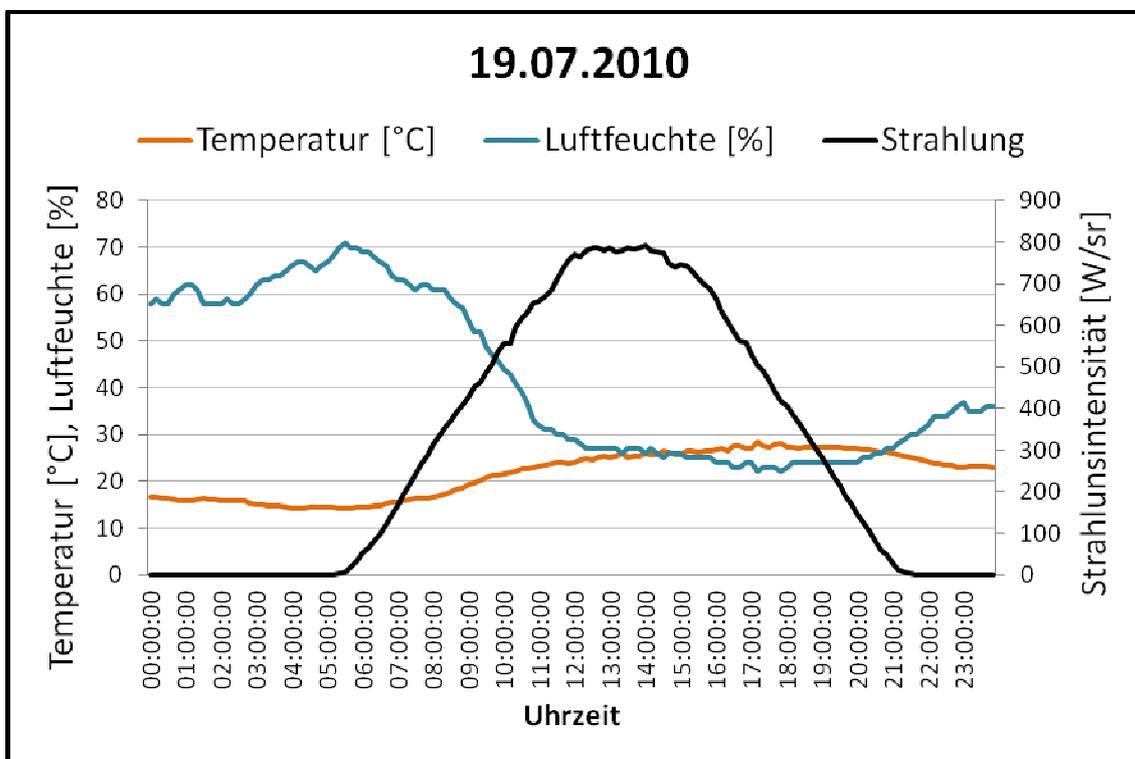


Abb. 17: Graphische Darstellung der Wetterdaten vom 19.07.2010 in Hamburg- Bergedorf, aufgezeichnet durch die Wetterstation der HAW. Gezeigt sind die alle 10 Minuten ermittelten Daten von 0 Uhr bis 23:50 Uhr.

Wetterdaten Saison 2011

Tab. 13: Übersicht der Gesamtwetterdaten zur Saison 2011. Die Wetterstation der HAW Hamburg misst alle 10 Minuten, gezeigt sind die Tageszeiträume von 10:30 Uhr bis 18:30 Uhr. Die Saisonübersicht zeigt die gemittelten Wetterdaten dieser Zeiträume von Mai bis September 2011 mit Standardabweichungen.

Wetterdaten 2011	Mai	Juni	Juli	August	September
Temperatur [°C]	16,9 ± 4,5	19,7 ± 3,8	19,2 ± 3,5	19,4 ± 3,8	18,3 ± 3,3
Luftfeuchte [%]	47,7 ± 19,8	54,9 ± 16,8	62,4 ± 19,3	67,1 ± 15,3	59,6 ± 11,7
Luftdruck [hPA]	1018 ± 5	1015 ± 8	1010 ± 5,8	1012 ± 5	1017 ± 7,2
Niederschlagsmenge [l/m²]	0,013 ± 0,08	0,049 ± 0,3	0,013 ± 0,1	0,032 ± 0,3	0,002 ± 0,02
Strahlung [W/sr]	442 ± 230	457 ± 260	356 ± 237	339 ± 203	301 ± 159
Windgeschwindigkeit [km/h]	4,1 ± 1,8	3,5 ± 1,5	3,8 ± 1,7	3,7 ± 1,9	3,3 ± 2,1
Windrichtung [°]	205 ± 84	221 ± 85	211 ± 82	210 ± 68	207 ± 55

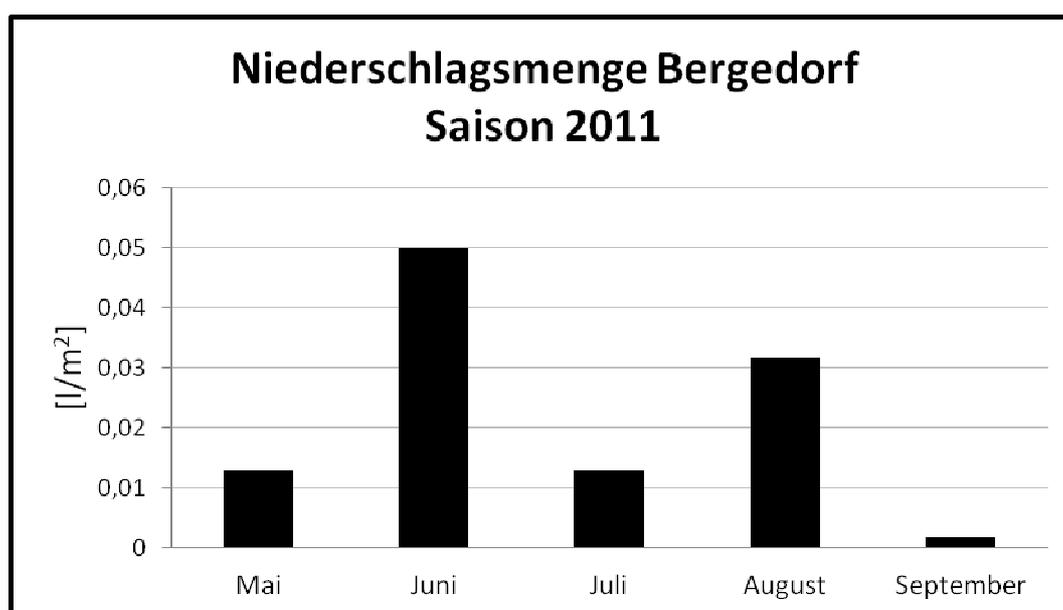


Abb. 18: Graphische Darstellung der Niederschlagsmenge der Saison 2011 in Hamburg- Bergedorf, aufgezeichnet durch die Wetterstation der HAW. Gezeigt sind die gemittelten Tageswerte zwischen 10:30 Uhr und 18:30 Uhr (Datenerhebung alle 10 Minuten) von Mai bis September 2011.

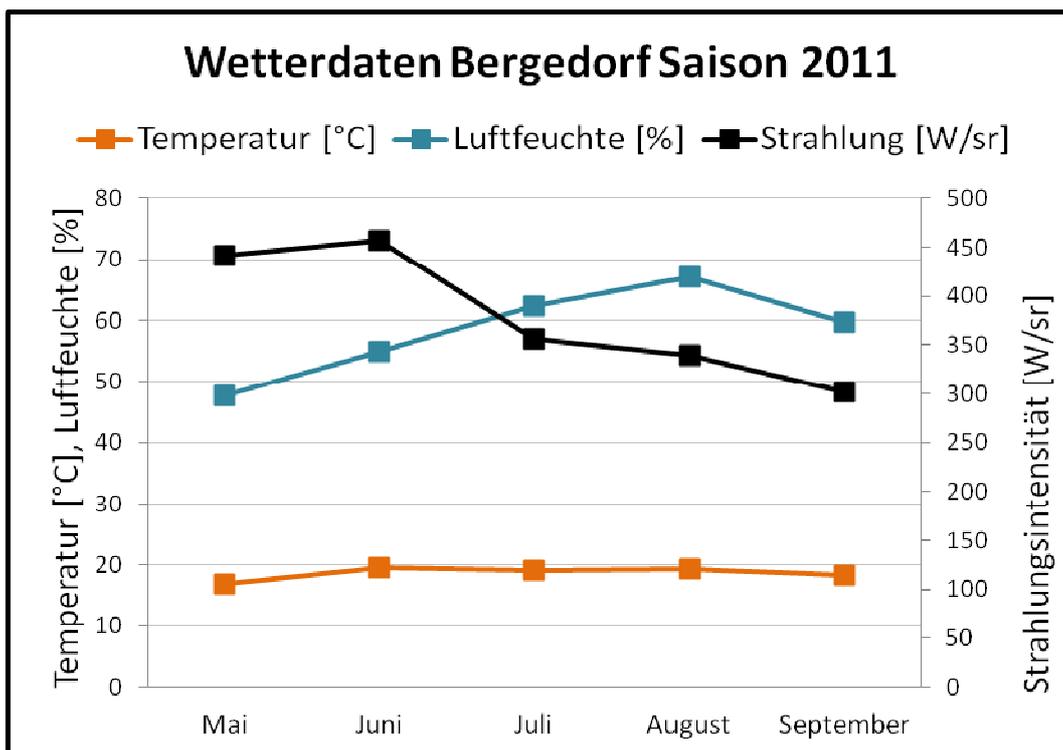


Abb. 19: Graphische Darstellung der Wetterdaten der Saison 2011 in Hamburg- Bergedorf, aufgezeichnet durch die Wetterstation der HAW. Gezeigt sind die gemittelten Tageswerte zwischen 10:30 Uhr und 18:30 Uhr (Datenerhebung alle 10 Minuten) von Mai bis September 2011.

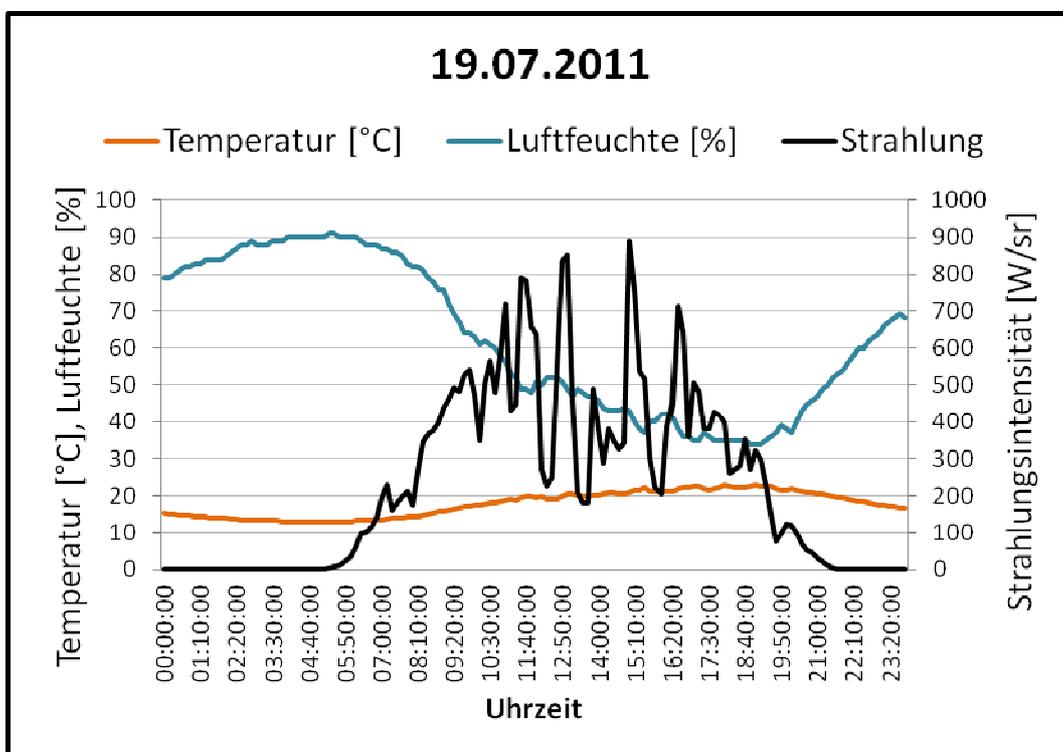


Abb. 20: Graphische Darstellung der Wetterdaten vom 19.07.2011 in Hamburg- Bergedorf, aufgezeichnet durch die Wetterstation der HAW. Gezeigt sind die alle 10 Minuten ermittelten Daten von 0 Uhr bis 23:50 Uhr.

V.IV Begriffsdefinitionen für IMAGING- PAM

Nachfolgender Text entspricht einer Übersetzung aus dem Handbuch der IMAGING- PAM M- Serie, Walz Mess- und Regeltechnik (Effeltrich/ Germany; *Instrument Description and Information for Users*; 2.152/07.06; 1. revised Edition: November 2007; imag-m-series0e_f.doc; Heinz Walz GmbH, 2006; S. 93 ff.)

F_t = current fluorescence yield

(Chlorophyll)Fluoreszenz, die abgegeben wird, wenn Blatt mit aktinischem Licht bestrahlt wird.

F₀ = dark fluorescence yield

Größtmögliche Lichtabsorption im Chlorophyll, die nach Dunkeladaption der Pflanze gemessen wird (alle PSII-Reaktionszentren sind offen und nicht belegt, maximales photochemisches Quenching). Dies bedeutet jedoch nicht zwangsläufig, dass zu diesem Zeitpunkt die Fluoreszenz am niedrigsten ist! Ermitteln des F₀ notwendig für Berechnung des Quenching- Koeffizienten qP.

F = fluorescence yield

Nach Setzen eines Lichtimpulses (SAT) gemessener Fluoreszenz- Parameter (außer Ft).

F_m = maximal fluorescence yield

Größtmögliche (Chlorophyll)Fluoreszenz, die nach Dunkeladaption der Pflanze gemessen wird (alle PSII-Reaktionszentren sind besetzt und geschlossen, minimales nicht- photochemisches Quenching).

F_m' = maximum fluorescence yield

Nach Setzen eines SAT- Lichtimpulses gemessene Fluoreszenz (F_m' < F_m).

F_v/F_m = maximal PSII quantum yield

Maximal mögliche PSII- Effizienz, die nach Dunkeladaption der Pflanze gemessen wird (alle PSII-Reaktionszentren sind offen und nicht belegt, maximales photochemisches Quenching). Berechnung: $F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$.

F_v = variable fluorescence

Sich erhöhende Fluoreszenz nach Setzen von Lichtimpulsen (SAT).

PSII *quantum yield*; am höchsten während der Messungen mittels SAT- Lichtimpulsen; Berechnung: $\Delta F/F_m = F_v/F_m$

Y(II) = effective PSII quantum yield

Nach Setzen des SAT- Lichtimpulses gemessene PSII- Effizienz; Berechnung nach GENTY *et al.* (1989): $Y(II) = (F_m' - F)/F_m'$; Wert- Variation von 0 bis 1, Wert- Definition: Y(II) = 0,5 bedeutet, dass die Hälfte aller von der Pflanze absorbierten Lichtquanten in den Reaktionszentren des PSII chemisch fixiert wurden; die zweite Hälfte wird als Wärmeenergie oder Fluoreszenz abgeleitet; somit ergibt die Summe aller Lichtquanten = 1.

Nach KRAMER *et al.* (2004) zwei weitere Effizienz- Typen zu berechnen: Y(NPQ), Y(NO) = (nicht) regulierte Energieemission am PSII; Y(II) = Energieabsorption; Y(NPQ) und Y(NO) = Energieemission; $Y(II) + Y(NPQ) + Y(NO) = 1$.

Y(NPQ)= quantum yield of regulated energy dissipation

Nach KRAMER *et al.* (2004) zu berechnen: $Y(NPQ) = 1 - Y(II) - 1/(NPQ + 1 + q_L(F_m/F_0 - 1))$. Voraussetzung für die korrekte Berechnung, ist die Anordnung der PSII- Pigmente als „Lake- Model“ (nach Stern- Volmer).

NPQ= nicht- photochemisches Quenching

Emission überschüssiger Lichtenergie über Wärme, zum Schutz des Photosystems vor unkontrollierter Wasserabspaltung (Radikalbildung)

q_L = Messung offener PSII- Reaktionszentren („Lake- Model“)

Y(NO)= quantum yield of non- regulated energie dissipation

Nach KRAMER *et al.* (2004) zu berechnen: $Y(NO) = 1/(NPQ + 1 + q_L(F_m/F_0 - 1))$. Voraussetzung für die korrekte Berechnung, ist die Anordnung der PSII- Pigmente als „Lake- Model“ (nach Stern- Volmer). Ein hoher Y(NO)- Wert bedeutet, dass beide Regulationen (Emission von Energie über Wärme oder Fluoreszenz) zum Schutz des PSII vor überschüssiger Energie nicht effizient genug sind (z.B. weil Pflanze Stress ausgesetzt ist)

NPQ/4= non-photochemical quenching

Stern- Volmer- Quenching; beschreibt die Emission überschüssiger Lichtenergie über die Antennenpigmente der Photosysteme; Indikator für überschüssige Energie; Berechnung: $NPQ = (F_m - F_m')/F_m'$.

qN= coefficient of non- photochemical quenching

Wert variiert zw. 0 (= definiert für Dunkeladaption) und 1 (Quenching der gesamten variablen Fluoreszenz F_v); Berechnung: $q_N = (F_m - F_m')/(F_m - F_0')$; Wert sehr sensitiv gegenüber Veränderungen im Energiestatus der Chloroplasten (Energie- abhängiges Quenching, abhängig vom Öffnungsstatus der Stomata); q_N als Indikator für stressbedingte Limitierungen

qP= coefficient of photochemical quenching

Messung des Gesamtzustandes bezogen auf Öffnung der Photosysteme; Berechnung: $q_P = (F_m' - F)/F_m' - F_0'$

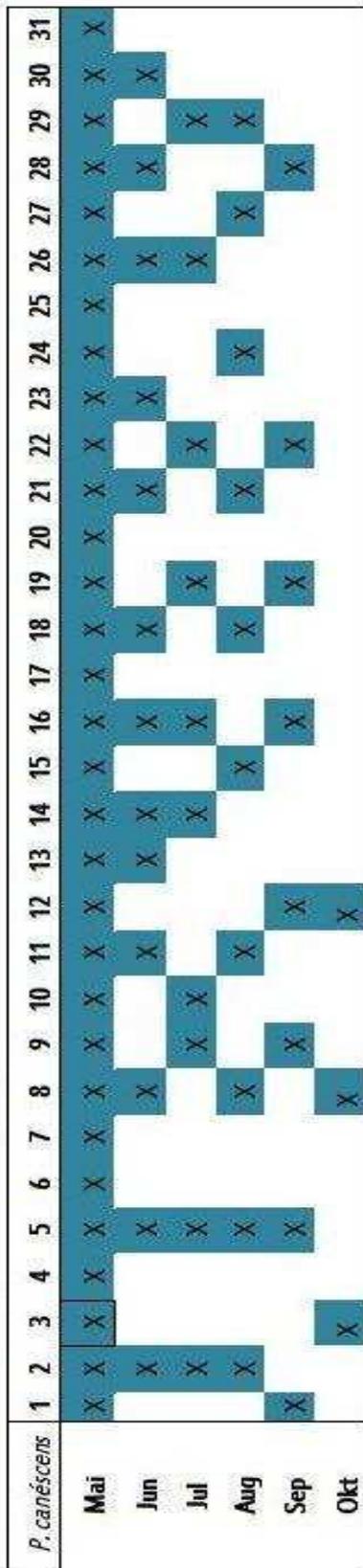
qL= coefficient of photochemical quenching

Messwert zum Status geöffneter PSII- Reaktionszentren (Wert variiert zw. 0 und 1); es gilt: $F_0' < F$ dann $q_L < q_P$

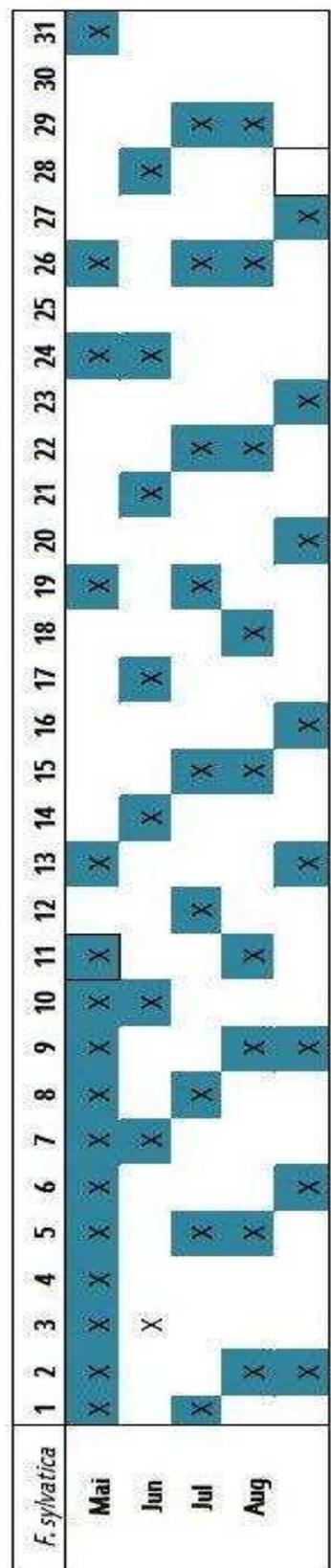
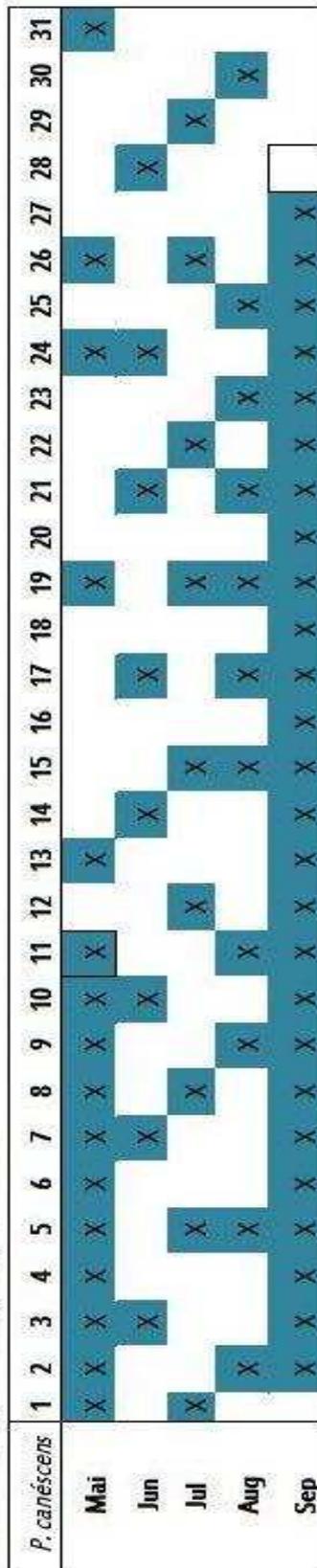
Hintergrundmessungen: alle Image- Darstellungen von Pixeln mit $F_m < 0,048$ werden im Programm IMAGING- WIN als Hintergrund angezeigt (schwarz)

Gießpläne für *P. canescens* und *F. sylvatica* 2010 und 2011

Saison 2010, *P. canescens*, Beginn der CO₂-Begasung: 03.05.2010



Saison 2011, Beginn der Begasung: 11.05.2011



Danksagung

Institutsübergreifend richtet sich mein größter Dank an alle Mitarbeiter für Holzwirtschaft, der Gärtnerei und der Technik für ihr Mitwirken am Gelingen meiner Arbeit.

Herrn Prof. Jörg Fromm möchte ich für die Anleitung und das Korrekturlesen meiner Arbeit vielmals danken. Ihre lobenden Worte haben mich motiviert und nach so manch wirrem Gedankengang meinerseits wieder auf den rechten Weg gebracht.

Frau Dr. Silke Lautner hat mich stets freundlich und zuvorkommend bei meiner Arbeit betreuen können und ich möchte mich bei ihr besonders für die beruhigenden Gespräche bedanken.

Frau Dr. Andrea Olbrich hat mir durch ihr Korrekturlesen am Ende meiner Arbeit viel und wichtig helfen können und durch ihre Freundschaft mein persönliches Befinden innerhalb der Gruppe gesteigert.

Ein besonderer Dank geht nun an Frau Gabriele Lütje. Sie hat mir methodisch oft unter die Arme greifen können und mir durch unzählige persönliche Gespräche meinen Alltag im Institut mehr oder weniger freiwillig belustigend verschönert. Auch ein dickes Dankeschön an Frau Tanja Potsch, die mir ebenfalls durch ihre Freundschaft und viele persönliche Gespräche mich durch meine Zeit am Institut hat begleiten können. Ohne euch beide, der viele Kaffee und den Hundekekse wären wir, Beau und ich, da unten im Keller vermutlich sehr einsam gewesen.

Auch möchte ich mich herzlich bei Frau Ute Moreth bedanken, die mir während meines Aufenthaltes in der AG Magel im ersten Jahr meiner Arbeit hilfreich zur Seite stand und mir ebenso freundschaftlich immer ihre Schulter bot! Alles Gute, Ute!

Nedaaa!! Unsere gemeinsame Zeit werde ich nicht vergessen und ich hoffe, wir bleiben noch lange gute Freunde und in Kontakt! Viel Glück für dich, deine Arbeit und deine weitere Zukunft. Du packst das!!!

Der Gärtnerei des VTI in Bergedorf kann ich nicht genug Danke sagen! Ohne ihre Mithilfe wären meine Bäume vermutlich allein schon durch meine Krachmusik beim Messen jede Woche eingegangen! Vielen Dank für die vielen lieben Gespräche, die starke Mitarbeit an meinem Projekt und das stets offene Ohr für meine Belange!

Ein weiterer Dank gilt meiner ehemaligen Arbeitsgruppe am Botanischen Institut in Klein Flottbek. Ich habe den Kontakt weites gehend halten können und bin sehr froh über die bestehende Freundschaft, die lieben Gespräche und guten Ratschläge. Ohne Prof. HokusPokus und sein „Zieh`s durch!“ wäre die Arbeit so nicht fertig geworden! Danke Udo!

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich für die Geduld, das Nachsehen und ihre Liebe!

Juhu, geschafft! :P