

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Ökophysiologie der Pflanzen

Ozонаufnahme als Funktion der Kronentranspiration in Bestandesbäumen
(*Fagus sylvatica* L. und *Picea abies* (L.) Karst.):
Integrative Kopplung durch den Stamm-Xylemfluss

Ursula Irmingard Metzger

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. R. Schopf

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. R. Matyssek
2. Univ.-Doz. Dr. G. Wieser
(Leopold-Franzens-Universität Innsbruck/ Österreich)

Die Dissertation wurde am 19.05.2011 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 01.08.2011 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	VI
Zusammenfassung	IX
Abstract	XII
1 Einleitung	1
1.1 Ozon	1
1.2 Wirkungsweise von Ozon auf Altbäume	4
1.3 Grenzwertkonzepte	8
1.4 Aufgabenstellung/Hypothesen	10
2 Material und Methoden	14
2.1 Versuchsgelände Kranzberger Forst	14
2.2 Experimentelles Design	16
2.3 Phänologie und Seneszenz	19
2.4 Biometrie	21
2.4.1 <i>Ermittlung der spezifischen Blattfläche</i>	21
2.4.2 <i>Blattoberflächen- und Kronenoberflächenberechnung</i>	22
2.5 Meteorologische Daten	22
2.6 Gaswechselformung	23
2.6.1 <i>Walz-Gaswechselformung (Astküvette)</i>	24
2.6.2 <i>CIRAS-2 Porometer</i>	27
2.7 Xylemflussmessung	28
2.7.1 <i>Xylemflussmessung im Stamm (Tissue Heat Balance)</i>	29
2.7.2 <i>Xylemflussmessung auf Astebene (Stem Heat Balance)</i>	33
2.8 Ozonaufnahmeberechnung	34
2.8.1 <i>Xylemfluss-Verfahren</i>	34
2.8.2 <i>Gaswechselformung (Astküvetten)</i>	37
2.8.3 <i>Ozonaufnahme-Modell</i>	38
2.9 Statistische Auswertung	42
3 Ergebnisse	45
3.1 Meteorologie	45
3.2 Phänologie	49
3.3 Biometrische Daten	52
3.4 Xylemflussmessung	55
3.4.1 <i>Xylemflussmessung im Stamm (THB)</i>	55
3.4.1.1 <i>Transpiration</i>	55
3.4.1.2 <i>Kronenleitfähigkeit für Wasserdampf</i>	62
3.4.1.3 <i>Ozonaufnahme</i>	65
3.4.2 <i>Xylemflussmessung auf Astebene (SHB)</i>	72

3.4.2.1	Transpiration	72
3.4.2.2	Leitfähigkeit für Wasserdampf	74
3.4.2.3	Ozонаufnahme	77
3.5	Gaswechselfmessung	79
3.5.1	<i>Astküvette</i>	79
3.5.1.1	Transpiration	79
3.5.1.2	Leitfähigkeit für Wasserdampf	81
3.5.1.3	Ozонаufnahme	82
3.5.2	<i>Ciras-2 Porometer</i>	83
3.5.2.1	Transpiration	83
3.5.2.2	Photosynthese	85
3.5.2.3	Lichtabhängigkeitskurven	86
3.5.2.4	Stomatäre Leitfähigkeit für Wasserdampf	90
3.5.2.5	Ozонаufnahme	92
3.6	Ozонаufnahme-Modell nach Emberson und Nunn	94
3.6.1	<i>Leitfähigkeit für Wasserdampf</i>	94
3.6.2	<i>Ozонаufnahme</i>	95
3.7	Vergleich von Tagen mit unterschiedlicher Witterung	96
3.7.1	<i>Buche</i>	96
3.7.2	<i>Fichte</i>	99
3.8	Methodenvergleich	107
3.8.1	<i>Xylemflussmessung im Stamm versus Gaswechselfmessung in der Astküvette</i>	107
3.8.1.1	Transpiration	107
3.8.1.2	Leitfähigkeit für Wasserdampf	109
3.8.1.3	Ozонаufnahme	111
3.8.2	<i>Xylemflussmessung im Stamm versus Ozонаufnahme-Modell</i>	112
3.8.2.1	Leitfähigkeit für Wasserdampf	112
3.8.2.2	Ozонаufnahme	114
4	Diskussion	118
4.1	Entwicklung der Phänologie unter Ozoneinfluss	118
4.2	Transpiration und deren Reaktion auf erhöhte Ozonkonzentration	119
4.3	Leitfähigkeit für Wasserdampf und deren Reaktion auf erhöhte Ozonkonzentration	122
4.4	Ozонаufnahme in den beiden Ozonregimen	123
4.5	Methodenvergleich	125
4.5.1	<i>Xylemflussmessung im Stamm versus Gaswechselfmessung in der Astküvette</i>	125
4.5.2	<i>Xylemflussmessung im Stamm versus Ozонаufnahme-Modell</i>	127
4.6	Buche und Fichte: Gesamtbetrachtung	130
4.7	AOT40, SUM0 und COU	135
5	Folgerungen & Ausblick	140
5.1	Folgerungen	140
5.2	Ausblick	144
6	Abbildungsverzeichnis	146
7	Tabellenverzeichnis	149

8	Literaturverzeichnis	152
	Publikationen und Präsentationen.....	166
	Danksagung.....	168

Abkürzungsverzeichnis

1xO ₃	unverändertes Ozonregime am Waldstandort Kranzberger Forst (Referenz)
2xO ₃	mittels Free-Air Ozonbegasung experimentell verdoppeltes Ozonregime des Waldstandortes Kranzberger Forst bei Begrenzung der Ozonkonzentration auf maximal 150 nl O ₃ l ⁻¹
A	Netto-CO ₂ -Assimilationsrate in der Walz-Gaswechselküvette [μmol CO ₂ min ⁻¹ Küvette ⁻¹]
A _{korr}	korrigierte Splintfläche [cm ²]
A _{Laub-Bu}	Kronen(Laub)oberfläche Buche [m ²]
A _{Laub-Fi}	Kronen(Laub)oberfläche Fichte [m ²]
A _{max}	maximale Photosyntheserate auf Blattebene [μmol m ⁻² s ⁻¹]
AOT40	A ccumulated O ₃ E xposure A bove T hreshold of 40 nl O ₃ l ⁻¹ [μl l ⁻¹ h]
BHD	Brusthöhendurchmesser [cm]
Bu	Buche
C	Kohlenstoff
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
COU _m	C umulative O zone U ptake; Monatliche kumulative Ozonaufnahme [mmol m ⁻² monat ⁻¹]
COU _v	kumulative Ozonaufnahme in der Vegetationsperiode [mmol m ⁻² veg.periode ⁻¹]
COU _{b_m}	monatliche kumulative Ozonaufnahme auf Astebene [mmol m ⁻² monat ⁻¹]
COU _{b_v}	kumulative Ozonaufnahme in der Vegetationsperiode auf Astebene [mmol m ⁻² veg.periode ⁻¹]
COU _{k_m}	monatliche kumulative Ozonaufnahme Astküvette [mmol m ⁻² monat ⁻¹]
COU _{k_v}	kumulative Ozonaufnahme in der Vegetationsperiode Astküvette [mmol m ⁻² veg.periode ⁻¹]
COU _{m_m}	monatliche kumulative Ozonaufnahme Modell [mmol m ⁻² monat ⁻¹]
COU _{m_v}	kumulative Ozonaufnahme in der Vegetationsperiode Modell [mmol m ⁻² veg.periode ⁻¹]
doy	d ay o f y ear, Tag im Jahr
Eb	Transpirationsrate auf Asteben [ml m ⁻² min ⁻¹]
Ec	Kronentranspirationsrate [ml m ⁻² min ⁻¹]
Ek	Transpirationsrate Astküvette [ml m ⁻² min ⁻¹]
EI	Transpirationsrate auf Blattebene [mmol m ⁻² s ⁻¹]
EI _{max}	maximale Transpirationsrate auf Blattebene [mmol m ⁻² s ⁻¹]
F	Xylemfluss [ml min ⁻¹]
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoff
Fi	Fichte
FO ₃	Ozonfluss [nmol m ⁻² s ⁻¹]
FO ₃	Ozonfluss auf Blattebene [nmol m ⁻² s ⁻¹]
gb	Leitfähigkeit für Wasserdampf auf Astebene [mmol m ⁻² s ⁻¹]
Gc	Kronenleitfähigkeit [mmol m ⁻² s ⁻¹]

gH ₂ O _{bl}	Blattleitfähigkeit für Wasserdampf [mmol H ₂ O min ⁻¹]
gk	Leitfähigkeit für Wasserdampf Astküvette [mmol m ⁻² s ⁻¹]
gl	Leitfähigkeit für Wasserdampf auf Blattebene [mmol m ⁻² s ⁻¹]
GLM	General Linear Modell
gm	Leitfähigkeit für Wasserdampf berechnet nach dem Ozonaufnahme-Modell [mmol m ⁻² s ⁻¹]
g _{max}	maximale Leitfähigkeit auf Blattebene [mmol m ⁻² s ⁻¹]
gO ₃	stomatäre Leitfähigkeit für Ozon [mmol O ₃ m ⁻² s ⁻¹]
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IR	Infrarot Bereich der Strahlung 750 nm - 1400 nm
LWF	Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
K	Flussindex, dimensionslos
n	Anzahl
N	Norden
NMVOG	Non Methane Volatile Organic Compounds
NN	Höhenangabe über Normal Null [m]
NO	Stickstoffmonoxid
NO _x	Stickstoffoxide
Ø	Durchmesser
O ₃	Ozon [nl O ₃ l ⁻¹]
P	Luftdruck [kPa]
PAR	Photosynthetic Active Radiation [µmol m ⁻² s ⁻¹]
ph _{eff}	photosynthetische Effizienz auf Blattebene [Steigung zwischen A und PPFD ≤ 80 mmol m ⁻² s ⁻¹]
Pn	Photosyntheserate auf Blattebene [µmol m ⁻² s ⁻¹]
PPFD	Photosynthetisch wirksame Photonenflussdichte [µmol Photonen m ⁻² min ⁻¹]
Q	Safffluss [kg H ₂ O]
R ²	Bestimmtheitsmaß
ROS	Reactive Oxygen Species; Reaktive Sauerstoffspezies; Sauerstoffradikale und Wasserstoffperoxid
SE	Standard Error; Standardfehler
sha	shade; Schattenast bzw. -krone
SHB	Stem Heat Balance, Xylemflussmessung an Messästen nach Cermak et al. (2004)
SLA	Specific Leaf Area, Spezifische Blattfläche [m ² kg ⁻¹]
SUM0	Sum of Ozone > 0, akumulierte Ozon-Dosis über einen Beobachtungszeitraum [µl l ⁻¹ h]
sun	sun; Sonneast bzw. -krone
THB	Tissue Heat Balance, Xylemflussmessung im Stamm nach Granier (1985)
TUM	Technische Universität München
u	Flussdichte [ml cm ⁻² min ⁻¹]
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
UV	Ultraviolettes Licht

Abkürzungsverzeichnis

UV-A	Ultraviolette Strahlung, Wellenlängenbereich von 320 - 400 nm
UV-B	Ultraviolette Strahlung, Wellenlängenbereich von 280 - 320 nm
VPD	V apor P ressure D eficit, Wasserdampfsättigungsdefizit (Wasserdampfdruckdefizit der Umgebung) [hPa]
WUE	W ater- U se E fficiency, photosynthetischer Wassernutzungskoeffizient [mmol mol^{-1}]
Δw	Differenz der Wasserdampfmolenbrüche zwischen Blatt und Umgebungsluft; luftdruckbezogenes VPD [Pa kPa^{-1}]
ψ	Wasserpotential [bar]

Zusammenfassung

In vorliegender Studie wurde die Ozonaufnahme von adulten Waldbäumen untersucht.

Troposphärisches Ozon kann in erhöhter Konzentration aufgrund seiner oxidierenden Wirkung Schäden in Bäumen verursachen und zu einer Reduktion von Photosynthese und Wachstum führen. Zum Schutz von Pflanzen hat die Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UNECE) das Grenzwertkonzept AOT40 (**A**ccumulated **O**₃ exposure above **T**hreshold of **40** nl O₃ l⁻¹) aufgestellt. Dieses Konzept gibt die externe Ozonkonzentration wieder, lässt jedoch keine Rückschlüsse auf die von den Bäumen über die Stomata aufgenommene Menge von Ozon (= Ozon-Dosis) zu. Daher soll AOT40 nach Maßgabe der UNECE durch ein Ozon-Dosis-Konzept ersetzt werden, das Aussagen zur physiologisch relevanten Ozonaufnahme von Bäumen treffen kann.

Eine Möglichkeit zur Berechnung der Ozon-Dosis ist das Ozonaufnahme-Modell¹, das die Ozonaufnahme von Bäumen auf Basis von Blattleitfähigkeiten berechnet, welche mit diskreten Porometermessungen erhoben werden. Dieses Modell tendiert allerdings zu einer Überschätzung der Ozonaufnahme, da es Luftgrenschichten im Kronenraum, die die Ozonaufnahme limitieren, nicht berücksichtigt.

Um die Ozon-Dosis gesamter Bäume unter Luftgrenschichteinfluss über eine Vegetationsperiode hinweg quantifizieren zu können, wurde in vorliegender Studie als Methode die Xylemflussmessung im Stamm angewandt. Durch die kontinuierliche Messung des Xylemflusses im Stamm wird der gesamte Wasserverbrauch der Bäume ermittelt. Bei gleichzeitiger Erfassung des luftdruckbezogenen Wasserdampfsättigungsdefizits lässt sich damit die Kronenleitfähigkeit für Wasserdampf und Ozon berechnen. Durch die Kenntnis der Ozonkonzentration auf Kronenebene kann dann die diffusive Ozonaufnahme des gesamten Baumes ermittelt werden.

In vorliegender Studie wurde auf diese Weise die Menge an Ozon, die von adulten Buchen (*Fagus sylvatica* L.) und Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.) eines bewirtschafteten, ca. 60-jährigen Waldbestandes in der Versuchsanlage Kranzberger Forst/Freising (DE) während der Vegetationsperiode aufgenommen wurde, quantitativ erfasst und mit den auf Basis des Ozonaufnahme-Modells berechneten Ozonaufnahme-Werten verglichen. Zur Validierung wurde der Gaswechsel mit Hilfe von Astküvetten gemessen und aus diesen Daten ebenfalls Leitfähigkeit und Ozonaufnahme berechnet. Darüber hinaus wurde der Einfluss einer erhöhten Ozonkonzentration auf Transpiration, Leitfähigkeit für Wasserdampf und die Ozonaufnahme von Buchen und Fichten während der Vegetationsperiode im Jahr 2006 untersucht.

¹Emberson et al. (2000a), Nunn et al. (2005)

Folgende Hypothesen wurden überprüft:

- 1) Ein Einfluss von Luftgrenzschichten auf die Ozonaufnahme ist feststellbar, d.h. eine minimierte Luftgrenzschicht äußert sich in einer Überschätzung der Ozonaufnahme der Bäume.
- 2) Die Ozonaufnahme der Buchen (pro m² projizierter Lauboberfläche) fällt in beiden Ozonregimen deutlich höher aus, als die der Fichten (pro m² gesamter Nadeloberfläche).
- 3) Ein Ozoneffekt ist sowohl in den phänologischen Parametern (Austrieb und Seneszenz), als auch in den physiologischen Parametern (Transpiration und Leitfähigkeit) existent. Dieser zeigt sich in einem verzögerten Blattaustrieb, einer beschleunigten herbstlichen Seneszenz und in einer Reduktion der Transpiration und Leitfähigkeit unter erhöhter Ozonkonzentration.

Auch wurde ein möglicher Einfluss unterschiedlicher Kronenzonen (Sonnen- und Schattenkrone) und unterschiedlicher Witterung (sonniges Wetter versus humides Wetter) auf die erhobenen Parameter untersucht.

Für die Versuchsdurchführung wurde eine „Free-Air“ Ozon-Begasungsanlage im Kranzberger Forst/Freising (DE) genutzt, mit welcher die Ozonkonzentration, ausgehend vom Referenzwert der Umgebungsluft, auf maximal 150 nl O₃ l⁻¹ verdoppelt wurde.

Durch den Vergleich der Methoden Xylemflussmessung im Stamm und Ozonaufnahmeberechnung auf Basis der Gaswechselformel in der Astküvette wurde ein Einfluss der Luftgrenzschichten auf die Ozonaufnahme der Buchen deutlich. Dieser äußerte sich in signifikant erniedrigten Ozonaufnahme-Werten bei der Xylemflussmessung im Stamm. Hypothese 1 wurde für Buche daher bestätigt. Für die Fichten existierte ein solcher Luftgrenzschichteneinfluss nicht, weswegen Hypothese 1 abgelehnt wurde.

Der Vergleich der Methoden Xylemflussmessung im Stamm und Ozonaufnahme-Modell konnte keinen konsistenten Luftgrenzschichteneinfluss für Buche und Fichte bei trocken warmer Witterung bestätigen. Bei humider Witterung war ein Luftgrenzschichteneinfluss nicht existent: mit Hilfe der Xylemflussmessung im Stamm in Anwesenheit der Luftgrenzschichten wurden höhere Ozonaufnahme-Werte ermittelt als mit Hilfe des Ozonaufnahme-Modells. Daher wurde für den Vergleich der Methoden Xylemflussmessung im Stamm mit dem Ozonaufnahme-Modell Hypothese 1 für beide Baumarten abgelehnt.

Darüber hinaus unterschätzte das Ozonaufnahme-Modell die nachts potentielle Ozonaufnahme und die Ozonaufnahme im Frühjahr und Herbst. Transpiration, Leitfähigkeit für Wasserdampf und Ozonaufnahme waren bei den Buchen – bezogen auf die projizierte Blattoberfläche – signifikant höher als bei den Fichten. Somit konnte Hypothese 2 bestätigt werden. Unter der erhöhten Ozonkonzentration war die Kronentranspiration und Kronenleitfähigkeit für Wasserdampf der Buchen und Fichten im Vergleich zur Ozonkonzentration der Umgebungsluft reduziert. Da diese Reduktion für beide Baumarten

jedoch nicht signifikant war, wurde Hypothese 3 abgelehnt. Im Vergleich zu sonnigem Wetter führte Regen zu einer signifikanten Verringerung der Kronentranspiration, einer Erhöhung der Kronenleitfähigkeit für Wasserdampf und einer Verringerung der Ozonaufnahme.

Auf den Blatt-Austrieb der Buchen hatte die erhöhte Ozonkonzentration keinen signifikanten Einfluss, weswegen Hypothese 3 diesbezüglich abgelehnt wurde. Auch für die Fichten wurde Hypothese 3 abgelehnt, aber nicht weil der Austrieb unter der erhöhten Ozonkonzentration verzögert, sondern weil er signifikant beschleunigt war. Auf die Seneszenz hatte die erhöhte Ozonkonzentration im Jahr 2006 keinen signifikant beschleunigenden Einfluss.

Die Validierung des Ozonaufnahme-Modells mit Hilfe der Xylemflussmessung im Stamm zeigte, dass Ersteres konzeptuelle Schwierigkeiten hat, die sich in einer unzureichenden Darstellung des Grenzschichteinflusses und einer unzureichenden Parametrisierung der stomatären Leitfähigkeit zeigen.

Dass die Xylemflussmessung im Stamm zur Ermittlung der Ozon-Dosis praxistauglich ist, konnte mit vorliegender Studie nachgewiesen werden. Ein Einsatz dieser Methode zur Validierung bisheriger Ozonaufnahme-Modelle ist ebenfalls möglich.

In der Gesamtschau der Ergebnisse ist festzuhalten, dass die Xylemflussmessung im Stamm aufgrund der inhärenten Erfassung der Luftgrenzschichten die derzeit geeignetste Methode ist, um die Ozon-Dosis von Waldbäumen zu quantifizieren.

Die Befunde dieser Studie haben eine Voraussetzung dafür geschaffen, dass auf politischer Ebene bei der Abschätzung eines Ozon-Risikos für Waldbäume vom Expositions-Konzept (AOT40) auf das Ozon-Dosis-Konzept umgestellt werden kann.

Abstract

In this study ozone uptake of adult forest trees was investigated.

Increased concentrations of tropospheric ozone can cause oxidative stress and injury to trees, accompanied by reduction in photosynthesis and growth. For plant protection, the **United Nations Economic Commission for Europe (UNECE)** established the threshold concept AOT40 (**A**ccumulated **O**zone exposure over a **T**hreshold of **40** ppb). This concept reflects the external ozone concentration, however it does not allow for conclusions on the actual amount of ozone (= ozone dose) taken in by the trees through their stomata. According to UNECE, AOT40 shall therefore be replaced by an ozone dose concept representing the physiologically meaningful ozone uptake of trees.

For the calculation of the ozone dose, an ozone uptake model¹ was used, which is calculating the ozone uptake of trees on the basis of leaf stomatal conductances, as derived from discrete porometer measurements. However, this model tends towards overestimating the ozone uptake, as it does not account for the canopy-level boundary layers, which limit the ozone uptake.

In order to quantify the ozone dose of entire trees under prevailing boundary layer conditions over a growing season, the method of xylem sap flow measurement in the trunk was employed. The entire water use of the trees is determined by continuous measurement of the xylem sap flow in the trunk. By simultaneous determination of the water vapour pressure deficit of air the crown conductance for water vapour and ozone is calculated. By knowing the ozone concentration at crown level the diffusive ozone uptake of the entire tree is determined.

In this study the amount of ozone uptake by adult beech (*Fagus sylvatica* L.) and spruce trees (*Picea abies* L. Karst.) of a managed 60-year-old forest stand at Kranzberger Forst/Freising was therefore quantitatively assessed throughout the growing season and compared with modelled uptake. For validation, leaf gas exchange was measured deriving conductance for water vapour and ozone uptake from this data base. On these grounds the influence of increased ozone concentration on the transpiration, conductance for water vapour and ozone uptake of beech and spruce trees was examined. The following hypotheses were assessed:

- 1) Influence of boundary layers on the ozone uptake is detectable, i.e., low boundary layer causes overestimation of the ozone uptake by the trees.
- 2) The ozone uptake of beech is higher under both ozone regimes per unit of stomata-bearing leaf area than that of spruce.

¹Emberson et al. (2000a), Nunn et al. (2005)

3) Ozone affects the phenology (bud break and autumnal leaf senescence) as well as physiological parameters (transpiration and conductance for water vapour). Effects are delayed bud break, accelerated autumnal leaf senescence, reduced transpiration and conductance under increased O₃ concentrations.

Differential effects between canopy positions (sun crown and shade crown) and contrasting weather conditions (dry versus humid) were examined.

Investigations were conducted using the free air canopy ozone fumigation system at Kranzberger Forst/Freising where the ambient ozone regime was experimentally enhanced to max. 150 nl O₃ l⁻¹.

An influence of boundary layers on the ozone uptake of beech was detectable when comparing the outcome from the xylem sap flow method with the ozone uptake calculation based on leaf gas exchange. Boundary layers reduced the ozone uptake as reflected by the xylem sap flow method. Hypothesis 1 was confirmed for beech. For spruce this effect did not exist, thus hypothesis 1 was rejected for spruce.

Comparison of the xylem sap flow method with the ozone uptake model did not confirm any consistent influence of the boundary layers for beech and spruce under dry and warm conditions. Under humid conditions this influence did not exist: Contrasting with the ozone uptake model, the xylem sap flow method in the presence of boundary layers yielded higher ozone uptake under humid conditions. For comparison of the xylem sap flow method with the ozone uptake model hypothesis 1 was therefore rejected for both tree species. Furthermore, the ozone uptake model underestimated potential ozone uptake at night as well as during spring and fall. Transpiration, conductance for water vapour and ozone uptake were, per unit of stomatic-bearing leaf surface, significantly higher in beech than in spruce. Thus hypothesis 2 was confirmed. Under increased ozone concentration, crown transpiration and canopy conductance for water vapour of beech and spruce were reduced in the absence of statistical significance, so that hypothesis 3 was rejected. Compared to sunny weather, rainy conditions led to a significant reduction in crown transpiration, an increase in canopy conductance, but a reduction in ozone uptake.

Bud break of beech was not significantly influenced by the increased ozone regime. Therefore, hypothesis 3 was rejected in this regard. Hypothesis 3 was also rejected for spruce trees, not because of delayed bud break due to increased ozone concentration, but rather because of accelerated bud break. The increased ozone regime had no significant accelerating effect on the autumnal leaf senescence.

Validation of the ozone uptake model based on the xylem sap flow approach showed that the model experienced conceptual difficulties manifesting in insufficient illustration of the boundary layer effect and insufficient parametrization of the stomatal conductance. The practical suitability of the xylem sap flow approach for quantifying the ozone uptake of forest

trees became apparent in this study. It is also possible to use this approach for the validation of previous ozone uptake models.

Overall, this study showed that xylem sap flow measurement in the trunk is currently the most suitable method for quantifying ozone doses in forest trees due to the inherent coverage of boundary layers. The results of this study have laid the foundation on a political level for changing from the exposure concept (AOT40) to the dose concept in ozone risk assessment.

1 Einleitung

1.1 Ozon

Entstehung von Ozon

Ozon (O_3) ist ein natürlicher Luftbestandteil, zählt zu den Treibhausgasen und ist in erhöhter Konzentration ein Luftschadstoff, der durch seine oxidierende Wirkung ein Gefährdungspotential für Pflanzen darstellt (Paoletti und Manning 2007, Matyssek und Innes 1999). Ozon befindet sich sowohl in der Stratosphäre (Luftschichten in 15 km bis 35 km Höhe) als auch in der Troposphäre (Luftschichten in 0 km bis 15 km Höhe), wobei der überwiegende Anteil von Ozon (90 %) in der Stratosphäre vorkommt (Paoletti 2007). Das stratosphärische Ozon wird unter Einfluss ultravioletter (UV) Strahlung gebildet und besitzt, als die sogenannte Ozonschicht, die Fähigkeit, DNA-schädigende UV-B und UV-C Anteile der Sonnenstrahlung komplett zu absorbieren, wodurch es für die belebte Umwelt eine schützende und lebenswichtige Funktion besitzt (Brönnimann 2002, Paoletti, 2007, Matyssek et al. 2010a). Problematisch für die belebte Umwelt ist die Induzierung des Abbaus von stratosphärischem Ozon durch Abgase aus Industrie und Verkehr, die Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKWs), Halone (Kohlenwasserstoffe mit Fluor, Chlor, Brom, oder Jod) und halogenhaltige Stoffe enthalten. Diese Reaktion trägt zur Bildung des Ozonloches bei (Fabian 2002; Menzel et al. 2004). In den 1970er Jahren wurde erstmals durch Molina und Rowland (1974) die Hypothese formuliert, dass FCKWs die stratosphärische Ozonschicht abbauen. Farman et al. (1985) konnten schließlich anhand von Meßreihen das Ozonloch nachweisen. Durch das Ozonloch gelangt vermehrt UV-Strahlung in die Troposphäre und an die Erdoberfläche mit Folgen für Pflanzen und Menschen. Ein höherer Anteil der energiereichen UV-B-Strahlung in der Troposphäre ruft photochemische und biologische Prozesse hervor, die zu Hautkrebs, Änderung des Erbgutes von Lebewesen und Schädigung von Pflanzen und Materialien führen können (Brönnimann 2002).

In der Troposphäre reagieren durch photochemische Reaktionen Kohlenmonoxide (CO), Stickstoffoxide (NO_x), Methan (CH_4) und andere flüchtige organische Kohlenwasserstoff-Verbindungen (NMVOC = **N**on **M**ethane **V**olatile **O**rganic **C**ompounds) mit Luftsauerstoff zu Ozon (Menzel et al. 2004). Hohe Lufttemperaturen beschleunigen diese Reaktion. Die Anwesenheit von Ozon in der Troposphäre kann für Pflanzen direkt schädlich sein. Bedingt durch oxidativen Smog und interkontinentale Transporte von Ozon und dessen Vorläufersubstanzen ist ein Anstieg der bodennahen Ozonkonzentration seit der industriellen Revolution um das Doppelte bis Vierfache auf heutige 20 ppb bis 45 ppb zu verzeichnen (Vingarzan 2004). Ein Absinken der gegenwärtigen Ozonbelastungen ist für das 21. Jahrhundert nicht zu erwarten (Nunn et al. 2010, Matyssek und Sandermann 2003,

Fowler et al. 2008). Ashmore (2005) stellt zwei verschiedene IPCC-Szenarien (IPCC = Intergovernmental panel on climate change) einer möglichen Entwicklung der Ozonbelastung dar: Demnach wird erwartet, dass die Ozon-Hintergrundkonzentration von heute 25 ppb bis zum Jahr 2050 auf 70 ppb zunimmt, falls keine Änderung in der derzeitigen globalen Energie- und Umweltpolitik eintritt. Alternativ könnte sich die Ozonkonzentration auf 40 ppb einpendeln, wenn sofort weltweit Ozonvermeidungsstrategien beschlossen und umgesetzt würden.

In Europa weist nach Matyssek et al. (2007) die mittlere Ozonkonzentration Werte von 30 nl l^{-1} bis 45 nl l^{-1} auf. Die Ozonkonzentration in der Troposphäre unterliegt einem Tagesgang (siehe Abbildung 1.1): an heißen Sommertagen zeigen sich am frühen Nachmittag Spitzenkonzentrationen, die erst nachts abgebaut werden können. Ein Abbau von Ozon durch hohe Konzentrationen von Stickstoffdioxid ist vor allem in Städten und stadtnahen Gebieten möglich, wo durch Photolyse Stickstoffmonoxid entsteht, das mit Ozon zu Stickstoffdioxid und Sauerstoff reagiert. Der im Tagesgang verzögerte und nur geringe Ozonabbau der stadtfernen Gebiete und Hochlagen wird durch Stickstoffmonoxid (NO) limitiert, da hier die NO-Konzentrationen im Vergleich zur Stadt geringer sind. Im Vergleich zur Stadt bleibt die Ozonkonzentration in ländlichen und waldreichen Gebieten über den gesamten Tag hinweg auf einem höheren Niveau (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2007). In Deutschland und Frankreich steigt die durchschnittliche Ozonkonzentration tendenziell von Norden nach Süden und mit zunehmender Höhenlage über NN an (Matyssek et al. 2007).

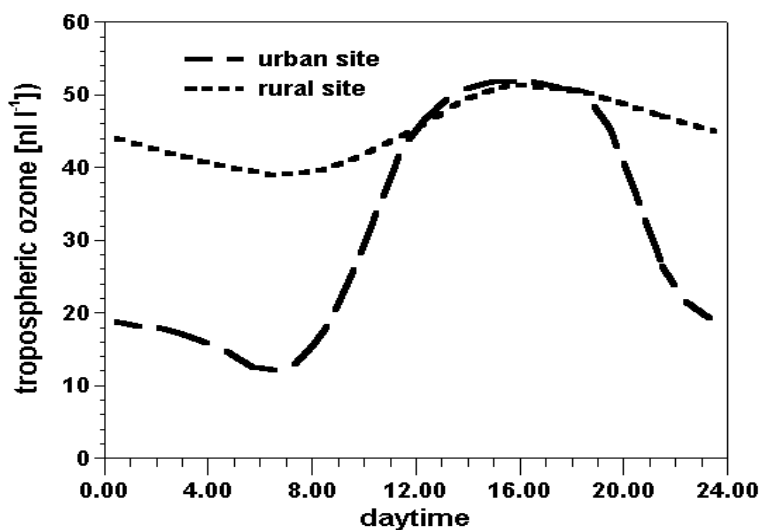


Abbildung 1.1: Tagesgang der Ozonkonzentration in städtischen (ausgeprägter Tagesgang) und in ländlichen Gebieten (gering ausgeprägter Tagesgang) (Grünhage et al. 2004).

Einfluss von Ozon auf Wälder

Ozon stellt derzeit einen Stressfaktor für über 25 % der Wälder weltweit dar (Fowler et al. 1999, Percy et al. 2009). In Deutschland werden die Grenzwerte zum Schutze der Wälder vor Ozonkonzentrationen, ab denen potentiell schädigende Auswirkungen auf die Vegetation auftreten, an den wenigsten Messstationen eingehalten (AOT40 = $20000 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$ akkumuliert von April bis September; Umweltbundesamt 2007; **AOT40 = Accumulated O₃ exposure above Threshold of 40 nl O₃ l⁻¹**). Für die Wälder in Bayern wurde von Baumgarten et al. (2009) ein hohes Ozon-Schadensrisiko festgestellt.

Laut Waldzustandsbericht (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2007) gehen die Ozon-Spitzenkonzentrationen seit den 1990er Jahren zurück (Umweltbundesamt 2005). Als Grund dafür wird der Rückgang der Emissionen der Vorläufersubstanzen für Ozon, wie NO_x (Stickstoffoxide) und NMVOC, um 29 % angesehen (Paoletti und Manning 2007). Die chronisch wirksamen Ozon-Hintergrundkonzentrationen sind jedoch im selben Zeitraum auf hohem Niveau geblieben, bzw. werden sogar infolge künftig erwarteter global erhöhter Emissionen von Stickstoffoxiden aus Verkehr und Industrie zunehmen (Ashmore 2005). Die Immission von Ozon, bedingt durch transpazifische, transatlantische und interkontinentale Transporte, hat sich von einem regionalen zu einem globalen Problem entwickelt (Ashmore 2005). Percy et al. (2009) gehen davon aus, dass etwa 12 % der weltweiten Waldfläche bis zum Jahr 2100 einer Ozonkonzentration von 60 nl l^{-1} ausgesetzt sein wird. Vingarzan (2004) sagt einen Anstieg der jährlichen durchschnittlichen Ozonkonzentration von heute 20 ppb bis 45 ppb auf 42 ppb bis 84 ppb bis 2100 auf globaler Ebene voraus. Dabei ist zu beachten, dass eine Zunahme der Ozon-Hintergrundkonzentration von nur wenigen ppb einen größeren Einfluss auf die Vegetation haben wird, als eine Abnahme der Spitzenkonzentration um 5 ppb bis 15 ppb (Paoletti 2007). Laut Musselmann et al. (2006) kann Ozon nicht nur den ökologischen Wert einer Pflanze reduzieren, sondern auch deren ökonomischen Wert. Broadmeadow (1998) berichtet von gegenwärtigen Schätzungen eines direkten Einflusses von Ozon auf Wälder in Form von Produktionseinbußen in der Größenordnung von 1 % bis 10 %. Die erhöhten Ozonkonzentrationen dürften sich nicht nur in Form von Ertragseinbußen auf die Land- und Forstwirtschaft auswirken, sondern auch die menschliche Gesundheit beeinträchtigen (Ashmore 2005).

Eine chronische Ozon-Belastung kann die Funktion der Wälder als Kohlenstoff-Senke einschränken (Matyssek et al. 2010b, c), indem sich die Kohlenstoff-Verteilung zwischen den Baumorganen verändert und der Kohlenstoff-Gewinn geschmälert wird (Kozovits et al. 2005a, b). Dies würde bedeuten, dass sich das Bindungsvermögen von Wäldern für zusätzlich aus fossilen Ressourcen freigesetztes CO₂ verringern wird (Wittig et al. 2009, Kozovits et al. 2005b, Karnosky et al. 2007, Matyssek et al. 2010a, b, c). Eine Änderung der

Kohlenstoff-Verteilung und Verringerung des Kohlenstoff-Gewinns kann zudem zu einer Veränderung der Kronenarchitektur führen, d. h. zu einer Abnahme von Verzweigungen und Blattgröße und zu einem reduzierten Wurzelwachstum und Mykorrhizierung (Matyssek et al. 2010b, c, Andersen 2003). Unter Ozonstress wird meist das unterirdische Wachstum stärker gehemmt als das oberirdische (Matyssek und Sandermann 2003), wodurch sich das Wurzel/Spross-Biomasseverhältnis erniedrigt (Matyssek und Sandermann 2003, Greitner et al. 1994).

Ein Einfluss von Ozon auf Waldbäume kann sich neben einer gesteigerten Respiration in Form einer Reduktion der Photosynthese, einem vorzeitigen Blattverlust und einer Wachstumseinbuße äußern (Reich 1987, Pearson und Mansfield 1993, Matyssek und Sandermann 2003, Wipfler et al. 2005, Pretzsch et al. 2010). Eine erhöhte Ozonkonzentration hat zudem das Potential, den Wasserhaushalt von Bäumen zu ändern (Mc Laughlin et al. 2007a, b). Die Fähigkeit zur Raumbesetzung und Ressourcennutzung kann infolgedessen beeinträchtigt sein, als entscheidender Faktor für das Konkurrenzverhalten gegenüber Nachbarpflanzen (Grams et al. 2002, Kozovits et al. 2005a).

1.2 Wirkungsweise von Ozon auf Altbäume

Kammerversuche an jungen Bäumen versus Freilandversuche an adulten Bäumen

Die Mehrzahl der Erkenntnisse über Ozon-Wirkungen auf Bäume wurde bisher durch Untersuchungen an Jungbäumen in kontrollierten Kammer- oder Küvettenexperimenten ermittelt (Kolb und Matyssek 2001). Über Reaktionen von Altbäumen auf Ozon existieren bisher nur wenige Erkenntnisse. Eine Übertragung der an Jungbäumen gewonnenen Befunde auf Altbäume ist aber problematisch, da sich während der Ontogenese die physiologischen Eigenschaften, und damit potentiell auch die Ozon-Empfindlichkeit, ändern (Kolb und Matyssek 2001, Skärby et al. 1998, Fredericksen et al. 1995). Die Wuchsbedingungen für Bäume in Klimakammern sind nicht dieselben wie im Freiland: So entsprechen der begrenzte Wurzelraum, die Wasserverfügbarkeit und das Fehlen von Parasiten und Konkurrenten in den Containern nicht den Bedingungen im Freiland (Kolb und Matyssek 2001, Matyssek und Sandermann 2003). Die jeweils spezifischen mikroklimatischen und edaphischen Standortbedingungen vor Ort können in Container- und Kammerexperimenten nur bedingt nachgestellt werden, sind jedoch für das Ausmaß der Ozon-Toleranz entscheidend (Matyssek und Sandermann 2003).

Viele an jungen Bäumen in Klimakammern erhobene Daten haben daher nur eine geringe ökologische Bedeutung für Bäume im Freiland, da Ozon im Freiland auf die Holzpflanzen mit einer Vielzahl variierender biotischer und abiotischer Faktoren einwirkt. Diese Faktoren können einen erheblichen Einfluss auf die Ozon-Empfindlichkeit haben, indem sie Schädigungen durch Ozon maskieren, aber auch forcieren können (Pearson und Mansfield

1993, Chappelka und Samuelson 1998): So zeigen Baumgarten et al. (2000), dass sichtbare Ozonschäden an Buchen-Sämlingen in Phytotronen bei einer höheren kumulativen Ozonexposition auftraten als bei Altbäumen, die der Ozonkonzentration im Freiland ausgesetzt waren.

Jungbuchen eines Phytotron-Experiments von Nunn et al. (2005) hatten unter erhöhtem Ozon-Regime eine geringere maximale Leitfähigkeit für Wasserdampf als die Schattenblätter von Altbuchen, die derselben Ozonkonzentration ausgesetzt waren. Die Leitfähigkeiten der Jungbuchen fielen ähnlich zu denen der Sonnenkrone von Altbäumen aus (Nunn et al. 2005). Paoletti et al. (2009) bewiesen an Eschen das Gegenteil: Hier war an jungen Bäumen, die einer erhöhten Ozonkonzentration ausgesetzt waren, die Leitfähigkeit höher als an ausgewachsenen Eschen. Des Weiteren konnten Nunn et al. (2005) zeigen, dass die Ozonaufnahme von Jungbuchen höher ausfiel als von adulten Buchen im Freiland, da Jungbuchen im Gegensatz zu den Altbäumen weniger Ressourcen zur Detoxifikation von Ozon besitzen (Nunn et al. 2005).

Eindringen des Ozons über die Stomata in die Pflanze

Ozon wird von Pflanzen über die Stomata (= Spaltöffnungen) aufgenommen. Beim Eintritt in das Blattgewebe folgt der Ozonfluss physikalischen Gesetzen. Die Gasdiffusion findet nach dem Fickschen Gesetz in Richtung eines Konzentrationsgefälles statt (Lüttge et al. 1999). Hierbei ist eine wichtige Annahme, dass nach Laisk et al. (1989) die Ozonkonzentration in den Blattinterzellularen nahe Null liegt, so dass Ozon entlang des Diffusionsgradienten durch die Stomata in die Blattinterzellulare fließt. Ozon wird von den Pflanzen nur über die Stomata aufgenommen, eine Aufnahme über die Cuticula der Blätter/Nadeln ist nicht möglich, da die Cuticula praktisch impermeabel für Ozon ist (Wittmann et al. 2005, Schulze et al. 2002).

Je nach Strahlung, Bodenwasserpotential, Wasserstatus und Nährstoffversorgung der Pflanze und dem Wasserdampfsättigungsdefizit der Atmosphäre, welches durch die Lufttemperatur und die Strahlung reguliert wird, steuern die Spaltöffnungen ihre Porenweite und somit die Ozonaufnahme (Lüttge et al. 1999, Götz 1996, Matyssek et al. 2010a). Aufgrund der stomatären Regulation der Ozonaufnahme korreliert die interne Ozon-Dosis (= Ozonmenge, die während einer definierten Zeitspanne über die Stomata aufgenommen wird) nicht mit der externen Ozon-Dosis (= Ozonkonzentration der Umgebungsluft) (Matyssek et al. 2007). So war in dem heißen und trockenen Sommer 2003 die Ozonkonzentration der Luft zwar sehr hoch, die Bäume nahmen aber um den Faktor 0,8 weniger Ozon auf als in den feuchten Sommern 2002 und 2004, da – bedingt durch die Trockenheit – die Stomata verengt waren (Matyssek et al. 2006, Löw et al. 2006). Umgekehrt kann unter humiden Bedingungen mit niedrigerer Ozon-Exposition die Ozonaufnahme höher ausfallen als bei heißem und trockenem Wetter mit hoher Ozonkonzentration (Löw

et al. 2006, Beyers et al. 1992, Dixon et al. 1998). Durch die stomatäre Regulation kann somit Ozonstress vermieden werden, da ein Schließen der Stomata die Ozonaufnahme verhindert. Daher ist die Kenntnis der stomatären Leitfähigkeit eine wichtige Größe bei der Abschätzung des Risikos ozoninduzierter Schädigung (Reich 1987).

Neben der stomatären Regulation wird die Ozontoleranz einer Pflanze aber auch durch die Fähigkeit der Stresskompensation wie Abwehr durch Entgiftung sowie Reparatur und/oder neue kompensatorische Laubbildung bestimmt (Matyssek et al. 2004).

Chemische Reaktion

Die Reaktion einer Pflanzenzelle auf Ozon ist vergleichbar mit der Abwehr eines Pathogenangriffs (Heath und Taylor 1997). In beiden Fällen wird ein gezieltes Absterben der infizierten bzw. betroffenen Zellen (= „programmed cell death“, Kangasjärvi et al. 1996) herbeigeführt, um weitere Schäden zu verhindern.

Nach Diffusion in die Blattinterzellularen greift Ozon (und seine oxidativen Folgeprodukte) den Apoplasten und das benachbarte Plasmalemma der Blatt-Mesophyll-Zellen (Matyssek und Sandermann 2003, Nali et al. 2004), unter Bildung reaktiver Sauerstoffspezies (ROS), an (Dizengremel et al. 2008). Hohe ROS-Dosen schädigen die Membrane, wie z. B. ungesättigte Fettsäuren der Mesophyll-Zellen, durch Oxidierung, wodurch es zu einer Beeinträchtigung der Semipermeabilität der Zellmembran (Heath und Taylor 1987), Plasmolyse und Zelltod kommen kann (Tausz et al. 2006). Zudem können freigesetzte ROS Chlorophyll und Xanthophyll zerstören, Nukleinsäuren verletzen, aber auch die Kalium- und Calcium-Transporter in den Schließzellen und in ihren Nebenzellen inaktivieren (Matyssek et al. 2005, Dizengremel 2001). In der Folge kann es insgesamt zu einer Beeinträchtigung der Photosynthese, einer Abnahme des Wachstums und vorzeitigen Blattseneszenz kommen (Matyssek und Sandermann 2003, Percy et al. 2009, Schulze et al. 2002, Matyssek et al. 2007, Dizengremel et al. 2008). Nach Schulze et al. (2002) werden während des normalen Zellstoffwechsels im Apoplasten, in Chloroplasten sowie Mitochondrien ebenfalls ROS gebildet, weswegen dort antioxidative Schutzsysteme existieren. Diese Schutzsysteme ermöglichen es manchen Zellen- und Pflanzenarten, einen Teil des aufgenommenen Ozons sofort zu entgiften. Andere Pflanzenarten dagegen reagieren bereits bei geringen Mengen aufgenommenen Ozons mit Zelltod. Bei der Zellschädigung durch Ozon sind nach Pell et al. (1997) auch noch indirekte Prozesse beteiligt, wodurch das Ozon in Folge einer als „oxidative burst“ bezeichneten Reaktion als Auslöser des programmierten Zelltodes fungiert (Sandermann 1996, Overmyer et al. 2000, 2003, Langebartels und Kangasjärvi 2004).

Neben ROS regt die Pflanze als Abwehrreaktion bzw. Reaktion auf (Ozon-) Stress die Bildung von Ethylen an (Dizengremel 2001). Das Hormon Ethylen treibt in Pflanzen im Herbst den Blattfall voran und wird bei Pathogenbefall/Stress ausgeschüttet, wodurch es den

programmierten Zelltod forciert. Ethylen wirkt u.a. fördernd auf die Samenkeimung, Zellteilung, Zellwandsynthese, Blühinduktion und das Wurzelwachstum (Abeles et al. 1992, Matyssek et al. 2010a). Nach Sandermann et al. (1998) korreliert dabei die Höhe der Ethylen-Emission mit der von Ozonschädigung betroffenen Blattfläche. Ethylen ist zu einem großem Anteil für die ozonbedingte Entstehung von Intercostal-Nekrosen verantwortlich (Sandermann 1996).

Darüber hinaus kann es in Folge von Ozonstress in der Pflanze zu einer Induktion von Abwehrgenen kommen (Sandermann 1996, Dizengremel 2001). Typisch für ozonexponierte Pflanzen ist zudem die Akkumulation von Salicylsäure, welche den oxidativen Zelltod verstärkt (Overmyer et al. 2003). Salicylsäure kommt in Pflanzen eine wichtige Rolle bei der Abwehr von Pathogenen zu (Wohlgemuth et al. 2002). Koch et al. (2000) berichten von einer Zunahme der Ozonsensitivität bei Hybridpappeln aufgrund von Unempfindlichkeit gegenüber Salicylsäure.

Blumenröther et al. (2007) fanden eine Reduktion des Zucker- und Stärkegehalts in Sonnenblättern von Buchen des Kranzberger Forstes unter chronisch erhöhtem Ozonregime, was die Autoren mit dem gesteigerten Bedarf nach Stoffwechselprodukten für Reparaturprozesse und Entgiftung begründen.

Durch Ozon hervorgerufene Schädigungen in Pflanzen

Akute Ozonschädigungen werden durch zeitlich begrenzte Ozon-Spitzenkonzentrationen hervorgerufen und führen zu plötzlichen und irreversiblen, physiologischen und strukturellen Schädigungen (Matyssek und Sandermann 2003). Sie äußern sich z. B. in den äußerlich sichtbaren „Intercostal-Nekrosen“ der Blätter (Sandermann 1996, Nunn 2005). Akute Ozonschädigung ist für Bäume in Mitteleuropa bisher eher von geringer Bedeutung, da Ozon-Spitzenkonzentrationen bei heißer und trockener Witterung auftreten, wenn die Pflanzen ihre Stomata trockenheits- und temperaturbedingt schließen (Baumgarten et al. 2010, Löw et al. 2006). Zudem nehmen die Ozon-Spitzenkonzentrationen – wie bereits geschildert – ab und sind zeitlich begrenzt.

Demgegenüber entstehen chronische Ozonschädigungen durch andauernde Belastung der Pflanze mit der im Mittel erhöhten Ozonkonzentration (= chronisches Ozonregime), welche für die Langzeitentwicklung der Bäume von großer Bedeutung ist (Matyssek und Sandermann 2003). Chronisch lang anhaltende Exponierung unter niedriger Ozonkonzentration wirkt sich auf physiologische und biochemische Prozesse aus, noch bevor es zur Ausbildung von sichtbaren Verletzungen kommt (Heath und Taylor 1997).

Chronische Schädigungen äußern sich mitunter in einer verfrühten Seneszenz der Blätter (Nunn 2005, Matyssek und Innes 1999, Benecke et al. 1981), verringerten Blattgröße, reduzierten spezifischen Blattfläche und in einem erniedrigten Wurzel-Spross-Verhältnis

(Kozovits et al. 2005a, b, Matyssek und Sandermann 2003). Ozon limitiert zudem, wie Wipfler et al. (2005) und Pretzsch et al. (2010) in der Versuchsfläche Kranzberger Forst feststellten, den Stammzuwachs der Bäume.

Im San Bernadino-Gebirge gelten *Pinus ponderosa* und *Pinus jeffreyi* als die ozonempfindlichsten Arten (Miller und Mc Bride 1999). Sie zeigten als Reaktion auf Ozonbelastung Nadelverletzungen, verkürzte Nadellängen, reduziertes Stammwachstum und, verbunden mit Trockenheit, erhöhte Anfälligkeit gegenüber Borkenkäfern (Ashmore 2005, Miller und McBride 1999). Wieser et al. (2006a) berichteten auch von Verletzungen an älteren Nadeln von Zirben (*Pinus cembra* L.), die Ozon zugeschrieben werden können.

1.3 Grenzwertkonzepte

In der Literatur wird zwischen Ozonkonzentration, Exponierung und Dosis unterschieden (Musselmann et al. 2006, Matyssek et al. 2007)

Die Konzentration stellt die molare Dichte eines Luftschadstoffes als Teilchen-Anzahl pro Volumen [mol m^{-3} oder ppm] dar. Die Exposition ist das Produkt aus der Ozonkonzentration und der Aussetzungsdauer, z. B. der Länge der Vegetationsperiode [$\text{mol m}^{-3} \text{ h}$ oder ppm-h]. Die Dosis gibt die gesamte Menge eines Luftschadstoffes an, die über die Stomata in die Pflanze innerhalb eines Zeitintervalls eindringt (Musselmann et al. 2006). Die effektive Ozon-Dosis stellt die Empfindlichkeit einer Pflanze pro Einheit aufgenommenen Ozons dar (Matyssek et al. 2008). Die Reaktion einer Pflanze auf Ozon hängt nicht nur von der Menge des aufgenommenen Ozons ab, sondern auch von ihrer Empfindlichkeit dafür.

Grenzwert- und Fluss-Konzepte

Zum Schutze der Pflanzen vor Ozon-Schädigung wurden von der UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) Grenzwerte eingeführt. Gemäß der Richtlinie 2002/3/EG des EUROPÄISCHEN PARLAMENTES UND RATES vom 12. Februar 2002 über den Ozongehalt der Luft (UNECE 2004) und der Richtlinie 2008/50/EG vom 25. März 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa des EUROPÄISCHEN PARLAMENTES UND RATES, wurde das Konzept der „Critical Levels for Ozone“ entwickelt. Hierfür wurde das Grenzwertkonzept AOT40 (Accumulated O_3 exposure above Threshold of $40 \text{ nl O}_3 \text{ l}^{-1}$) eingeführt, das heute in Europa für Pflanzen gültig ist. Dieses Grenzwert-Konzept dient der regionalen Abschätzung des Ozonrisikos für die Biomasseproduktion. Bei AOT40 wird davon ausgegangen, dass Ozonkonzentrationen bis $40 \text{ nl O}_3 \text{ l}^{-1}$ keinen negativen Einfluss auf die Biomasseproduktion der Waldbäume haben. Die Definition des Grenzwertkonzeptes fusst auf Ozon-Exponierungsversuchen an jungen Einzelpflanzen (unter Kammerbedingungen) und stellt die kumulative externe Ozon-Dosis dar. Während der Tageslichtstunden werden alle Stundenmittelwerte $> 40 \text{ nl O}_3 \text{ l}^{-1}$, nach Abzug eines Basisniveaus von $40 \text{ nl O}_3 \text{ l}^{-1}$, für die

mittlere Länge der Vegetationsperiode aufsummiert. Seit September 2004 gilt ein Grenzwert von $5 \mu\text{l l}^{-1} \text{ h}$ (vormals $10 \mu\text{l l}^{-1} \text{ h}$) für Waldbäume. Bei Erreichen dieses Grenzwerts wird eine Produktionseinbuße von 5 % angenommen (im Vergleich zu Ozon-freier Luft).

Da AOT40 zur Schätzung eines Ozonrisikos für die Biomasseproduktion eingeführt wurde, lässt es keine Rückschlüsse auf die physiologisch wirksame, aufgenommene Ozon-Dosis und Ursache-Wirkungsbeziehungen zu. Unterschiedliche Standortsbedingungen, Baumarten und Regionen werden nicht berücksichtigt. Eine Korrelation mit dem gegebenen Waldzustand ist fragwürdig (Matussek und Innes 1999).

Neben dem AOT40-Konzept gibt es das SUM0-Konzept (**Summe** aller Ozonkonzentrationen >0), welches die nicht gewichtete, externe Ozon-Dosis darstellt (kumulative Ozon-Exponierung). SUM0 berechnet sich aus der Summe aller Stundenmittelwerte der herrschenden Ozonkonzentrationen. Im Gegensatz zum AOT40 wird hier kein Schwellenwert abgezogen, zudem gehen nächtliche Ozonkonzentrationen in die Berechnung ein.

Als drittes Konzept wurde – um die interne Ozon-Dosis zu ermitteln, die eine Pflanze aufnimmt – das Ozon-Fluss-Konzept entwickelt (Matussek et al. 1995a, b, Matussek et al. 2007). Es berechnet den Ozonfluss durch die Stomata in die Pflanze und berücksichtigt bei Anwendung des Ozonaufnahme-Modells nach Emberson et al. (2000a) sowohl die Standortbedingungen (Strahlungsmesswerte, Lufttemperaturwerte, VPD-Werte und Bodenwasserpotential-Werte des Standortes) als auch die nächtliche Ozonkonzentration, wodurch eine Risikoeinschätzung mit Ursache-Wirkungsbeziehungen des Ozons verknüpft werden kann.

Im Kranzberger Forst konnte bereits gezeigt werden, dass bei einer experimentellen Verdoppelung des herrschenden Ozon-Regimes während der Vegetationsperiode die Ozonaufnahme von Fichten- und Buchen-Altbäumen um das 0,7- bis 1,6-fache anstieg, wohingegen sich AOT40 vervierfachte (Nunn 2005). Die Ursache für die nur wenig veränderte Ozonaufnahme liegt in der Regulierung der Ozonaufnahme durch die Stomata. Hohe Ozonkonzentrationen treten zumeist bei hohen Temperaturen und Trockenheit auf, d. h. Klimabedingungen, unter denen sich die Stomata von Pflanzen schließen.

Emberson et al. (2000a) haben nachgewiesen, dass die kumulative stomatäre Ozon-Dosis bei Buche über die Vegetationsperiode hinweg an vier verschiedenen Standorten (in Schweden, Großbritannien, Tschechien und Spanien) nur geringe Unterschiede aufzeigte, wohingegen die AOT40-Werte stark differierten. Nur die von den Pflanzen aufgenommene Dosis ist physiologisch relevant und maßgeblich für die Festlegung von kausal definierten Ozonbelastungsgrenzen für Pflanzen.

Eine weitere Möglichkeit der Modellierung der Ozonaufnahme stellt die Anwendung der Eddy-Covarianz-Methode (= Eddy-Flux-Verfahren) dar. Hierbei wird der gesamte Ozonfluss auf Bestandesebene erfasst, der sich aus der stomatären Ozondeposition (= stomatäre

Ozonaufnahme) und der nicht-stomatären Ozondeposition zusammensetzt. Letztere ist die Deposition von Ozon auf allen anderen Flächen der Pflanzen außer der Stomata, die Deposition am Boden und der Ozonabbau durch chemische Senken (Feretti et al. 2007).

Feretti et al. (2007) sehen als Schlüsselproblem des Eddy-Flux-Verfahrens, dass die stomatäre Ozonaufnahme schwer vom gesamten Ozonfluss zu trennen ist. Zumeist wird die stomatäre Deposition nach Jarvis (1976) bestimmt (Feretti et al. 2007). Hierbei fließen die maximale Leitfähigkeit, Phänologie und andere standortsbezogene Parameter mit ein. Die Bestimmung der nicht-stomatären Deposition ist wegen des Fehlens bewährter Modelle jedoch schwierig (Feretti et al. 2007). Nunn et al. (2010) wandten in ihrem Versuch das Eddy-Flux-Verfahren und das Verfahren der stomatären Ozonaufnahmeberechnung mit Hilfe der Xylemflussmethode (siehe Kap. 1.4) an. Durch diese Kombination konnten die stomatäre Ozonaufnahme und die nicht-stomatäre Deposition bestimmt werden.

1.4 Aufgabenstellung/Hypothesen

Nach Maßgabe der UNECE soll das AOT40-Konzept mittelfristig durch ein relevantes und prozess-basiertes Ozon-Fluss-Konzept ersetzt werden (Grünhage und Jäger 2003, Matyssek et al. 2007). Grund dafür ist, dass nur die von den Pflanzen aufgenommene Ozonmenge (interne Ozon-Dosis) auch physiologisch wirksam ist und nicht die externe Ozon-Dosis, welche vom AOT40-Konzept wiedergegeben wird (Matyssek et al. 2008). Einen Ansatz zur Bestimmung der physiologisch wirksamen Ozonmenge bietet die Ermittlung der Transpiration und Leitfähigkeit für Wasserdampf gesamter Baumkronen. Die Leitfähigkeit für Wasserdampf stellt die Basis zur Berechnung der Ozonaufnahme auf Kronenebene von Baumindividuen dar, da Transpiration und Ozonaufnahme durch die stomatäre Leitfähigkeit verknüpft sind (Wieser et al. 2003, Nunn et al. 2006).

Daher soll in vorliegender Studie die tägliche, monatliche und saisonale Ozonaufnahme von Buchen- und Fichten-Altbäumen in einem forstlich begründeten Waldbestand während der Vegetationsperiode bestimmt werden.

Hierbei kommt als Methode die Xylemflussmessung im Stamm zum Einsatz (Granier 1987; Wieser et al. 2003), die die Kronentranspiration und Ozonaufnahme integrativ koppelt. Die Xylemflussmessung im Stamm gibt im kontinuierlichen Messgang den Tagesverlauf der in Gegenwart der Luftgrenzschichten transpirierten Wassermenge wieder. Luftgrenzschichten bilden sich über ganzen Beständen, in Kronen von Bäumen und auch über Blattflächen aus. Eine Grenzschicht ist ein Luftraum, in dem die Fließgeschwindigkeit der Luft im Vergleich zur freien Strömung reduziert ist (von Willert et al. 1995). Die Ursache solcher Grenzschichten ist die Bildung von Scherkräften an der Oberfläche durch die Viskosität der Luft. Direkt an der Blattoberfläche in der Grenzschicht herrscht Windstille, während sich die Windgeschwindigkeit mit immer größer werdendem Abstand zur Oberfläche asymptotisch

der Windgeschwindigkeit in der Luft annähert (von Willert et al. 1995). Nach Martin et al. (1999) hängt die Grenzschichtleitfähigkeit für Wasserdampf von der Dicke der Luftschicht an der Blattoberfläche ab und wird von der Blattgröße, der Blattmorphologie und der Windgeschwindigkeit gesteuert. Grenzschichtleitfähigkeiten steuern auch die Transpiration (Martin et al. 1999), so baut sich z. B. bei Windstille eine mächtige Grenzschicht auf, wodurch der Widerstand für Wasserdampf hoch ist und die Transpiration gering ausfällt (Lüttge et al. 1999). Mit Abnahme der Grenzschichtdicke wird der Wärme- und Gasaustausch erleichtert (von Willert 1995). Die Leitfähigkeit für Ozon in der Grenzschicht nimmt mit zunehmender Grenzschichtdicke ab, da in der Grenzschicht Ozon nur langsam durch Diffusion nachgeliefert werden kann (Musselmann et al. 2006). Somit stellen die Grenzschichten einen Widerstand für den Ozonfluss dar (Pleijel et al. 1996). Der Grenzschichtwiderstand ist proportional zur Länge des Blattes und umgekehrt proportional zur Windgeschwindigkeit (von Willert et al. 1995). Die Dicke von Grenzschichten lässt sich aus physikalischen Gründen nicht direkt messen, weswegen Näherungsverfahren entwickelt wurden, die sich auf messtechnisch einfach zu bestimmende Parameter beziehen. Ausgegangen wird dabei von einer mittleren und für das gesamte Blatt repräsentativen äquivalenten Grenzschichtdicke δ . Die Berechnung erfolgt anhand der mittleren Blattlänge in Fließrichtung der Luft (l) und der Fließgeschwindigkeit der freien Strömung (v) (von Willert et al. 1995):

$$\delta = a * l^{0,5} * v^{-0,5}$$

Gleichung 1

- δ = mittlere Dicke der äquivalenten Grenzschicht um Blatt bzw. Nadel [mm]
 l = mittlere Blattlänge in Fließrichtung der Luft [m]
 v = Windgeschwindigkeit [m s^{-1}]
 a = empirisch ermittelter Faktor; $a = 4,0 \text{ mm s}^{-0,5}$

Aus der Kronentranspiration, dem mittleren Wasserdampf-sättigungsdefizit der Luft ($\text{VPD} = \text{vapour pressure deficit}$) und des Luftdruckes (P) (gemessen in Kronennähe) kann die Kronenleitfähigkeit für Wasserdampf bei herrschender Luftgrenzschicht berechnet werden (Köstner et al. 1992, 2008, von Willert et al. 1995). Die Kronenleitfähigkeit für Wasserdampf stellt ein Maß für die mittlere Öffnungsweite der Stomata dar. Mit Hilfe der Kronenleitfähigkeit und unter Einbeziehung der Ozonkonzentration (wiederum gemessen in Kronennähe) wird die Ozonaufnahme berechnet. Gemäß dem Fickschen Gesetz folgt Ozon entlang des Diffusionsgradienten in die Blattinterzellularen, wo nach Laisk et al. (1989) die Ozonkonzentration nahe Null liegt (siehe Kap. 1.2).

Eine Anwendung der Xylemflussmessung zur Bestimmung der Ozonaufnahme ist nach Wieser et al. (2003) und Matyssek et al. (2004) nicht nur in verschiedenen Regionen, sondern auch in verschiedenen Klimata und Höhenlagen möglich.

Die Mehrzahl der Fluss-Konzepte zur Berechnung der Ozonaufnahme, wie z. B. das auch in vorliegender Arbeit angewandte Ozonaufnahme-Modell (Emberson et al. 2000a, Nunn 2005), beziehen in ihren Berechnungen die Luftgrenzschichten nicht realitätsnah bzw. gar nicht mit ein, weswegen hier die berechneten Ozonaufnahmeraten nicht exakt denen im Freiland entsprechen können (siehe Kapitel 1.3). Aufgrund des Fehlens der Grenzschichtwiderstände für Ozon im Ozonaufnahme-Modell dürften die Ozonaufnahmen theoretisch sogar höher ausfallen als die der Xylemflussmessung.

Zusätzlich wird in vorliegender Arbeit die Ozonaufnahme anhand der Gaswechselformung in Astküvetten ermittelt. Nach Wullschleger et al. (1998) entsprechen Grenzschichten in Küvetten nicht denen im Freiland, da sie in Küvetten gänzlich zerstört werden.

Bereits Wieser et al. (2003) konnten einen Einfluss der Luftgrenzschichten auf die Ozonaufnahme zeigen. Dazu haben sie die Ozonaufnahmen verglichen, die sie mit Hilfe der Xylemfluss-Methode (mit Grenzschichten) und der Gaswechselformung in einer Astküvette (ohne Grenzschichten) ermittelt haben.

Um einen Einfluss der Luftgrenzschichten auf die Ozonaufnahme zu ermitteln, wird in vorliegender Arbeit die Xylemflussmessung im Stamm mit der Gaswechselformung an Ästen und dem Ozonaufnahme-Modell verglichen. Es wird die Hypothese aufgestellt, dass ein Einfluss der Luftgrenzschichten auf die Ozonaufnahme feststellbar ist, d. h. eine minimierte Luftgrenzschicht äußert sich in einer Überschätzung der Ozonaufnahme der Bäume (Hypothese 1). Dabei wird erwartet, dass der xylemfluss-basierte Ansatz die geringsten Ozonaufnahmen zeigt, da nur hier die Grenzschichten in vollem Umfang vertreten sind, wodurch ein Widerstand für das Ozon besteht (Nunn et al. 2007, Matyssek et al. 2004, Wieser et al. 2003).

Alle in vorliegender Arbeit erhobenen Gaswechselformungparameter wurden nicht nur an Buchen, sondern auch an Fichten gemessen, da es sich um zwei Baumarten handelt, die in Deutschland und innerhalb Zentraleuropas eine große wirtschaftliche Rolle spielen. Nunn et al. (2006) konnten zeigen, dass die Buchen eine höhere Kronenleitfähigkeit und Ozonaufnahme in der Vegetationsperiode erreichten als die Fichten. Gemäß den Untersuchungen von Nunn et al. (2006) wird die Hypothese aufgestellt, dass die Ozonaufnahme der Buchen in beiden Ozonregimen pro m² projizierter Lauboberfläche deutlich höher ausfällt als die der Fichten pro m² gesamter Lauboberfläche (Hypothese 2).

Gulke et al. (2002, 2004, 2007b) und Wittmann et al. (2007) berichten von einer Abnahme der Photosyntheserate und der stomatären Leitfähigkeit unter erhöhtem Ozon. Es wird daher die Hypothese aufgestellt, dass ein Ozoneffekt sowohl in den phänologischen Parametern

(Austrieb und Seneszenz), als auch in den physiologischen Parametern (Transpiration und Leitfähigkeit) existiert. Dieser zeigt sich in einem verzögerten Blattaustrieb, einer beschleunigten herbstlichen Seneszenz (Karnosky et al. 2005) und in einer Reduktion der Transpiration und Leitfähigkeit unter erhöhter Ozonkonzentration (Hypothese 3).

2 Material und Methoden

2.1 Versuchsgelände Kranzberger Forst

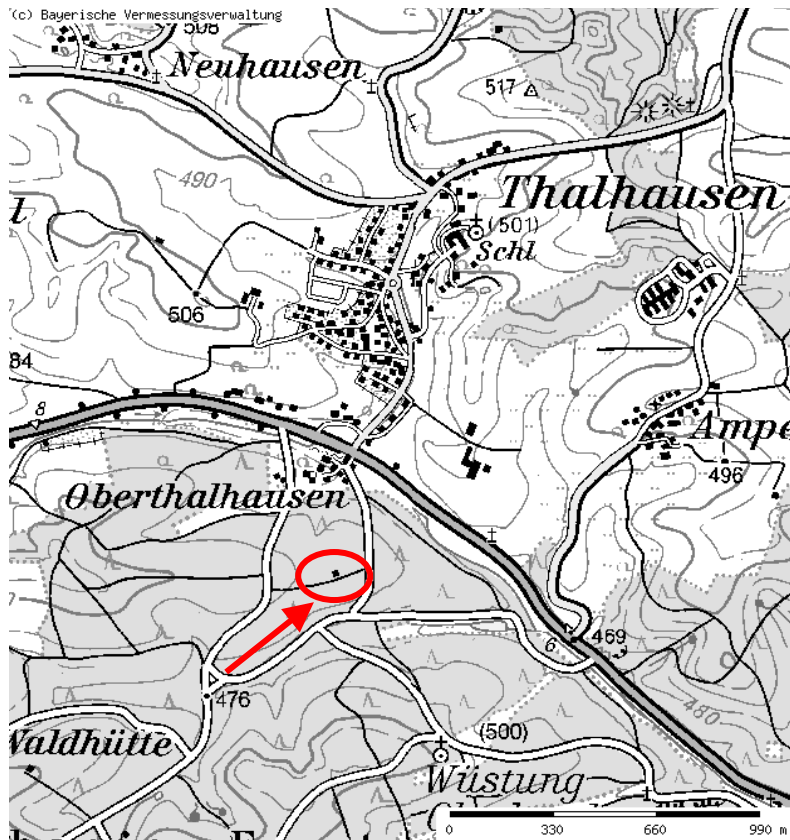


Abbildung 2.1: Lage der Versuchsfläche (Reiter 2004).

Das Versuchsgelände Kranzberger Forst liegt bei Thalhausen (siehe Abbildung 2.1), einem Ort 8 km nord-westlich von Freising und 35 km nordöstlich von München. Es umfasst ein Areal von etwa 5017 m².

Die Koordinaten des Versuchsgeländes sind 48°25′ Nord und 11°39′ Ost, die Höhenlage 490 m über NN und die Hangneigung 1,8° nach N (Pretzsch et al. 1998). Der Jahresniederschlag umfasst 730 mm bis 890 mm, wobei 410 mm bis 520 mm während der Vegetationsperiode niedergehen. Die Jahresmitteltemperatur liegt zwischen 7,0°C und 7,5°C. Während der Vegetationsperiode (Temperatur > 10°C), die 150 bis 155 Tage andauert, liegt das Temperaturmittel bei 14°C bis 15°C (Pretzsch et al. 1998, Pretzsch und Schütze 2005).

Im Versuchsbestand gibt es Bereiche, die ausschließlich mit Buche oder mit Fichte bestockt sind, aber auch Gruppen- und Einzelbaummischungen beider Baumarten (Pretzsch et al. 2005). Der etwa 60-jährige Wald-Bestand gehört zum Wuchsbezirk 12.8, „Oberbayerisches Tertiärhügelland“ (Pretzsch et al. 1998). Die potentielle natürliche Waldgesellschaft ist

Waldmeister-Tannen-Buchenwald (*Galio odorati-Fagetum*) mit Tannenbeimischung (Ellenberg 1996).

Die Baumarten Fichte und Buche stehen in diesem Forschungsprojekt im Mittelpunkt, da beide Arten einen hohen wirtschaftlichen Stellenwert in der Forstwirtschaft besitzen. Die Fichte als „Brotbaum“ der Forstwirtschaft ist mit einem Anteil an der Waldfläche in Bayern von etwa 45 % die häufigste Baumart (Bayerisches Staatsministerium für Ernährung Landwirtschaft und Forsten 2008). Buche ist mit einem Anteil an der Waldfläche in Bayern von 12 % die wichtigste Laubbaumart (Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten 2008). Beide Baumarten nehmen über 50 % der Waldfläche Bayerns ein und etwa 45 % der Waldfläche Deutschlands (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz 2007).

Der Bodentyp des Versuchsbestandes ist als Parabraunerde (Schuhbäck 2004) mit mäßig frischem bis frischem Schluff und Verdichtung im Unterboden (Standortseinheit 373) klassifiziert. Unter Buchen befindet sich eine gering mächtige Humusauflage mit Mull bis mullartigem Moder, unter Fichten dagegen eine mächtigere Humusauflage mit mullartigem Moder bis Moderschichten (Schuhbäck 2004).

1994 lag die Stammzahl für Fichte bei 540 pro Hektar und für Buchen bei 336, der Derbholzvolumenzuwachs lag bei $17,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Fichte) und $4,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (Buche). Die durchschnittliche Baumhöhe lag 1994 bei etwa 23 m (Pretzsch und Schütze 2005), 2006 bei etwa 26 m.

2.2 Experimentelles Design

Ein aus vier Türmen bestehendes Stahlgerüst und ein Baukran ermöglichten den Zugang zu den Baumkronen und Versuchsästen (siehe Abbildung 2.2).



Abbildung 2.2: Versuchsbestand Kranzberger Forst, vom Baukran aus fotografiert. Innerhalb des Gerüsts sind die Buchen vor Laubaustrieb zu sehen (Häberle et al. 2003).

Drei Türme (T1 - T3) sind durch Plattformen in verschiedenen Höhen (15,5 m, 17,5 m, 19,5 m, 21,5 m und 23,5 m) miteinander verbunden, ein vierter (T4) steht etwas abseits frei im Bestand. Die Plattformen ermöglichen den Zugang zu den verschiedenen Kronen-Bereichen der Intensiv-Messbäume. Die dem Gerüst abgewandten Seiten der Bäume sind mit dem Kran erreichbar. Direkt im Umfeld der Türme befinden sich die Intensiv-Messbäume (siehe Abbildung 2.3).

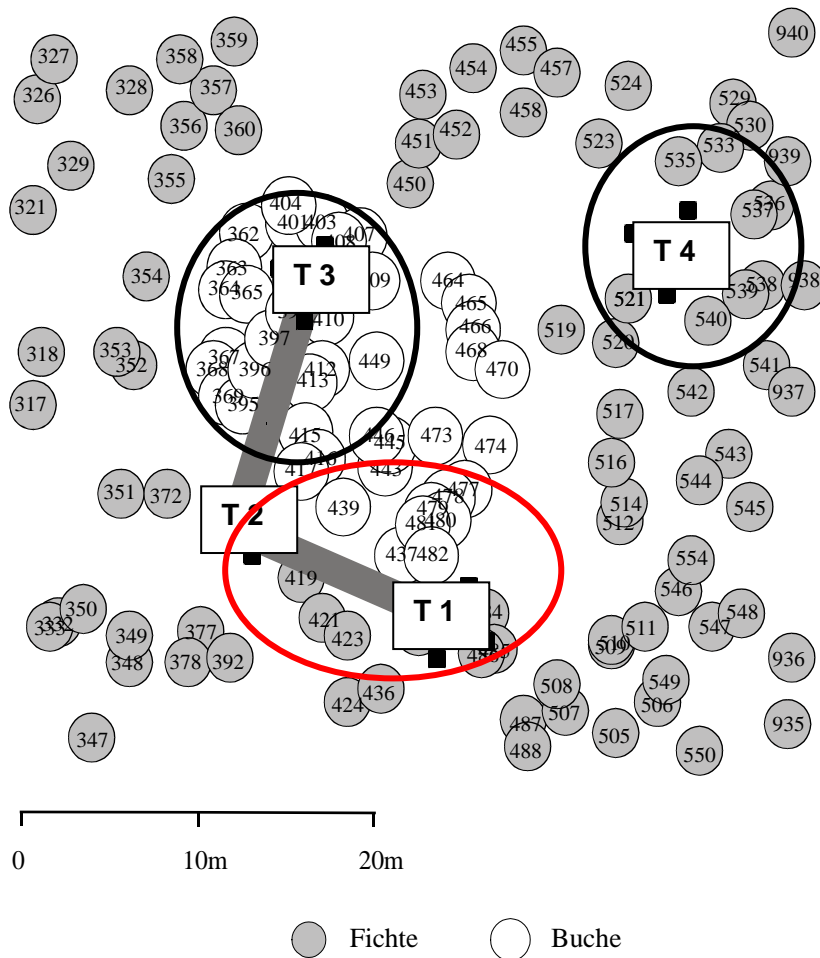


Abbildung 2.3: Schwarze Ringe = $1 \times O_3$, roter Ring = $2 \times O_3$; T = Turm.

Bei den Intensiv-Messbäumen handelt es sich um insgesamt 10 Buchen und 10 Fichten, an denen physiologische, phänologische und strukturelle Daten erhoben wurden. Jeweils fünf Buchen und fünf Fichten waren dort im Verhältnis zur Umgebung der doppelten Ozonkonzentration ($2 \times O_3$) ausgesetzt (= Begasungszone), wobei die Ozonkonzentration unter $2 \times O_3$ auf $150 \text{ nl } O_3 \text{ l}^{-1}$ begrenzt wurde, um akute Schädigungen der Bäume durch Ozon zu vermeiden. Weitere fünf Buchen und fünf Fichten dienten als Kontrolle unter dem unveränderten ($1 \times O_3$) Ozon-Regime. An jedem der Intensiv-Messbäume wurde ein repräsentativer und vom Gerüst aus erreichbarer Ast sowohl in der Sonnenkrone als auch in der Schattenkrone ausgewählt, an dem physiologische Messungen durchgeführt und phänologische Daten erhoben wurden.

Die Begasung der Bäume mit Ozon ($2 \times O_3$ -Regime) erfolgte durch die **Free-Air Ozonbegasungs-Methode** (siehe Abbildung 2.4). Dabei wurde Ozon durch elektrische Entladung in einem Ozongenerator mit aus 90 % sauerstoffangereicherter, spurengasfreier Luft hergestellt (Nunn 2005). Im zusammenhängenden Kronenraum der jeweils fünf Fichten und Buchen waren zur Begasung ca. 120 Schläuche mit insgesamt 6000 kalibrierten Düsen (die den Druckgradienten kompensierten) vertikal aufgehängt, über die das Ozon

ausströmte. Diese Methode ermöglichte eine homogene Verteilung des Ozons über 2000 m³ Bestandeskronenvolumen. Bereits vier bis fünf cm von den Düsen entfernt, wurde der Sollwert der Ozonkonzentration im 2xO₃-Regime (= gerade herrschende doppelte Ozonkonzentration der Umgebungsluft) erreicht (Werner und Fabian 2002). Der Referenzwert (1xO₃) wurde mit einem Ozonmessgerät an dem 30 m entfernt stehenden Turm (T4) gemessen. Die Dosierung erfolgte computergesteuert in einer Halbstunden-Auflösung (Nunn 2005).

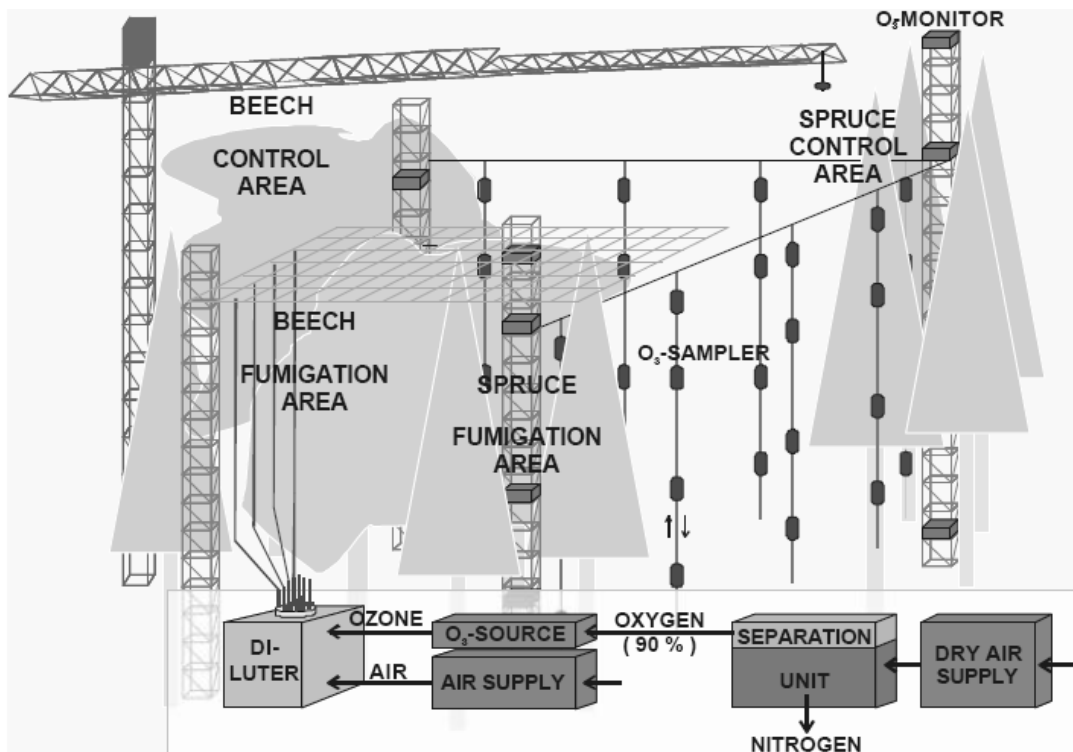


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung der Free-Air Ozonbegasungsanlage im Kranzberger Forst (Fabian et al. 2005).

Jeweils vier online-Ozonalysatoren (ML8811, Monitor Labs, Englewood, USA) in der Begasungszone (auf Turm 1 in 6 m, 14 m, 20 m und 26 m Höhe) und vier in der Referenzzone (auf Turm 4 in 2 m, 20 m und 28 m Höhe und auf Turm 3 in 20 m Höhe) lieferten kontinuierlich Ozon-Daten zur Darstellung der Ozon-Verteilung in der Ozonbegasungs- und Referenzzone (Werner und Fabian 2002, Nunn 2005). Eingesetzt wurden zudem Ozon-Passivsammler (Nunn 2005), welche zusätzlich zu den Ozon-Monitoren in wöchentlicher Auflösung die Ozonverteilung im Kronenraum in beiden Ozon-Regimen dokumentierten. Die 100 Passivsammler wurden nach dem Fahnenmastprinzip an Seilen in die jeweilige Messhöhe (6 m, 14 m, 20 m, 26 m) gezogen (Werner und Fabian 2002). Die Ozonbegasung wurde jedes Jahr kurz vor Austrieb der Laubbäume gestartet und Anfang November, nach dem herbstlichen Blattfall beendet.

2.3 Phänologie und Seneszenz

Im Frühjahr, zu Beginn der Vegetationszeit, wurde im Rahmen dieser Studie mehrmals in der Woche das Blattaustriebs- bzw. Nadelaustriebs-Stufe der zu untersuchenden Äste protokolliert (siehe Tabelle 2.1). Beendet wurde die Bonitur, sobald bei Buche die Blätter voll entwickelt waren, der Langtrieb erstarkt war und aufrecht abstand, und bei Fichte, sobald das Längenwachstum abgeschlossen war und neue Knospenanlagen am Spitzentrieb auftraten.

Zur Dokumentation des Austriebs von Buche und Fichte wurde folgender Boniturschlüssel (Nunn 2005) verwendet:

Tabelle 2.1: Aufnahmekatalog (Boniturschlüssel) des Austriebs bei Buche und Fichte.

Austriebsstufen für Buche	Austriebsstufen für Fichte
0 Winterknospe	0 Winterknospen, Knospen geschlossen, nicht verdickt
1 Knospe gestreckt, kein Grün sichtbar	1 Knospen verdickt, grüne Nadeln schimmern durch Knospenhülle hindurch
2 grüne Spitzen an Knospe sichtbar	2 Knospen infolge Verdickung aufgeplatzt, Knospenhaube teilweise abgeworfen
3 erste Blätter sichtbar, gefaltet	3 Längenwachstum beginnt
4 Blätter entfaltet, hängend	4 Fortgeschrittenes Längenwachstum
5 Blätter waagrecht abstehend, Langtrieb gestreckt, aber hängend	5 Nadeln der neuen Triebe sind leicht abgespreizt
6 Blätter voll entwickelt, Langtrieb abstehend	6 Längenwachstum abgeschlossen, Auftreten neuer Knospenanlagen am Spitzentrieb

Die so erhobenen Daten wurden über das Programm Origin 6.0 (Microcalc Inc., Northampton, USA) bearbeitet. Zur Bestimmung des Tages, an dem die Austriebsstufe 3 bei 50 % der Knospen erreicht war, wurde eine sigmoidale Anpassung mit Hilfe der Formel von Boltzman verwendet (siehe Gleichung 2).

$$y = \frac{A0 - A6}{1 + e^{(x-x0)/dx}} + A6 \quad \text{Gleichung 2}$$

A0 = 0 (erste Stufe des Boniturschlüssels)

A6 = 6 (letzte Stufe des Boniturschlüssels)

e = Exponentialfunktion

x0 = Wendepunkt

dx = Steigung der Kurve

A0 und A6 sind festgelegte Konstanten: A0 ist die erste Stufe des Boniturschlüssels (Winterknospen), A6 ist die letzte Stufe des Boniturschlüssels (Blätter voll entwickelt). Für spätere Auswertungen wurde als Beginn der Vegetationszeit der Termin herangezogen, an dem die Austriebsstufe 3 erreicht war.

Am Ende der Vegetationszeit wurde die Seneszenz, der herbstliche Blattfall, protokolliert. Hierfür wurden die Äste zu Herbstanfang nach Abschluss der Gaswechselfmessungen in Netze zur quantitativen Erfassung der abfallenden Blätter und deren Fläche eingehüllt (siehe Abbildung 2.5).



Abbildung 2.5: Eingenetzer Ast zur Ermittlung der abgefallenen Blattfläche und Protokollierung des Verlaufes der Seneszenz.

Anhand des Verfärbungszustandes bzw. Abfalls der Blätter konnte der Fortschritt der Seneszenz ermittelt werden. Das Seneszenzstadium errechnet sich als Anteil der verfärbten und der bereits abgefallenen Blattfläche in Prozent der Ausgangsblattfläche eines Astes. Zur Bestimmung des Datums, an dem 50 % der Blätter verfärbt waren, wurde analog zum Blattaustrieb eine sigmoidale Anpassung nach Boltzman (siehe Gleichung 3) (Origin 6.0, Microcalc Inc., Northampton, USA) angewendet.

$$y = \frac{A0 - A100}{1 + e^{(x-x_0)/dx}} + A100$$

Gleichung 3

A0 = 0 (keine Blattverfärbung)

A100 = 100 (alle Blätter verfärbt)

e = Exponentialfunktion

x0 = Wendepunkt

dx = Steigung der Kurve

A0 und A100 sind festgelegte Konstanten: A0 = keine Verfärbung der Blätter, A100 = alle Blätter verfärbt.

Durch die Erfassung von Austrieb und Seneszenz konnte die Länge der Vegetationsperiode in Tagen zwischen Austriebsstufe 3 (bei 50 % der Knospen) und Seneszenzstadium 50 % ermittelt werden. Mit Hilfe dieser Daten kann ein potentieller Einfluss von Ozon auf die Bäume aufgezeigt werden.

2.4 Biometrie

2.4.1 Ermittlung der spezifischen Blattfläche

Im Spätsommer wurde die spezifische Blattfläche (SLA: **S**pecific **L**eam **A**rea) der Buchen-Blätter bestimmt, eine Skalierungsgröße, die die Blattfläche mit der Blattmasse ins Verhältnis setzt. Mit Hilfe des SLA kann eine potentielle Ozon-Wirkung auf die strukturelle Differenzierung von Sonnen- und Schattenblättern nachgewiesen werden. SLA errechnet sich wie folgt:

$$SLA = \frac{A}{M} \quad \text{Gleichung 4}$$

SLA	= Spezifische Blattfläche [m ² kg ⁻¹]
A	= Blattfläche [m ²]
M	= Blattmasse [kg]

Hierfür wurden je nach Astgröße 5 bis 15 Blätter über die gesamte Astlänge der untersuchten Äste geerntet. Anschließend wurden diese Blätter gescannt und dabei deren Fläche mittels Delta-T Scan 2.0 (Delta-T, Burwell, UK) bestimmt. Danach wurden die Blätter bei 60°C bis zur Gewichtskonstanz als Voraussetzung der SLA-Berechnung getrocknet und anschließend gewogen.

An den Ästen, an denen zusätzlich Xylemfluss gemessen wurde (siehe Kapitel 2.7.2), wurden im Spätsommer (vor Blattfall) Netze angebracht. Durch diese Netze konnte nicht nur der Verlauf der Seneszenz verfolgt, sondern auch die Blätter des gesamten Astes gesammelt werden. Nach der vollständigen Seneszenz wurden die mittlerweile verwelkten Blätter des gesamten Astes gezählt und gewogen. Aus den Flächenwerten der vor dem Welken entnommenen SLA-Proben und dem Trockengewicht der verwelkten Blätter wurde dann über den SLA-Wert die gesamte Blattoberfläche dieser Äste berechnet, welche als Bezugsgröße für den Xylemfluss auf Astebene dient.

2.4.2 Blattoberflächen- und Kronenoberflächenberechnung

Da Buchenblätter einen bifazialen Blattaufbau haben, bei dem sich die Stomata nur auf der Blattunterseite befinden, wurde für die Berechnung von Gaswechsel, Transpiration und Ozonaufnahme die projizierte Blattfläche herangezogen. Fichtennadeln dagegen zeichnen sich durch einen äquifazialen Nadelaufbau aus, wonach die Stomata auf der gesamten Nadeloberfläche verteilt sind. Aus diesem Grund wurde bei Fichte die projizierte Nadeloberfläche, die man durch das Scannen der Nadeln erhält, in die allseitige Oberfläche durch Multiplikation mit dem Faktor 2,6 (Oren et al. 1986) umgerechnet.

Die Bestimmung der Kronen(Laub)oberfläche ($A_{\text{Laub-Bu}}$ für Buche, $A_{\text{Laub-Fi}}$ für Fichte) erfolgte anhand allometrischer Gleichungen von Burger (1950) und Patzner (2004).

Mit Hilfe von Dendrometerbändern (UMS, München, DE) wurden die **Brusthöhendurchmesser (BHD)** der Intensivmessbäume erfasst und monatlich aufgezeichnet (P. Wipfler, Waldwachstumskunde, TUM). Die BHD's der Intensivmessbäume wurden anschließend in die Regressionsgleichungen eingesetzt und so die gesamte Kronen-Lauboberfläche (Kronenoberfläche) der Bäume berechnet (Burger 1950, Patzner 2004).

Für Buche gilt folgende Regression:

$$A_{\text{Laub-Bu}} = (0,1748 * BHD^2) + 0,1037 * BHD \quad \text{Gleichung 5}$$

Für Fichte gilt folgende Regression:

$$A_{\text{Laub-Fi}} = (0,0936 * BHD^2) + 0,42 * BHD \quad \text{Gleichung 6}$$

2.5 Meteorologische Daten

Am Gerüst und im Versuchsbestand wurden vom Lehrstuhl für Bioklimatologie der TUM folgende mikroklimatische Parameter ermittelt: Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Niederschlag, Luftdruck, Ozonkonzentration und Globalstrahlung.

Die Ozonkonzentration wurde mittels acht online Ozonanalytoren kontinuierlich gemessen (ML8811, Monitor Labs, USA) (vgl. Kap. 2.2).

AOT40 wurde nach Fuhrer (1994) berechnet, indem die Stundenmittelwerte der Ozonkonzentrationen $> 40 \text{ nl l}^{-1}$ nach Abzug eines Basisniveaus von 40 nl l^{-1} aufsummiert wurden. Dabei wurden nur die Ozonkonzentrationen am Tag bei Lichtbedingungen $> 50 \text{ W m}^{-2}$ berücksichtigt, die Ozonkonzentrationen in der Nacht flossen in die Berechnung nicht mit ein.

SUM0 dagegen wurde als die Summe aller herrschenden Ozonkonzentrationen ohne Abzug eines Schwellenwertes berechnet. Im Gegensatz zu AOT40 flossen hier in die Berechnung auch die nächtlichen Ozonkonzentrationen ein.

An 16 Punkten innerhalb der Buchen- und Fichtenbaumkronen wurden Temperatur und Luftfeuchte bestimmt (Psychro- und Baro-Transmitter, Model Assmann; ThiesClima, Göttingen, DE).

Die Luftdruckmessung fand an Turm 4 auf 28 m Höhe statt. Am selben Turm wurde die Windgeschwindigkeit in 32 m Höhe mit Hilfe von Schalenanemometern (ThiesClima, Göttingen, DE) bestimmt.

Als Niederschlagsdaten wurden die Werte, die von der nahe gelegenen Waldklimastation der Bayerischen Forstverwaltung erhoben wurden, herangezogen (LWF, G. Gietl; Model Pulvio; Ott Messtechnik, Kempten, DE).

Das Bodenwasserpotential in der Intensivmessfläche des Versuchsbestandes wurde mit Hilfe von Equitensiomern (Firma Ecomatik, Dachau, DE) aufgenommen.

Die Globalstrahlung [W m^{-2}] wurde am Referenzturm (Turm 4) auf 32 m Höhe mit einem Pyranometer (Typ CM 11; Kipp & Zonen, Delft, NL) gemessen. Die Photosynthetische Photonenflussdichte (PPFD [$\mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$]) wurde über der Baumkrone gemessen (LI-190 Quantum Sensor, Firma LI-COR, Biosciences, Lincoln Nebraska, USA).

2.6 Gaswechselfmessung

Der Gaswechsel wurde an intakten und am Baum befindlichen Blättern und Ästen gemessen. Sowohl die Küvette des Porometers, mit dem der Gaswechsel einzelner Blätter gemessen werden kann, als auch die Küvette der Gaswechselfmessanlage, in welcher der Gaswechsel eines gesamten Astabschnittes ermittelt werden kann, erfassen den Netto- CO_2 -Austausch zwischen Pflanze und Umgebungsluft und die Änderung der Luftfeuchte (von Willert et al. 1995, Schulze et al. 2002).

Der CO_2 -Austausch des Blattes basiert auf Diffusionsprozessen, die durch die chemische Potentialdifferenz von Kohlendioxid zwischen Blattinnerem und Umgebungsluft angetrieben werden. Sofern respiratorische oder photosynthetische Prozesse im Blatt überwiegen, kommt es zu einer Netto- CO_2 -Abgabe bzw. einer Netto- CO_2 -Aufnahme (von Willert et al. 1995).

2.6.1 Walz-Gaswechselfmessanlage (Astküvette)

Zur kontinuierlichen Ermittlung von Tagesgängen der Photosyntheserate und der Transpirationsrate wurden zwei stationäre Gaswechselfküvetten (Walz, Effeltrich, DE) montiert (siehe Abbildung 2.6).



Abbildung 2.6: Gaswechselfküvette (Walz, Effeltrich, DE)

Die Gaswechselfküvetten zeichneten den Gaswechsel und das dazugehörige Mikroklima auf. Aufgrund der Erreichbarkeit vom Gerüst aus konnten 2006 nur ein Sonnenast der Buche 417 unter $1 \times O_3$ und ein Sonnenast der Fichte 419 unter $2 \times O_3$ in die Küvetten eingebaut werden. Am Ende der Messperiode wurden die Äste geerntet und deren Lauboberfläche, Laubgewicht und SLA bestimmt.

Im Folgenden wird die Funktionsweise der Küvetten erläutert:

Die Wände der Küvetten bestehen aus speziellem Plexiglas mit einem hohen Transmissionsgrad ($> 90\%$) für den Bereich der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR: 400 nm bis 700 nm; von Willert et al. 1995).

Der Küvettendeckel aus poliertem Quarzglas hat eine hohe Durchlässigkeit im UV-Bereich (Ultraviolette Strahlung: 100 nm bis 400 nm, Schulze et al. 2002) und IR-Bereich (Infrarot-Bereich 750 bis 1400 nm, Götz 1996). Zur Messung der Strahlung befinden sich in der Mitte der Küvette Licht-Sensoren (LI-190SB; LI-COR, Biosciences, Lincoln Nebraska, USA), die die Photonenflussdichte im Bereich der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) messen.

Der am Baum natürlich wachsende und in die Küvette eingedichtete Astabschnitt wurde mit Außenluft versorgt, so dass in der Küvette dieselben Feuchte- und CO_2 -Gehalte wie in der Außenluft herrschten.

Die Luftfeuchten wurden mittels IR-Gasanalysator (Binos 4b.2; Emerson, Hasselroth, DE) gemessen, dabei wurde die Luftfeuchte der Außenluft (Eingangsfeuchte) als Referenz-Wert definiert, die Luftfeuchte der Küvette (Ausgangsfeuchte) als Ist-Wert.

Die Temperatur in der Küvette (Ist-Wert) wurde mit jener der Außenluft (Referenz-Wert) verglichen und mit Hilfe von Peletierelementen an die Außentemperatur angepasst. Mittels eines Thermoelements (\emptyset der Drähte = 0,05 mm; Kupfer und Konstantan; Ing. Th. Feuerbach) wurde die Oberflächen-Temperatur des Blattes ermittelt.

In der Küvette befand sich ein Querstromlüfter, damit sich die Luft gleichmäßig verteilen konnte. Durch die so erzeugte Luftzirkulation kommt es nach Wullschleger et al. (1998) zu einem Abbau der Luftgrenzschichten.

Da die Transpiration des Astes die Kammerfeuchte nicht erhöhen darf, wurde ein zusätzlicher Trocknungskreislauf, der sogenannte Nebenschluss, installiert.

Zur Bestimmung der Netto-CO₂-Assimilationsrate wurde ein Differenzmessverfahren angewendet. Dabei wird die durch Atmung und Assimilation geänderte CO₂-Konzentration der Kammerluft mit der ursprünglichen Eingangskonzentration verglichen. Ein IR-Differenzgasanalysator (Binos 4b.2; Emerson, Hasselroth, DE) bestimmt die CO₂-Differenz zwischen Eingangs- und Kammerluft.

Der Kammerdurchfluss wird mittels elektronischen Massendurchflussmessern erfasst (Tylan FM 360; Tylan General TCA GmbH, Eching, DE). Die ermittelten Daten wurden alle vier Minuten abgespeichert. Die Gaswechsellaten wurden wie folgt berechnet (Gleichung 7):

$$A = (\Delta CO_2 - N_p) * \frac{(F_{Hs1} + F_{Hs2})}{k_1} \quad \text{Gleichung 7}$$

A	= Netto- CO ₂ -Assimilationsrate [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ min}^{-1} \text{ Küvette}^{-1}$]
ΔCO_2	= ermittelte CO ₂ -Differenz des Binos [ppm]
N _p	= elektrischer Nullpunkt des Binos [ppm]
F _{Hs1}	= Hauptschlussdurchfluss zur CO ₂ - und H ₂ O-Analyse [l min^{-1}]
F _{Hs2}	= Durchfluss zur Nebenschlussfeuchteanalyse = 0,5 [l min^{-1}]
k ₁	= Molvolumen von Luft = 22,414 [l mol^{-1}]

Die Transpirationmessung erfolgte durch das Kompensationsverfahren:

Aus der Multiplikation des Feuchteunterschiedes zwischen Kammerluft und getrockneter Nebenschlussluft mit der Durchflussrate der Luft wird die Transpirationsrate errechnet. Hierfür wurden die Luftfeuchte mittels IR-Gasanalysator (Binos 4b.2) und der Durchfluss elektronisch ermittelt.

Der Nebenschlussdurchfluss wird durch den kontinuierlichen Vergleich von Eingangsfeuchte (Luftfeuchtigkeit der einströmenden Luft = Sollwert) und Ausgangsfeuchte (Luftfeuchtigkeit der ausströmenden Luft = Istwert) geregelt.

Die Transpirationsrate berechnet sich nach von Willert et al. (1995) (Gleichung 8):

$$E = \Delta H_2O_{Ns} * \frac{F_{Ns}}{k1} + \Delta H_2O_{Hs} * \frac{F_{Hs}}{k1} \quad \text{Gleichung 8}$$

E	= Transpirationsrate [mmol H ₂ O min ⁻¹ Küvette ⁻¹]
ΔH ₂ O _{Ns}	= Differenz der molaren Feuchte im Nebenschluss vor und nach der Trocknung [%]
F _{Ns}	= Durchflussrate im Nebenschluss [l min ⁻¹]
k1	= Molvolumen von Luft 0 22,414 [l mol ⁻¹]
ΔH ₂ O _{Hs}	= Differenz der molaren Feuchte im Hauptschluss vor und nach Verlassen der Messküvette [%]
F _{Hs}	= Hauptschlussdurchfluss = Kammerdurchsatz [l min ⁻¹] = F _{Hs1} + F _{Hs2}

Mit Hilfe der Transpiration und des luftdruckbezogenen Wassersättigungsdefizits (Δw) am Blatt wurde die Blattleitfähigkeit für Wasserdampf bestimmt, bei Buche auf die projizierte Blattoberfläche und bei Fichte auf die gesamte Nadeloberfläche des eingeschlossenen Astes bezogen. Diese Leitfähigkeit stellt ein Maß für den mittleren Öffnungsgrad der Spaltöffnungen des gesamten Blattkollektivs dar und errechnet sich folgendermaßen (von Willert et al. 1995) (Gleichung 9).

$$g_{H_2O_bl} = \frac{E}{\Delta w} \quad \text{Gleichung 9}$$

g _{H₂O_{bl}}	= Blattleitfähigkeit für Wasserdampf [mmol H ₂ O min ⁻¹]
E	= Transpirationsrate [mmol H ₂ O min ⁻¹]
Δw	= Differenz der Wasserdampfmolenbrüche zwischen Blatt und Umgebungsluft [H ₂ O mmol mol ⁻¹]; Luftdruckbezogenes VPD

2.6.2 CIRAS-2 Porometer



Abbildung 2.7: Links: Porometer CIRAS-2 der Firma PP Systems (Hitchin, UK), rechts: dazugehörige Gaswechsellkuvette (PP Systems, Hitchin, UK) für Laubgehölze.

Zur Messung des Blatt-Gaswechsels wurde in der vorliegenden Arbeit das Porometer CIRAS-2 (PP Systems, Hitchin, UK) verwendet (siehe Abbildung 2.7). Dieses Porometer-System verfügt über je eine Messkuvette für Buchenblätter und für kleine Fichtenzweige. Für die regelmäßige Messung des Gaswechsels der gleichen Blätter und Nadeln eines Baumes unter im Freiland herrschenden Lichtbedingungen über die Vegetationsperiode hinweg wurden je Mess-Ast bei den Buchen drei Blätter, bei den Fichten drei Zweige sowohl unter $1 \times O_3$ als auch unter $2 \times O_3$ dauerhaft gekennzeichnet. Die Gaswechsellmessungen wurden sowohl unter Freiland-Bedingungen durchgeführt, als auch mit künstlichem Licht, um Lichtabhängigkeitskurven der Photosyntheseraten erstellen zu können. Dabei wurde für beide Behandlungen die Temperatur in der Kuvette bei 25°C gehalten. Die CO_2 -Konzentration lag bei 380 ppm, die Luftfeuchte bei ca. 80 %.

Bei der Erstellung der Lichtabhängigkeitskurven wurde das Buchenblatt bzw. der Fichtenzweig künstlichem Licht ausgesetzt, das ausgehend von niedriger photosynthetischer Photonenflussdichte (PPFD [$\mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$]) auf hohes PPFD (bis zur Lichtsättigung) hochgeregelt wurde. Dabei wurden die Bedingungen in der Sonnen- und Schattenkrone beachtet, indem die Messungen der Lichtabhängigkeitskurven in der Sonnenkrone bei $20 \mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$ begannen und stufenweise über 40, 60, 80, 100, 250, 500, 750, 1000 auf $1500 \mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$ gesteigert wurden. In der Schattenkrone wurde die Lichtabhängigkeitskurve bei $10 \mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$ gestartet und dann die Lichtintensität über 20, 40, 60, 80, 100, 250, 500, 750 auf $1000 \mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$ erhöht. Hierbei ist A_{max} die maximale Photosyntheserate bei Lichtsättigung ($1000 \mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$), g_{max} die maximale Leitfähigkeit bei Lichtsättigung ($1000 \mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$) und $E_{\text{I}_{\text{max}}}$ die maximale Transpirationsrate bei Lichtsättigung ($1000 \mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Die photosynthetische Effizienz (ph_{eff}) stellt die Steigung der Regressionsgeraden durch die Wertepaare Photosyntheserate und $PPFD \leq 80 \mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$ dar, und der photosynthetische Wassernutzungskoeffizient (WUE) den Quotienten aus A_{max} und $E_{\text{I,max}}$.

Zusätzlich wurden zur Bestimmung der Leitfähigkeit für Wasserdampf in der nacht an den Sonnenästen von je drei Fichten und drei Buchen Nachtmessungen unter $1xO_3$ und $2xO_3$ durchgeführt. Die Messungen begannen zwei Stunden nach Sonnenuntergang und endeten kurz vor Sonnenaufgang (von ca. 23 Uhr bis 3 Uhr). Für diese Messungen wurden dieselben Einstellungen wie unter Freilandbedingung gewählt.

Die Photosyntheseraten bezogen sich auf m^2 Blattfläche. Bei Buche wurde die Photosynthese auf $2,5 \text{ cm}^2$ Blattfläche gemessen. Bei Fichte war ein Dummy-Wert von 10 cm^2 Fläche vorgegeben. Nach Ernte der für die Photosynthesemessung eingeschlossenen Nadeln wurde die Nadeloberfläche bestimmt und die Photosynthese anhand der realen Nadeloberfläche pro m^2 umgerechnet.

2.7 Xylemflussmessung

Der Xylemfluss gibt quantitativ den Wassertransport einer Pflanze von den Wurzeln in die Krone und durch das Laub in die Atmosphäre wieder. Die Xylemflussmessung erfasst den Wasserfluss des Baumes im wasserleitenden Gewebe.

Der Wassertransport erfolgt gemäß der Kohäsionstheorie entlang eines Wasserpotentialgradienten vom Boden zur Atmosphäre, letztere hat im Boden-Pflanzen-Atmosphären Kontinuum (Soil-Plant-Atmosphere Continuum) das negativste Wasserpotential mit etwa $\psi = -1000 \text{ bar}$ (Lüttge et al. 1999). Der negative Druck in der Atmosphäre bewirkt, dass Wasser durch die Gefäße des Xylems entgegen der Schwerkraft transportiert werden kann (Matyssek et al. 2010a). Auf Grund der durch den Wasserpotentialgradienten zwischen Wurzel und Blatt hervorgerufenen Saugspannung und der Kohäsion zwischen den Wassermolekülen können durchgängige Wasserfäden von den Wurzeln bis in die Blätter gebildet werden. Die Kohäsion zwischen den Wassermolekülen reicht aus, um bei einigen Baumarten ein hydraulisches Kontinuum im Xylem von mehr als 100 m zu ermöglichen (Lüttge et al. 1999, Schulze et al. 2002). Die Ursache der Kohäsion liegt in der Bildung von Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Wassermolekülen (Lüttge et al. 1999).

Die Abgabe von Wasserdampf durch Pflanzenorgane an die Atmosphäre wird als Transpiration bezeichnet, dabei bewegt sich Wasserdampf durch Diffusion entlang eines Konzentrationsgradienten durch die Spaltöffnungen in die Atmosphäre (Matyssek et al. 2010a). Die Transpiration wird durch die Stomata reguliert. Strahlung, Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft, Bodenwasserverfügbarkeit und Temperatur haben

dabei einen Einfluss auf die Transpiration und die Öffnungsweite der Stomata, aber auch Windgeschwindigkeiten und Grenzschichten um Laub und Kronenraum.

Für die vorliegende Arbeit kamen zur kontinuierlichen Messung des Xylemflusses im Stamm und an den Messästen zwei Varianten der Temperatur-Gleichgewichtsmethode zum Einsatz: Zum einen die Xylemflussmessung im Stamm nach Granier (1985) (**T**issue **H**eat **B**alance = THB) und zum anderen die Xylemflussmessung auf Astebene nach Cermak et al. (2004) (**S**tem **H**eat **B**alance = SHB).

Die Messungen wurden von Anfang bis Ende der Vegetationsperiode durchgeführt.

2.7.1 Xylemflussmessung im Stamm (Tissue Heat Balance)

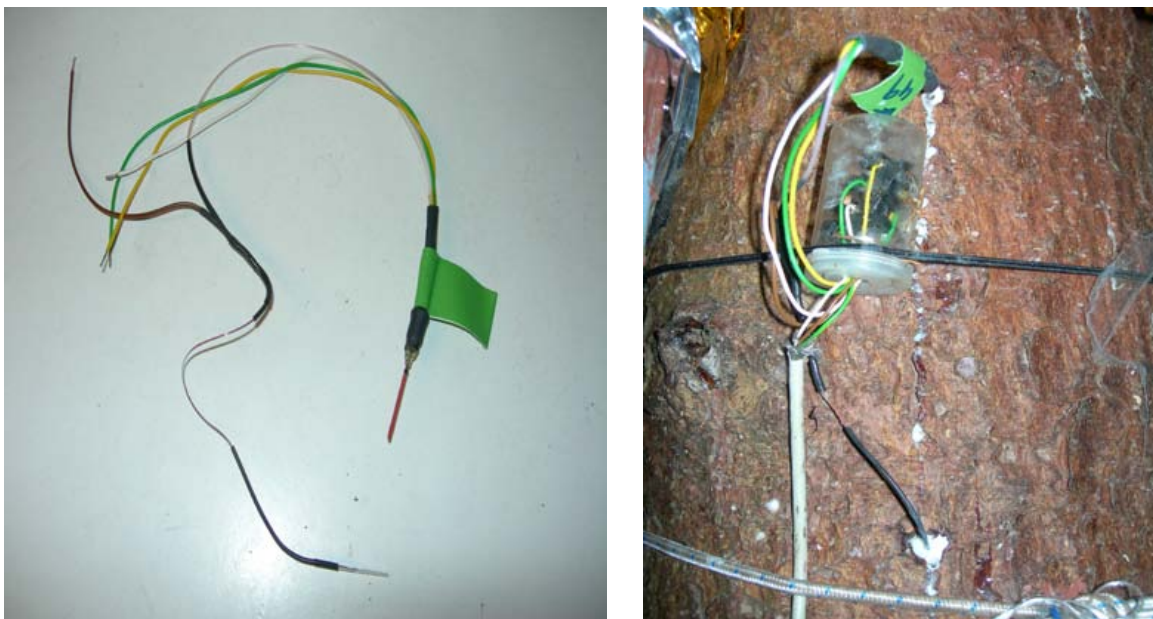


Abbildung 2.8: Links nicht eingebauter Xylemflusssensor (THB); rechts eingebauter Xylemflusssensor (THB): die obere Sonde wird beheizt, die untere dient der Referenzmessung.

Zur Durchführung dieses Messverfahrens wurden paarweise auf den West- und Südseiten eines jeden Intensiv-Messbaumes in Brusthöhe (1,30 m) Mess-Sonden angebracht. Die zwei Zentimeter langen und zwei Millimeter dicken nadelförmigen Sonden (jeweils ein Paar) (siehe Abbildung 2.8) sind Teil eines Kupfer-Konstantan-Thermoelements (Typ T) zur Temperaturmessung, welches den Wasserfluss thermisch als Massenstrom erfasst. Für die Montage der Sonden wurden in den Stamm mit einer Bohrmaschine zwei 2 mm breite Löcher in einem vertikalen Abstand von 10 cm bis 15 cm gebohrt. In diese wurden 2,1 cm lange Aluminiumhülsen eingeführt, um die Sonden vor Beschädigungen beim Einbau zu schützen, eine homogene Erwärmung der Sonden zu ermöglichen und eine gleichmäßige Weitergabe der Wärme an das Holz zu gewährleisten. Zusätzlich wurden diese Hülsen zur besseren Wärmeleitfähigkeit zwischen Hülse und Thermoelement mit einer Wärmeleitpaste befüllt.

Die Sonden wurden am Lehrstuhl hergestellt (Ilse Süß, Technische Assistentin am Lehrstuhl für Ökophysiologie der Pflanzen, TUM). Dafür wurde ein modifiziertes Verfahren angewendet, bei dem eine Sonde eines jeden Paares aus einer medizinischen Kanüle (Sterincanüle, 0,9 mm x 40 mm und 0,9 mm x 70 mm) hergestellt wird. Diese Kanülen-Sonde wird an der Spitze mit Konstantandraht ($\varnothing = 0,13$ mm; Firma Newport Omega; Deckenpfronn, DE) umwickelt, wodurch die Sonde beheizt werden kann. Die andere Sonde besteht aus einem Transparen Schlauch (Firma Bürklin, Oberhaching, DE). In beiden Sonden befinden sich Kupfer-Konstantan-Thermoelemente (Firma Newport Omega, Deckenpfronn, DE; Kupferdraht: $\varnothing = 0,13$ mm), mit Hilfe derer die Temperatur gemessen werden kann.

Die jeweils oberen Sonden wurden mit einer konstanten Heizleistung von 0,2 Watt versorgt und somit erwärmt, während die unteren der Messung der Referenztemperatur dienen. Mit dem Zusammenschließen der Konstantandrähte beider Sonden kann die Differenztemperatur zwischen beiden Sonden aufgenommen werden. Diese wird als Spannungssignal auf Basis einer 10 s Auflösung als 10 min Mittelwerte auf einen Datalogger (DL2e; Delta-T-Devices, Cambridge, UK) übertragen. Diese Spannungssignale [μV] mussten zunächst im Tabellenkalkulationsprogramm Excel (Office XP 2003, Microsoft Corporation, Redmond, USA) in Temperaturen [K] umgerechnet werden. Die Temperaturdifferenz betrug etwa 10 K bis 13 K, dies entspricht Werten von etwa 400 μV bis 520 μV (1 K = 40 μV).

Eine Styroporabdeckung der Sensoren schützte gegen Witterungseinflüsse, vor allem gegen thermische Störungen durch Besonnung.

Drei Buchen und drei Fichten waren neben den zwei Zentimeter langen Sonden zusätzlich mit Sonden ausgestattet, die vier und sechs Zentimeter tief in den Splint reichten. Diese dienten der Bestimmung der Abnahme der Saftflussrate zur Stammmitte hin im Radialprofil. Grundlage der Berechnung des Xylemflusses ist die Temperaturdifferenzmessung zwischen beheizter und unbeheizter Sonde (Referenz). Das Wasser, das durch den Stamm fließt, kühlt den oberen beheizten Sensor ab, dies führt dazu, dass die Temperaturdifferenz zwischen oberen und unteren Sensor geringer wird. Fließt kein Wasser durch den Stamm, ist die Temperaturdifferenz maximal. Da die applizierte Wärme über den Massenfluss des Xylemsafts (Konvektion) schneller transportiert wird als durch die Wärmeleitung im Gewebe, verhält sich der Grad der Abkühlung des beheizten Sensors proportional zu Flussrate des Xylemflusses.

Granier (1985) führte Durchflusseexperimente an Stammabschnitten verschiedener Baumarten (*Pseudotsuga menziesii*, *Pinus nigra*, *Quercus robur*, *Castanea sativa* und *Prunus domestica*) durch, anhand derer er empirisch die Formeln der Xylemflussberechnung festlegte.

Für alle von ihm untersuchten Bäume wurde demnach die gleiche Beziehung zwischen gravimetrisch bestimmter Flussdichte (Fluss pro Splintfläche und Zeiteinheit) und Flussindex (K) gefunden. Dieser Flussindex gibt das Verhältnis zwischen Grad der Abkühlung der beheizten Sonden und der Saftflussrate wieder.

Nach Granier (1985) lässt sich der Flussindex (dimensionslos) aus den Temperaturdifferenzen berechnen (Gleichung 10):

$$K = \frac{T_{\Delta M} - T_{\Delta A}}{T_{\Delta A}} \quad \text{Gleichung 10}$$

K = Flussindex
 $T_{\Delta M}$ = Temperaturdifferenz bei Xylemfluss = 0
 $T_{\Delta A}$ = aktuelle Temperaturdifferenz

Die Flussdichte [$\text{ml cm}^{-2} \text{min}^{-1}$] errechnet sich empirisch (nach Granier 1985) und stellt den Fluss pro Splintflächeneinheit und Zeitintervall dar (Gleichung 11):

$$u = 0,714 * K^{1,231} \quad \text{Gleichung 11}$$

u = Flussdichte
 K = Flussindex

Da der Wassertransport in Bäumen nur im Splintholz möglich ist und zum Kernholz hin abnimmt, musste als nächster Schritt die wasserleitende Splintfläche ermittelt werden (Lüttge et al. 1999).

Hierzu wurden die Flussdichten mit 2 cm, 4 cm und 6 cm tief in den Splint reichenden Sensoren gemessen. Die Flussdichte des Fühlers mit 2 cm Länge wurde auf 100 % gesetzt und die Abnahme der Flussdichte in den Tiefen bei 4 cm und 6 cm prozentual ermittelt. Die Abnahme der Flussdichte ab 8 cm Splint-Tiefe wurde durch die Annahme einer linearen Abnahme extrapoliert.

Die Querschnittsfläche des wasserleitenden Splintholzes [cm^2] errechnet sich aus den Ringflächen (siehe Abbildung 2.9), die sich aus den unterschiedlichen Längen der Sensoren ergeben (Gleichungen 12 bis 15):

Für die Ringfläche der Sensorlänge 2 cm: $A_{2cm} = \pi * r^2 - \pi * (r - 2)^2$ Gleichung 12

Für die Ringfläche der Sensorlänge 4 cm: $A_{4cm} = \pi * (r - 2)^2 - \pi * (r - 4)^2$ Gleichung 13

Für die Ringfläche der Sensorlänge 6 cm: $A_{6cm} = \pi * (r - 4)^2 - \pi * (r - 6)^2$ Gleichung 14

Für die Ringfläche der Sensorlänge 8 cm: $A_{8cm+Rest} = A_{2cm} - A_{4cm} - A_{6cm}$

Gleichung 15

r = Radius [cm]

A = Fläche [cm²]

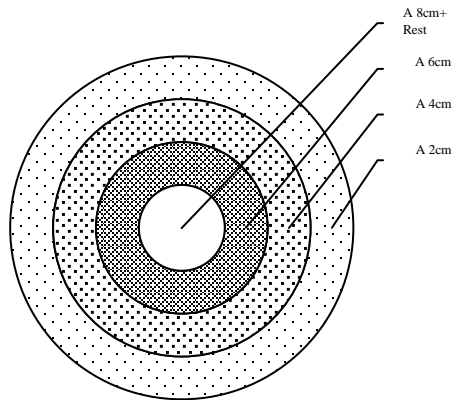


Abbildung 2.9: Der Stammquerschnitt teilt sich in Ringflächen von 2 cm, 4 cm, 6 cm und 8 cm + Rest auf.

Um die korrigierte Splintfläche (A_{korr}) zu erhalten, wurden die entsprechenden Ringflächen wochenweise mit der jeweiligen prozentualen Abnahme der Flussdichte multipliziert und aufsummiert. Bedingt durch Stromausfälle oder defekte Sensoren fielen auch bei diesen Sensoren vereinzelt Messungen aus. In diesem Fall wurden die Daten der Tiefenprofile der Vorwoche bzw. der folgenden Woche herangezogen.

Der Xylemfluss [ml min⁻¹] errechnet sich schließlich aus der Flussdichte (u) und der korrigierten, wasserleitenden Splintfläche (A_{korr}) (Gleichung 16):

$$F = u * A_{korr}$$

Gleichung 16

F = Xylemfluss [ml min⁻¹]

U = Flussdichte [ml cm⁻² min⁻¹]

A_{korr} = wasserleitende Splintfläche [cm²]

Zur Ermittlung von während der Vegetationsperiode transpirierten Wassermengen mussten Lücken in den Xylemflussdaten, welche durch Stromausfälle und defekte Sensoren entstanden waren, interpoliert werden. Hierzu wurden lineare Regressionen zwischen der Globalstrahlung und dem Xylemfluss gebildet. Nach Patzner (2004) weist die Strahlung unter allen klimatischen Faktoren die engste Korrelation mit der Kronentranspiration auf.

2.7.2 Xylemflussmessung auf Astebene (Stem Heat Balance)

Zusätzlich zur Xylemflussmessung im Stamm wurde der Xylemfluss in einzelnen Ästen bestimmt. Die Asttranspiration wurde hierbei mit Xylemflusssensoren nach Cermak/Kucera (Cermak et al. 2004; siehe Abbildung 2.10) erfasst. An jeweils einem Schatten- und Sonnenast von je drei Buchen unter $1xO_3$ unter $2xO_3$ und drei Fichten unter $1xO_3$, an denen auch der Xylemfluss im Stamm gemessen wurde, wurde der Xylemfluss ermittelt.



Abbildung 2.10: Xylemflusssensor nach Cermak/Kucera (EMS, Brno, CZ). Links im geschlossenen Zustand, am Ast montiert. Rechts im offenen Zustand (Nadeln und Heizspirale sichtbar).

Bei den Buchen- und Fichtenästen wurden dieselben Sensoren (Sap Flow Gauge T4/T693.2; EMS, Brno, CZ) verwendet. Es handelt sich um ein **Stem Heat Balance**-Prinzip, bei dem, im Gegensatz zu unter 2.7.1 beschriebenen System von Granier (**Tissue Heat Balance**), ein gesamtes Astsegment über eine Manschette beheizt wird. Mit Hilfe einer Steuereinheit wird die Temperaturdifferenz zwischen beheiztem und unbeheiztem Segment konstant bei 4K (ΔT) gehalten. Datenlogger zeichneten die gemessenen Spannungen in [mV] auf, eine vom Hersteller mitgelieferte Software (MINI32 vers. 3.65.24.14; EMS, Brno, CZ) rechnete die Spannungsdifferenzen in kg H_2O um. Der Umrechnung liegt folgende Gleichung zugrunde (Gleichung 17):

$$Q = \frac{3600}{C_w * \Delta T} * \frac{R_h * U^2}{R_m^2 * 10^6} \quad \text{Gleichung 17}$$

- Q = Saftfluss [kg H_2O]
- U = gemessene Spannung [mV]
- Rh = Widerstand der Heizwendel (= 100 Ohm)
- Rm = Konstante (= 0,6 Ohm)
- Cw = Spezifische Wärmekapazität von Wasser (= 4186,8 J*kg⁻¹*K⁻¹)
- ΔT = Temperaturdifferenz zwischen den Messpunkten (= 4K)

Zur Verhinderung von Witterungseinflüssen auf die Xylemflussmessung wurden die Fühler mit Styroporkugeln und einer Silberfolie abgedeckt. Der Xylemfluss der Buchen-Äste wurde auf die projizierte Lauboberfläche und der Xylemfluss der Fichten-Äste auf die gesamte Nadeloberfläche des gemessenen Astes bezogen.

2.8 Ozonaufnahmeberechnung

Die Ozonaufnahme von Bäumen wird durch die Öffnungsweite der Stomata bestimmt. Wie in Kapitel 1.2 beschrieben, folgt hierbei der Ozonfluss einem Konzentrations-Gradienten in die Blattinterzellularen. Wichtig für die Berechnung des Ozonflusses in das Blattinnere ist die Annahme, dass die Ozonkonzentration in den Interzellularen annähernd Null (Laisk et al. 1989) und die Blattcuticula für Ozon undurchlässig ist (Kerstiens und Lenzian 1989). Aus diesem Grund ist die stomatäre Leitfähigkeit bei gegebener Ozonkonzentration ein entscheidender Faktor zur Berechnung des Ozonflusses.

2.8.1 Xylemfluss-Verfahren

In den letzten Jahren wurde vielfach vorgeschlagen, den stomatären Ozonfluss statt der Ozonexposition zur Risikobewertung durch Ozon heranzuziehen (Emberson et al. 2000a, Matyssek et al. 2007).

Eine Möglichkeit, den Ozonfluss bzw. die Ozonaufnahme zu berechnen, stellt die Messung des Xylemflusses dar. Hierfür wurde in einem ersten Schritt wie in Kapitel 2.7.1 beschrieben, die Kronentranspiration ermittelt. In einem zweiten Schritt wurde die Kronenleitfähigkeit für Wasserdampf (G_c) mit DIAdem (Vers. 8.1.1292, 2002, National Instruments, Austin, USA) wie folgt berechnet (Gleichung 18) (Köstner et al. 1992, Wieser et al. 2003, von Willert et al. 1995):

$$G_c = \frac{E_c}{\Delta w} \qquad \Delta w = \frac{VPD}{P} \qquad \text{Gleichung 18}$$

G_c = Kronenleitfähigkeit für H_2O [$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$]

E_c = Kronentranspirationsrate [$ml\ m^{-2}\ min^{-1}$]

VPD = Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft [Pa]

P = Luftdruck [kPa]

Δw = Differenz der Wasserdampfmolesbrüche zwischen Blatt und Umgebungsluft [$H_2O\ mmol\ mol^{-1}$] [Pa kPa^{-1}]; Luftdruckbezogenes VPD

Das Wasserdampfsättigungsdefizit VPD (VPD: **V**apor **P**ressure **D**eficit) errechnet sich wie folgt (von Willert et al. 1995):

$$VPD = e^0 - e$$

Gleichung 19

VPD = Wasserdampfsättigungsdefizit [hPa]

e^0 = Sättigungsdampfdruck des Wassers [hPa], maximale Feuchte

e = aktueller Wasserdampfpartialdruck bei aktueller Temperatur [hPa]

In einem ersten Schritt wurde hierfür e^0 nach Goff und Gratch (in von Willert et al. 1995) berechnet:

$$\lg e^0 = -7,90298 * \frac{T_s}{T-1} - 5,02808 * \lg \frac{T_s}{T} - 1,3816 * 10^{-7} * (10^{11,344(\frac{1-T}{T_s})} - 1) + 8,1328 * 10^{-3} * (10^{-3,49149(\frac{T_s}{T-1})} - 1) + \lg e^0_s$$

Gleichung 20

T_s = Temperatur am Siedepunkt (373,16K)

T = Temperatur (K)

e^0 = gesuchter Sättigungsdampfdruck bei Temperatur T (in K)

e^0_s = Sättigungsdampfdruck am Siedepunkt über reinem Wasser (1013,246 mbar)

Im Anschluss wurde e (bei aktueller Temperatur) berechnet (von Willert et al. 1995):

$$e = \frac{RH}{100} * e^0$$

Gleichung 21

e = aktueller Wasserdampfpartialdruck bei aktueller Temperatur [hPa]

RH = relative Luftfeuchte [%]

e^0 = Sättigungsdampfdruck [hPa], maximale Feuchte

VPD lässt sich dann (wie in Gleichung 19 dargestellt) durch die Subtraktion von e^0 und e berechnen.

Mit Sonnenaufgang öffnen die Blätter ihre Stomata und damit beginnt die Transpiration auf Blattebene. Zu diesem Zeitpunkt findet jedoch im Stamm auf Brusthöhe noch kein Xylemfluss statt. Dieser Zustand hält so lange an, bis der bauminterne Wasserspeicher in der Krone aufgebraucht ist. Der zeitliche Versatz zwischen Sonnenaufgang und Beginn des Xylemflusses im Stamm wurde tageweise pro Baum bestimmt. Für einen zeitgleichen Verlauf der Kronentranspiration mit Strahlung und Δw wurde der Xylemfluss im Stamm mit der Transpiration auf Blattebene synchronisiert, indem die Messkurve der Xylemflussmessung im Stamm auf der Zeitachse um den zeitlichen Versatz auf Beginn der Transpiration auf Blattebene zurück geschoben wurde (siehe Abbildung 2.11; Matyssek et al. 2004). Somit

wird eine Voraussetzung geschaffen, auf Kronenebene die stomatären Leitfähigkeit für Wasserdampf und die Ozonaufnahme zu bestimmen (Matyssek et al. 2004).

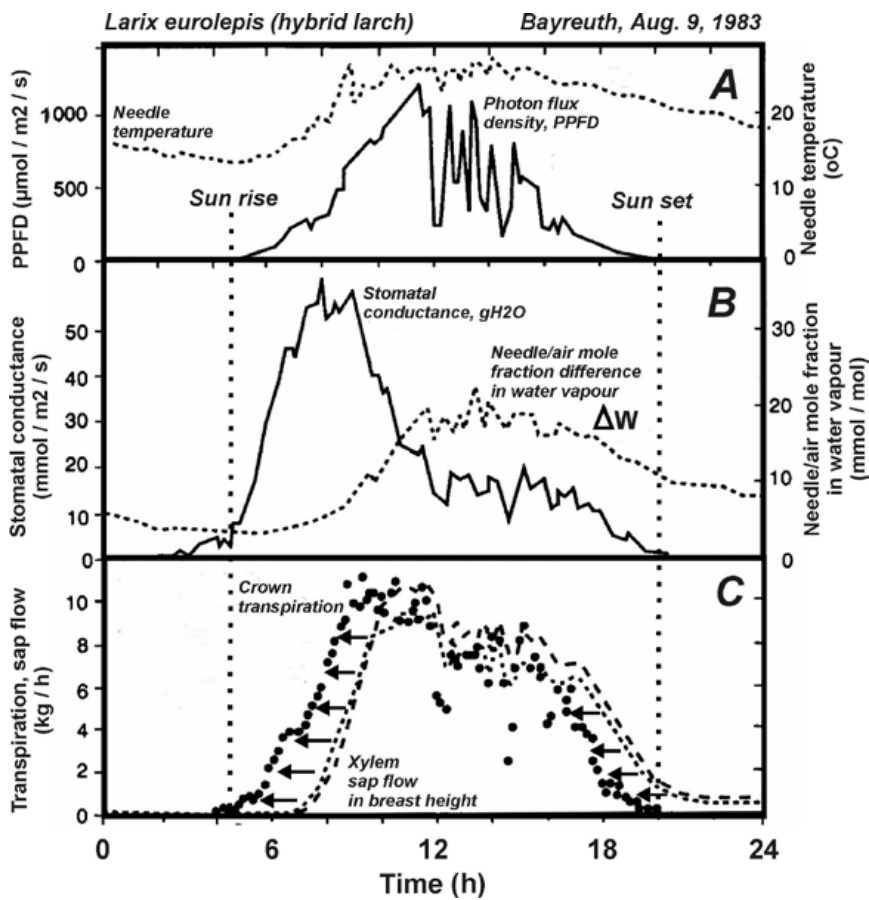


Abbildung 2.11: Zeitliche Angleichung des Xylemflusses im Stamm mit Δw und Strahlung (Matyssek et al. 2004).

Danach wurden die Leitfähigkeiten auf die Kronenoberfläche bezogen.

Da nachts die Stomata nicht alle gänzlich geschlossen sind, wurde ab einem VPD von 0,1 hPa für die Buchen eine minimale Leitfähigkeit von $19,5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ festgesetzt und für die Fichten von $4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Nunn et al. 2007). Trotz dieser Reglementierung traten vereinzelt nachts immer noch hohe Leitfähigkeiten im Vergleich zur Gaswechsellmessung in der Astküvette auf. Daher wurden bei Buche Kronenleitfähigkeiten bei Dunkelheit von über $50 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ auf $19,5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ korrigiert und bei Fichten von über $20 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ auf $4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Als Anhaltspunkt dienten hierbei die Nacht-Leitfähigkeiten der Gaswechsellmessung in den Astküvetten.

An feuchten und verregneten Tagen erreichte die Kronenleitfähigkeit, bedingt durch das sehr niedrige VPD, unrealistisch hohe Werte. Analog zu Nunn et al. (2007) und zu den maximalen Leitfähigkeitswerten (g_{max}) aus der Gaswechsellmessung in den Astküvetten, wurde die Kronenleitfähigkeit bei Buche auf ein Maximum von $250 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Nunn et al. 2005,

2007) und bei Fichte auf ein Maximum von $80 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Emberson et al. 2000b) begrenzt.

In einem letzten Schritt wurde die korrigierte Kronenleitfähigkeit mit der jeweiligen Ozonkonzentration und einer Konstanten (Umrechnungsfaktor des Diffusionskoeffizienten von Wasserdampf zu Ozon, da Ozon eine geringere Diffusivität besitzt als Wasserdampf) multipliziert, um den Ozonfluss zu erhalten (Gleichung 22; Wieser et al. 2003).

$$FO_3 = [O_3] * Gc * 0,613 \quad \text{Gleichung 22}$$

FO_3 = O_3 -Fluss der gesamten Baumkrone skaliert auf Laubebene [$\text{nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]

Gc = Kronenleitfähigkeit für H_2O [$\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]

$[O_3]$ = Ozonkonzentration [$\text{nl } O_3 \text{ l}^{-1}$]

0,613 = Umrechnungsfaktor der Diffusionskoeffizienten O_3/H_2O

Die Summierung dieser Werte ergab die Kumulative Ozonaufnahme (COU) über einen bestimmten Zeitraum, z. B. über ein Monat oder über eine Vegetationsperiode (siehe Gleichung 23):

$$COU = \sum FO_3 \quad \text{Gleichung 23}$$

COU = Kumulative O_3 -Aufnahme [$\text{mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ bzw. veg.periode^{-1}]

FO_3 = O_3 -Fluss der gesamten Baumkrone, skaliert auf Laubebene [$\text{nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]

2.8.2 Gaswechselperfahren (Astküvetten)

Zur Berechnung der Ozonaufnahme anhand der Gaswechselformel in den Astküvetten wurde die im Kalkulationsprogramm DIAdem (8.1.1292, 2002, National Instruments) berechnete Leitfähigkeit für Wasserdampf ($\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) des eingeschlossenen Astes (siehe Kapitel 2.6.1) in das Tabellenkalkulationsprogramm Excel (Office 2003, Microsoft Corporation, Redmond, USA) übertragen und mit der entsprechenden Ozonkonzentration und dem Umrechnungsfaktor des Diffusionskoeffizienten von Wasserdampf zu Ozon multipliziert (siehe Gleichung 24).

$$FO_3 = gH_2O * [O_3] * 0,613$$

Gleichung 24

FO_3 = O_3 -Fluss des Astes skaliert auf die Lauboberfläche des Astes [$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$]

gH_2O = Leitfähigkeit für Wasserdampf [$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$]

$[O_3]$ = Ozonkonzentration [$nl\ O_3\ l^{-1}$]

0,613 = Umrechnungsfaktor der Diffusionskoeffizienten O_3/H_2O

Entsprechend der Gleichung 23 (vgl. Kap. 2.8.1) lässt sich die Kumulative Ozonaufnahme (COU) aus den Ozon-Flüssen berechnen.

2.8.3 Ozonaufnahme-Modell

Das Modell von Emberson et al. (2000a) fußt auf einem korrelativen Ansatz zur Berechnung der stomatären Leitfähigkeit (gH_2O_s).

Die stomatäre Leitfähigkeit berechnet sich nach dem multiplikativen Leitfähigkeitsmodell von Jarvis (1976) und Köstner et al. (1992), in welches sowohl mikroklimatische Faktoren, wie Strahlung, Lufttemperatur, Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft (VPD) und Bodenwasserpotential (SWP) eingehen, als auch artspezifische Faktoren, wie maximale stomatäre Leitfähigkeit (gO_{3max}) und phänologische Größen wie Blattaustrieb und Seneszenz (siehe Gleichung 26). Strahlungsdaten, Lufttemperaturwerte, Wasserdampfsättigungsdefizit und Bodenwasserpotential wurden analog zu Kapitel 2.5 erhoben und in das Ozonaufnahme-Modell (siehe Gleichung 25 und folgende) eingesetzt. Die phänologischen Daten wurden analog zu Kapitel 2.3 ermittelt. Als Beginn und Ende der Vegetationsperiode wurden die Tage im Jahr gesetzt, an denen 50 % der Blätter ausgetrieben bzw. seneszent waren (siehe Tabelle 2.2).

Nunn (2005) und Nunn et al. (2005) passten dieses Modell durch eine Parametrisierung aus Gaswechselfeldaten an die Bäume des Kranzberger Forst an. Des Weiteren führten Nunn (2005) und Nunn et al. (2005) eine zusätzliche Funktion zur Berechnung der nächtlichen Ozonaufnahme (g_{night}) und ein Bodenfeuchtemodul (f_{soil}) ein, welches in extrem trockenen Witterungsperioden greift. Hierfür wurden die in Kapitel 2.5 beschriebenen Bodenwasserpotentialmessungs-Daten herangezogen.

Der minimale Werte der Tagesleitfähigkeit wurde auf 13 % der maximalen Tagesleitfähigkeit bei Buche und 10 % bei Fichte festgesetzt (Emberson et al. 2000a; siehe Tabell 2.2). Als maximale Tagesleitfähigkeit wurden für Buche und Fichte unter $1xO_3$ und $2xO_3$ die maximalen Leitfähigkeiten herangezogen, die unter Lichtsättigung mit Hilfe des CIRAS-2 Porometers durch diskrete Messungen erreicht wurden (siehe Kapitel 2.6.2).

Das Bodenfeuchtemodul wurde nach Nunn (2005) anhand von Bodenfeuchtefühlern in 5 cm Tiefe eigens für die Buchen im Kranzberger Forst parametrisiert. Für Fichte lag kein eigenes

Bodenfeuchtemodul vor, weswegen hier die Funktion von Emberson et al. (2000b) herangezogen wurde. Leitfähigkeit und Ozonaufnahme wurde analog zu Nunn (2005) berechnet.

$$g_{O_3} = \begin{cases} \text{night} : g_{\text{night}} * g_{O_{3\text{max}}} \\ \text{day} : \max \left\{ \begin{array}{l} f_{\text{phen}} * g_{\text{min}} * g_{O_{3\text{max}}} \\ f_{\text{phen}} * f_{\text{light}} * f_{\text{temp}} * f_{\text{vpd}} * f_{\text{soil}} * g_{O_{3\text{max}}} \end{array} \right. \end{cases} \quad \text{Gleichung 25}$$

g_{O_3} = stomatische Leitfähigkeit für Ozon

g_{night} = nächtliche Ozonleitfähigkeit

$g_{O_{3\text{max}}}$ = maximale stomatische Leitfähigkeit für Ozon

g_{min} = minimale Leitfähigkeit, entspricht 13 % (Bu) bzw. 10 % (Fi) der maximalen Leitfähigkeit

f_{phen} = Einfluss der Phänologie der Blätter auf die stomatische Blattleitfähigkeit für Wasserdampf

→ Buche:

$$f_{\text{phen}} = \begin{cases} \text{doy} < \text{SGS}; 0 \\ \text{SGS} \leq \text{doy} \leq (\text{SGS} + f_{\text{phen_b}}); \\ \quad (1 - f_{\text{phen_a}}) * ((\text{doy} - \text{SGS}) / f_{\text{phen_b}}) + f_{\text{phen_a}} \\ (\text{SGS} + f_{\text{phen_b}}) \leq \text{doy} \leq (\text{EGS} - f_{\text{phen_c}}); 1 \\ \text{EGS} \geq \text{doy} \geq (\text{EGS} - f_{\text{phen_c}}); \\ \quad (1 - f_{\text{phen_a}}) * ((\text{EGS} - \text{doy}) / f_{\text{phen_c}}) + f_{\text{phen_a}} \\ \text{doy} > \text{EGS}; 0 \end{cases} \quad \text{Gleichung 26}$$

doy = day of year, Tag im Jahr

SGS = Datum des Austriebes (Austriebsstadium 3) in doy

EGS = Datum der 50 % - Seneszenz in doy

$f_{\text{phen_a}}$ = Anfangs- und Endwert von f_{phen} ; zwischen 0 und 1

$f_{\text{phen_b}}$ = Anzahl der Tage nach SGS bis $g_{O_{3\text{max}}}$ einsetzt

$f_{\text{phen_c}}$ = Tage vor EGS, an denen die stomatische Leitfähigkeit altersbedingt limitiert wird

→ Fichte:

$$f_{\text{phen}} = f_{\text{phen_a}} * \text{doy} * f_{\text{phen_b}} * \text{doy}^2 + f_{\text{phen_c}} \quad \text{Gleichung 27}$$

f_{light} = Veränderung der stomatären Blattleitfähigkeit für Wasserdampf durch unterschiedliche Strahlungsintensität

$$f_{light} = 1 - e^{f_{light_a} - a * PPFD} \quad \text{Gleichung 28}$$

f_{light_a} = die exponentielle Abhängigkeit der stomatären Leitfähigkeit von der Strahlung (PPFD)

f_{temp} = Temperaturabhängigkeit der stomatären Öffnungsweite

$$f_{temp} = 1 - (T - T_{opt})^2 / (T_{opt} - T_{min})^2 \quad \text{Gleichung 29}$$

T = Temperatur [°C]

T_{opt} = optimale Temperatur der Temperaturabhängigkeit der stomatären Leitfähigkeit für Wasserdampf [°C]

T_{min} = minimale Temperatur der Temperaturabhängigkeit der stomatären Leitfähigkeit für Wasserdampf [°C]

f_{vpd} = Einfluss des Wasserdampf-sättigungsdefizits der Luft auf die stomatäre Blattleitfähigkeit für Wasserdampf

$$f_{vpd} = \min \left\{ 1, \left((1 - g_{min}) + (VPD_{min} - VPD) / (VPD_{min} - VPD_{max}) \right) + g_{min} \right\} \quad \text{Gleichung 30}$$

g_{min} = minimale Leitfähigkeit, entspricht 13% (Bu) bzw. 10 % (Fi) der maximalen Leitfähigkeit

VPD_{min} = minimales VPD [kPa]

VPD_{max} = maximale VPD [kPa]

f_{soil} = Abhängigkeit der stomatären Öffnungsweite vom Bodenwasserpotential

$$f_{soil} = \min \left\{ 1, \left((1 - g_{min}) + (SWP_{min} - SWP) / (SWP_{min} - SWP_{max}) \right) + g_{min} \right\} \quad \text{Gleichung 31}$$

SWP_{min} = minimales Bodenwasserpotential (Soil Water Potential; MPa)

SWP_{max} = maximales Bodenwasserpotential (MPa)

Tabelle 2.2: Parameter des Ozonaufnahme-Modells nach Emberson et al. 2000a, b und Nunn 2005: $f_{\text{night_m}}$ beschreibt die Steigung der linearen Regression und $f_{\text{night_t}}$ den y-Abschnitt der linearen Regression, die den Anstieg der nächtlichen Leitfähigkeit während der Vegetationsperiode wiedergibt.

	Buche		Fichte	
	1xO ₃	2xO ₃	1xO ₃	2xO ₃
gO_{3max} [mmol m⁻² s⁻¹]	65,6	59,5	18,4	25,1
g_{min} [% gO_{3max}]	13	13	10	10
SGS [doy]	01.05.2006	2.05.2006	21.05.2006	18.05.2006
EGS [doy]	24.10.2006	25.10.2006	-	-
f_{phen_a}	0,4	0,4	0,0085	0,0085
f_{phen_b} [Tage]	50	50	-0,0000232	-0,0000232
f_{phen_c} [Tage]	50	50	0,2147	0,2147
f_{light_a}	-0,006	-0,006	-0,0083	-0,0083
T_{max} [°C]	34	34	-	-
T_{min} [°C]	8	8	1	1
T_{opt} [°C]	21	21	19	19
VPD_{max} [kPa]	1,1	1,1	0,6	0,6
VPD_{min} [kPa]	3,1	3,1	3,5	3,5
SWP_{max} [MPa]	-0,05	-0,05	-0,66	-0,66
SWP_{min} [MPa]	-1,25	-1,25	-0,98	-0,98
g_{night} [% gO_{3max}]	-	-	10	10
f_{night_m}	0,0011403	0,0011506	-	-
f_{night_t}	-0,1693381	-0,1961991	-	-

Der Ozonfluss in die Stomata errechnet sich nach folgender Formel (Gleichung 32):

$$FO_3 = [O_3] * gO_3 \quad \text{Gleichung 32}$$

FO₃ = O₃-Fluss [mmol m⁻² s⁻¹]

[O₃] = Ozonkonzentration [nl O₃ l⁻¹]

gO₃ = stomatäre Leitfähigkeit für Ozon [mmol m⁻² s⁻¹]

Im Anschluss konnte aus der Summe der Ozonflüsse die Kumulative Ozonaufnahme (COU) berechnet werden, indem die Ozonflüsse über die Vegetationsperiode hinweg aufsummiert wurden (siehe Gleichung 23).

2.9 Statistische Auswertung

Die in vorliegender Studie erhobenen Daten wurden mit den Programmen DIAdem (Version 8.1 National Instruments, Austin, USA), Origin 6.0 (Microcalc Inc., Northampton, USA) und Excel (Office 2003, Microsoft Corporation, Redmond, USA) ausgewertet. Die statistischen Tests erfolgten mit SPSS (PASW Statistics 18, SPSS Inc., Chicago, USA).

Standardfehler (SE) wurden mit Hilfe von Excel (Office 2003, Microsoft Corporation) berechnet, lineare Regressionen mit Hilfe von DIAdem (Version 8.1) und Origin 6.0.

Univariate Varianzanalyse

Um einen Einfluss von Ozon auf Austrieb, Seneszenz und Vegetationsperiode feststellen zu können, wurde die Univariate Varianzanalyse des Allgemeinen Linearen Modells (= GLM, General Linear Modell; SPSS) benutzt. Die mit SPSS dargestellten Boxplots definieren sich folgendermaßen: Der Median wird durch den Mittelstrich gezeigt, die Box selber umfasst 50 % des Interquartilbereichs. Die durch Linien markierten Bereiche über und unter der Box geben die Minimal- bzw. Maximal-Werte an, die weniger als 1,5 Boxlängen (= Länge des interquartilen Abstandes) vom Boxrand entfernt sind. Werte die vom Boxrand über 1,5 bis 3 Boxlängen entfernt sind, werden als „Ausreißer“ bezeichnet und mit „o“ gekennzeichnet. Werte, die über 3 Boxlängen vom Boxrand entfernt sind, werden als „Extremwerte“ bezeichnet und mit „*“ gekennzeichnet.

Ebenfalls mit der Univariaten Varianzanalyse (GLM, SPSS) wurde der Einfluss des Ozons auf die baumindividuellen physiologischen Parameter (Transpiration, Leitfähigkeit für Wasserdampf, Ozonaufnahme) der Buchen und Fichten getestet. Die beiden Ozonregime ($1 \times O_3$ und $2 \times O_3$) und die Kronenzonen (Sonnen- und Schattenkrone) dienten als Kofaktoren.

Messwertwiederholung

Da alle erhobenen physiologischen Parameter aus wiederholten oder kontinuierlichen Beobachtungen ermittelt wurden, wurde zudem das Verfahren der Messwertwiederholung des Allgemeinen Linearen Modells (SPSS) angewandt. Hier wurden die Daten nicht nur auf einen Einfluss von Ozon und/oder der Baumart hin getestet, sondern auch auf einen Einfluss der Monate/Jahreszeit.

Korrelationstest

Die statistische Auswertung der Klimadaten (AOT40, SUM0, VPD, Temperatur und COU) erfolgte nach Aufteilung in die Ozonregime mit Hilfe des bivariaten, nicht parametrischen Korrelationstests (SPSS; Pearson und Spearman).

T-Test bei einer Stichprobe

Zur Ermittlung signifikanter Unterschiede zwischen den Methoden Xylemflussmessung im Stamm, Ozonaufnahme-Modell und Gaswechselformung in der Astküvette wurde ein T-Test

bei einer Stichprobe (SPSS) angewandt. Dabei wurde der Datensatz monatsweise, nach Baumart und Ozonregime aufgeteilt.

Für vorliegende Studie wurde folgende sprachliche Regelung angewandt: Ergab die statistische Auswertung der getesteten Daten $p < 0,05$, so liegt statistische Signifikanz vor. Für $p = 0,05 - 0,1$ liegt eine Tendenz und für $p = 0,11 - 0,2$ die Andeutung einer Abweichung der untersuchten Daten vor.

Übersicht der erhobenen Datensätze und Methoden:

Tabelle 2.3: Übersicht der erhobenen Datensätze, Methoden und der Bearbeiter.

Untersuchung	Methode	Untersuchungsobjekt	Zeitraum
Mikroklima	Meteorologische Messungen	Kronenraum des Versuchsbestandes	kontinuierlich
Ozonverteilung	UV-Analysatoren, Passivsammler	Kronenraum des Versuchsbestandes	kontinuierlich
Phänologie	Bonitur des Austriebes und der Seneszenz	10 Buchen, 10 Fichten, Sonnen- und Schattenkronen, 1xO ₃ und 2xO ₃	Alle 2 Tage im Frühjahr und Herbst
Biometrie	SLA	Je 15 bis 20 Blätter bzw. Nadeln der 40 Messäste, Buchen und Fichten, Sonnen- und Schattenkrone, 1xO ₃ und 2xO ₃	August/ September
	Blattmasse	Eingenetzte Äste	September
	BHD	Alle Bäume des Versuchsbestandes	monatlich
	Astvermessung	An 10 Buchen und 10 Fichten, 1xO ₃ und 2xO ₃	August
Gaswechsel	Walz Gaswechselküvette	Ein Sonnenast einer Buche und einer Fichte	kontinuierlich
	CIRAS-2	An jeweils 3 Blättern der 40 Messäste, Buchen und Fichten, Sonnen- und Schattenkrone, 1xO ₃ und 2xO ₃	diskret, von Juni bis September, 2-mal im Monat
Transpiration	Granier (THB)	12 Buchen und 12 Fichten; 1xO ₃ und 2xO ₃ , West- und Südseite	kontinuierlich
	Kucera (SHB)	17 Messäste, Buchen und Fichten, Sonnen- und Schattenkrone, 1xO ₃ und 2xO ₃	kontinuierlich

3 Ergebnisse

3.1 Meteorologie

Im Jahr 2006 waren die Monate Juni und Juli von hohen Temperaturen und geringer Niederschlagsmenge geprägt. So wurden auf dem Versuchsgelände Kranzberger Forst monatliche Durchschnittstemperaturen von bis zu 21,7°C erreicht (siehe Tabell 3.1). Mit Ende dieser Schönwetterlage Anfang August 2006 sank die Temperatur auf durchschnittlich 14,5°C, stieg im September auf 16,2°C an und sank dann im Oktober 2006 auf maximal 11,8°C. Die Strahlungskurve (PPFD) (siehe Abbildung 3.1 F) zeigt hohe Werte in der Schönwetterlage im Juni und Juli, ab August 2006 verringerte sich PPFD deutlich.

In den Monaten Juni und Juli, wie auch in den Monaten September und Oktober 2006, gab es längere Perioden ohne Niederschlag. Die geringsten monatlich summierten Niederschlagsmengen wurden im Juli mit 29 mm und im September mit 12,6 mm erreicht (siehe Tabelle 3.1). Die höchste monatlich aufsummierte Niederschlagsmenge (von Mai bis Oktober 2006) wurde im August mit 114,8 mm gemessen.

Mit den hohen Temperaturen und den geringen Niederschlägen im Juni und Juli sank auch die Luftfeuchte entsprechend (siehe Abbildung 3.1 B).

Das monatlich gemittelte Wasserdampf-sättigungsdefizit (VPD) erreichte sein Maximum mit 10,2 hPa im Juli, im August verringerte es sich auf durchschnittlich 3,5 hPa und im warmen September betrug es, über die Ozonregime und Baumarten gemittelt, durchschnittlich 4,6 hPa (siehe Tabelle 3.1). Berechnet nach Pearson (SPSS, bivariater Korrelationstest), ergibt sich über den Jahresgang hinweg eine signifikante Korrelation zwischen Temperatur und VPD unter 1xO₃ und 2xO₃ von jeweils $p = 0,01$. Nach Spearman (SPSS, bivariater Korrelationstest) zeigte sich eine signifikante Korrelation von VPD mit der Temperatur ($p = 0,042$ unter 1xO₃ und 2xO₃), mit der Ozonkonzentration ($p = 0,019$ für 1xO₃ bzw. $p = 0,005$ für 2xO₃), mit AOT40 ($p = 0,019$ für 1xO₃ bzw. $p = 0,005$ für 2xO₃) und mit SUM0 ($p = 0,019$ für 1xO₃ bzw. $p = 0,005$ für 2xO₃). Δw zeigte die höchsten Werte im Juni mit 8,2 Pa kPa⁻¹ bzw. 7,1 Pa kPa⁻¹ und im Juli mit 11,3 Pa kPa⁻¹ bzw. 10,5 Pa kPa⁻¹ und nahm von August an deutlich ab (siehe Abbildung 3.1 D und Tabelle 3.1).

Der Verlauf der Ozonkonzentration im Jahr 2006 lässt einen deutlichen Anstieg in den Schönwetter-Monaten Juni und Juli erkennen, mit Spitzen von bis zu 130 nl l⁻¹ unter 2xO₃ und 90 nl l⁻¹ unter 1xO₃ (siehe Abbildung 3.1 E). Mit Einsetzen des Niederschlags im August nahmen die Ozon-Konzentrationen sowohl unter 1xO₃ als auch unter 2xO₃ ab (Abbildung 3.1 A).

Ergebnisse

Tabelle 3.1: Monatlich ermittelte Niederschlagssummen N_d [mm], gemittelter Luftdruck P [hPa], gemittelte Temperatur T [C°] in der Sonnen- und Schattenkrone unter $1xO_3$ und $2xO_3$, gemitteltes Wasserdampfsättigungsdefizit VPD [hPa], gemittelte Differenz der Wasserdampfmolesbrüche zwischen Blatt und Umgebungsluft Δw [Pa kPa⁻¹], gemittelte Ozonkonzentration ($1xO_3$, $2xO_3$) [nl l⁻¹], gemittelte Strahlung $PPFD$ [$\mu\text{mol min}^{-1} \text{m}^{-2}$] und monatlich gemittelte Luftfeuchte RH [%] im Jahr 2006.

	Mai 06	Jun 06	Jul 06	Aug 06	Sep 06	Okt 06
Nd [mm]	82,4	92,1	29,0	114,8	12,6	35,6
P [hPa]	964,2	964,6	964,6	964,7	965,9	964,2
T_1xO₃ sha [C°]	12,7	16,8	21,2	14,4	16,0	11,3
T_1xO₃ sun [C°]	12,8	17,1	21,6	14,6	16,3	11,6
T_2xO₃ sha [C°]	12,6	16,5	21,0	14,2	15,9	11,2
T_2xO₃ sun [C°]	13,2	17,3	21,7	14,7	16,5	11,8
VPD_1xO₃ sha [hPa]	5,3	7,3	10,0	3,6	4,7	3,1
VPD_1xO₃ sun [hPa]	5,4	7,9	10,9	3,9	5,3	3,4
VPD_2xO₃ sha [hPa]	4,2	6,5	9,7	3,2	4,3	2,4
VPD_2xO₃ sun [hPa]	4,9	6,8	10,2	3,2	4,4	2,5
Δw_{1xO_3} [Pa kPa ⁻¹]	5,6	8,2	11,3	4,1	5,4	3,5
Δw_{2xO_3} [Pa kPa ⁻¹]	5,1	7,1	10,5	3,3	4,5	2,6
2xO₃ sun [nl l ⁻¹]	67,0	72,6	86,2	47,9	44,1	23,5
2xO₃ sha [nl l ⁻¹]	58,1	62,3	75,3	40,0	37,2	20,7
1xO₃ Buche [nl l ⁻¹]	46,3	41,8	49,4	29,0	25,8	15,7
1xO₃ Fichte [nl l ⁻¹]	48,7	48,7	56,6	29,9	26,1	15,4
PPFD_ref [$\mu\text{mol min}^{-1} \text{m}^{-2}$]	459,5	565,3	608,6	345,6	352,4	217,7
RH_1xO₃ [%]	74,3	66,6	63,2	82,3	75,3	77,7
RH_2xO₃ [%]	67,1	71,0	65,5	78,8	78,8	84,0

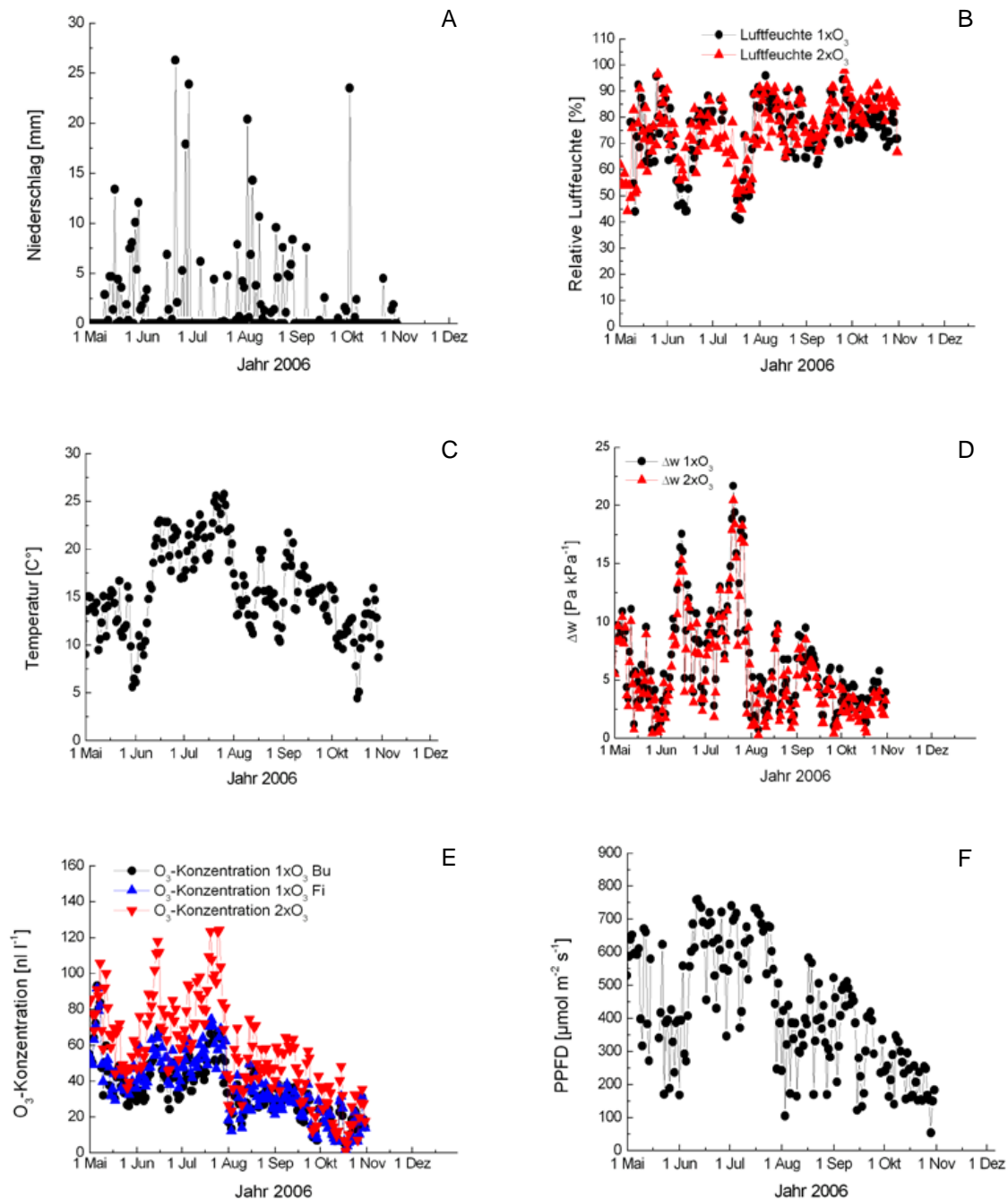


Abbildung 3.1: Darstellung des Klimas im Jahr 2006: (A) Tagessummen Niederschlag [mm]; (B) Tagesmittelwerte Relative Luftfeuchte [%]; (C) Tagesmittelwerte Temperatur [C°]; (D) Tagesmittelwerte Δw [Pa kPa⁻¹]; (E) Tagesmittelwerte Ozonkonzentration [nl l⁻¹]; (F) Tagesmittelwerte Strahlung PPFD [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$].

Über die Vegetationsperiode 2006 gemittelt, erreichte die Ozonkonzentration unter 1xO₃ 35,2 nl l⁻¹ und unter 2xO₃ 58 nl l⁻¹. AOT40 und SUM0 war unter 2xO₃ höher als unter 1xO₃ (siehe Tabelle 3.2).

Tabelle 3.2: Über die Vegetationsperiode hinweg gemittelte Ozonkonzentration [nl l^{-1}], SUM0 [$\mu\text{l l}^{-1} \text{h}$] und AOT40 [$\mu\text{l l}^{-1} \text{h}$] in der Vegetationsperiode 2006.

		2006
Ozonkonzentration	1xO ₃	35,2
[nl l ⁻¹] pro Vegetation	2xO ₃	58,0
SUM0	1xO ₃	148,8
[$\mu\text{l l}^{-1} \text{h}$] pro Vegetation	2xO ₃	245,0
AOT40	1xO ₃	19,2
[$\mu\text{l l}^{-1} \text{h}$] pro Vegetation	2xO ₃	66,1

Nach Karlsson et al. (2004) spricht man von Bodentrockenheit ab einem Bodenwasserpotential von weniger als -0,05 MPa. Demnach lag 2006 bereits Mitte Mai eine leichte Bodentrockenheit im Kranzberger Forst vor, wobei nach einem Regenfall Mitte Juni das Bodenwasserpotential wieder anstieg (siehe Abbildung 3.2). Im trocken-heißen Juli war erneut Bodentrockenheit (-0,5 MPa) zu erkennen. Durch Regenfälle stieg das Bodenwasserpotential im August rasch auf -0,07 MPa an. Weitere Tage mit trockenem und warmem Wetter führten jedoch schnell zu einer erneuten Trocknung des Bodens. Die Monate September und Oktober waren ebenfalls durch warmes und trockenes Wetter gekennzeichnet, dementsprechend kam es zu einer Verschärfung der Trockenheit im Boden (-0,56 MPa).

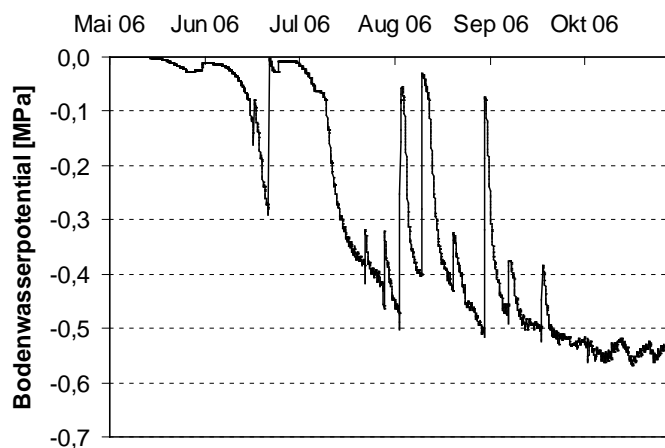


Abbildung 3.2: Verlauf des Bodenwasserpotentials pro Stunde [MPa] während der Vegetationsperiode 2006 auf der Versuchsfläche (gemessen mit Equitensiometer der Firma Ecomatik, Dr. Liu, Dachau, DE).

3.2 Phänologie

Austrieb

Buche:

Unter beiden Ozon-Regimen ($1xO_3$ und $2xO_3$) ergab sich für Buche ein früherer Austriebszeitpunkt als für Fichte. Der frühere Buchenaustrieb war jedoch nicht statistisch signifikant (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse; $p = 0,793$).

In der Sonnenkrone unter $2xO_3$ fand der Blattaustrieb später statt als in der Schattenkrone und dauerte länger. Die Schattenkronen der Buchen unter $1xO_3$ und $2xO_3$ und die Sonnenkrone unter $1xO_3$ erreichten die Austriebsstufe 3 (siehe Kap. 2.3) am 01.05.06, die Sonnenkronen der Buchen unter $2xO_3$ einen Tag später (siehe Abbildung 3.3 und Tabelle 3.3).

Tabelle 3.3: Blatt- bzw. Nadel-Austrieb bei Buche und Fichte im Jahr 2006: Erreichen der Austriebsstufe 3.

Buche			Fichte		
Behandlung	Kronenzone	Austriebsstufe 3	Behandlung	Kronenzone	Austriebsstufe 3
$1xO_3$	sun	01.05.2006	$1xO_3$	sun	21.05.2006
	sha	01.05.2006		sha	20.05.2006
$2xO_3$	sun	02.05.2006	$2xO_3$	sun	18.05.2006
	sha	01.05.2006		sha	16.05.2006

Fichte:

Fichte dagegen erreichte in der Sonnenkrone unter $2xO_3$ die Austriebsstufe 3 (18.05.06) früher als unter $1xO_3$ (21.05.2006) (siehe Abbildung 3.3). In den Abbildung 3.3 C und D sieht man den für Fichte in der Schattenkrone signifikant früheren Austriebstermin unter $2xO_3$ im Vergleich zu $1xO_3$ ($p = 0,012$; SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse) und in der Sonnenkrone die Tendenz eines früheren Erreichens der Austriebsstufe 3 unter $2xO_3$ (GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,064$).

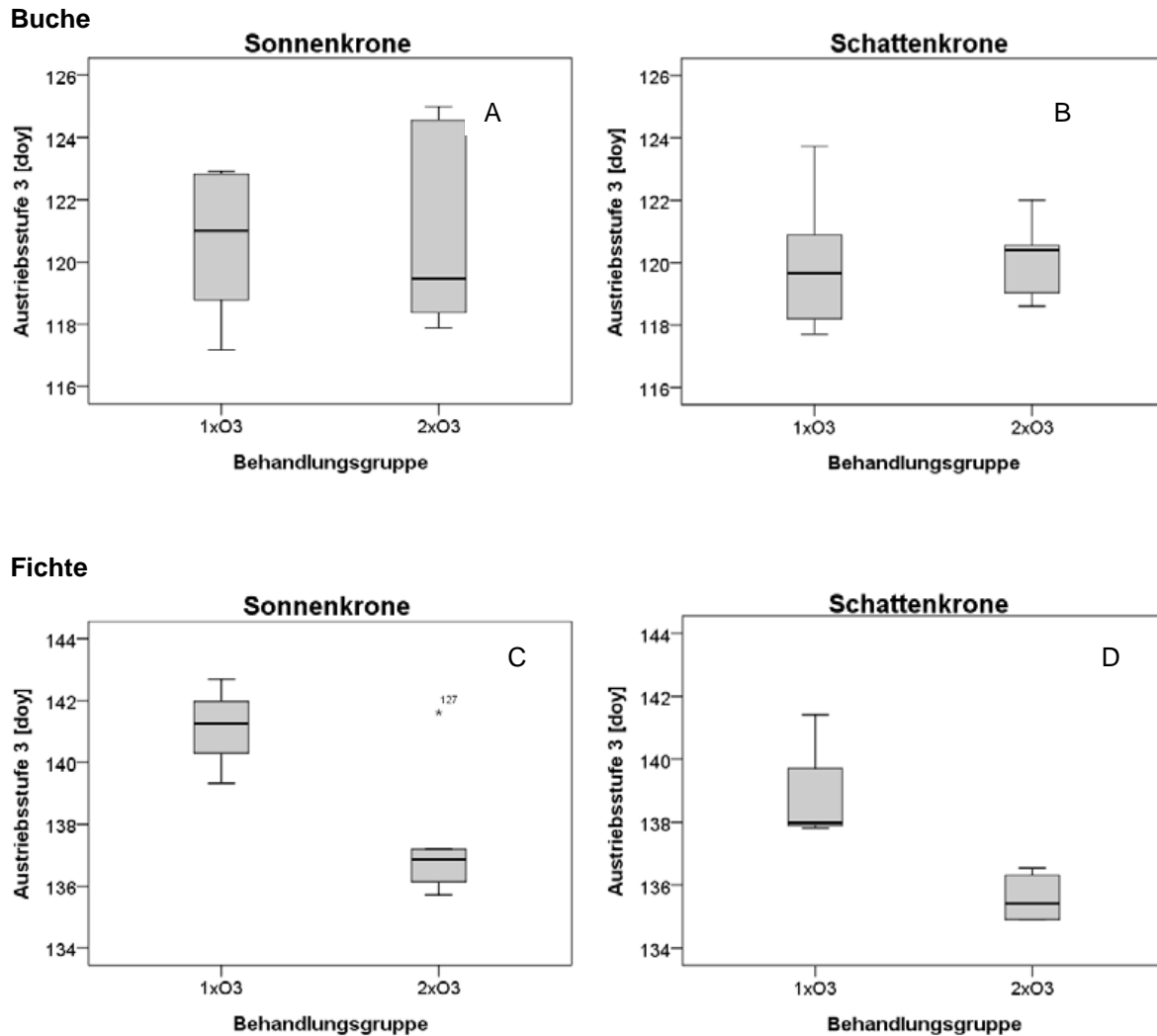


Abbildung 3.3: Zeitpunkt (doy = Tag im Jahr), an dem die Austribsstufe 3 unter $1xO_3$ und $2xO_3$ (A) in den Sonnenkronen und (B) in den Schattenkronen der untersuchten Buchen, (C) in den Sonnenkronen und (D) in den Schattenkronen der untersuchten Fichten im Jahr 2006 erreicht wurde.

Seneszenz

Ein signifikanter Ozoneffekt auf die Seneszenz konnte im Jahr 2006 nicht nachgewiesen werden (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,435$ für Schattenkrone, $p = 0,972$ für Sonnenkrone).

In der Schattenkrone der Buchen begann die herbstliche Verfärbung im Gegensatz zur Sonnenkrone (unter $1xO_3$ und $2xO_3$) früher im Jahr und benötigte mehr Zeit (siehe Abbildung 3.4). Die Blätter der Buchen in der Schattenkrone unter $1xO_3$ erreichten das Stadium, bei dem 50 % der Blattfläche seneszent oder abgefallen waren, am 21.10.2006 und somit drei Tage früher als unter $2xO_3$ (siehe Tabelle 3.4). In der Sonnenkrone unter $1xO_3$ wurde jenes Stadium am 24.10.2006 erreicht, unter $2xO_3$ einen Tag später. In der Sonnenkrone der Buchen schritt der Verlauf der Seneszenz schneller voran als in der Schattenkrone (siehe Abbildung 3.4). Auffallend war auch, dass in der Sonnenkrone die

Verfärbung der Blätter früher begann als in der Schattenkrone. Im Gegensatz zur Schattenkrone waren in der Sonnenkrone vereinzelt weit verzögerte Eintrittspunkte der Seneszenz bei einigen Bäumen zu finden. Diese Verzögerung zeigte jedoch keinen signifikanten Ozoneinfluss (siehe Abbildung 3.4).

Tabelle 3.4: Datum des Erreichens des 50 %-Seneszenzstadiums im Jahr 2006 bei Buche.

Behandlung	Kronenzone	Datum Seneszenzstadium 50%
1xO ₃	sun	24.10.2006
	sha	21.10.2006
2xO ₃	sun	25.10.2006
	sha	24.10.2006

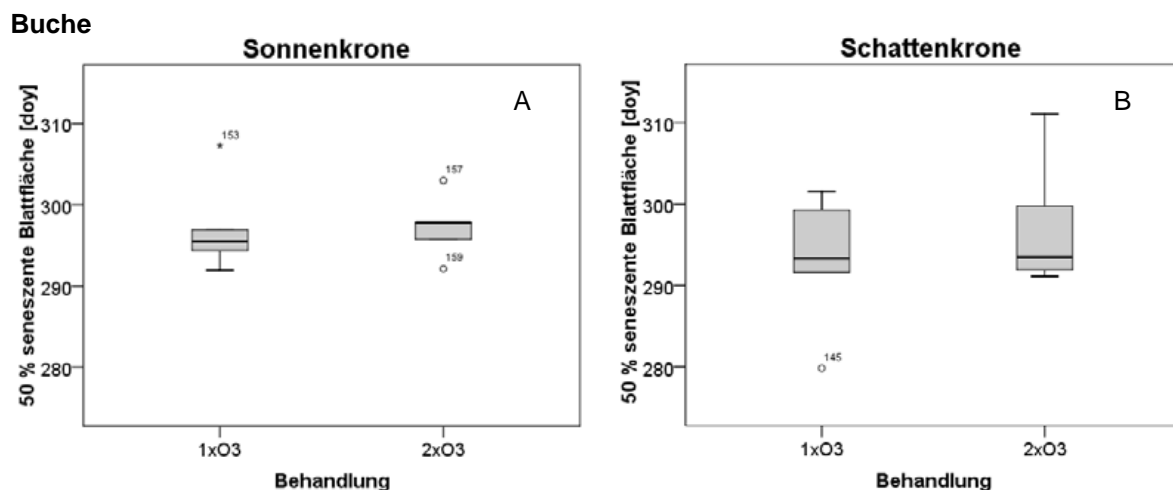


Abbildung 3.4: Zeitpunkt des Eintretens des 50 %-Stadiums der Seneszenz (doy = Tag im Jahr) (A) in den Sonnenkronen und (B) in den Schattenkronen der untersuchten Buchen.

Die Länge der Vegetationsperiode errechnet sich aus der Differenz des Austriebsdatums und des Seneszenzdatums. In der Sonnenkrone unter 1xO₃ und 2xO₃ und in der Schattenkrone unter 2xO₃ dauerte die Vegetationsperiode durchschnittlich 177 Tage an, am kürzesten fiel die Vegetationsperiode für die Schattenkrone unter 1xO₃ mit durchschnittlich 174 Tagen aus (Abbildung 3.5). Ein signifikanter Ozoneffekt bezogen auf die Länge der Vegetationsperiode konnte für die Buchen weder in den Sonnen- noch in den Schattenkronen nachgewiesen werden (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse: Sonnenkrone $p = 0,891$; Schattenkrone $p = 0,423$).

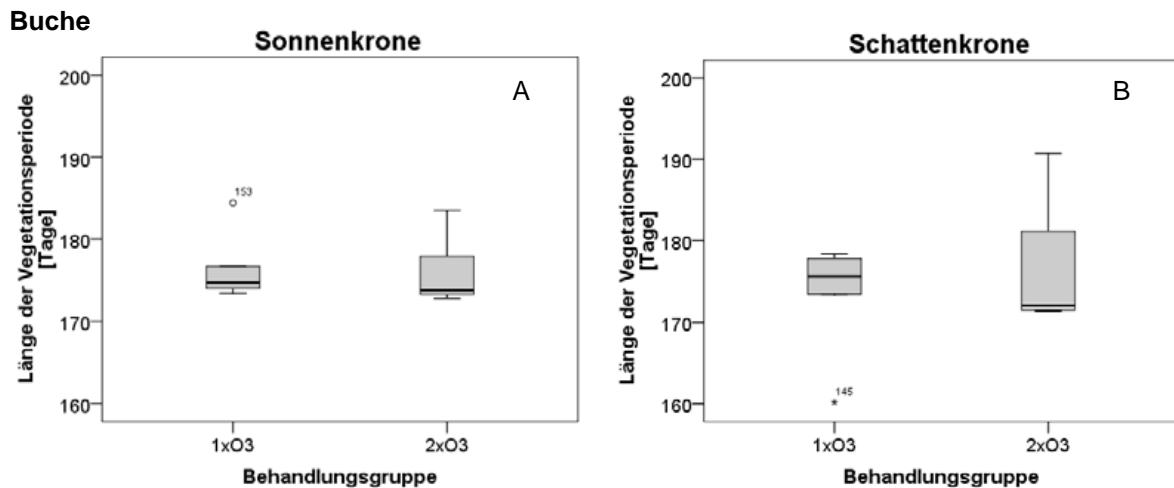


Abbildung 3.5: Länge der Vegetationsperiode (Tage) im Jahr 2006 (A) in den Sonnenkronen und (B) in den Schattenkronen der untersuchten Buchen.

3.3 Biometrische Daten

Spezifische Blattfläche (SLA)

Buche:

Die Buchenblätter in der Sonnenkrone besitzen ein mehrschichtiges Palisadenparenchym, weswegen sie schwerer und kompakter sind als die Blätter in der Schattenkrone. In beiden Ozonregimen fiel die SLA in der Sonnenkrone daher niedriger aus als in der Schattenkrone. Die SLA der Sonnenblätter unter $2xO_3$ war höher als unter $1xO_3$. In der Schattenkrone waren die SLA-Werte beider Behandlungen ähnlich.

Fichte:

Die Fichtennadeln fallen in der Sonnenkrone durch die starke Hypodermis und das stark ausgeprägte Armpalisadenparenchym kürzer und kräftiger aus als die Nadeln der Schattenkrone. Die Schattennadeln haben ein weniger stark ausgeprägtes Armpalisadenparenchym und eine relative schwache Hypodermis (Schütt et al. 1992).

Dass das Lichtregime eine wichtige Rolle in der Ausprägung der Nadeln und somit der SLA spielt, zeigte sich bei Fichte unter $1xO_3$. Hier war die SLA in der Schattenkrone ähnlich der SLA in der Sonnenkrone. Die Fichten waren unter $1xO_3$ als Baumgruppe von Nachbarbäumen wenig bedrängt, wodurch die Schattennadeln einer hohen PFD ausgesetzt waren. Dadurch wiesen hier die Schattennadeln eine ähnliche SLA auf wie die Sonnennadeln. Unter $2xO_3$ dagegen hatten die Fichtennadeln der Schattenkrone typischerweise eine höhere SLA als in der Sonnenkrone (siehe Abbildung 3.6).

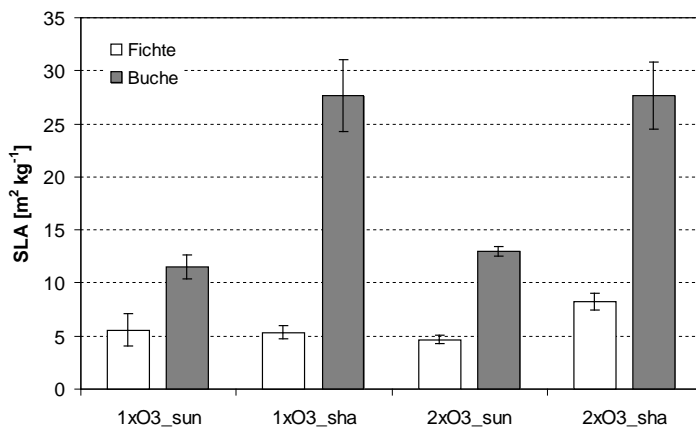


Abbildung 3.6: SLA [m² kg⁻¹], gemittelt über drei Messungen an jedem Messast pro Behandlung. Fichte (weiß) und Buche (grau) unter 1xO₃ und 2xO₃ (SE: n = 4 - 5).

Die Auswertung der SLA-Blattproben aus verschiedenen Höhen eines jeden Baumes in Stammnähe und an verschiedenen Punkten entlang der beprobten Äste zeigte, dass eine Korrelation zwischen SLA und Asthöhe existiert. Abbildung 3.7 zeigt dies exemplarisch für die Buchen unter 1xO₃. Für die Buchen konnte ein Bestimmtheitsmaß von R² = 0,9 bis 1,0 errechnet werden (siehe Abbildung 3.7), für die Fichten war R² = 0,6 bis 1,0.

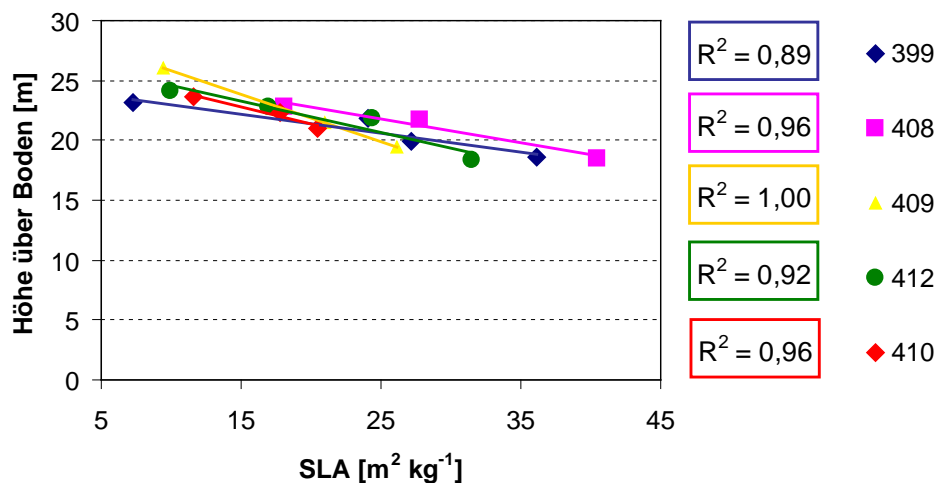


Abbildung 3.7: SLA-Höhen-Gradient der Buchen (399, 408, 409, 412, 410) unter 1xO₃ im Jahr 2006.

In Abbildung 3.8 ist die Verteilung der SLA entlang von Ästen der Buche 412 in verschiedenen Höhen über Grund exemplarisch dargestellt. Entlang eines Astes tritt ein Gradient mit zunehmender SLA von der Astspitze bis zum Astansatz auf, parallel zur zunehmenden Beschattung in Richtung Stamm.

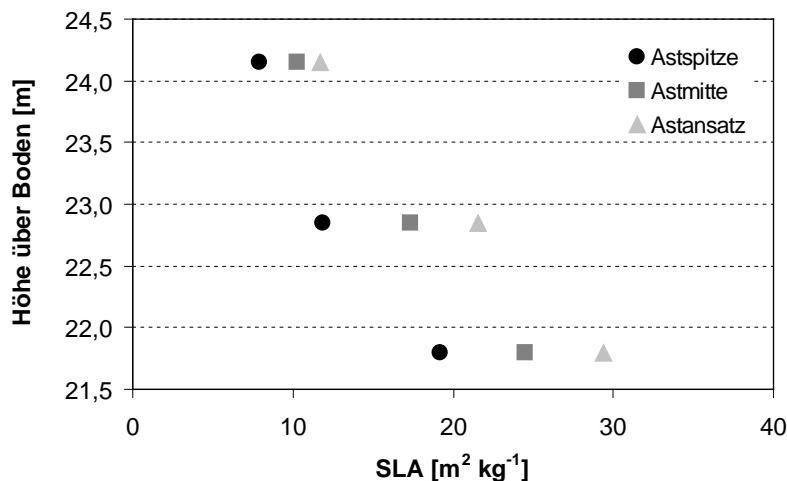


Abbildung 3.8: Aus drei SLA-Blattproben an der Astspitze, an der Astmitte und am Anstansatz gemittelter SLA-Gradient der Buche 412 ($1xO_3$), gemessen an je einem Ast, in 24,2 m Höhe über Boden, in 22,9 m Höhe über Boden und in 21,8 m Höhe über Boden. .

Kronenoberfläche

Als Bezugsgröße für Transpiration und Ozonfluss wurden, wie in Kapitel 2.4.2 beschrieben, die Kronenoberflächen korrelativ aus dem BHD-Wert des jeweiligen Baumes berechnet.

Unter allen auf der Versuchsfläche untersuchten Buchen hatte Buche 410 die kleinste Krone, Buche 482 hatte die Größte (siehe Tabelle 3.5). Da Fichtennadeln im Gegensatz zu den bifazialen Buchenblättern einen äquifazialen Nadelaufbau besitzen, wurde die Laubfläche der Fichte auf Basis der projizierten Nadeloberfläche mit dem Faktor 2,6 multipliziert (Oren et al. 1986), um die gesamte photosynthetisch aktive Kronenoberfläche zu erhalten. Unter den Fichten fällt vor allem Fichte 483 durch ihre große und Fichte 485 durch ihre kleine Kronenoberfläche auf.

Tabelle 3.5: Projizierte Kronenoberflächen [m^2] der Buchen und gesamte Kronenoberflächen [m^2] der Fichten unter $1xO_3$ und $2xO_3$ im Jahr 2006.

Kronenoberfläche				
Buche			Fichte	
Behandlung	Baumnr.	Projizierte Kronenoberfläche [m^2]	Baumnr.	Gesamte Kronenoberfläche [m^2]
$1xO_3$	399	74,0	374	338,3
	408	128,9	521	207,5
	409	157,0	535	423,2
	410	35,9	537	444,2
	412	59,6	349	449,9
$2xO_3$	437	74,0	419	211,8
	439	39,8	483	487,7
	443	90,4	484	336,5
	480	214,8	485	153,9
	482	268,1	486	170,9

Tabelle 3.5 zeigt, dass die Buchenkronen unter $1xO_3$ kleiner ausfallen als unter $2xO_3$, während umgekehrt die Fichtenkronen unter $1xO_3$ tendenziell größer ausfallen als unter $2xO_3$. Bei dieser Beobachtung handelt es sich nicht um einen Ozoneffekt, sondern um einen strukturellen Unterschied zwischen den beiden Baumgruppen.

3.4 Xylemflussmessung

3.4.1 Xylemflussmessung im Stamm (THB)

3.4.1.1 Transpiration

Radialprofil der Xylemflussdichte

In Abbildung 3.9 ist die Abnahme der Flussdichte (Fluss pro Flächeneinheit und Zeitintervall in $ml\ cm^{-2}\ min^{-1}$) von Buche und Fichte zur Stammmitte hin dargestellt. In 20 mm Splinttiefe wird die Flussdichte als maximal, also 100 %, gesetzt (hier 1,0). Die Flussdichte in 40 mm Splinttiefe erreicht dann im Verhältnis dazu nur mehr 60 %.

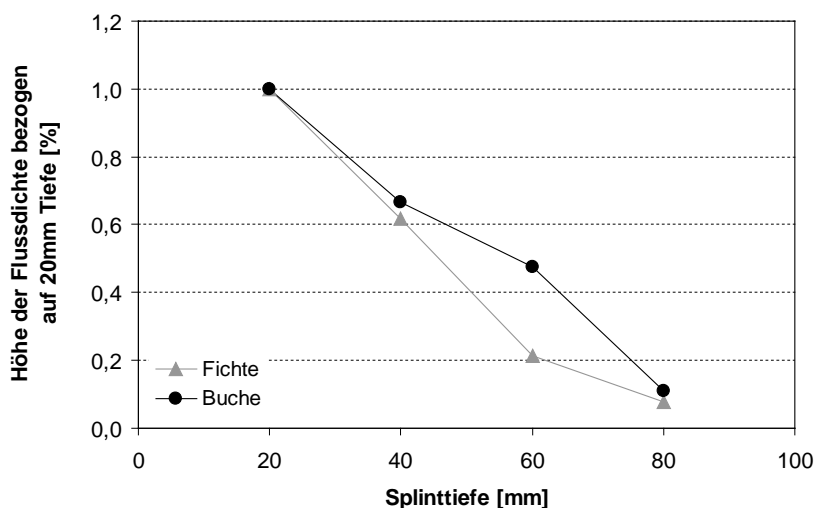


Abbildung 3.9: Gemittelttes Tiefenprofil der Flussdichte bei Buche und Fichte [%]: Prozentuale Abnahme der Flussdichten vom Splintholz in das Kernholz.

Der Verlauf der Flussdichte in den unterschiedlichen Splinttiefen über die Vegetationsperiode hinweg ist in Abbildung 3.10 dargestellt. Die prozentuale Flussdichte in 60 mm Splinttiefe verlief bei Fichte in der Vegetationsperiode ähnlich zu der in 80 mm Splinttiefe, bei Buche dagegen zu der in 40 mm Splinttiefe.

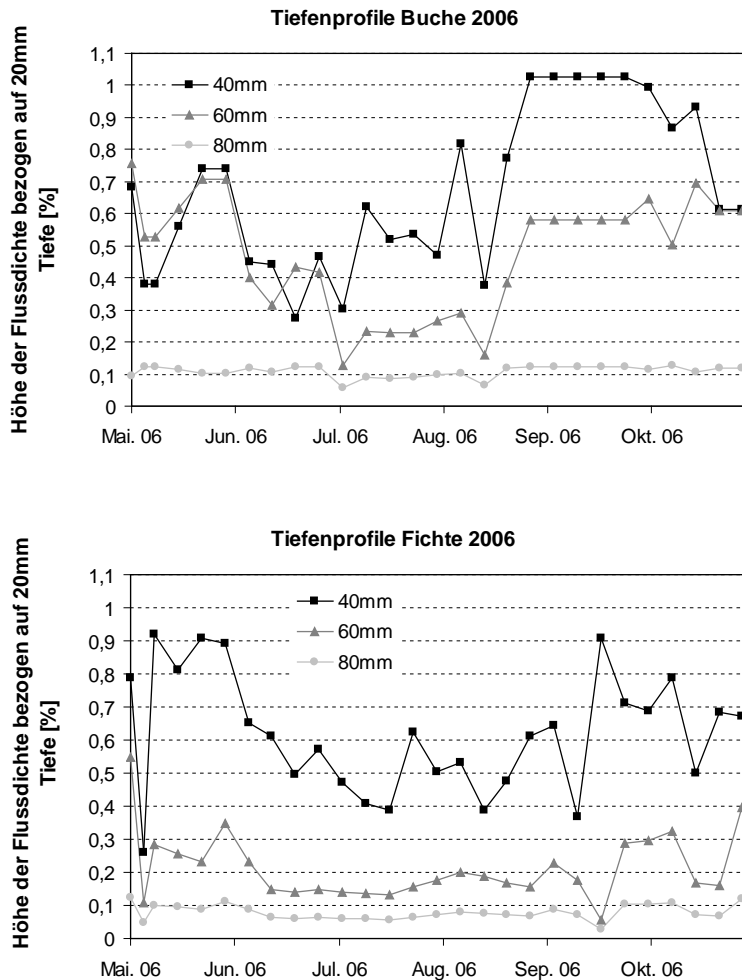
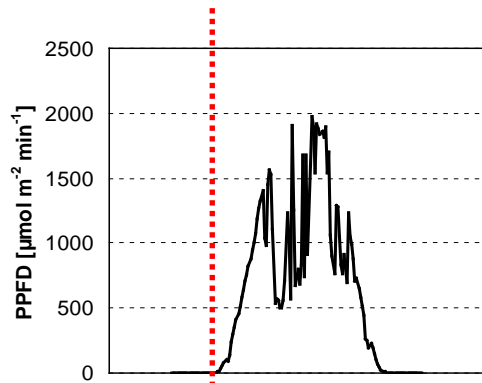


Abbildung 3.10: Verlauf der Flussdichten [%] in 40 mm, 60 mm und 80 mm Splinttiefe bezogen auf die Flussdichte in 20 mm Tiefe in der Vegetationsperiode 2006 bei Buche (oben) und Fichte (unten).

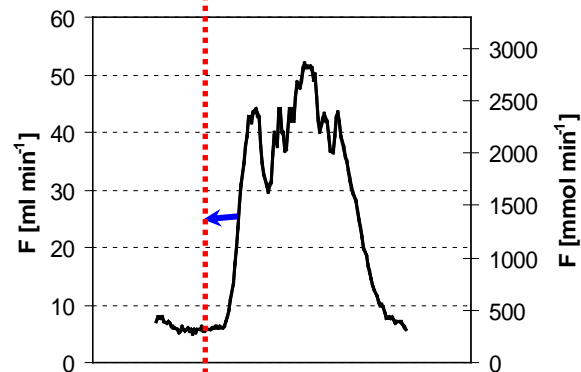
Zeitlicher Versatz zwischen Sonnenaufgang und Start des Xylemflusses im Stamm (Offset)

Matyssek et al. (2004) konnten zeigen, dass es einen zeitlichen Versatz zwischen Sonnenaufgang und Beginn des Xylemflusses in Brusthöhe (BHD) der Stämme gibt (siehe Kap. 2.8.1). Demnach fängt der Xylemfluss im Stamm erst einige Stunden nach Sonnenaufgang an, wohingegen die Transpiration in der Sonnenkrone mit Sonnenaufgang einsetzt (bei sonnigem Wetter) (Matyssek et al. 2004). Die Buchen und Fichten im Kranzberger Forst zeigten jeweils einen durchschnittlichen zeitlichen Versatz von zwei Stunden zwischen Sonnenaufgang und Beginn des Xylemflusses im Stamm in Brusthöhe – unabhängig von der Ozonbehandlung. Um diesen zweistündigen Versatz für die Berechnung der Kronenleitfähigkeit für Wasserdampf anzugleichen, wurde der Beginn des Xylemflusses mit dem Beginn der Einstrahlung (PPFD) synchronisiert, indem der Xylemfluss auf der Zeitachse um zwei Stunden (siehe Abbildung 3.11) zurückgesetzt wurde.

Strahlung (PPFD)



Xylemfluss



Leitfähigkeit

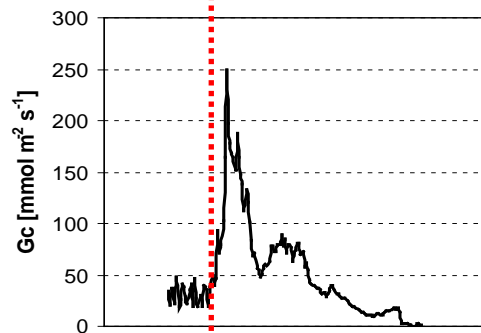
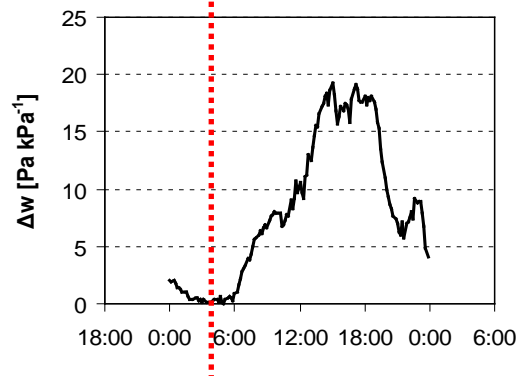
 Δw 

Abbildung 3.11: Darstellung eines Tagesganges (am 9. Juli 2006) von PPFD [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{min}^{-1}$], des Xylemflusses der Buche 412 [ml min^{-1}], der Leitfähigkeit G_c [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] und von Δw [Pa kPa^{-1}]. Die rote gestrichelte Linie gibt den Beginn der Strahlung und den Anstieg von Δw an. Der Xylemfluss, gemessen im Stamm in Brusthöhe, startet mit einiger Verzögerung im Vergleich zum Sonnenaufgang. Durch ein zeitliches Zurücksetzen des Xylemflusses (blauer Pfeil) wird die Kronentranspiration mit der Strahlung und Δw synchronisiert

Tagesgänge der Kronentranspiration und deren Abhängigkeit von der Strahlung und VPD

Die Transpirationsrate (entsprechend dem Xylemfluss im Stamm) der Buchen und Fichten zeigte einen ausgeprägten Tagesgang. Dieser erreichte um die Mittagszeit sein Maximum, bei besonders warmen und sonnigem Wetter einen zweiten Peak am frühen Nachmittag und sank dann zum Abend/zur Nacht hin ab. In Abbildung 3.12 ist exemplarisch der Tagesverlauf der Transpirationsrate der Buche 482 und der Verlauf der Strahlung dargestellt. Die Abhängigkeit der Transpiration in erster Linie von der Strahlung wird deutlich. Mit Abnahme von PPFD sinkt auch die Transpiration ab, so dass nachts die Transpiration der Buchen unter $2xO_3$, über die Vegetationsperiode hinweg gemittelt, auf $1,2 \text{ l m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ absinkt. Buche unter $1xO_3$ erreichte eine mittlere nächtliche Transpiration von $0,9 \text{ l m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$, Fichte unter $2xO_3$ $0,5 \text{ l m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ und Fichte unter $1xO_3$ $0,6 \text{ l m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$.

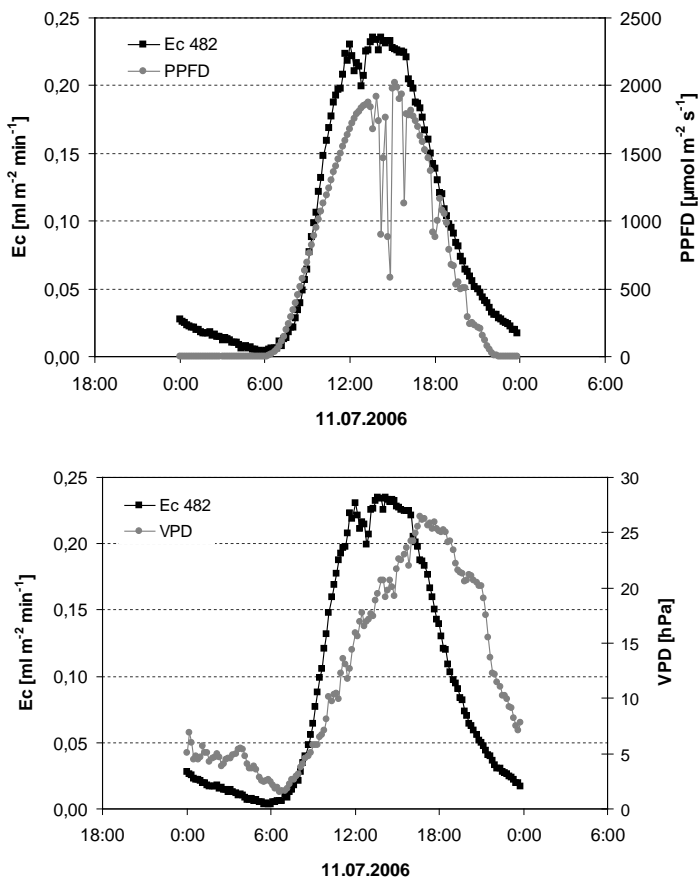


Abbildung 3.12: Oben: Tagesgang der Transpirationsrate (Ec) [$\text{ml m}^{-2} \text{ min}^{-1}$] von Buche 482 und PPFD [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{ min}^{-1}$]. Unten: Tagesgang der Transpirationsrate (Ec) [$\text{ml m}^{-2} \text{ min}^{-1}$] von Buche 482 und des Wasserdampf-sättigungsdefizites der Luft (VPD) [hPa].

Die Korrelation der Kronentranspiration mit PPFD ergab für Buche unter $1xO_3$ ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9$ und unter $2xO_3$ $R^2 = 0,8$ (siehe Abbildung 3.13 A und B), eine Korrelation der Kronentranspiration mit VPD dagegen erreichte bei Buche unter $1xO_3$

ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,59$ und unter $2xO_3$ ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,62$ (siehe Abbildung 3.13 C und D). Auch für Fichte konnte eine hohe Korrelation der Kronentranspiration mit PPFD mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9$ unter $1xO_3$ und einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,9$ für $2xO_3$ berechnet werden.

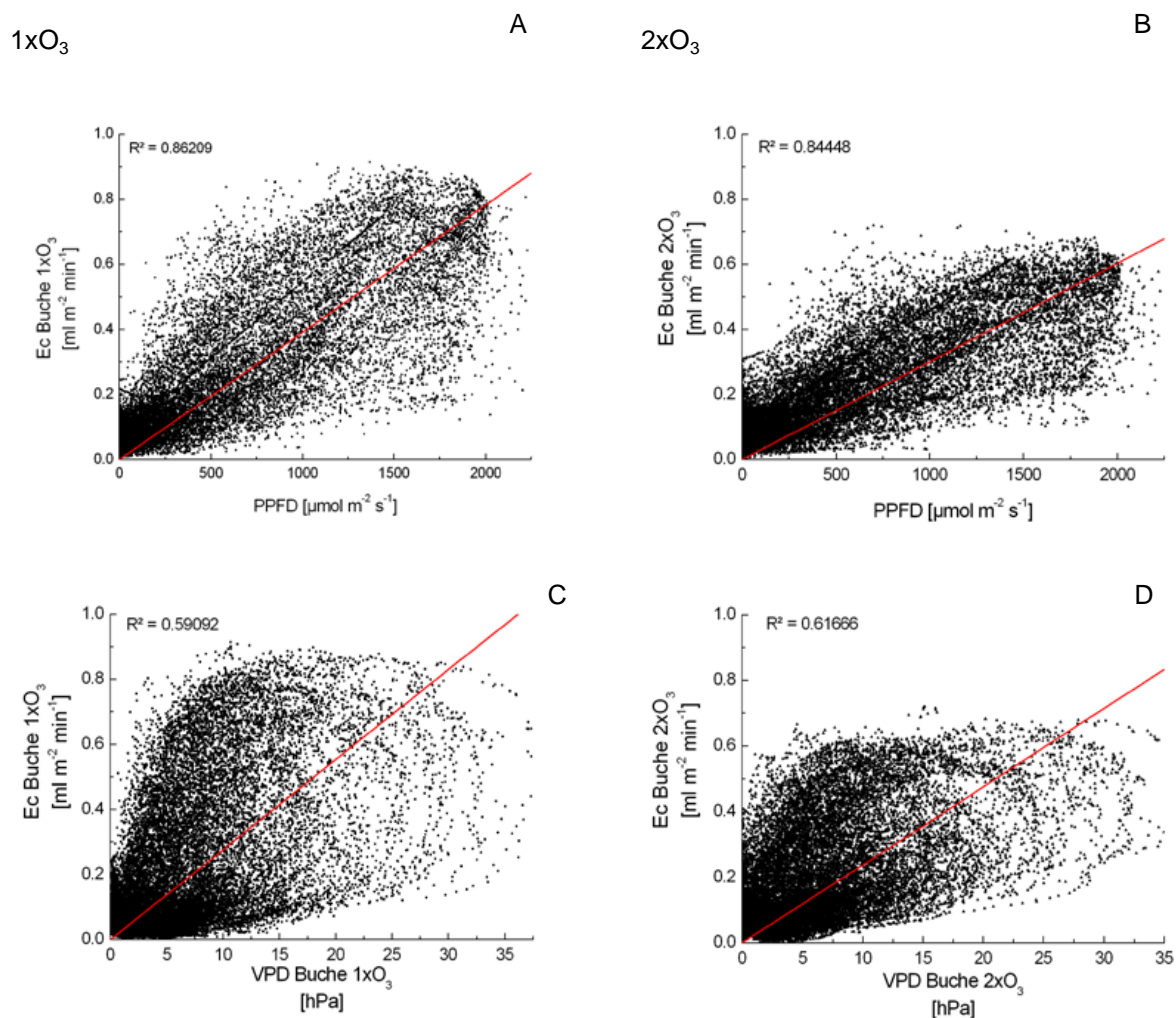


Abbildung 3.13: Korrelation der Buchen-Transpirationsraten $[ml\ m^{-2}\ min^{-1}]$ unter $1xO_3$ und $2xO_3$ mit PPFD $[\mu mol\ m^{-2}\ min^{-1}]$ und VPD $[hPa]$.

Transpiration von Buche und Fichte

Buche:

Unter $1xO_3$ erreichten die Buchen 2006 bis zu 21 % höhere Transpirationssummen als unter $2xO_3$. Ein signifikanter Ozoneffekt auf die Transpiration konnte für Buche nach Anwendung einer Messwertwiederholung (SPSS, GLM) aber nicht nachgewiesen werden ($p = 0,394$). Die höchsten Transpirationssummen erreichten die Buchen in $1xO_3$ und $2xO_3$ im Juli (siehe Abbildung 3.14 und Tabelle 3.6). Tabelle 3.7 zeigt, dass sich im regenreichen August die Transpirationssummen im Vergleich zum Juli unter $1xO_3$ um 39 % reduzierten und unter

2xO₃ um 37 %. Im warmen September stieg die Transpiration wieder an (siehe Abbildung 3.14).

Fichte:

Unter 1xO₃ hatten die Fichten eine bis zu 67 % höhere Transpiration als unter 2xO₃. Nach Anwendung einer Messwertwiederholung (SPSS, GLM) konnte auch bei Fichte kein signifikanter Ozoneffekt nachgewiesen werden (p = 0,347). Lediglich im September zeigte sich nach Berechnung der univariaten Varianzanalyse (SPSS, GLM) die Tendenz eines Einflusses von Ozon (p = 0,114). In beiden Ozonregimen erreichten die Fichten die höchsten Transpirationssummen im Mai (siehe Abbildung 3.14) und die geringsten im August (siehe Tabelle 3.6). Wie die Buchen, reduzierten auch die Fichten ihre Transpiration im kühlen und feuchten August im Vergleich zum Vormonat um 44 % unter 1xO₃ und um 42 % unter 2xO₃ (siehe Tabelle 3.7).

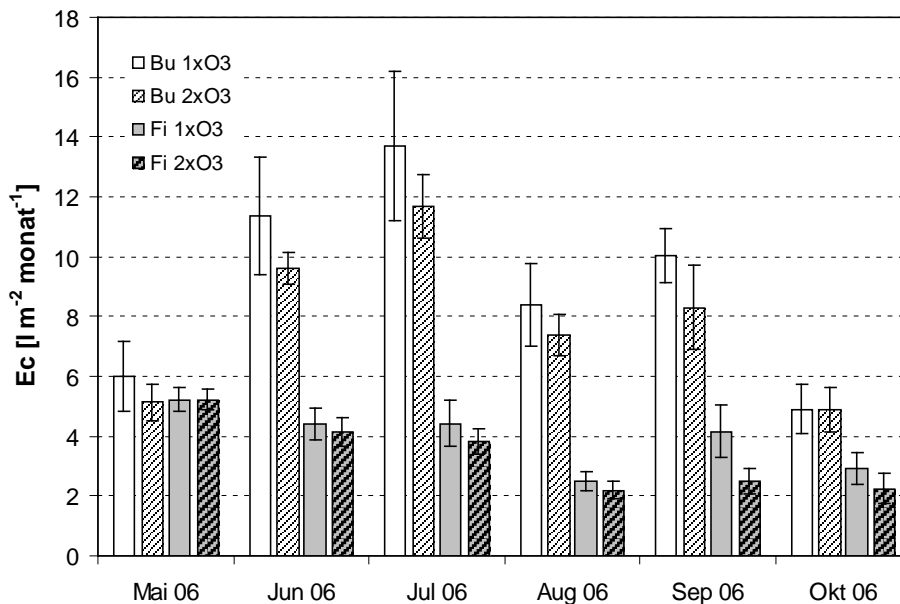


Abbildung 3.14: Monatliche Transpirationssummen pro projizierter Lauboberfläche E_c [$l\ m^{-2}\ monat^{-1}$] bei Buche und pro gesamtter Nadeloberfläche bei Fichte unter 1xO₃ und 2xO₃ im Jahr 2006 (SE: n = 4 - 5).

Tabelle 3.6: Transpirationssummen pro projizierter Lauboberfläche für Buche und pro gesamter Nadeloberfläche für Fichte [$\text{l m}^{-2} \text{monat}^{-1}$] unter $1xO_3$ und $2xO_3$ (SE: $n = 4 - 5$).

	Bu $1xO_3$	SE	Fi $1xO_3$	SE
	$\text{l m}^{-2} \text{monat}^{-1}$		$\text{l m}^{-2} \text{monat}^{-1}$	
Mai 06	5.99	1.2	5.22	0.4
Jun 06	11.37	2.0	4.40	0.6
Jul 06	13.68	2.5	4.42	0.8
Aug 06	8.40	1.4	2.49	0.3
Sep 06	10.03	0.9	4.16	0.9
Okt 06	4.91	0.8	2.90	0.5
	Bu $2xO_3$	SE	Fi $2xO_3$	SE
	$\text{l m}^{-2} \text{monat}^{-1}$		$\text{l m}^{-2} \text{monat}^{-1}$	
Mai 06	5.14	0.6	5.21	0.3
Jun 06	9.62	0.5	4.15	0.5
Jul 06	11.67	1.1	3.81	0.4
Aug 06	7.38	0.7	2.20	0.3
Sep 06	8.29	1.4	2.51	0.4
Okt 06	4.90	0.7	2.25	0.5

Tabelle 3.7: Prozentualer Vergleich der Transpirationssummen [%] mit dem jeweiligen Vormonat im Jahr 2006 bei Buche und Fichte unter $1xO_3$ und $2xO_3$. Wert des Vormonats wurde als Referenzwert genommen (= 100 %), Minuszeichen bedeuten eine geringere Transpirationssumme als im Vormonat.

Vergleich zum jeweiligen Vormonat (= 100%)	Bu $1xO_3$	Fi $1xO_3$	Bu $2xO_3$	Fi $2xO_3$
	[%]	[%]	[%]	[%]
Mai 06				
Jun 06	90	-16	87	-20
Jul 06	20	0	21	-8
Aug 06	-39	-44	-37	-42
Sep 06	19	67	12	14
Okt 06	-51	-30	-41	-10

Vergleich von Buche und Fichte:

Die statistische Auswertung (SPSS, GLM, Messwertwiederholung und Univariate Varianzanalyse) zeigte einen signifikanten Unterschied zwischen den Baumarten mit $p = 0,000$ (bezogen auf die projizierte Kronenfläche bei Buche und auf die gesamte Kronenfläche bei Fichte). So ergibt der prozentuale Vergleich der monatlichen Transpirationssummen unter $1xO_3$ zwischen Buche und Fichte eine um 15 % bis 238 % höhere Transpiration der Buchen als der Fichten. Unter $2xO_3$ transpirierten die Buchen – abgesehen vom Mai – bis zu 235 % mehr als die Fichten (siehe Tabelle 3.8).

Wurden die Transpirationsraten der Fichten statt auf die gesamte Kronenoberfläche auf die projizierte Kronenoberfläche bezogen, so zeigte sich auch dann ein signifikanter Unterschied zwischen den Baumarten mit $p = 0,000$ (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse und Messwertwiederholung). In beiden Behandlungsregimen transpirierten die Fichten das 0,2-fache der Buchen.

Tabelle 3.8: Verhältnis der Transpirationssummen [%] von Buchen und Fichten zwischen 1xO₃ und 2xO₃ (2xO₃ = 100 %) und Verhältnis der Transpirationssummen [%] zwischen Buchen und Fichten (Fichte = 100 %) unter 1xO₃ und 2xO₃.

	Transpiration der Buchen 1xO ₃ /2xO ₃	Transpiration der Fichten 1xO ₃ /2xO ₃
	[%]	[%]
Mai 06	17	0.2
Jun 06	18	6
Jul 06	17	16
Aug 06	14	13
Sep 06	21	65
Okt 06	0.2	29
	Transpiration Buche/Fichte unter 1xO ₃	Transpiration Buche/Fichte unter 2xO ₃
	[%]	[%]
Mai 06	15	-1
Jun 06	158	132
Jul 06	209	206
Aug 06	238	235
Sep 06	141	231
Okt 06	69	118

3.4.1.2 Kronenleitfähigkeit für Wasserdampf

Buche:

Die Kronenleitfähigkeit für Wasserdampf der Buchen war unter 2xO₃ im Vergleich zu 1xO₃ bis zu 42 % reduziert, jedoch nicht signifikant (SPSS, GLM, Messwertwiederholung, p = 0,972). Lediglich im Oktober zeigten die Buchen die Tendenz eines Ozoneinflusses mit p = 0,076 (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse) in Form einer Reduktion der Leitfähigkeit (siehe Tabelle 3.9).

Die monatlich gemittelten Kronenleitfähigkeiten von Buche unter 1xO₃ reichten von 18,5 mmol m⁻² s⁻¹ bis 68,8 mmol m⁻² s⁻¹ pro projizierter Kronenoberfläche (siehe Tabelle 3.9). Die mitunter geringsten Leitfähigkeiten wurden für die Buchen unter 1xO₃ im heißen und trockenen Juli erreicht, wohingegen im August, bedingt durch das kühle und regnerische Wetter, die Leitfähigkeiten der Buchen wieder zunahmen. Die Leitfähigkeiten der Buchen unter 2xO₃ reichten von 9,3 mmol m⁻² s⁻¹ bis 65,8 mmol m⁻² s⁻¹. Auch unter 2xO₃ zeigten die Buchen eine deutliche Abnahme der Leitfähigkeit im Juli.

Tabelle 3.9: Monatliche gemittelte Kronenleitfähigkeit für Wasserdampf pro projizierte Kronenoberfläche für Buche unter $1xO_3$ und $2xO_3$ [$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$] (SE: $n = 5$).

Kronenleitfähigkeit Buche $1xO_3$						
Baumnummer	399	408	409	410	412	SE
	$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$	
Mai 06	25.54	55.89	25.98	52.16	32.90	6.5
Jun 06	33.93	55.54	31.15	50.90	30.29	5.3
Jul 06	19.14	52.37	22.64	36.56	40.27	6.1
Aug 06	32.05	53.05	39.18	63.12	68.75	7.0
Sep 06	36.27	49.71	39.38	45.11	48.13	2.6
Okt 06	18.45	36.98	22.86	29.09	43.96	4.6
Kronenleitfähigkeit Buche $2xO_3$						
Baumnummer	437	439	443	480	482	SE
	$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$	
Mai 06	38.94	50.79	46.31	38.06	29.26	3.7
Jun 06	47.13	49.90	38.67	44.48	37.25	2.4
Jul 06	32.38	36.56	24.62	33.42	25.15	2.4
Aug 06	55.89	49.46	54.78	51.73	65.78	2.8
Sep 06	59.04	47.76	31.94	43.81	65.26	5.9
Okt 06	14.47	11.86	9.32	19.10	33.05	4.2

Fichte:

Die Fichten reduzierten unter $2xO_3$ ihre Kronenleitfähigkeit für Wasserdampf um bis zu 31 %, ein signifikanter Ozoneffekt lag hier jedoch nicht vor (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,789$ und Messwertwiederholung, $p = 0,845$). Die Fichten unter $1xO_3$ erreichten Leitfähigkeiten von $5,7\ mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ bis $29,3\ mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ pro gesamter Kronenoberfläche und unter $2xO_3$ von $5,5\ mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ bis $30,7\ mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ (siehe Tabelle 3.10). Die geringsten Leitfähigkeiten hatten die Fichten in beiden Ozonregimen im Juli, die höchsten Leitfähigkeiten im Mai (siehe Tabelle 3.10).

Vergleich von Buche und Fichte:

Nach der statistischen Auswertung zeigte sich ein signifikanter Einfluss der Baumarten auf die Kronenleitfähigkeit ($p = 0,000$, SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse). In beiden Behandlungsregimen fielen die Leitfähigkeiten der Fichten um das 0,4-fache geringer aus als die der Buchen.

Wurde die Leitfähigkeit der Fichten wie bei Buche auf die projizierte Kronenoberfläche bezogen, so zeigte sich auch hier mit $p = 0,000$ (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse) ein signifikanter Einfluss der Baumarten auf die Leitfähigkeit. Der Vergleich der Kronenleitfähigkeit zwischen den Baumarten ergab, dass die Werte der Fichten unter $1xO_3$ und $2xO_3$ nur das 0,2-fache der Buchen erreichten.

Tabelle 3.10: Monatlich gemittelte Kronenleitfähigkeit pro gesamter Kronenoberfläche [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] der Fichten unter $1xO_3$ und $2xO_3$ (SE: $n = 4 - 5$).

Kronenleitfähigkeit Fichte $1xO_3$							
Baumnummer		374 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	521 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	535 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	537 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	SE	
Mai 06	-	29.32	21.84	24.00	26.20	1.0	
Jun 06	-	18.30	13.53	16.71	10.70	1.7	
Jul 06	-	12.52	11.83	11.34	5.71	1.6	
Aug 06	-	19.15	15.88	17.95	10.34	2.0	
Sep 06	-	18.33	21.94	19.69	9.22	2.8	
Okt 06	-	20.03	15.05	17.53	9.55	2.2	
Kronenleitfähigkeit Fichte $2xO_3$							
Baumnummer		419 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	483 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	484 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	485 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	486 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	SE
Mai 06		27.53	29.61	23.57	24.69	30.67	1.4
Jun 06		6.86	16.82	20.88	13.17	21.26	2.7
Jul 06		8.53	12.42	8.52	11.27	9.24	0.8
Aug 06		15.98	20.37	12.08	17.40	10.69	1.8
Sep 06		15.49	19.62	11.82	17.39	9.22	1.9
Okt 06		11.01	20.55	7.26	9.36	5.46	2.6

Kronenleitfähigkeit bei Nacht

Buche:

Die über die Vegetationsperiode hinweg gemittelte Leitfähigkeit in der Nacht bei Buche unter $1xO_3$ war im Durchschnitt um 72 % im Vergleich zur Leitfähigkeit während des Tages reduziert (siehe Abbildung 3.15) und lag bei $9,7 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bis $17,7 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Unter $2xO_3$ traten Nachtleitfähigkeitswerte von $12,4 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bis $20,8 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ auf und fielen somit im Mittel um 63 % geringer aus als die Leitfähigkeiten bei Tag, was mit $p = 0,000$ signifikant war (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse). War tagsüber die Leitfähigkeit bei Buche unter $2xO_3$ im Vergleich zu $1xO_3$ um durchschnittlich 6 % erniedrigt (es lag keine Signifikanz vor; SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,669$) so war sie nachts tendenziell um durchschnittlich 17 % erhöht (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,078$) (siehe Tabelle 3.11).

Fichte:

Fichte unter $1xO_3$ erreichte nachts Leitfähigkeiten von $3,9 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bis $10,9 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, unter $2xO_3$ von $4,5 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bis $13,0 \text{ mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (siehe Tabelle 3.11). Im Mittel reduzierten die Fichten unter $1xO_3$ nachts ihre Leitfähigkeit im Vergleich zu tagsüber signifikant um 67 % und unter $2xO_3$ signifikant um bis zu 66 % (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $1xO_3 p = 0,000$; $2xO_3 p = 0,000$).

Bei beiden Baumarten war, bedingt durch die Trockenheit im Juli, ein Absinken der Leitfähigkeitswerte sowohl untertags als auch nachts festzustellen (siehe Abbildung 3.15).

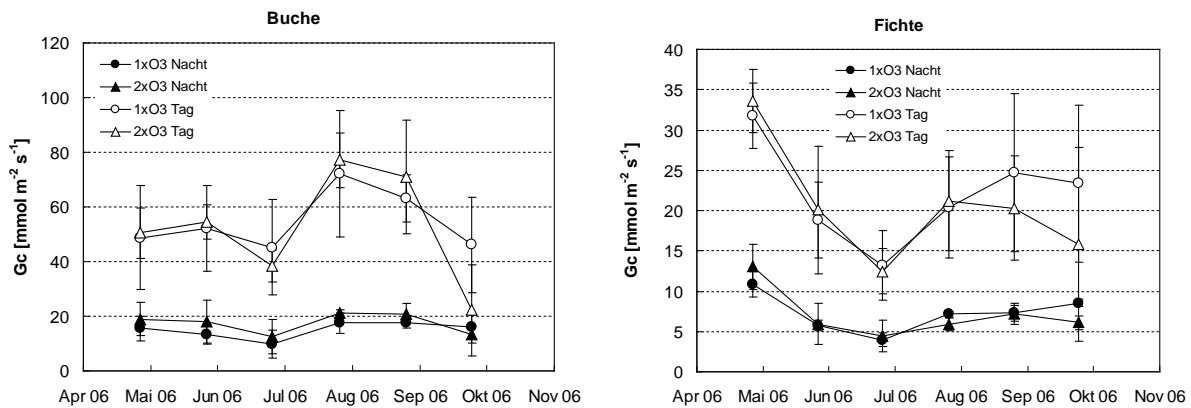


Abbildung 3.15: Verlauf der Kronenleitfähigkeiten G_c [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] der Buchen (links) und Fichten (rechts) bei Tag und bei Nacht (Monatsmittelwerte), berechnet auf Basis der Xylemflussmessung im Stamm in Brusthöhe unter $1xO_3$ und $2xO_3$ im Jahr 2006 (SE: $n = 4 - 5$).

Tabelle 3.11: Kronenleitfähigkeit [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] der Buchen und Fichten unter $1xO_3$ und $2xO_3$ bei Tag und bei Nacht im Jahr 2006 (SE: $n = 4 - 5$).

Kronenleitfähigkeit $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$		$1xO_3$				$2xO_3$			
		Tag	SE	Nacht	SE	Tag	SE	Nacht	SE
Buche	Mai 06	48,74	19,0	15,60	4,6	50,44	9,4	18,92	6,0
	Jun 06	52,16	15,7	13,29	3,5	54,58	6,2	18,14	7,8
	Jul 06	45,21	17,4	9,74	5,2	38,55	5,9	12,37	6,3
	Aug 06	72,18	23,0	17,59	3,7	77,10	10,1	21,02	1,2
	Sep 06	62,98	8,6	17,69	2,1	70,90	20,9	20,80	3,7
	Okt 06	46,11	17,4	16,08	4,3	22,18	16,7	13,39	3,3
Fichte	Mai 06	31,76	4,1	10,88	1,6	33,60	3,9	13,01	2,8
	Jun 06	18,77	4,7	5,77	0,6	20,11	7,9	5,93	2,6
	Jul 06	13,23	4,3	3,93	0,8	12,47	2,9	4,50	2,0
	Aug 06	20,45	6,3	7,13	0,3	21,23	6,2	5,83	0,8
	Sep 06	24,74	9,8	7,29	1,0	20,31	6,5	7,16	1,3
	Okt 06	23,37	9,7	8,50	0,5	15,82	12,0	6,13	0,8

3.4.1.3 Ozonaufnahme

Buche:

Die Ozonaufnahme der Buchen fiel unter $2xO_3$ mit $p = 0,003$ signifikant um 79% höher aus als unter $1xO_3$. (SPSS, GLM, Messwertwiederholung). Die Spannweiten der kumulativen Ozonaufnahme (COU_m) der Buchen (bezogen auf die projizierte Kronenoberfläche) unter $1xO_3$ reichten von $0,5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ bis $3,6 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ und unter $2xO_3$ von $0,2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ bis $4,8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ (siehe Tabelle 3.12). Im Juni traten im Vergleich zu den anderen Monaten unter $1xO_3$ und $2xO_3$ die höchsten monatlichen kumulativen Ozonaufnahmen auf (siehe Abbildung 3.16), da hier das Wetter zwar heiß und trocken war, den Bäumen aber noch ausreichend Bodenfeuchte zur Verfügung stand (siehe Kap. 3.1, Abbildung 3.2). Dadurch mussten die Pflanzen ihre Stomata noch nicht

trockenheitsbedingt schließen, wie das zum Teil im Juli erforderlich war, als die Bäume bei hoher Ozonkonzentration geringere Mengen von Ozon aufnahmen als im Mai/Juni.

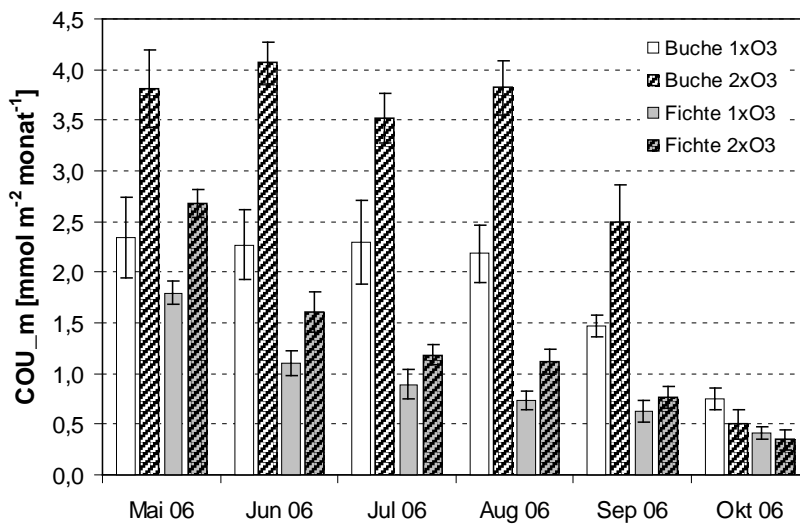


Abbildung 3.16: Monatliche kumulative Ozonaufnahme COU_m [$mmol\ m^{-2}\ monat^{-1}$] pro projizierte Kronenoberfläche der untersuchten Buchen und pro gesamter Kronenoberfläche der untersuchten Fichten unter $1xO_3$ und $2xO_3$ im Jahr 2006 (SE: $n = 4 - 5$).

Tabelle 3.12.: Monatliche kumulative Ozonaufnahmen (COU_m) [$mmol\ m^{-2}\ monat^{-1}$] pro projizierter Kronenoberfläche der Buchen unter $1xO_3$ und $2xO_3$ im Jahre 2006 (SE: $n = 5$).

COU_m Buche 1xO ₃						
Baumnummer	399	408	409	410	412	SE
	$mmol\ m^{-2}\ monat^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ monat^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ monat^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ monat^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ monat^{-1}$	
Mai 06	1,64	3,38	1,52	3,22	1,97	0,4
Jun 06	1,78	3,26	1,71	2,94	1,66	0,3
Jul 06	1,26	3,55	1,50	2,57	2,59	0,4
Aug 06	1,39	2,32	1,68	2,80	2,72	0,3
Sep 06	1,17	1,73	1,27	1,63	1,53	0,1
Okt 06	0,47	0,88	0,59	0,72	1,08	0,1
COU_m Buche 2xO ₃						
Baumnummer	437	439	443	480	482	SE
	$mmol\ m^{-2}\ monat^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ monat^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ monat^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ monat^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ monat^{-1}$	
Mai 06	3,77	4,84	4,42	3,24	2,78	0,4
Jun 06	4,39	4,64	3,77	4,00	3,52	0,2
Jul 06	3,73	4,28	3,09	3,58	2,92	0,2
Aug 06	3,94	3,10	3,83	3,54	4,69	0,3
Sep 06	3,07	2,18	1,43	2,29	3,50	0,4
Okt 06	0,38	0,27	0,21	0,60	1,03	0,2

Fichte:

Unter $2xO_3$ nahmen die Fichten signifikant bis zu 53 % mehr Ozon auf als unter $1xO_3$. (SPSS, GLM, Messwertwiederholung, $p = 0,014$).

Für die Fichten unter $1xO_3$ wurde mit Hilfe der Xylemflussmessung ein COU_m von $0,3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ bis maximal $2,1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ und unter $2xO_3$ von $0,2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ bis $2,9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ berechnet (siehe Tabelle 3.13). Im Mai wurden in beiden Ozonregimen die höchsten Ozonaufnahmen erreicht.

Tabelle 3.13: Monatliche kumulative Ozonaufnahmen (COU_m) [$\text{mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$] pro gesamter Kronenoberfläche der Fichten unter $1xO_3$ und $2xO_3$. (SE: $n = 4 - 5$).

COU_m Fichte $1xO_3$							
Baumnummer		372	521	535	537	SE	
		$\text{mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$		
Mai 06	-	2,11	1,60	1,67	1,81	0,1	
Jun 06	-	1,31	1,06	1,26	0,77	0,1	
Jul 06	-	1,06	1,06	0,97	0,48	0,1	
Aug 06	-	0,85	0,76	0,86	0,47	0,1	
Sep 06	-	0,65	0,81	0,72	0,31	0,1	
Okt 06	-	0,51	0,40	0,48	0,26	0,1	
COU_m Fichte $2xO_3$							
Baumnummer		419	483	484	485	486	SE
		$\text{mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$	
Mai 06	2,72	2,91	2,31	2,42	3,01	0,1	
Jun 06	1,08	1,64	2,03	1,21	2,06	0,2	
Jul 06	1,07	1,47	0,90	1,38	1,10	0,1	
Aug 06	1,17	1,48	0,86	1,27	0,83	0,1	
Sep 06	0,80	1,07	0,57	0,93	0,47	0,1	
Okt 06	0,35	0,72	0,23	0,27	0,17	0,1	

Vergleich von Buche und Fichte:

Ein Vergleich der COU_m von Buchen und Fichten im Jahr 2006 zeigte, dass die Buchen pro projizierter Kronenoberfläche unter $1xO_3$ signifikant bis zu 197 % mehr Ozon aufnahmen als die Fichten (pro gesamter Kronenoberfläche) und unter $2xO_3$ bis zu 240 % mehr als die Fichten. Bei Verwendung der univariaten Varianzanalyse und der Messwertwiederholung (SPSS, GLM) zeigte sich, dass ein signifikanter Einfluss der Baumarten auf die Ozonaufnahme existiert ($p = 0,000$).

Wurde bei Berechnung der Ozonaufnahme der Fichten die projizierte Kronenoberfläche statt der gesamten Kronenoberfläche als Bezugsfläche zugrunde gelegt, so war auch dann ein signifikanter Einfluss der Baumarten auf die Ozonaufnahme mit $p = 0,000$ (SPSS, GLM,

Univariate Varianzanalyse) feststellbar. Dabei fiel die Ozonaufnahme der Buchen unter $1xO_3$ 5,2-mal so hoch aus wie die Ozonaufnahme der Fichten, und unter $2xO_3$ 6,2-mal so hoch.

Die kumulative Ozonaufnahme in der Vegetationsperiode (COU_v) stellt die Menge an Ozon dar, die von den Bäumen über die gesamte Vegetationsperiode hinweg aufgenommen wurde. Die statistische Auswertung (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse und Messwertwiederholung) zeigte einen signifikanten Einfluss des Ozonregimes auf die kumulative Ozonaufnahme in der Vegetationsperiode der Buchen und Fichten mit $p = 0,000$.

Buche:

Die höchste kumulative Ozonaufnahme in der Vegetationsperiode wurde für Buche mit einem Wert von $18,2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ veg.periode}^{-1}$ unter $2xO_3$ berechnet (siehe Abbildung 3.17). Unter $1xO_3$ erreichten die Buchen ein COU_v von $11,3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ veg.periode}^{-1}$.

Fichte:

Im Gegensatz zu den Buchen fiel COU_v der Fichten mit $7,7 \text{ mmol m}^{-2} \text{ veg.periode}^{-1}$ unter $2xO_3$ und $5,6 \text{ mmol m}^{-2} \text{ veg.periode}^{-1}$ unter $1xO_3$ geringer aus.

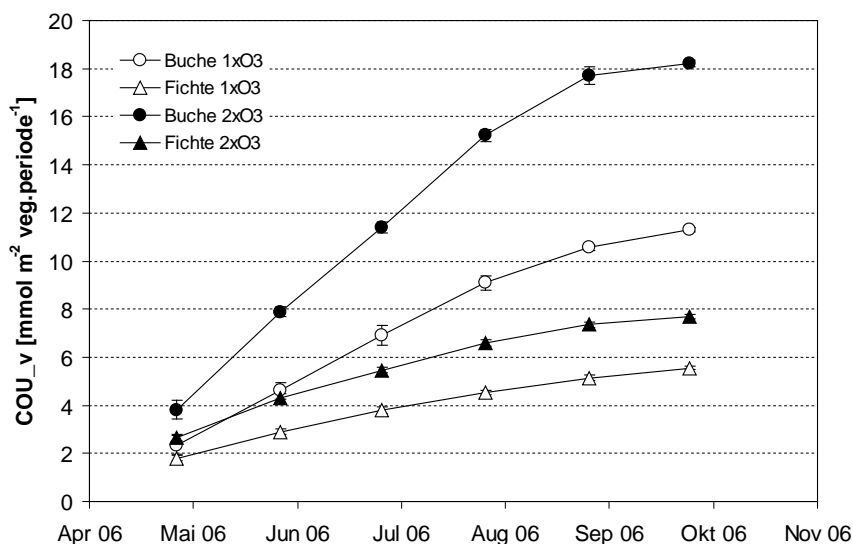


Abbildung 3.17: Kumulative Ozonaufnahme in der Vegetationsperiode (COU_v) [$\text{mmol m}^{-2} \text{ veg.periode}^{-1}$] der Buchen und Fichten unter $1xO_3$ und $2xO_3$ (SE: $n = 4 - 5$).

Vergleich von Buche und Fichte:

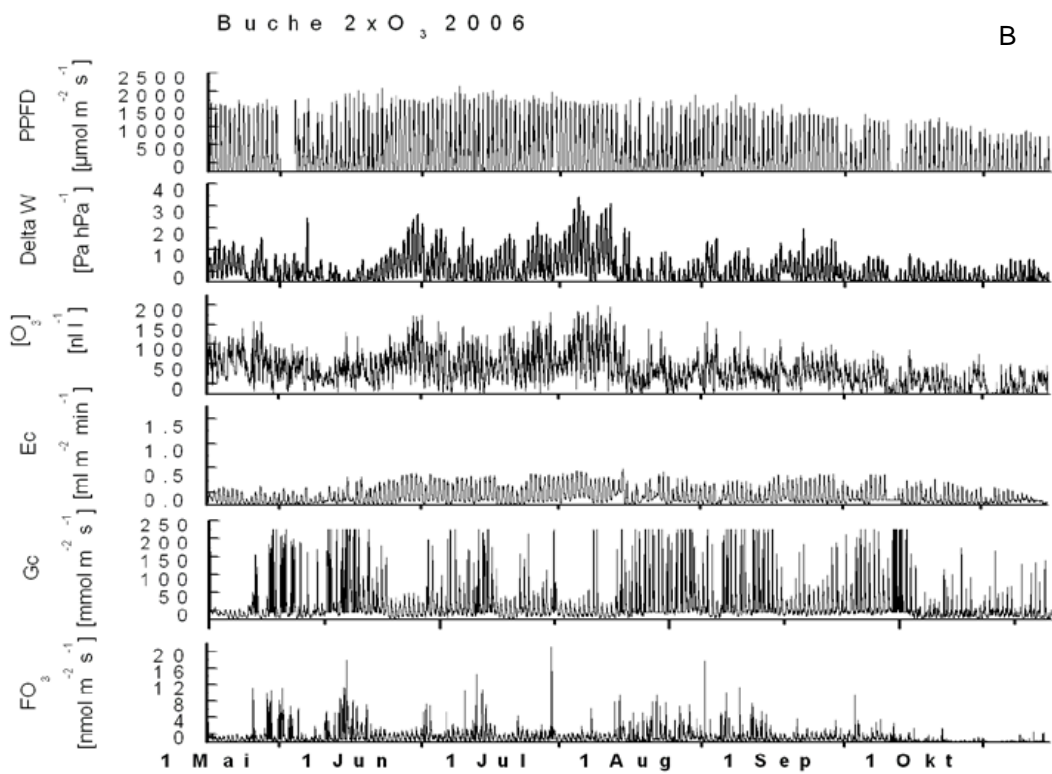
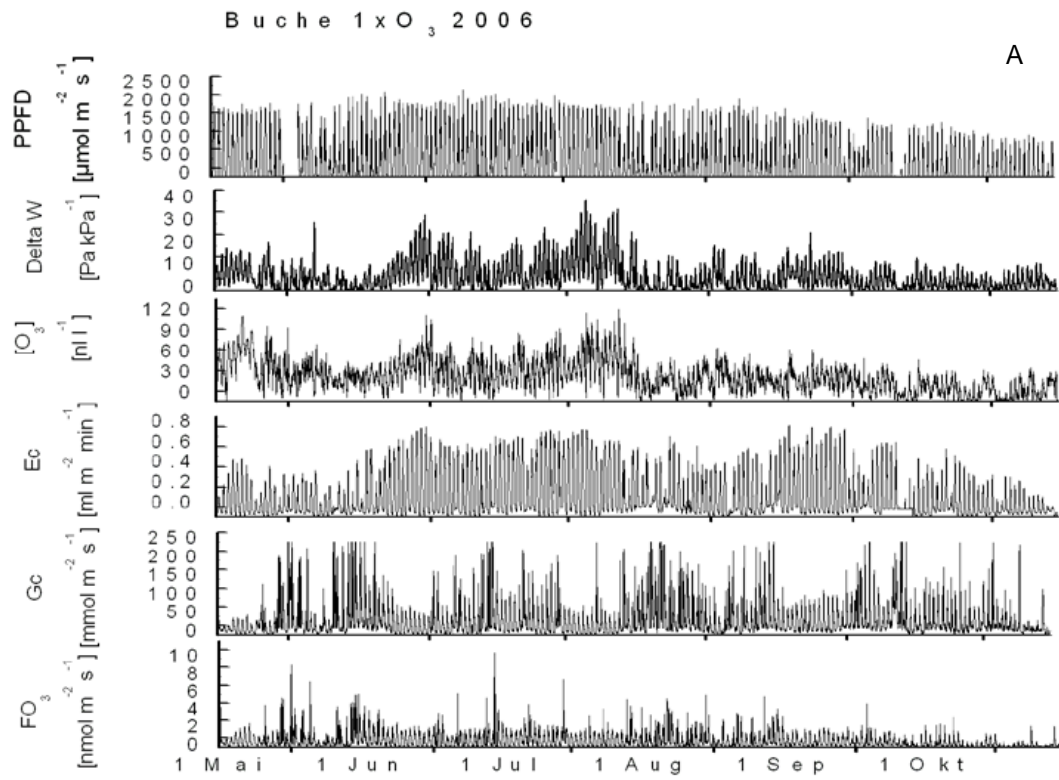
Die COU_v der Fichten erreichte unter $1xO_3$ nur das 0,5-fache der COU_v der Buchen und unter $2xO_3$ das 0,4-fache. Die statistische Auswertung (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse und Messwertwiederholung) zeigte nicht nur einen signifikanten Einfluss der Baumarten auf COU_v ($p = 0,000$), sondern auch einen signifikanten Einfluss von Ozon auf die kumulative Ozonaufnahme in der Vegetationsperiode der Buchen und Fichten mit $p = 0,000$. Wurde COU_v der Fichten nicht auf die gesamte Kronenoberfläche bezogen, sondern auf die projizierte Kronenoberfläche, so war der Einfluss der Baumarten mit

$p = 0,000$ (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse) ebenfalls signifikant. Die Buchen erreichten dann unter $1xO_3$ ein 4,9-mal so hohes COU_v wie die Fichten und unter $2xO_3$ ein 5,7-mal so hohes COU_v .

Die 10-Minuten-Verläufe der Ozonflüsse, der Kronenleitfähigkeit für Wasserdampf, der Kronentranspiration, der Ozonkonzentration, des Δw und der Strahlung über die gesamte Vegetationsperiode 2006 hinweg werden in Abbildung 3.18 A - D dargestellt.

An sehr warmen und trockenen Tagen fielen zwar die Transpiration und die Ozonkonzentration hoch aus, die Ozonaufnahme jedoch nicht. Um an solchen Tagen einem Wasserverlust vorzubeugen, schließen die Pflanzen ihre Stomata, was an den reduzierten Leitfähigkeitswerten zu erkennen ist. Ein Schluss der Stomata wirkt sich auf die Pflanze in Form einer reduzierten Ozonaufnahme aus (trotz hoher Ozonkonzentration). Umgekehrt kann an humiden Tagen, trotz geringer Ozonkonzentration, gleich viel oder mehr Ozon aufgenommen werden als an heißen und trockenen Tagen mit hoher Ozonkonzentration, da die Stomata offen bleiben.

Somit nehmen die Buchen und Fichten bei hoher Ozonkonzentration nicht zwingend mehr Ozon auf als an Tagen mit niedriger Ozonkonzentration.



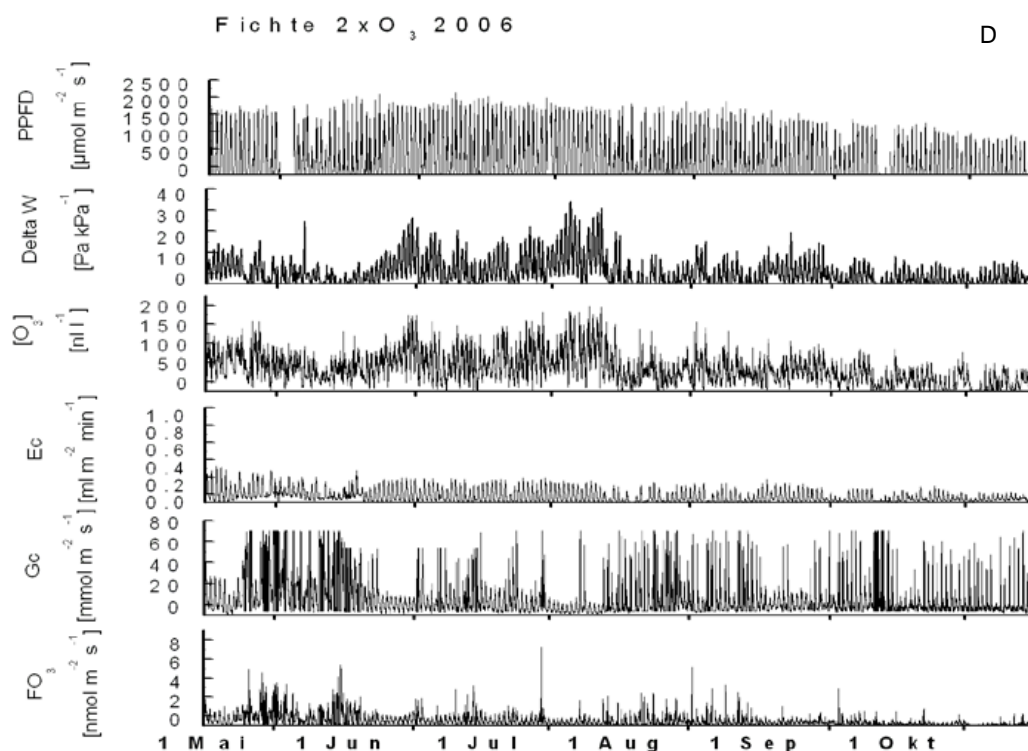
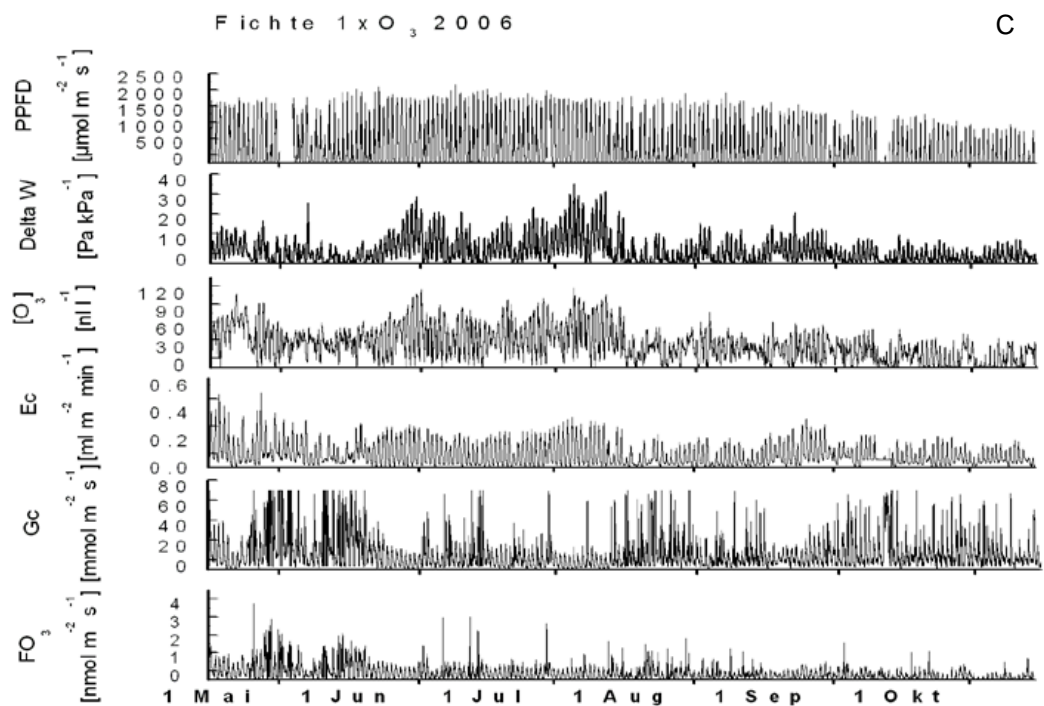


Abbildung 3.18: Gesamtübersicht der Verläufe der Ozonflüsse FO_3 [$\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$], der Kronenleitfähigkeiten für Wasserdampf Gc [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$], der Transpirationsrate Ec [$\text{ml m}^{-2} \text{min}^{-1}$], der Ozonkonzentrationen $[\text{O}_3]$ [nl l^{-1}], des Δw [Pa kPa^{-1}] und der Strahlung PPFD [$\mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$] während der Vegetationsperiode im Jahr 2006 für (A) Buche unter $1 \times \text{O}_3$, (B) Buche unter $2 \times \text{O}_3$, (C) Fichte unter $1 \times \text{O}_3$, (D) Fichte unter $2 \times \text{O}_3$.

3.4.2 Xylemflussmessung auf Astebene (SHB)

3.4.2.1 Transpiration

Buche:

Die Transpiration der Sonnenäste unter $2xO_3$ war im Vergleich zu $1xO_3$ durchschnittlich um 22 % reduziert, die der Schattenäste unter $2xO_3$ um 10 %, ein signifikanter Ozoneinfluss konnte in beiden Kronenzonen nicht nachgewiesen werden, lediglich die Andeutung eines Ozoneinflusses (SPSS, GLM Univariate Varianzanalyse, $p = 0,171$). Ebenso wenig konnte ein signifikanter Einfluss der Kronenzonen (Schattenkrone oder Sonnenkrone) auf die Transpiration (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,108$) bestätigt werden.

Das vorherrschende Wetter im trockenen Juni und Juli und im humiden August spiegelte sich auch in den Messungen des Xylemflusses an den Ästen wider. So wurden im Vergleich zu den übrigen Monaten im Juni und Juli die höchsten monatlichen Transpirationssummen erreicht, wohingegen diese im August geringer ausfielen (siehe Tabelle 3.14).

Die Transpirationssummen, die an den Sonnenästen unter $1xO_3$ gemessen wurden, reichten von $3,5 \text{ l m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ bis maximal $30,9 \text{ l m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$, an den Schattenästen von $4,02 \text{ l m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ bis $17 \text{ l m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$. Die Transpirationssummen der Sonnenäste der Buchen unter $2xO_3$ lagen zwischen $4,04 \text{ l m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ bis $17,2 \text{ l m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ und die der Schattenästen zwischen $2,6 \text{ l m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ und $15,0 \text{ l m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ (siehe Tabelle 3.14).

Fichte:

Aufgrund von System-Ausfällen konnte bei Fichte nur die Xylemflussmessung auf Astebene unter $1xO_3$ ausgewertet werden. Die Transpiration der Schattenäste der Fichten fiel um das 0,1-fache geringer aus als die der Buchen, und die Transpiration der Sonnenäste um das 0,3-fache. Der Einfluss der unterschiedlichen Kronenzonen und damit der unterschiedlichen Lichtexposition auf die Transpiration der Fichten war mit $p = 0,009$ signifikant (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse). So zeigten die Sonnenäste der Fichten unter $1xO_3$ Transpirationssummen von $0,2 \text{ l m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ bis $18,7 \text{ l m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ und die Schattenästen von $0,05 \text{ l m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ bis $3,2 \text{ l m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ (siehe Tabelle 3.14). Dabei wurden von den Sonnen- und Schattenästen unter $1xO_3$ die geringsten monatlichen Transpirationssummen im Mai und die höchsten im Juli erreicht. Auch hier spiegelte sich das humide Wetter im August durch die Abnahme der Transpiration deutlich wider.

Wurde die Transpiration der Fichten auf die projizierte Nadeloberfläche bezogen statt auf die gesamte Nadeloberfläche, so erreichte sie das 0,1-fache der Buchen. Auch mit projizierter Nadeloberfläche war bei den Fichten der Einfluss der unterschiedlichen Kronenzonen signifikant (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,000$).

Tabelle 3.14: Monatliche Transpirationssummen (Eb) [$l\ m^{-2}\ monat^{-1}$] der Sonnen (sun)- und Schattenäste (sha) der untersuchten Buchen pro projizierter Blattoberfläche und der untersuchten Fichten pro gesamter Nadeloberfläche unter $1xO_3$ und $2xO_3$.

Eb Transpiration auf Astebene: Buche $1xO_3$						
Baumnr.	409sun	412sun	410sun	409sha	412sha	410sha
	$l\ m^{-2}\ monat^{-1}$	$l\ m^{-2}\ monat^{-1}$	$l\ m^{-2}\ monat^{-1}$	$l\ m^{-2}\ monat^{-1}$	$l\ m^{-2}\ monat^{-1}$	$l\ m^{-2}\ monat^{-1}$
Mai 06	14,77	9,95	9,53	8,63	4,02	6,55
Jun 06	36,6	10,1	14,9	13,8	8,1	11,1
Jul 06	30,98	5,54	12,78	13,51	5,93	7,46
Aug 06	18,70	4,36	8,45	8,79	4,59	8,75
Sep 06	17,20	3,75	7,36	12,93	5,06	9,06
Okt 06	17,23	3,46	4,92	17,18	7,08	8,71
Eb Transpiration auf Astebene: Buche $2xO_3$						
Baumnr.	482sun	446sun	443sun	482sha	443sha	
	$l\ m^{-2}\ monat^{-1}$	$l\ m^{-2}\ monat^{-1}$	$l\ m^{-2}\ monat^{-1}$	$l\ m^{-2}\ monat^{-1}$	$l\ m^{-2}\ monat^{-1}$	
Mai 06	-	5,47	5,15	3,42	7,77	-
Jun 06	-	15,51	12,96	7,40	15,03	-
Jul 06	-	13,63	11,64	6,48	11,82	-
Aug 06	7,65	10,19	5,14	4,91	10,16	-
Sep 06	11,83	7,06	6,40	3,38	10,40	-
Okt 06	17,19	4,04	7,38	2,57	12,70	-

Bei Buche, getestet mit SPSS (GLM), ergaben sich keine signifikanten Unterschiede (weder in der Ozonbehandlung, noch in den Kronenzonen). Ausfälle waren durch defekte Sensoren bedingt.

Eb Transpiration auf Astebene: Fichte $1xO_3$						
Baumnr.	521sun	535sun	5357sun	521sha	535sha	537sha
	$l\ m^{-2}\ monat^{-1}$	$l\ m^{-2}\ monat^{-1}$	$l\ m^{-2}\ monat^{-1}$	$l\ m^{-2}\ monat^{-1}$	$l\ m^{-2}\ monat^{-1}$	$l\ m^{-2}\ monat^{-1}$
Mai 06	0,41	0,51	0,24	0,07	0,08	0,05
Jun 06	12,76	6,61	3,10	2,25	1,40	2,48
Jul 06	18,66	7,85	3,84	2,43	1,73	3,23
Aug 06	4,36	4,35	2,11	1,43	1,06	1,74
Sep 06	3,66	3,99	1,65	1,17	0,89	1,20
Okt 06	1,70	2,55	1,21	0,77	0,36	0,83

Bei Fichte, getestet mit SPSS (GLM), ergab sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Sonnen- und Schattenästen.

Vergleich der Ast- mit der Kronentranspiration

In Abbildung 3.19 wird exemplarisch der Tagesgang der Transpiration eines Sonnen- und eines Schattenastes mit der Kronentranspiration der Buche 412 verglichen. Die Transpirationsrate [$ml\ m^{-2}\ min^{-1}$] des Sonnenastes liegt über der des Schattenastes und der gesamten Krone (siehe Abbildung 3.19). So transpierte der Sonnenast der Buche 412 ($1xO_3$) bis zu 84 % mehr als der Schattenast und bis zu 44 % mehr als die gesamte Baumkrone. Die Kronentranspiration fiel um 28 % höher aus als die Transpiration des Schattenastes.

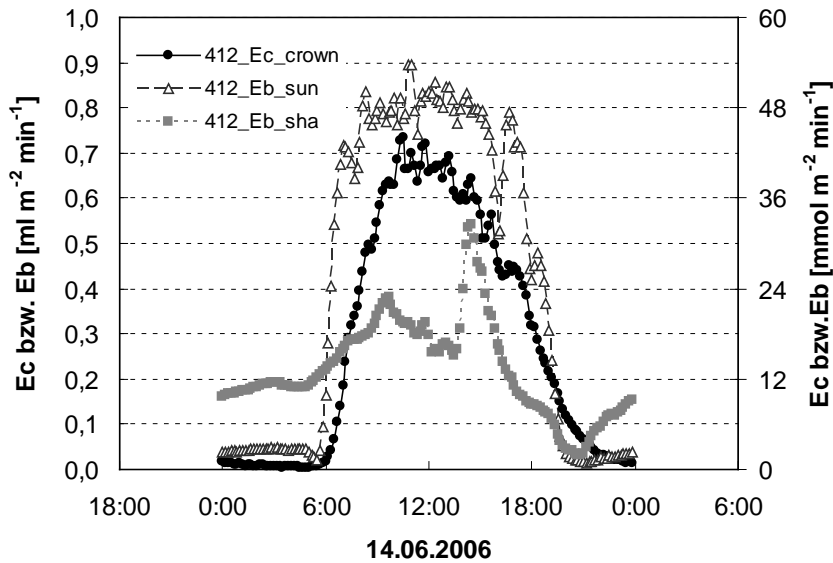


Abbildung 3.19: Vergleich der Transpirationsrate pro projizierter Blattoberfläche [$\text{ml m}^{-2} \text{min}^{-1}$] auf Astebene und auf Kronenebene. Weiße Dreiecke stellen die Transpiration des Sonnenastes, graue Kästchen die Transpiration des Schattenastes und schwarze Kreise die Transpiration der Krone (projizierte Kronenoberfläche) [$\text{ml m}^{-2} \text{min}^{-1}$] der Buche 412 am 14.06.06 dar.

3.4.2.2 Leitfähigkeit für Wasserdampf

Buche:

Unter $1xO_3$ fiel die Leitfähigkeit für Wasserdampf der Sonnenäste der Buchen im Mittel 5 % höher aus als die der Schattenäste, unter $2xO_3$ war die Leitfähigkeit der Sonnenäste um 28 % höher als die der Schattenäste. Für die Buchen konnte die Tendenz eines Einflusses der Kronenzone auf die Leitfähigkeit festgestellt werden (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,06$). Ein Einfluss von Ozon auf die Leitfähigkeit konnte statistisch nicht nachgewiesen werden (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,807$).

Die Sonnenäste der Buchen unter $2xO_3$ erreichten gemittelte monatliche Leitfähigkeiten pro m^2 projizierte Blattoberfläche von $47,6 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bis zu $88,9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (siehe Tabelle 3.15), die Schattenäste Leitfähigkeiten von $28,9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bis $72,3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Für die Sonnenäste der Buchen unter $1xO_3$ wurden Leitfähigkeiten von $24,5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bis $96,9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ berechnet, für die Schattenäste Leitfähigkeiten von $36,7 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bis $79,7 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (siehe Tabelle 3.15). Der Verlauf der monatsweise gemittelten Leitfähigkeit ist in Abbildung 3.20 dargestellt.

Tabelle 3.15: Leitfähigkeit für Wasserdampf g_b [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] der Sonnenäste (sun) und Schattenäste (sha) der Buchen pro projizierte Blattoberfläche unter $1xO_3$ und $2xO_3$ und der Fichten pro gesamter Nadeloberfläche unter $1xO_3$.

gb Leitfähigkeit für Wasserdampf auf Astebene: Buche $1xO_3$						
Baumnr.	409sun	412sun	410sun	409sha	412sha	410sha
	$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Mai 06	84,21	63,98	52,23	58,96	45,26	61,78
Jun 06	96,95	41,26	49,46	57,93	38,30	50,80
Jul 06	92,92	24,46	43,03	60,79	27,65	38,70
Aug 06	92,98	32,71	48,49	74,00	38,47	65,90
Sep 06	83,71	27,63	41,14	79,69	36,74	64,46
Okt 06	73,92	34,76	42,33	75,49	47,31	52,52
gb Leitfähigkeit für Wasserdampf auf Astebene: Buche $2xO_3$						
Baumnr.	482sun	446sun	443sun	482sha	443sha	
	$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	
Mai 06	-	47,58	49,47	32,97	60,17	-
Jun 06	-	70,89	61,33	34,69	65,08	-
Jul 06	-	62,65	50,87	28,45	51,88	-
Aug 06	70,41	73,73	52,81	45,76	72,27	-
Sep 06	88,91	69,10	62,69	28,93	66,78	-
Okt 06	85,79	50,45	64,99	36,28	68,47	-
gb Leitfähigkeit für Wasserdampf auf Astebene: Fichte $1xO_3$						
Baumnr.	521sun	535sun	537sun	521sha	535sha	537sha
	$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Mai 06	36,91	36,34	17,40	9,54	10,45	-
Jun 06	34,75	24,22	10,14	10,83	7,79	9,59
Jul 06	32,64	19,50	8,40	6,98	5,30	9,12
Aug 06	26,51	24,62	13,48	14,64	9,98	12,62
Sep 06	24,07	19,06	6,15	6,76	5,85	7,94
Okt 06	18,30	19,47	9,14	8,58	6,48	8,19

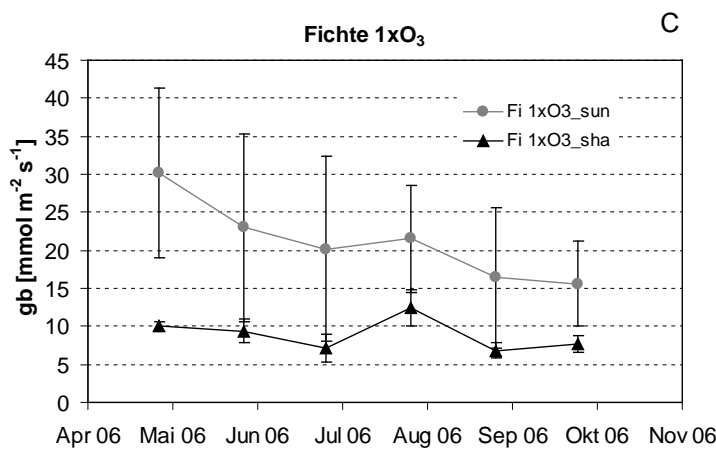
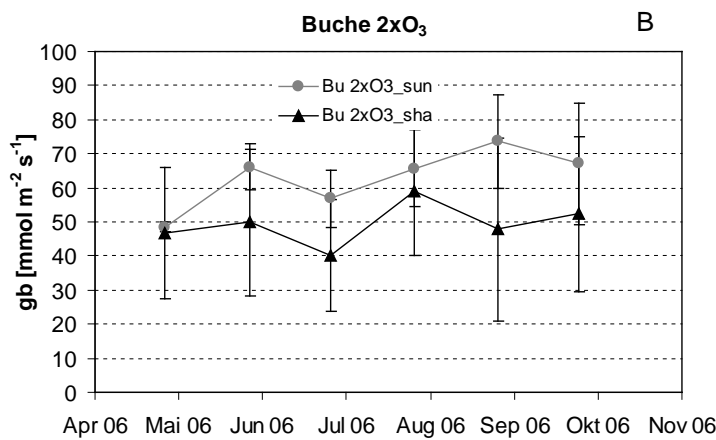
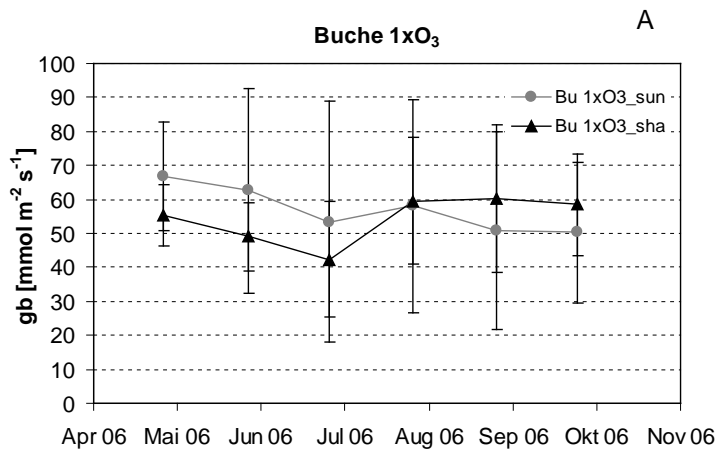


Abbildung 3.20: Verlauf der monatlich pro Ozonregime und Kronenzone gemittelten Leitfähigkeit für Wasserdampf (g_b) [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] der Sonnen- (grau) und Schattenäste (schwarz) (A) der Buchen unter $1xO_3$ und (B) der Buchen unter $2xO_3$ und (C) der Fichten unter $1xO_3$ im Jahr 2006 (SE: $n = 2 - 3$).

Fichte:

Bei den Fichten fiel die Leitfähigkeit der Sonnenäste im Mittel um 137 % signifikant höher aus als die der Schattenäste (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,000$).

3.4.2.3 Ozonaufnahme

Buche:

Die Sonnenäste der Buchen nahmen unter $2xO_3$ bis zu 139 % mehr Ozon auf als unter $1xO_3$, die Schattenäste bis zu 85 % mehr. Der Einfluss von Ozon auf die Ozonaufnahme war mit $p = 0,001$ (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse) signifikant. Die Ozonaufnahme der Schattenäste fiel im Mittel unter $1xO_3$ und $2xO_3$ um 20 % geringer aus als die der Sonnenäste (siehe Abbildung 3.21). Mit $p = 0,006$ (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse) wurde zudem ein signifikanter Einfluss der Kronenzone auf die Ozonaufnahme festgestellt.

Die Berechnung der Ozonaufnahme der Äste, an denen der Xylemfluss gemessen wurde, ergab für alle Sonnenäste der Buchen unter $1xO_3$ eine Spannweite der monatlichen kumulativen Ozonaufnahme (COUb_m) von $0,6 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ bis $6,1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ (bezogen auf die projizierte Blattoberfläche). Für die Schattenäste wurde eine monatliche kumulative Ozonaufnahme von $0,6 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ bis $2,6 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ ermittelt (siehe Tabelle 3.16). Unter $2xO_3$ erreichten die Sonnenäste der Buchen eine Ozonaufnahme von $1,4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ bis $7,1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ und die Schattenästen eine Ozonaufnahme von $0,8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ bis $5,0 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$. Unter $1xO_3$ und $2xO_3$ waren die höchsten COUb_m-Werte im Mai/Juni festzustellen. Zurückzuführen ist dies auf die Witterungsverhältnisse, die sich – wie in Kapitel 3.1 beschrieben – durch hohe Temperaturen bei noch ausreichend feuchten Böden auszeichneten. Damit waren die Stomata geöffnet und eine Ozonaufnahme fand statt.

Fichte:

COUb_m der Fichtenäste fiel geringer aus als COUb_m der Buchenäste. So nahmen die Sonnenäste der Fichten unter $1xO_3$ im Vergleich zu denen der Buchen unter $1xO_3$ um bis zu 94 % weniger Ozon auf. Bei den Schattenästen der Fichte unter $1xO_3$ zeigt sich eine um bis zu 98 % geringere Ozonaufnahme im Vergleich zu den Schattenästen der Buche unter $1xO_3$. Die Ozonaufnahme der Sonnenäste fiel bei den Fichten im Mittel um 190 % höher aus als die der Schattenäste (siehe Abbildung 3.21). Wie bei Buche konnte bei Fichte ein signifikanter Einfluss der Kronenzone auf die Ozonaufnahme der Äste nachgewiesen werden (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,018$).

Die Fichtenäste unter $1xO_3$ erreichten monatliche kumulative Ozonaufnahmen in der Sonnenkrone von $0,1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ bis $2,8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$, wohingegen sie in der Schattenkrone monatliche kumulative Ozonaufnahmen von $0,06 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ bis $0,7 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ (bezogen auf die gesamte Nadeloberfläche) erzielten (siehe Tabelle 3.16).

Wurde die Ozonaufnahme der Fichten auf die projizierte Nadeloberfläche bezogen, nahmen die Fichten im Vergleich zu den Buchen in der Sonnenkrone im Mittel 68 % weniger Ozon auf als die Buchen und in der Schattenkrone 84 % weniger. Auch mit projizierter

Nadeloberfläche als Bezugsgröße war der Einfluss der Kronenzone bei den Fichten mit $p = 0,018$ signifikant (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse).

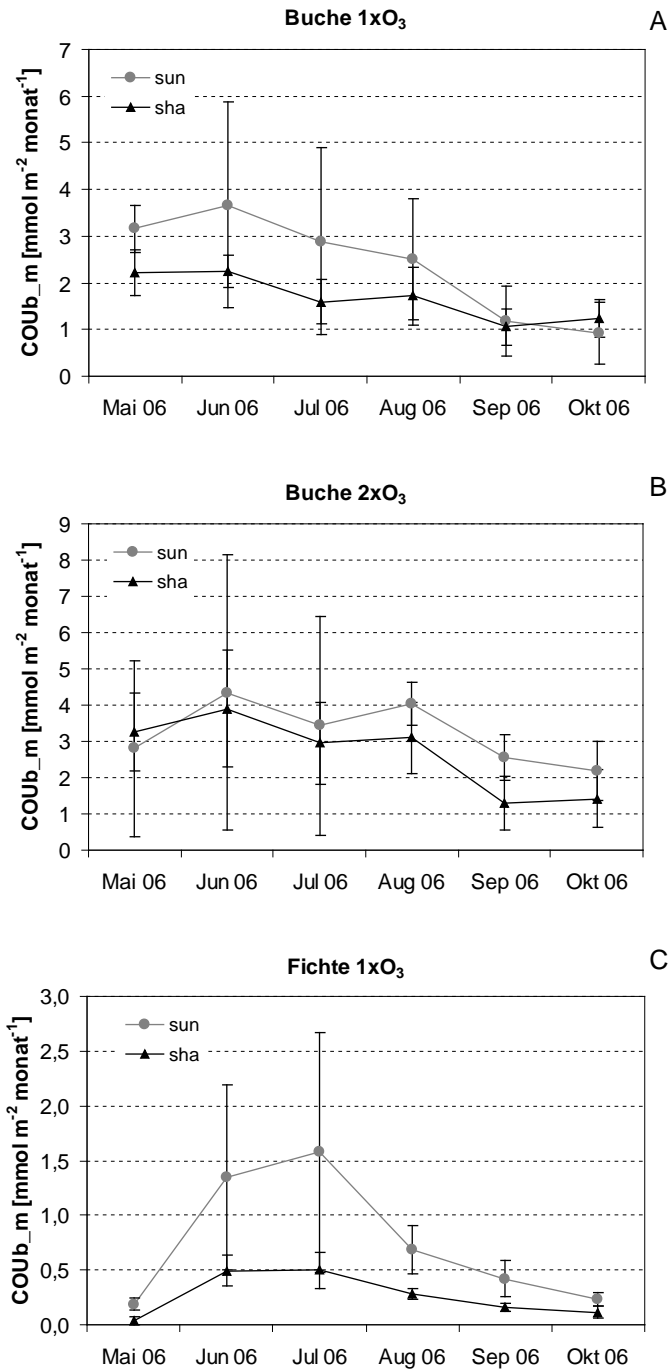


Abbildung 3.21: Verlauf der monatlichen kumulativen Ozonaufnahme (COUb_m) [mmol m⁻² monat⁻¹] der Sonnen- und Schattenäste (A) der Buchen unter 1xO₃ pro projizierter Blattoberfläche und (B) der Buchen unter 2xO₃ pro projizierter Blattoberfläche und (C) der Fichten unter 1xO₃ pro gesamter Nadeloberfläche. (SE: n = 2 - 3).

Tabelle 3.16: Monatliche kumulative Ozonaufnahme (COUb_m) [mmol m⁻² monat⁻¹] der Sonnen- und Schattenästen der Buchen unter 1xO₃ und 2xO₃ und der Fichten unter 1xO₃.

COUb_m auf Astebene: Buche 1xO ₃						
Baumnr.	409sun	412sun	410sun	409sha	412sha	410sha
	mmol m ⁻² monat ⁻¹	mmol m ⁻² monat ⁻¹	mmol m ⁻² monat ⁻¹	mmol m ⁻² monat ⁻¹	mmol m ⁻² monat ⁻¹	mmol m ⁻² monat ⁻¹
Mai 06	3,75	2,84	2,88	2,41	1,66	2,58
Jun 06	6,12	1,88	3,01	2,56	1,89	2,30
Jul 06	5,09	1,20	2,37	2,08	1,14	1,57
Aug 06	3,92	1,39	2,20	2,01	1,00	2,15
Sep 06	2,00	0,55	0,98	1,40	0,64	1,15
Okt 06	1,67	0,56	0,51	1,71	0,94	1,06
COUb_m auf Astebene: Buche 2xO ₃						
Baumnr.	482sun	446sun	443sun	482sha	443sha	
	mmol m ⁻² monat ⁻¹	mmol m ⁻² monat ⁻¹	mmol m ⁻² monat ⁻¹	mmol m ⁻² monat ⁻¹	mmol m ⁻² monat ⁻¹	
Mai 06	-	4,08	4,33	2,50	4,02	-
Jun 06	-	7,10	5,93	2,76	5,04	-
Jul 06	-	5,61	4,68	2,16	3,76	-
Aug 06	3,94	4,66	3,50	2,41	3,79	-
Sep 06	3,25	2,39	2,02	0,77	1,82	-
Okt 06	3,05	1,40	2,11	0,86	1,98	-
COUb_m auf Astebene: Fichte 1xO ₃						
Baumnr.	521sun	535sun	537sun	521sha	535sha	537sha
	mmol m ⁻² monat ⁻¹	mmol m ⁻² monat ⁻¹	mmol m ⁻² monat ⁻¹	mmol m ⁻² monat ⁻¹	mmol m ⁻² monat ⁻¹	mmol m ⁻² monat ⁻¹
Mai 06	0,24	0,18	0,13	0,06	0,07	0,00
Jun 06	2,30	1,06	0,69	0,54	0,34	0,60
Jul 06	2,80	1,26	0,68	0,50	0,33	0,66
Aug 06	0,76	0,86	0,44	0,33	0,24	0,28
Sep 06	0,48	0,55	0,23	0,16	0,13	0,20
Okt 06	0,19	0,30	0,21	0,14	0,06	0,15

3.5 Gaswechselformung

3.5.1 Astküvette

3.5.1.1 Transpiration

Buche:

Der Buchenast (Buche 417) transpierte im Juni 32,9 l m⁻² monat⁻¹ pro projizierter Blattoberfläche, im Juli erreichte der Ast mit 49,6 l m⁻² monat⁻¹ sein Transpirations-Maximum und im August nur mehr 24,9 l m⁻² monat⁻¹. Für den warmen und trockenen September wurde mit 25,1 l m⁻² monat⁻¹ eine höhere Transpirationssumme (siehe Tabelle 3.17) als im August ermittelt.

Tabelle 3.17: Monatliche Transpirationssummen (Ek) [$\text{l m}^{-2} \text{monat}^{-1}$] eines Sonnenastes bei Buche (417) pro projizierter Blattoberfläche und bei Fichte (419) pro gesamter Blattfläche, gemessen in der Astkuvette.

Ek Transpiration		
Sonnenast	Buche 417	Fichte 419
	$\text{l m}^{-2} \text{monat}^{-1}$	$\text{l m}^{-2} \text{monat}^{-1}$
Juni	32,97	3,40
Juli	49,56	5,83
August	24,85	2,53
September	25,06	2,76
Oktober	8,82	2,26

Fichte:

Wie anhand der Kurvenverläufe in Abbildung 3.22 zu sehen ist, erreichte der in der Gaswechsellkuvette eingeschlossene Fichtenast nur etwa 10 % der Transpirationsraten des Buchenastes (mit gesamter Nadeloberfläche als Bezugsgröße). Wurde die Transpiration der Fichten auf die projizierte Nadeloberfläche bezogen, so entsprachen die Werte des in der Kuvette eingeschlossenen Fichtenastes im Mittel nur 5 % der Transpiration des Buchenastes.

Im Juni erreichte der Fichtenast eine Transpirationssumme (pro gesamter Nadelfläche) von $3,4 \text{ l m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ pro gesamte Blattoberfläche, im Juli sein Transpirations-Maximum mit $5,8 \text{ l m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ und im August eine Transpirationssumme von $2,5 \text{ l m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$. Im September transpirierte der Fichtenast insgesamt $2,8 \text{ l m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$, im Oktober nur mehr $2,3 \text{ l m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ (siehe Tabelle 3.17).

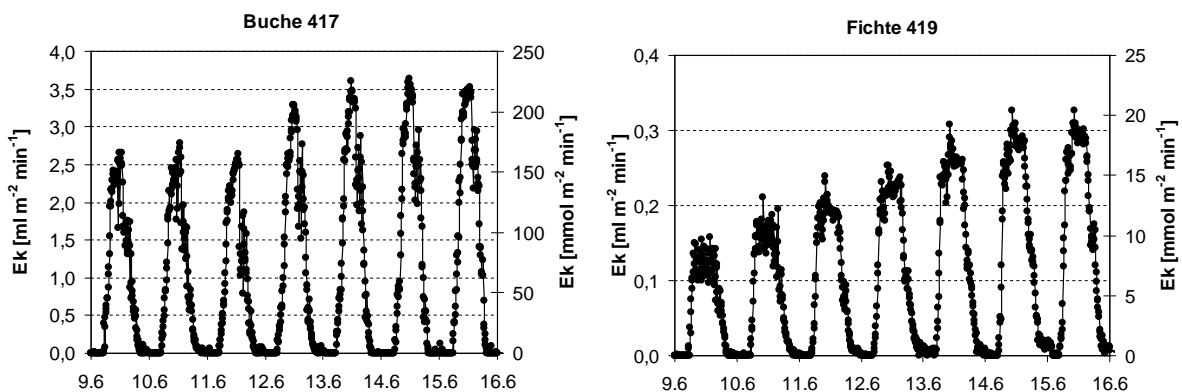


Abbildung 3.22: Tagesgang der Transpiration (Ek) [$\text{ml m}^{-2} \text{min}^{-1}$ bzw. $\text{mmol m}^{-2} \text{min}^{-1}$] gemessen mit Hilfe der Gaswechsellkuvetten an Buche 417 pro projizierter Blattoberfläche und Fichte 419 pro gesamter Nadeloberfläche. Die y-Achsen sind unterschiedlich skaliert.

3.5.1.2 Leitfähigkeit für Wasserdampf

Buche:

Vergleicht man die Blattleitfähigkeiten (g_k) in den Monaten der Vegetationsperiode, so erreichte der Buchenast sein Leitfähigkeits-Maximum im Oktober mit $117,8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ und sein Leitfähigkeitsminimum im Juli mit $73,7 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Fichte:

Die Blattleitfähigkeit des Fichtenastes (pro gesamter Nadeloberfläche) entsprach durchschnittlich 14 % der Leitfähigkeit des Buchenastes, bezogen auf die projizierte Nadeloberfläche nur 5 %. Die maximale gemittelte Blattleitfähigkeit des Fichtenastes lag bei $15,3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ pro gesamter Nadeloberfläche im Oktober und die geringste gemittelte Blattleitfähigkeit bei $8,9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ im Juni (siehe Tabelle 3.18).

Tabelle 3.18: Monatlich gemittelte Blattleitfähigkeit für Wasserdampf (g_k) [$\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$] pro projizierter Blattoberfläche bei Buche (417) und pro gesamter Nadeloberfläche bei Fichte (419).

g_k Leitfähigkeit für Wasserdampf		
Sonnenast	Buche 417	Fichte 419
	$\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Juni	83,61	8,88
Juli	73,67	10,60
August	103,48	15,06
September	79,14	12,55
Oktober	118,78	15,34

In Abbildung 3.23 wird der Verlauf der Leitfähigkeit bei Tag und bei Nacht des in der Gaswechsellkuvette eingeschlossenen Buchenzweiges gezeigt.

Im Vergleich zum Tag ist in der Nacht die Leitfähigkeit der Buche im Mittel um 85 % geringer, die der Fichten um 94 %. Die höchsten monatlich gemittelten Blattleitfähigkeiten tagsüber sowie nachts wurden bei Buche und Fichte im humiden August gemessen.

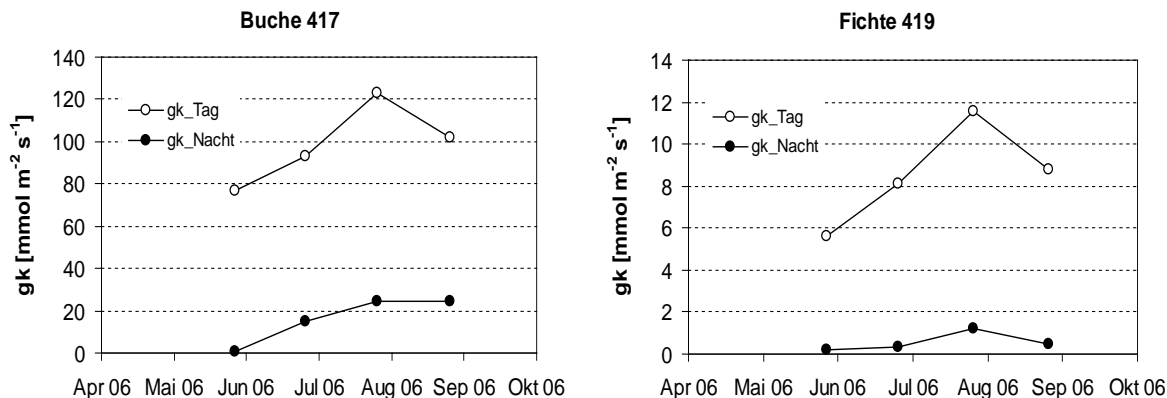


Abbildung 3.23: Verlauf der monatlich gemittelten Leitfähigkeit für Wasserdampf (g_k) bei Tag und bei Nacht [$\text{mmol m}^{-2} \text{monat}^{-1}$] pro projizierter Blattoberfläche bei Buche 417 (links) und pro gesamter Nadeloberfläche bei Fichte 419 (rechts) im Jahr 2006. Die y-Achsen sind unterschiedlich skaliert.

3.5.1.3 Ozonaufnahme

Buche:

Der in der Küvette eingeschlossene Sonnenast der Buche 417 erreichte eine monatliche kumulative Ozonaufnahme (COUk_m) von minimal $1,5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ im September bis zu maximal $3,7 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ im Oktober.

Fichte:

Der in der Küvette eingeschlossene Ast der Fichte 419 erreichte die geringste monatliche kumulative Ozonaufnahme mit $0,2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ pro gesamter Nadeloberfläche im Mai und sein Ozonaufnahme-Maximum mit $0,8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ im Juli (siehe Tabelle 3.19). Die kumulative Ozonaufnahme in der Vegetationsperiode (COUk_v) fiel bei Fichte mit $1,9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ veg.periode}^{-1}$ pro gesamter Nadeloberfläche um 94 % geringer aus als bei Buche mit $15,2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ veg.periode}^{-1}$ pro projizierter Blattoberfläche (siehe Abbildung 3.24). Wurde die Ozonaufnahme der Fichten auf die projizierte Nadeloberfläche – wie bei den Buchen – bezogen, erreichten die Fichten 5 % der Ozonaufnahme der Buchen.

Tabelle 3.19: Monatliche kumulative Ozonaufnahme (COUk_m) [$\text{mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$] des in der Gaswechsellkütte eingeschlossenen Buchenastes 417 und Fichtenastes 419 im Jahr 2006.

COUk_m Ozonaufnahme		
Sonnenast	Buche 417	Fichte 419
	$\text{mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$
Juni	3.53	0.20
Juli	2.97	0.79
August	3.56	0.39
September	1.50	0.32
Oktober	3.67	0.27

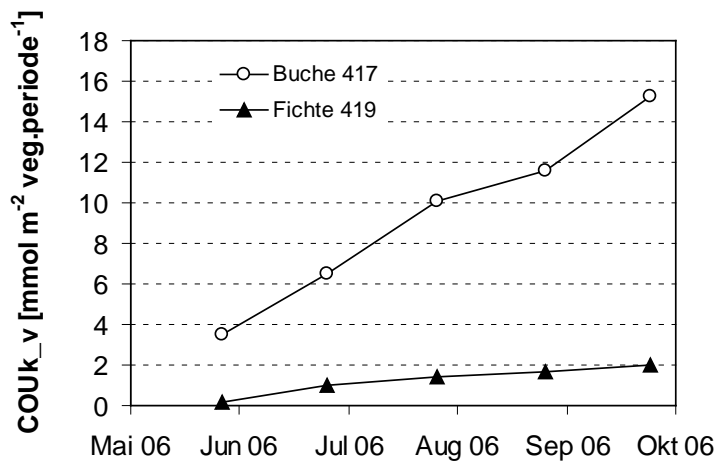


Abbildung 3.24: Kumulative Ozonaufnahme in der Vegetationsperiode ($COUK_v$) [$mmol\ m^{-2}\ veg.\ periode^{-1}$] des in der Gaswechsellkuvette eingeschlossenen Buchenastes 417 und Fichtenastes 419.

3.5.2 Ciras-2 Porometer

3.5.2.1 Transpiration

Buche:

Die Transpiration der Buchenblätter (EI) in der Sonnenkrone unter $1xO_3$ war im Mittel 6-mal so hoch wie die der Schattenblätter und unter $2xO_3$ 4-mal so hoch.

So transpirierten die Schattenblätter unter $1xO_3$ gemittelt $0,4\ mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ bis $0,7\ mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ bzw. $0,6\ mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ bis $0,9\ mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ unter $2xO_3$ ($n = 4 - 5$). An den Sonnenblättern wurden unter $1xO_3$ Transpirationen in der Größenordnung von $2,2\ mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ bis $3,5\ mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ gemessen und unter $2xO_3$ von $2,1\ mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ bis $3,0\ mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ (siehe Tabelle 3.20). Ozon hatte mit $p = 0,093$ (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse) die Tendenz eines Einflusses auf die Transpiration der Sonnenblätter der Buchen und mit $p = 0,035$ (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse) einen signifikanten Einfluss auf die Transpiration der Schattenblätter. Die Position der Blätter in der Krone hatte unter $1xO_3$ und $2xO_3$ einen signifikanten Einfluss auf die Transpiration (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,000$).

Ergebnisse

Tabelle 3.20: Monatliche Mittelwerte der Photosyntheseraten (PN) [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$], der Leitfähigkeit für Wasserdampf (gs) [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] und der Transpirationsraten (EI) [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] der Buchenblätter und Fichtennadeln, gemessen mit dem Porometer CIRAS-2 unter Umgebungsbedingungen (Buchen SE: $n = 4 - 5$, Fichten SE: $n = 3 - 4$).

Buche			PN	SE _{PN}	gl	SE _{gl}	EI	SE _{EI}
			$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$		$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$		$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	
Jun 06	1xO ₃	sun	7,79	1,0	120,40	18,2	3,50	0,5
Jul 06	1xO ₃	sun	9,06	1,8	248,30	60,9	3,19	0,6
Aug 06	1xO ₃	sun	6,11	1,9	189,44	55,1	2,47	0,5
Sep 06	1xO ₃	sun	5,42	1,5	181,08	33,4	2,16	0,4
Jun 06	1xO ₃	sha	-0,46	0,1	14,21	4,3	0,37	0,1
Jul 06	1xO ₃	sha	0,06	0,3	33,63	13,7	0,67	0,3
Aug 06	1xO ₃	sha	0,61	0,7	29,68	9,3	0,48	0,2
Sep 06	1xO ₃	sha	-0,08	0,3	33,61	11,7	0,55	0,2
Jun 06	2xO ₃	sun	5,31	2,0	87,35	17,7	2,29	0,5
Jul 06	2xO ₃	sun	5,47	2,3	180,19	51,2	2,99	0,6
Aug 06	2xO ₃	sun	7,49	2,2	156,18	43,7	2,63	0,6
Sep 06	2xO ₃	sun	5,90	1,11	160,27	24,4	2,06	0,3
Jun 06	2xO ₃	sha	-0,71	1,0	23,92	11,6	0,56	0,3
Jul 06	2xO ₃	sha	0,28	0,7	49,35	8,1	0,96	0,2
Aug 06	2xO ₃	sha	0,31	0,2	57,28	22,4	0,63	0,2
Sep 06	2xO ₃	sha	0,00	0,1	45,10	17,4	0,71	0,2

Fichte			PN	SE _{PN}	gl	SE _{gl}	EI	SE _{EI}
			$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$		$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$		$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	
Jun 06	1xO ₃	sun	1,22	0,1	15,95	6,0	0,32	0,1
Jul 06	1xO ₃	sun	0,65	0,0	19,44	0,9	0,27	0,0
Aug 06	1xO ₃	sun	-		-		-	-
Sep 06	1xO ₃	sun	1,07	0,7	17,52	6,3	0,28	0,1
Jun 06	1xO ₃	sha	0,86	0,0	15,52	3,5	0,39	0,1
Jul 06	1xO ₃	sha	0,70	0,3	14,79	1,3	0,23	0,0
Aug 06	1xO ₃	sha	0,57	0,2	15,23	5,9	0,24	0,0
Sep 06	1xO ₃	sha	0,40	0,3	11,74	0,9	0,20	0,0
Jun 06	2xO ₃	sun	1,92	0,7	21,34	6,9	0,40	0,1
Jul 06	2xO ₃	sun	0,95	0,4	17,20	7,7	0,25	0,1
Aug 06	2xO ₃	sun	1,12	0,5	16,43	3,3	0,29	0,1
Sep 06	2xO ₃	sun	1,17	0,3	16,86	3,0	0,26	0,1
Jun 06	2xO ₃	sha	-0,06	0,1	6,32	0,8	0,10	0,0
Jul 06	2xO ₃	sha	-0,06	0,1	4,33	0,9	0,09	0,0
Aug 06	2xO ₃	sha	0,03	0,0	4,13	0,4	0,08	0,0
Sep 06	2xO ₃	sha	0,06	0,1	4,52	1,2	0,08	0,0

Aufgrund regnerischen und stürmischen Wetters war eine Messung bei Fichte im August nicht möglich.

Fichte:

Die Transpirationsraten der Schattennadeln der Fichten unter 1xO₃ stimmten mit denen der Sonnennadeln unter 2xO₃ überein (siehe Tabelle 3.20). Der Grund hierfür war, dass die Schattenkronen der Fichten unter 1xO₃ im Bestand beinahe frei stehen, wodurch sie hohem PPFD ausgesetzt sind. Mit $p = 0,715$ (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse) zeigte sich

kein statistischer Einfluss des Ozons auf die Transpiration der Sonnennadeln, jedoch mit $p = 0,000$ (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse) ein signifikanter Ozoneinfluss auf die Transpiration der Schattennadeln. Sonnennadeln und Schattennadeln in beiden Ozonregimen zeigten wie die Buchenblätter eine jahreszeitliche Dynamik in der Transpiration: mit Beginn der Messreihen im Juni wurden die höchsten Transpirationsraten erreicht. Zum Ende der Vegetationsperiode nahmen die Transpirationsraten ab.

Vergleich von Buche und Fichte:

Bei der Gegenüberstellung von Buche und Fichte wird die bis 4-fach höhere Transpirationsrate der Buchenblätter im Vergleich zu den Fichtennadeln unter $1xO_3$ und die 5-fach höhere Transpirationsrate unter $2xO_3$ deutlich. Der Einfluss der Baumart auf die Transpiration war mit $p = 0,000$ (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse) signifikant. Bezieht man die Transpirationsdaten der Fichten dagegen nicht auf die gesamte, sondern auf die projizierte Nadeloberfläche, so zeigten die Buchen eine um das 12-fache höhere Transpiration wie die Fichten.

3.5.2.2 Photosynthese

Buche:

Wie der Transpirationsverlauf zeigte auch der Photosynthese-Verlauf der Buchenblätter einen Sonnen- und Schattenblatteffekt. So fielen die monatlich gemittelten Photosyntheseraten in den Blättern der Schattenkrone deutlich niedriger aus als in der Sonnenkrone (siehe Tabelle 3.20). Die Photosyntheseraten (PN) erreichten unter $1xO_3$ Werte von $-0,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bis $0,6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und unter $2xO_3$ von $-0,7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bis $0,4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Mit $p = 0,086$ (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse) zeigte sich die Tendenz eines Ozoneinflusses auf die Photosynthese der Sonnenblätter, mit $p = 0,687$ war jedoch kein signifikanter Ozoneinfluss auf die Photosynthese der Schattenblätter zu beobachten. Die Position der Blätter in der Krone hatte dagegen auf die Photosynthese in beiden Ozonregimen einen signifikanten Einfluss (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse; $p = 0,000$).

Zu Beginn der Messreihen fielen die Photosyntheseraten der Buchenblätter in der Sonnenkrone unter $2xO_3$ geringer aus als unter $1xO_3$. Erst ab August erreichten die Sonnenblätter unter $2xO_3$ eine höhere Photosyntheseleistung als unter $1xO_3$ (siehe Tabelle 3.20).

Fichte:

Unter $2xO_3$ fielen die Photosyntheseraten der Sonnennadeln im Juni mit $1,9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ am höchsten aus, die der Schattennadeln im September mit $0,06 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (siehe Tabelle 3.20).

Zu Beginn der Messkampagne wurde in den Sonnennadeln unter $1xO_3$ eine Photosyntheserate von $1,22 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und in den Schattennadeln von $0,86 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ gemessen (siehe Tabelle 3.20). Am Ende der Messkampagne erreichten die Sonnennadeln Photosyntheseraten von $1,07 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und die Schattennadeln von $0,40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (siehe Tabelle 3.20). Ein tendenzieller Einfluss von Ozon konnte auf die Photosynthese der Sonnennadeln mit $p = 0,075$ (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse) festgestellt werden, der Ozoneinfluss auf die Photosynthese der Schattennadeln war mit $p = 0,000$ (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse) signifikant. Die Position der Nadeln in der Krone hatten einen signifikanten Einfluss auf die Photosynthese (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,000$).

3.5.2.3 Lichtabhängigkeitskurven

Neben den Messungen des Blatt/Nadelgaswechsels unter Umgebungsbedingungen wurden Lichtabhängigkeitskurven der Photosyntheseraten gemessen.

Buche:

Unter $1xO_3$ erreichten die Photosyntheseraten der Schattenblätter der Buchen schon unter einem PPFD von $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ Lichtsättigung (siehe Abbildung 3.25). Die Photosynthesewerte der Lichtabhängigkeitskurve fielen im Juni höher aus als im September (siehe Abbildung 3.25).

Die Lichtabhängigkeitskurven zeigten, dass die Photosyntheseraten der Sonnenblätter unter $1xO_3$ im Mittel 10 % höhere Werte erreichten als unter $2xO_3$ und die der Schattenblätter um 5 % höhere Werte (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, Sonnenblätter $p = 0,807$; Schattenblätter $p = 0,597$) (siehe Abbildung 3.25).

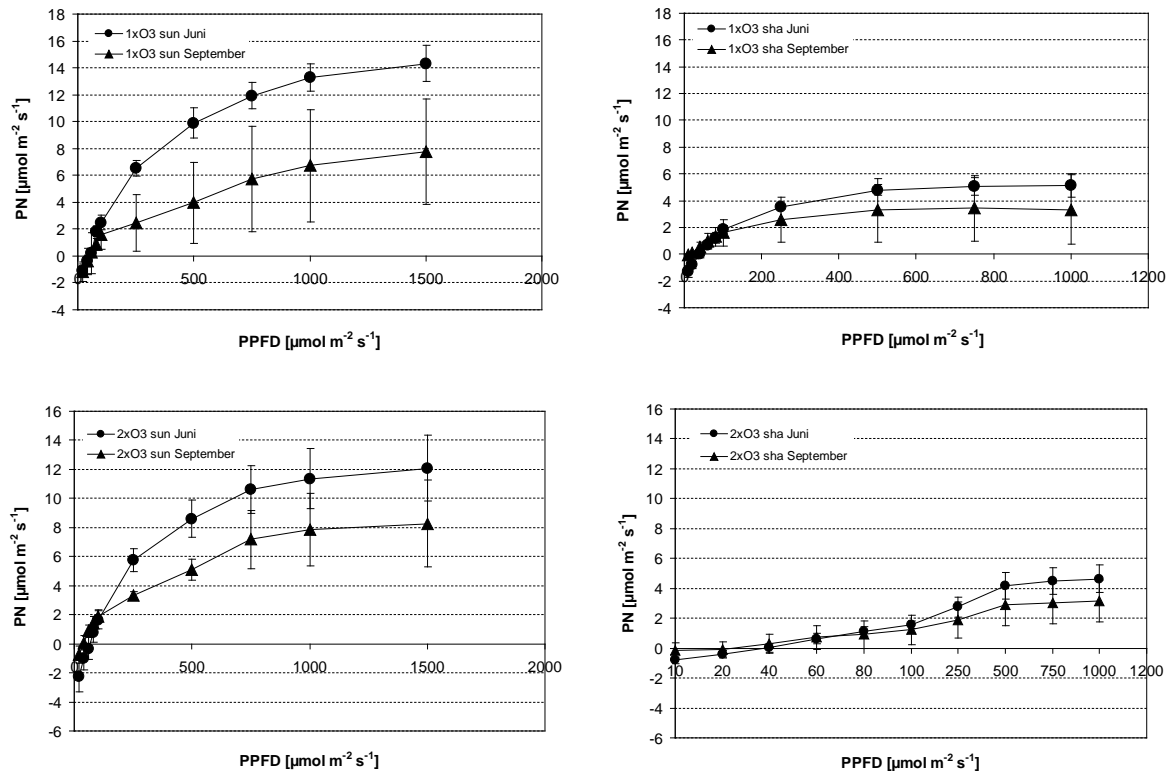


Abbildung 3.25: Lichtabhängigkeitskurven der Photosyntheserate PN [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] von Buchen gemessen an Blättern der Sonnen- (links)- und Schattenkrone (rechts) unter $1xO_3$ (oben) und $2xO_3$ (unten) im Juni und September 2006 (SE: $n = 3$).

Ein Einfluss der Lichtexposition zeigte sich in den untersuchten photosynthetischen Parametern A_{max} , ph_{eff} , g_{max} , $E_{\text{I}_{\text{max}}}$ und WUE in Form geringerer Werte in der Schattenkrone als in der Sonnenkrone (siehe Tabelle 3.21).

Die maximale Photosyntheserate A_{max} , die maximale Leitfähigkeit g_{max} und die maximale Transpiration $E_{\text{I}_{\text{max}}}$ (gemessen bei einem PPFD von $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) fielen im Juni in der Sonnenkrone unter $1xO_3$ im Mittel 1,2-mal (A_{max}), 1,1-mal (g_{max}) und 1,3-mal ($E_{\text{I}_{\text{max}}}$) höher aus als unter $2xO_3$. Dagegen waren die photosynthetische Effizienz ph_{eff} und der photosynthetische Wassernutzungskoeffizient WUE unter $2xO_3$ höher als unter $1xO_3$ (siehe Tabelle 3.21). Im September fielen A_{max} , g_{max} , $E_{\text{I}_{\text{max}}}$ in der Sonnenkrone unter $2xO_3$ höher aus als unter $1xO_3$, in der Schattenkrone unter $2xO_3$ dagegen geringer als unter $1xO_3$. Während ph_{eff} der Sonnen- und Schattenblätter der Buchen in beiden Behandlungsregimen im September ähnliche Werte erreichte, war WUE der Sonnen- und Schattenblätter unter $2xO_3$ höher als unter $1xO_3$.

Tabelle 3.21: Maximale Photosyntheserate A_{max} [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$], photosynthetische Effizienz ph_{eff} [Steigung der Regressionsgeraden zwischen A und $PPFD \leq 80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$], maximale Leitfähigkeit g_{max} [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$], maximale Transpiration EI_{max} [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] und photosynthetische Wassernutzungseffizienz WUE [mmol mol^{-1}] der Buchenblätter bei einem $PPFD$ von $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; (SE: $n = 2 - 4$).

Jun 06		A_{max} $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	ph_{eff}	g_{max} $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	EI_{max} $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	WUE mmol mol^{-1}
1xO ₃	sun	13,27	0,04	209,13	2,71	4,92
SE		0,6	0,0	32,0	0,1	0,4
1xO ₃	sha	5,13	0,04	102,20	1,42	3,61
SE		0,5	0,0	12,2	0,1	0,1
2xO ₃	sun	11,36	0,05	185,33	2,01	5,67
SE		1,2	0,0	28,4	0,2	0,2
2xO ₃	sha	4,61	0,03	67,00	0,97	4,85
SE		0,5	0,0	10,8	0,1	0,4
Sep 06		A_{max} $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	ph_{eff}	g_{max} $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	EI_{max} $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	WUE mmol mol^{-1}
1xO ₃	sun	7,07	0,03	83,47	1,62	4,03
SE		2,5	0,0	24,8	0,4	0,8
1xO ₃	sha	3,33	0,02	56,47	1,41	2,13
SE		1,5	0,0	16,9	0,6	0,7
2xO ₃	sun	7,87	0,03	94,13	1,94	4,11
SE		1,5	0,0	22,2	0,3	0,4
2xO ₃	sha	3,16	0,02	46,40	0,72	3,36
SE		2,7	0,0	23,0	0,3	2,3

Fichte:

In der Sonnenkrone unter 1xO₃ erreichten die Photosyntheseraten der Fichtennadeln bereits bei einem $PPFD$ von $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ Lichtsättigung (siehe Abbildung 3.26). Wie bei Buche fielen die Photosyntheseraten der Lichtabhängigkeitskurve der Sonnen- und Schattennadeln in beiden Ozonregimen im September geringer aus als im Juni.

Die Sonnenkronen unter 1xO₃ zeigten im Mittel um 11 % höhere Photosyntheseraten als unter 2xO₃, was jedoch nicht signifikant war (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,353$). In den Schattenkronen unter 1xO₃ fiel die Photosyntheserate im Mittel signifikant um 209 % höher aus als unter 2xO₃ (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,003$).

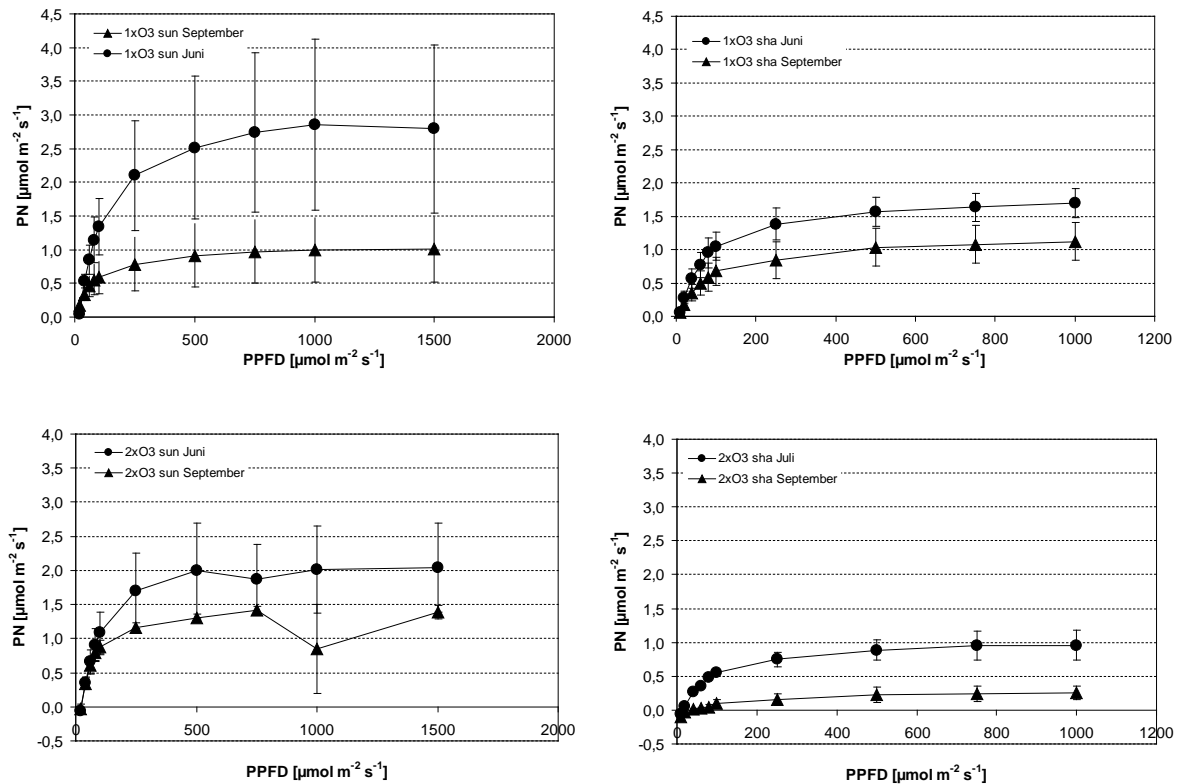


Abbildung 3.26: Lichtabhängigkeitskurven der Photosyntheseraten $PN [\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$ von Fichten gemessen an Nadeln der Sonnen- (links) und Schattenkrone (rechts) unter $1\times\text{O}_3$ (oben) und $2\times\text{O}_3$ (unten) im Juni und September 2006 (SE: $n = 2 - 3$)

Die photosynthetischen Parameter in Tabelle 3.22 spiegeln auch bei den Fichten den Einfluss der Lichtexposition wider. So fallen A_{max} , ph_{eff} , g_{max} und EI_{max} in beiden Behandlungsregimen in der Schattenkrone geringer aus als in der Sonnenkrone. WUE jedoch erreichte in der Schattenkrone höhere Werte. Unter $2\times\text{O}_3$ reduzierten sich A_{max} , ph_{eff} , g_{max} und EI_{max} im Vergleich zu $1\times\text{O}_3$. WUE fiel in der Sonnenkrone unter $2\times\text{O}_3$ tendenziell höher aus als unter $1\times\text{O}_3$, während in der Schattenkrone der umgekehrte Fall auftrat.

Tabelle 3.22: Maximale Photosyntheserate A_{max} [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$], photosynthetische Effizienz ph_{eff} [Steigung der Regressionsgeraden zwischen A und $PPFD \pm 80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$], maximale Leitfähigkeit g_{max} [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$], maximale Transpiration EI_{max} [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] und photosynthetische Wassernutzungseffizienz WUE [mmol mol^{-1}] der Fichtennadeln bei einem $PPFD$ von $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; (SE: $n = 3 - 4$).

Jun 06		A_{max}	ph_{eff}	g_{max}	EI_{max}	WUE
		$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$		$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	mmol mol^{-1}
1xO ₃	sun	2,79	0,02	68,78	0,63	4,24
	SE	1,2	0,0	39,8	0,3	0,3
1xO ₃	sha	1,70	0,01	23,17	0,32	5,44
	SE	0,2	0,0	3,9	0,1	0,3
2xO ₃	sun	2,05	0,01	40,72	0,47	4,27
	SE	0,6	0,0	12,4	0,1	0,2
2xO ₃	sha	0,96	0,01	13,15	0,22	4,36
	SE	0,2	0,0	3,0	0,1	0,0
Sep 06		A_{max}	ph_{eff}	g_{max}	EI_{max}	WUE
		$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$		$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	mmol mol^{-1}
1xO ₃	sun	1,01	0,01	27,34	1,02	2,89
	SE	0,5	0,0	12,8	0,8	1,3
1xO ₃	sha	1,12	0,01	13,58	0,26	4,55
	SE	0,2	0,0	3,9	0,1	0,4
2xO ₃	sun	1,18	0,01	20,32	0,28	4,25
	SE	0,2	0,0	6,5	0,1	0,0
2xO ₃	sha	0,25	0,002	3,92	0,08	2,86
	SE	0,1	0,0	1,2	0,0	0,6

3.5.2.4 Stomatäre Leitfähigkeit für Wasserdampf

Buche:

Die stomatäre Leitfähigkeit für Wasserdampf der Buchenblätter unter 1xO₃ erreichte in den Sonnen- und Schattenkronen ihr Maximum im Juli. Dabei fiel die Leitfähigkeit der Blätter in den Sonnenkronen mit gemittelt $248,3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ höher aus als in den Schattenkronen (gemittelt $33,6 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Unter 2xO₃ trat das Maximum der stomatären Leitfähigkeit der Sonnenblätter ebenfalls im Juli mit $180,2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ auf, in den Schattenkronen im August mit $57,28 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Die geringste stomatäre Leitfähigkeit erreichten die Blätter der Sonnen- und Schattenkronen unter 1xO₃ und 2xO₃ im Juni (siehe Tabelle 3.20). Dabei zeigte sich auch hier wieder eine höhere stomatäre Leitfähigkeit der Sonnenblätter als der Schattenblätter. Die Position der Blätter in der Baumkrone hatte in beiden Ozonregimen einen signifikanten Einfluss auf die Leitfähigkeit (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,000$). Der Ozoneinfluss auf die Leitfähigkeit war mit $p = 0,007$ (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse) bei den Sonnenblättern und mit $p = 0,019$ (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse) bei den Schattenblättern signifikant.

Fichte:

Die stomatäre Leitfähigkeit der Fichtennadeln in den Sonnenkronen erreichte unter $1xO_3$ ihr Maximum im Juli mit $19,4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, in den Schattenkronen im Juni mit $15,5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Unter $2xO_3$ traten die maximalen stomatären Leitfähigkeiten der Fichtennadeln in der Sonnen- als auch Schattenkronen im Juni mit $21,3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bzw. $6,3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ auf. Während die Sonnennadeln die geringste stomatäre Leitfähigkeit unter $1xO_3$ im Juni mit $15,95 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ erreichten, war die geringste stomatäre Leitfähigkeit der Schattennadeln im September mit $11,7 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ zu finden. Unter $2xO_3$ erreichten die Fichtennadeln in den Sonnen- und Schattenkronen ihr Leitfähigkeits-Minimum im August (siehe Tabelle 3.20). Die stomatäre Leitfähigkeit der Fichtennadeln in den Schattenkronen unter $1xO_3$ erreichte ähnliche Werte wie in den Sonnenkronen unter $2xO_3$. Da die Fichten fast freistehend waren, erhielten die Schattenäste fast genauso viel Licht wie die Sonnenäste. Die Position der Fichtennadeln in der Baumkrone hatte einen signifikanten Einfluss auf die Leitfähigkeit (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,000$). Ozon hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Leitfähigkeit der Sonnennadeln (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,837$), aber einen signifikanten Einfluss auf die Leitfähigkeit der Schattennadeln (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,000$).

Stomatäre Leitfähigkeit für Wasserdampf bei Nacht

Im Vergleich zu den Leitfähigkeiten am Tag waren die nächtlichen Werte sowohl bei Buche als auch bei Fichte deutlich reduziert (siehe Tabelle 3.23).

Die Leitfähigkeiten der Buchen bei Nacht reichten von $11,73 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bis $38,20 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, bei Fichte von $1,9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bis $10,1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (in den selben Nächten gemessen). Im Juli 2006 fielen die Leitfähigkeiten beider Baumarten bei Nacht unter $2xO_3$ geringer aus als unter $1xO_3$ (siehe Tabelle 3.23). Dies deckt sich mit den Leitfähigkeiten am Tag, die in den Sonnenkronen unter $2xO_3$ im Vergleich zu $1xO_3$ reduziert waren.

Im Gegensatz dazu führte die Xylemflussmessung im Stamm bei Nacht unter $1xO_3$ und $2xO_3$ zu vergleichbaren Kronenleitfähigkeiten.

Tabelle 3.23: Photosynthese bei Nacht PN_{Nacht} [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$], Leitfähigkeit für Wasserdampf bei Nacht gl_{Nacht} [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] und Transpirationsrate bei Nacht EI_{Nacht} [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] von Buchenblättern und Fichtennadeln, gemessen mit dem Porometer CIRAS-2 unter Umgebungsbedingungen (SE: $n = 3$).

Buche			PN_{Nacht}	SE_{PN}	gl_{Nacht}	SE_{gl}	EI_{Nacht}	SE_{EVAP}
			$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$		$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$		$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	
Jul 06	1xO ₃	sun	-0,77	0,2	27,87	22,4	0,32	0,2
Aug 06	1xO ₃	sun	-	-	-	-	-	-
Jul 06	2xO ₃	sun	-0,70	0,2	11,73	5,7	0,15	0,1
Aug 06	2xO ₃	sun	-0,47	0,1	38,20	11,3	0,22	0,1

Fichte			PN_{Nacht}	SE_{PN}	gl_{Nacht}	SE_{gl}	EI_{Nacht}	SE_{EVAP}
			$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$		$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$		$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	
Jul 06	1xO ₃	sun	-0,17	0,0	2,79	1,2	0,04	0,0
Aug 06	1xO ₃	sun	-0,08	0,0	10,08	3,0	0,04	0,0
Jul 06	2xO ₃	sun	-0,20	0,1	1,88	0,4	0,03	0,0
Aug 06	2xO ₃	sun	-0,13	0,1	7,71	1,2	0,04	0,0

Aufgrund regnerischen und stürmischen Wetters war eine Messung im August teilweise nicht möglich.

3.5.2.5 Ozonaufnahme

Buche:

Die Ozonaufnahmesummen auf Blattebene (FO_3l) erreichten in den Sonnenblättern unter 1xO₃ Werte von 18,22 $\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bis 38 $\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und unter 2xO₃ Werte von 25,71 $\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bis 47,30 $\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (siehe Tabelle 3.24). Ozon hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Ozonaufnahme der Sonnenblätter (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,981$). In den Schattenblättern dagegen hatte Ozon einen signifikanten Einfluss auf die Ozonaufnahme (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,000$). Hier konnten Ozonaufnahmesummen von 2,77 $\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bis 4,81 $\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ unter 1xO₃ berechnet werden und unter 2xO₃ von 6,15 $\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ bis 14,39 $\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (siehe Tabelle 3.24). Die Position der Blätter in der Baumkrone hatte in beiden Ozonregimen einen signifikanten Einfluss auf die Ozonaufnahme (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,000$).

Tabelle 3.24: Ozonaufnahmesummen (FO_3I) [$nmol\ m^{-2}\ s^{-1}$] der Buchen (SE: $n = 4 - 5$) und Fichten (SE: $n = 3 - 4$), berechnet anhand der mit dem Porometer CIRAS-2 gemessenen Leitfähigkeit.

			Buche		Fichte	
			FO_3I	SE	FO_3I	SE
			$nmol\ m^{-2}\ s^{-1}$		$nmol\ m^{-2}\ s^{-1}$	
Jun 06	1xO ₃	sun	18,22	0,7	2,41	0,2
Jul 06	1xO ₃	sun	38,82	2,3	3,42	0,3
Aug 06	1xO ₃	sun	25,39	1,2	-	-
Sep 06	1xO ₃	sun	20,42	0,8	1,28	0,1
Jun 06	1xO ₃	sha	2,77	0,2	2,30	0,1
Jul 06	1xO ₃	sha	4,66	0,5	2,58	0,1
Aug 06	1xO ₃	sha	4,81	0,4	1,17	0,1
Sep 06	1xO ₃	sha	3,57	0,3	1,12	0,0
Jun 06	2xO ₃	sun	28,25	1,7	3,65	0,4
Jul 06	2xO ₃	sun	47,30	2,7	4,13	0,5
Aug 06	2xO ₃	sun	25,71	1,5	2,32	0,1
Sep 06	2xO ₃	sun	25,71	1,0	3,06	0,1
Jun 06	2xO ₃	sha	10,40	1,1	1,11	0,1
Jul 06	2xO ₃	sha	14,39	0,5	0,87	0,0
Aug 06	2xO ₃	sha	12,50	1,3	0,55	0,0
Sep 06	2xO ₃	sha	6,15	0,4	0,61	0,1

Aufgrund regnerischen und stürmischen Wetters war eine Messung im August teilweise nicht möglich.

Fichte:

Für die Sonnennadeln der Fichten unter 1xO₃ konnten Ozonaufnahmesummen von 1,28 $nmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ bis 2,41 $nmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ berechnet werden und unter 2xO₃ von 2,32 $nmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ bis 4,13 $nmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ (siehe Tabelle 3.24). Die Schattennadeln zeigten Ozonaufnahmesummen unter 1xO₃ von 1,12 $nmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ bis 2,58 $nmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ und unter 2xO₃ von 0,55 $nmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ bis 1,11 $nmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ (siehe Tabelle 3.24). Die Ozonbehandlung hatte auf die Ozonaufnahme der Sonnennadeln keinen signifikanten Einfluss (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,219$). Dagegen hatte Ozon auf die Ozonaufnahme der Schattennadeln mit $p = 0,000$ (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse) einen signifikanten Einfluss. Die Andeutung eines Einflusses der Position der Nadeln in der Baumkrone auf die Ozonaufnahme konnte mit $p = 0,127$ unter 1xO₃ nachgewiesen werden (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse), unter 2xO₃ hatte die Position der Nadeln in der Baumkrone einen signifikanten Einfluss auf die Ozonaufnahme (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,000$).

3.6 Ozonaufnahme-Modell nach Emberson und Nunn

3.6.1 Leitfähigkeit für Wasserdampf

Buche:

Die monatlich gemittelte stomatäre Leitfähigkeit für Wasserdampf (gm) der Buchen (bezogen auf die projizierte Blattoberfläche), berechnet mit dem Ozonaufnahme-Modell, fiel unter $1xO_3$ um 12 % höher aus als unter $2xO_3$. Die Leitfähigkeit der Buchen erreichte ihr Maximum unter $1xO_3$ im Juni $76,9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, unter $2xO_3$ im Juli mit $70,9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (siehe Tabelle 3.25), sowie ihr Minimum unter $1xO_3$ und $2xO_3$ im Oktober.

Fichte:

Anders als die Buchen erreichten die Fichten unter $2xO_3$ eine um 36 % höhere Leitfähigkeit (bezogen auf die gesamte Nadeloberfläche) als unter $1xO_3$. Das Leitfähigkeits-Maximum der Fichten trat unter $1xO_3$ und $2xO_3$ im August mit $13,4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bzw. $18,3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ auf, das Minimum im Oktober (siehe Tabelle 3.25) mit $8,0 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bzw. $11,0 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Tabelle 3.25: Monatlich gemittelte stomatäre Leitfähigkeit für Wasserdampf (gm) [$\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$] bei Buche (bezogen auf die projizierte Blattoberfläche) und Fichte (bezogen auf die gesamte Nadeloberfläche) unter $1xO_3$ und $2xO_3$ während der Vegetationsperiode 2006, berechnet über das Ozonaufnahme-Modell nach Emberson et al. (2000a), angepasst von Nunn (2005).

Leitfähigkeit für Wasserdampf (gm)				
	Buche		Fichte	
	$1xO_3$	$2xO_3$	$1xO_3$	$2xO_3$
	$\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Mai 06	34,49	32,49	12,86	17,54
Jun 06	75,55	70,87	13,35	18,21
Jul 06	76,98	69,74	12,43	16,96
Aug 06	69,61	61,83	13,41	18,30
Sep 06	60,07	52,63	11,32	15,45

Vergleich von Buche und Fichte:

Die mit Hilfe des Ozonaufnahme-Modells ermittelte Leitfähigkeit der Buchen (bezogen auf die projizierte Blattoberfläche) erreichte unter $1xO_3$ 5-mal höhere Leitfähigkeiten als die Fichten (bezogen auf die gesamte Nadeloberfläche) und unter $2xO_3$ 3-mal so hohe Leitfähigkeiten. Wurde bei den Fichten als Bezugsgröße die projizierte Nadeloberfläche herangezogen, so fiel unter $1xO_3$ die Leitfähigkeit der Buchen um das 12-fache höher aus als die Leitfähigkeit der Fichten und unter $2xO_3$ war die Leitfähigkeit der Buchen um das 8-fache höher als die der Fichten.

3.6.2 Ozonaufnahme

Buche:

Das Ozonaufnahme-Modell ermittelte für Buche unter $1xO_3$ eine monatliche kumulative Ozonaufnahme (COUm_m) von minimal $0,4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ bis maximal $2,8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ und unter $2xO_3$ von $0,5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ bis $4,7 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ (siehe Tabelle 3.26). Damit fiel COUm_m unter $2xO_3$ im Mittel um 48 % höher aus als unter $1xO_3$. Im Juli erreichten die Buchen im Vergleich zu den Vor- und Nachmonaten in beiden Ozonregimen ihre maximale monatliche kumulative Ozonaufnahme.

Fichte:

Die Fichten erreichten eine Ozonaufnahme (COUm_m) von $0,3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ bis $1,2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ unter $1xO_3$ und $0,5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ bis $2,2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$ unter $2xO_3$. Dies entspricht einer im Mittel 92 % höheren Ozonaufnahme unter $2xO_3$.

Im Vergleich zu den Vor- und Nachmonaten erreichten die Fichten die höchste monatliche kumulative Ozonaufnahme unter $1xO_3$ im Juni und unter $2xO_3$ im Juli.

Vergleich von Buche und Fichte:

Im Mittel fiel die monatliche kumulative Ozonaufnahme der Buchen (projizierte Blattoberfläche) im Vergleich zu den Fichten (gesamte Nadeloberfläche) in der Vegetationsperiode unter $1xO_3$ 2-mal so hoch aus und unter $2xO_3$ 1,7-mal so hoch. Wurde die Ozonaufnahme der Fichten auf die projizierte Nadeloberfläche bezogen, so nahmen die Buchen in beiden Ozonregimen 4-mal so viel Ozon auf wie die Fichten.

Tabelle 3.26: Monatliche kumulative Ozonaufnahme (COUm_m) [$\text{mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$] bei Buche (bezogen auf projizierte Blattoberfläche) und Fichte (bezogen auf gesamte Nadeloberfläche) unter $1xO_3$ und $2xO_3$ im Jahr 2006, berechnet über das Ozonaufnahme-Modell.

COUm_m Ozonaufnahme				
	Buche		Fichte	
	$1xO_3$	$2xO_3$	$1xO_3$	$2xO_3$
	$\text{mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$	$\text{mmol m}^{-2} \text{ monat}^{-1}$
Mai 06	1,51	1,98	1,04	1,85
Jun 06	2,70	4,44	1,16	2,14
Jul 06	2,98	4,70	1,12	2,18
Aug 06	1,88	2,82	0,76	1,57
Sep 06	1,42	2,12	0,55	1,13
Okt 06	0,38	0,51	0,28	0,52

Die kumulative Ozonaufnahme in der Vegetationsperiode (COUm_v) der **Buchen** erreichte unter $1xO_3$ $10,9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ veg.periode}^{-1}$, unter $2xO_3$ $16,6 \text{ mmol m}^{-2} \text{ veg.periode}^{-1}$ (siehe Tabelle 3.27). Die **Fichten** hatten ein COUm_v von $4,9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ veg.periode}^{-1}$ unter $1xO_3$ und $9,4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ veg.periode}^{-1}$ unter $2xO_3$.

Unter $1xO_3$ fiel somit $COUm_v$ der Buchen um 2,2-mal so hoch aus wie $COUm_v$ der Fichten, unter $2xO_3$ 1,8-mal so hoch. Bezog man die Ozonaufnahme der Fichten auf die projizierte Nadeloberfläche statt auf die gesamte Nadeloberfläche, so fiel $COUm_v$ der Buchen unter $1xO_3$ um das 5,8-fache höher aus als $COUm_v$ der Fichten und unter $2xO_3$ um das 4,6-fache höher.

Tabelle 3.27: Kumulative Ozonaufnahme in der Vegetationsperiode ($COUm_v$) [$mmol\ m^{-2}\ veg.periode^{-1}$] bei Buche (bezogen auf die projizierte Blattoberfläche) und Fichte (bezogen auf die gesamte Nadeloberfläche) unter $1xO_3$ und $2xO_3$ im Jahr 2006, berechnet über das Ozonaufnahme-Modell.

COUm_v Ozonaufnahme				
	Buche		Fichte	
	$1xO_3$	$2xO_3$	$1xO_3$	$2xO_3$
	$mmol\ m^{-2}\ veg.periode^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ veg.periode^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ veg.periode^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ veg.periode^{-1}$
Mai 06	1,51	1,98	1,04	1,85
Jun 06	4,22	6,42	2,20	3,99
Jul 06	7,19	11,13	3,33	6,17
Aug 06	9,08	13,95	4,08	7,74
Sep 06	10,49	16,07	4,64	8,86
Okt 06	10,87	16,57	4,91	9,38

3.7 Vergleich von Tagen mit unterschiedlicher Witterung

In Folgendem soll ein Einfluss unterschiedlicher Witterung (sonniges Wetter: 08.07.2006 bis 13.07.2006 und humides Wetter: 28.08.2006) auf Transpiration, Leitfähigkeit für Wasserdampf und Ozonaufnahme in den verschiedenen Methoden (Xylemflussmessung im Stamm, Ozonaufnahme-Modell, Gaswechsellmessung in der Astküvette, Xylemflussmessung auf Astebene) gezeigt werden (siehe Abbildung 3.27 bis Abbildung 3.30).

3.7.1 Buche

Transpiration

Bei allen vier Methoden reduzierte sich die Transpiration von Buche bei Regen (siehe Abbildung 3.27, Abbildung 3.28 und Tabelle 3.28). Dabei hatte das Wetter mit $p = 0,000$ (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse) einen signifikanten Einfluss auf die Kronentranspiration (THB). So fiel die Kronentranspiration $_{THB}$ der Buchen unter $1xO_3$ an sonnigen Tagen signifikant um das 0,9- bis 32-fache höher aus (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,000$) als an niederschlagsreichen Tagen, unter $2xO_3$ signifikant um das 0,9- bis 33-fache höher (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,000$). Der in der Astküvette eingeschlossene Buchenast 417 erreichte bei sonnigem Wetter die 2- bis 22-fache Transpiration wie bei humidem Wetter (siehe Tabelle 3.28). Die Messung der

Transpiration am Ast nach SHB zeigte für $1xO_3$ eine um 2- bis 32-fach höhere Transpiration bei sonnigem Wetter als bei Regen, für $2xO_3$ eine um 1,2- bis 37-fach höhere Transpiration bei sonnigem Wetter (siehe Tabelle 3.28). Das Wetter hatte bei SHB mit $p = 0,000$ einen signifikanten Einfluss auf die Transpiration (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse).

Tabelle 3.28: Monatliche Transpirationssummen der Buchen (bezogen auf die projizierte Blatt - bzw. Kronenoberfläche) bei sonnigem und humidem Wetter während der Vegetationsperiode 2006.

Buche: Transpiration bei sonnigem Wetter					
	THB $1xO_3$	THB $2xO_3$	Astküvette $1xO_3$	SHB $1xO_3$	SHB $2xO_3$
	ml m⁻² monat⁻¹	ml m⁻² monat⁻¹	ml m⁻² monat⁻¹	ml m⁻² monat⁻¹	ml m⁻² monat⁻¹
Mai 06	5,27	3,62	-	-	4,86
Jun 06	8,34	5,26	24,36	13,74	9,00
Jul 06	12,51	7,70	44,98	16,26	10,61
Aug 06	4,06	2,32	14,95	6,85	4,41
Sep 06	8,31	7,35	22,24	11,90	6,63
Okt 06	5,22	4,09	9,27	18,22	9,33
Buche: Transpiration bei Regen					
	THB $1xO_3$	THB $2xO_3$	Astküvette $1xO_3$	SHB $1xO_3$	SHB $2xO_3$
	ml m⁻² monat⁻¹	ml m⁻² monat⁻¹	ml m⁻² monat⁻¹	ml m⁻² monat⁻¹	ml m⁻² monat⁻¹
Mai 06	0,72	0,62	-	-	0,59
Jun 06	3,03	0,62	8,61	6,44	3,72
Jul 06	1,58	1,10	4,58	3,25	1,38
Aug 06	4,34	2,59	9,91	4,28	4,13
Sep 06	1,72	1,32	3,60	2,31	1,19
Okt 06	0,16	0,12	0,41	0,57	0,25

Leitfähigkeit für Wasserdampf

Bei den vier Methoden war keine einheitliche Reduktion der Leitfähigkeit bei Regen zu beobachten (siehe Abbildung 3.27). Eine eindeutige Reduktion der Kronenleitfähigkeit war mit der THB-Methode bei Regen nicht festzustellen. Ganz im Gegenteil traten hier bei Regen z. T. hohe Leitfähigkeiten auf, die die Kronenleitfähigkeiten der Sonnentage überschritten (siehe Tabelle 3.29). Der Einfluss des Wetters auf die Leitfähigkeit in Form einer geringeren Leitfähigkeit bei sonnigem Wetter war mit $p = 0,000$ signifikant (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse). Für die gesamte Vegetationsperiode fiel die Kronenleitfähigkeit der Buchen bei sonnigem Wetter unter $1xO_3$ 0,5- bis 0,8-mal geringer aus als bei Regen und unter $2xO_3$ 0,9- bis 1,3-mal geringer. Im Gegensatz zu THB führte im Ozонаufnahme-Modell Regen zu einer Reduktion der Leitfähigkeit (siehe Abbildung 3.28). Das Modell berechnete für die Buchen unter $1xO_3$ eine um das 0,8- bis 1,2-fach höhere Leitfähigkeit bei sonnigem Wetter als bei humidem Wetter und unter $2xO_3$ eine um das 0,9- bis 1,3-fach höhere Leitfähigkeit.

In der Astküvette war die Leitfähigkeit des Buchenastes bei sonnigem Wetter um das 0,9- bis 1,3-fache höher als bei Regen. Hohe Leitfähigkeiten bei Regen waren – wie bei THB – auch mit der SHB-Methode berechnet worden. Die Leitfähigkeiten von SHB waren unter $1xO_3$ bei

Ergebnisse

sonnigem Wetter um das 0,5- bis 0,9-fache geringer als bei Regen und unter $2xO_3$ das 0,7- bis 1,0-fache geringer. Die statistische Auswertung zeigte auch hier einen signifikanten Einfluss des Wetters auf die Leitfähigkeit (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,000$).

Tabelle 3.29: Monatlich gemittelte Leitfähigkeit für Wasserdampf der Buchen (bezogen auf die projizierte Blatt- bzw. Kronenoberfläche) bei sonnigem und humidem Wetter während der Vegetationsperiode 2006.

Buche: Leitfähigkeit für Wasserdampf bei sonnigem Wetter							
	THB $1xO_3$	THB $2xO_3$	Modell $1xO_3$	Modell $2xO_3$	Astküvette $1xO_3$	SHB $1xO_3$	SHB $2xO_3$
	$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$
Mai 06	33,22	33,94	34,65	32,69	-	-	54,28
Jun 06	35,56	39,02	80,15	75,54	53,53	52,72	53,88
Jul 06	31,64	29,04	74,79	67,77	70,95	44,09	47,97
Aug 06	39,54	50,33	74,53	66,34	90,01	49,63	56,83
Sep 06	42,13	48,99	61,37	53,90	68,58	62,68	69,06
Okt 06	29,72	13,08	26,97	22,20	151,56	55,57	60,05
Buche: Leitfähigkeit für Wasserdampf bei Regen							
	THB $1xO_3$	THB $2xO_3$	Modell $1xO_3$	Modell $2xO_3$	Astküvette $1xO_3$	SHB $1xO_3$	SHB $2xO_3$
	$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$	$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$
Mai 06	65,73	75,67	41,98	39,32	-	-	74,82
Jun 06	49,87	52,41	66,36	61,54	55,33	66,87	67,35
Jul 06	47,48	37,64	88,37	79,95	76,08	67,02	53,06
Aug 06	60,78	59,81	65,56	58,11	94,02	71,73	68,64
Sep 06	49,95	51,87	54,85	47,55	58,67	67,89	66,78
Okt 06	48,76	25,51	31,43	25,45	116,44	81,43	88,75

Ozonaufnahme

Obgleich die Ozonaufnahme bei Regen aufgrund der hohen Leitfähigkeit am 28.08.2006 (siehe Abbildung 3.28) hoch ausfällt, trifft dieser Zusammenhang nicht für die gesamte Vegetationsperiode zu. Über die Vegetationsperiode hinweg betrachtet, trat bei Regen bei allen Methoden eine Reduktion der Ozonaufnahme auf (siehe Tabelle 3.30).

Der prozentuale Vergleich der Ozonaufnahmen auf Basis von THB zeigte unter $1xO_3$ 0,6- bis 11-mal so hohe Ozonaufnahmen bei sonnigem Wetter wie bei Regen und unter $2xO_3$ 0,7- bis 9-mal so hohe Ozonaufnahmen. Diese höheren Ozonaufnahmen bei sonnigem Wetter waren mit $p = 0,000$ signifikant (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse). Das Ozonaufnahme-Modell berechnete für $1xO_3$ eine um das 1,1- bis 17-fach höhere Ozonaufnahme an sonnigen Tagen als an verregneten Tagen, unter $2xO_3$ waren die Ozonaufnahmen bei sonnigem Wetter 1,1- bis 18-mal so hoch wie bei Regen. Die Ozonaufnahme des Buchenastes in der Astküvette war an sonnigen Tagen 1,3- bis 8-mal höher als an Regentagen. An sonnigen Tagen fiel die Ozonaufnahme, berechnet über SHB,

unter $1xO_3$ im Mittel um das 0,7- bis 12-fache höher aus als bei Regen und unter $2xO_3$ um das 0,8- bis 1,0-fache höher. Das Wetter hatte auf die Ozonaufnahme_{SHB} mit $p = 0,000$ einen signifikanten Einfluss (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse).

Tabelle 3.30: Monatliche Ozonaufnahmesummen der Buchen (bezogen auf die projizierte Blatt- bzw. Kronenoberfläche) bei sonnigem und humidem Wetter während der Vegetationsperiode 2006.

Buche: Ozonaufnahme bei sonnigem Wetter							
	THB $1xO_3$	THB $2xO_3$	Modell $1xO_3$	Modell $2xO_3$	Astküvette $1xO_3$	SHB $1xO_3$	SHB $2xO_3$
	$nmol\ m^{-2}$ monat ⁻¹	$nmol\ m^{-2}$ monat ⁻¹	$nmol\ m^{-2}$ monat ⁻¹	$nmol\ m^{-2}$ monat ⁻¹	$nmol\ m^{-2}$ monat ⁻¹	$nmol\ m^{-2}$ monat ⁻¹	$nmol\ m^{-2}$ monat ⁻¹
Mai 06	3,05	4,71	2,23	2,87	-	-	5,66
Jun 06	2,36	4,37	3,31	5,51	4,18	3,46	5,84
Jul 06	3,03	4,66	4,07	6,37	7,56	3,20	5,71
Aug 06	1,40	2,64	1,67	2,49	3,38	1,78	3,08
Sep 06	1,94	3,33	1,95	2,97	3,83	1,72	3,11
Okt 06	1,14	0,75	0,60	0,80	1,70	2,08	2,99
Buche: Ozonaufnahme bei Regen							
	THB $1xO_3$	THB $2xO_3$	Modell $1xO_3$	Modell $2xO_3$	Astküvette $1xO_3$	SHB $1xO_3$	SHB $2xO_3$
	$nmol\ m^{-2}$ monat ⁻¹	$nmol\ m^{-2}$ monat ⁻¹	$nmol\ m^{-2}$ monat ⁻¹	$nmol\ m^{-2}$ monat ⁻¹	$nmol\ m^{-2}$ monat ⁻¹	$nmol\ m^{-2}$ monat ⁻¹	$nmol\ m^{-2}$ monat ⁻¹
Mai 06	0,93	1,38	0,29	0,43	-	-	1,22
Jun 06	1,42	2,41	1,19	1,89	1,70	1,90	2,96
Jul 06	0,80	1,21	0,90	1,47	1,18	0,92	1,32
Aug 06	2,23	3,72	1,46	2,22	2,55	2,41	3,90
Sep 06	0,51	0,82	0,40	0,56	0,76	0,30	0,47
Okt 06	0,10	0,08	0,03	0,04	0,20	0,18	0,29

3.7.2 Fichte

Transpiration

Auch bei Fichte zeigten alle drei Messverfahren bei Regen eine Reduktion der Transpiration (siehe Tabelle 3.31, Abbildung 3.29 und Abbildung 3.30). Basierend auf der THB-Messung transpirierten die Fichten bei regnerischem Wetter unter $1xO_3$ das 0,03- bis 0,9-fache wie bei sonnigem Wetter und unter $2xO_3$ das 0,02- bis 0,8-fache. Die Transpiration bei Regen fiel in beiden Ozonbehandlungen signifikant geringer aus als bei sonnigem Wetter (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,000$). Der unter $2xO_3$ in der Astküvette eingeschlossene Fichtenast transpirierte bei regnerischem Wetter nur das 0,02- bis 0,5-fache als bei sonnigem Wetter. Die Fichtenäste transpirierten – nach der Xylemflussmessung am Ast (SHB) – unter $1xO_3$ bei regnerischem Wetter das 0,1- bis 4,7-fache als bei sonnigem Wetter. Die Transpiration war durch das Wetter mit $p = 0,003$ signifikant beeinflusst worden (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse).

Tabelle 3.31: Monatliche Transpirationssummen der Fichten (bezogen auf die gesamte Nadel- bzw. Kronenoberfläche) bei sonnigem und humidem Wetter während der Vegetationsperiode 2006.

Fichte: Transpiration bei sonnigem Wetter				
	THB 1xO₃	THB 2xO₃	Astküvette 2xO₃	SHB 1xO₃
	ml m ⁻² monat ⁻¹	ml m ⁻² monat ⁻¹	ml m ⁻² monat ⁻¹	ml m ⁻² monat ⁻¹
Mai 06	4,73	3,33	-	-
Jun 06	3,16	6,06	2,23	3,30
Jul 06	4,05	8,44	5,33	5,60
Aug 06	1,34	4,66	1,72	1,31
Sep 06	3,34	8,43	2,40	1,61
Okt 06	2,91	5,49	2,34	1,28
Fichte: Transpiration bei Regen				
	THB 1xO₃	THB 2xO₃	Astküvette 2xO₃	SHB 1xO₃
	ml m ⁻² monat ⁻¹	ml m ⁻² monat ⁻¹	ml m ⁻² monat ⁻¹	ml m ⁻² monat ⁻¹
Mai 06	0,49	0,64	-	-
Jun 06	1,24	2,27	0,97	1,33
Jul 06	0,50	0,98	0,49	0,62
Aug 06	1,15	3,67	0,82	0,73
Sep 06	0,82	1,63	0,37	0,31
Okt 06	0,08	0,09	0,04	0,08

Leitfähigkeit für Wasserdampf

Die Leitfähigkeit für Wasserdampf der Fichten fiel bei Regen im Durchschnitt höher aus als bei sonnigem Wetter (siehe Abbildung 3.29 und Tabelle 3.32). Mit Hilfe der Xylemflussmessung im Stamm (THB) wurde eine um das 1,2- bis 1,5-fach höhere Leitfähigkeit bei regnerischem Wetter als bei sonnigem Wetter unter 1xO₃ berechnet und unter 2xO₃ eine um das 0,9- bis 1,7-fach höhere Leitfähigkeit. Die statistische Auswertung zeigte, dass sich das Wetter mit p = 0,000 signifikant auf die Leitfähigkeit auswirkte (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse). Die Leitfähigkeiten, ermittelt mit dem Ozонаaufnahme-Modell, waren bei humidem Wetter unter 1xO₃ 0,9- bis 1,2-mal so hoch wie bei sonnigem Wetter, unter 2xO₃ 0,9- bis 1,8-mal so hoch. Die Leitfähigkeit, berechnet mit Hilfe der Gaswechselformel in der Astküvette, zeigte eine Erhöhung der Leitfähigkeit bei Regen um das 0,9- bis 1,4-fache im Vergleich zu sonnigem Wetter. Über SHB konnte unter 1xO₃ eine signifikante (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, p = 0,011) um das 0,9- bis 2-fach höhere Leitfähigkeit bei Regen im Vergleich zu sonnigem Wetter berechnet werden.

Tabelle 3.32: Monatlich gemittelte Leitfähigkeit für Wasserdampf der Fichten bei sonnigem Wetter und Regen in der Vegetationsperiode 2006.

Fichte: Leitfähigkeit für Wasserdampf bei sonnigem Wetter						
	THB 1xO ₃ mmol m ⁻² s ⁻¹	THB 2xO ₃ mmol m ⁻² s ⁻¹	Modell 1xO ₃ mmol m ⁻² s ⁻¹	Modell 2xO ₃ mmol m ⁻² s ⁻¹	Astküvette 2xO ₃ mmol m ⁻² s ⁻¹	SHB 1xO ₃ mmol m ⁻² s ⁻¹
Mai 06	24,07	26,12	12,87	17,56	-	19,36
Jun 06	12,70	14,47	13,45	9,57	6,33	12,99
Jul 06	9,53	9,81	12,01	16,38	9,51	10,98
Aug 06	13,01	14,95	13,43	18,32	13,84	12,17
Sep 06	16,61	14,89	11,44	15,61	9,73	10,22
Okt 06	15,30	10,50	8,06	10,99	15,29	9,26
Fichte: Leitfähigkeit für Wasserdampf bei Regen						
	THB 1xO ₃ mmol m ⁻² s ⁻¹	THB 2xO ₃ mmol m ⁻² s ⁻¹	Modell 1xO ₃ mmol m ⁻² s ⁻¹	Modell 2xO ₃ mmol m ⁻² s ⁻¹	Astküvette 2xO ₃ mmol m ⁻² s ⁻¹	SHB 1xO ₃ mmol m ⁻² s ⁻¹
Mai 06	31,58	32,90	12,80	17,46	-	18,30
Jun 06	18,59	17,98	12,85	17,54	8,67	15,87
Jul 06	14,60	10,95	14,57	19,88	10,19	17,28
Aug 06	17,23	15,60	13,40	18,28	15,63	20,67
Sep 06	20,07	13,97	10,84	14,79	8,59	11,72
Okt 06	23,32	17,70	8,44	11,51	17,43	18,76

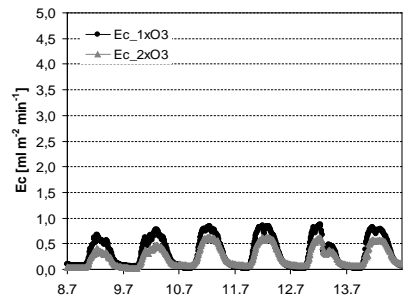
Ozonaufnahme

Die mit den verschiedenen Methoden berechneten Ozonaufnahmen waren – über die Vegetationsperiode betrachtet – bei sonnigem Wetter höher als bei Regen (siehe Abbildung 3.29, Abbildung 3.30 und Tabelle 3.33). Die Ozonaufnahme für Fichte, berechnet mit Hilfe der Xylemflussmessung im Stamm (THB) zeigte eine signifikante Reduktion der Ozonaufnahme bei humidem im Vergleich zu sonnigem Wetter (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,000$). So fiel die Ozonaufnahme bei sonnigem Wetter unter 1xO₃ um das 0,7- bis 12-fache höher aus als bei regnerischem Wetter, unter 2xO₃ um das 0,8- bis 9-fache höher. Mit dem Ozonaufnahme-Modell wurde für beide Ozonregime bei sonnigem Wetter eine bis zu 20-fach höhere Ozonaufnahme als bei humidem Wetter berechnet. Die Astküvette zeigte bei Fichte eine um das 2- bis 31-fach erhöhte Ozonaufnahme bei schönem Wetter im Vergleich zu Regen. Die Ozonaufnahmen_{SHB} fielen bei sonnigem Wetter signifikant um 0,2- bis 7-fach höher aus als bei regnerischem Wetter (SPSS; GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,000$).

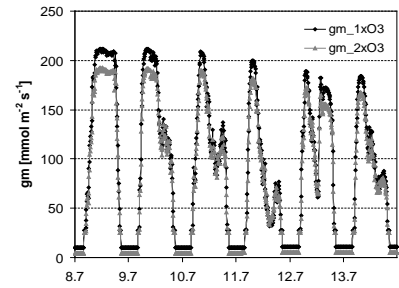
Tabelle 3.33: Monatliche Ozonaufnahmesummen der Fichten (bezogen auf die gesamte Nadel- bzw. Kronenoberfläche) bei sonnigem und humidem Wetter während der Vegetationsperiode 2006.

Fichte: Ozonaufnahme bei sonnigem Wetter						
	THB 1xO₃	THB 2xO₃	Modell 1xO₃	Modell 2xO₃	Astküvette 2xO₃	SHB 1xO₃
	nmol m⁻² monat⁻¹	nmol m⁻² monat⁻¹	nmol m⁻² monat⁻¹	nmol m⁻² monat⁻¹	nmol m⁻² monat⁻¹	nmol m⁻² monat⁻¹
Mai 06	3,05	3,75	1,51	2,70	-	0,07
Jun 06	1,19	1,89	1,43	2,72	0,57	1,17
Jul 06	1,19	1,61	1,51	2,94	1,17	1,54
Aug 06	0,52	0,86	0,63	1,30	0,42	0,45
Sep 06	0,82	1,05	0,76	1,56	0,46	0,51
Okt 06	0,63	0,53	0,44	0,82	0,44	0,34
Fichte: Ozonaufnahme bei Regen						
	THB 1xO₃	THB 2xO₃	Modell 1xO₃	Modell 2xO₃	Astküvette 2xO₃	SHB 1xO₃
	nmol m⁻² monat⁻¹	nmol m⁻² monat⁻¹	nmol m⁻² monat⁻¹	nmol m⁻² monat⁻¹	nmol m⁻² monat⁻¹	nmol m⁻² monat⁻¹
Mai 06	0,87	0,71	0,23	0,38	-	0,29
Jun 06	0,69	0,89	0,57	0,99	0,25	0,61
Jul 06	0,30	0,36	0,36	0,70	0,15	0,44
Aug 06	0,70	1,01	0,63	1,31	0,23	0,88
Sep 06	0,22	0,23	0,16	0,32	0,07	0,12
Okt 06	0,05	0,06	0,02	0,04	0,01	0,05

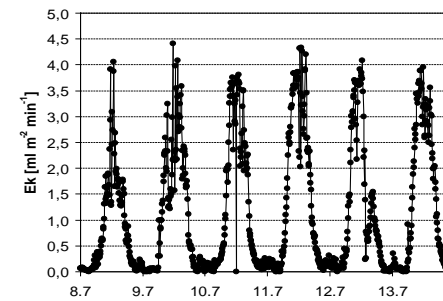
Xylemflussmessung im Stamm



Ozonzufnahme-Modell



Gaswechselformung Astkuvette



Xylemflussmessung auf Astebene

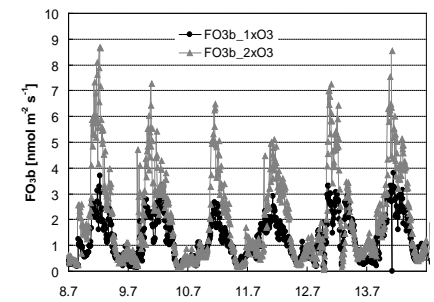
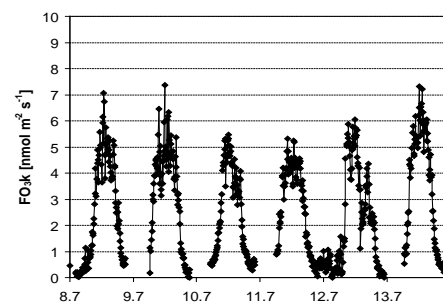
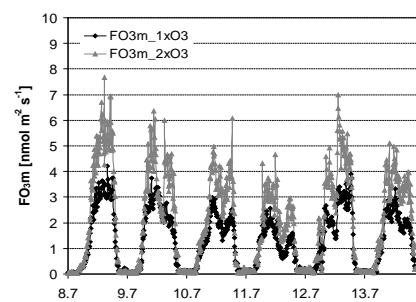
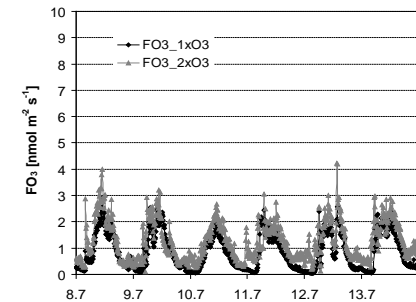
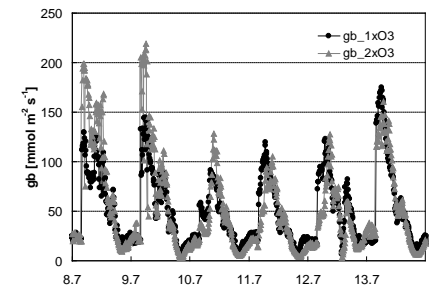
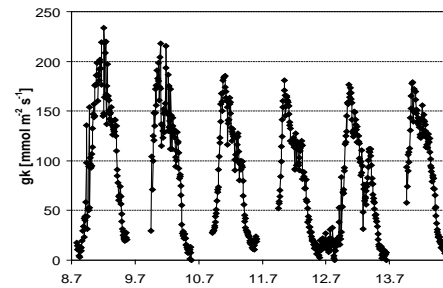
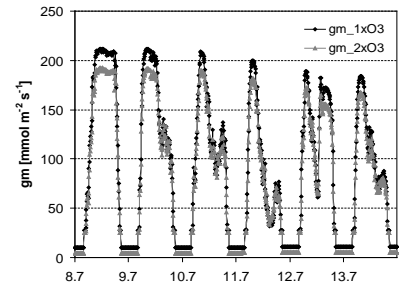
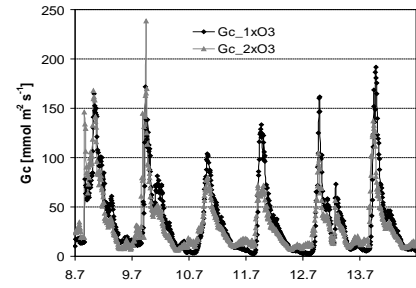
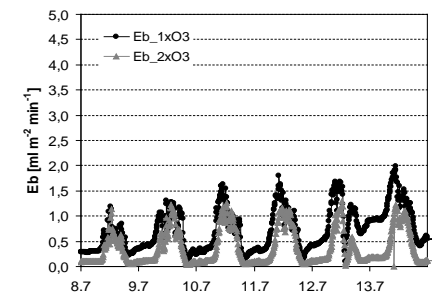
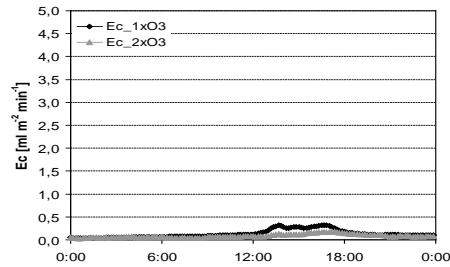
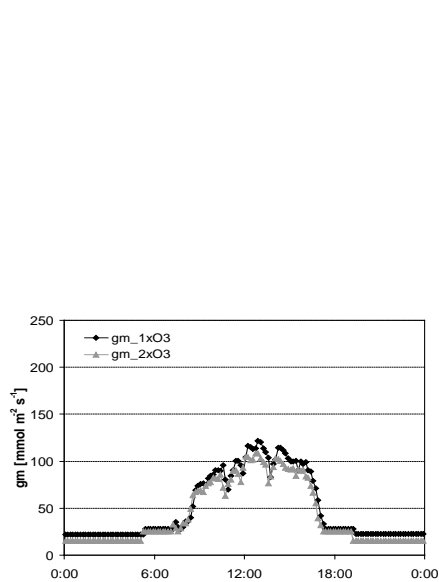


Abbildung 3.27: Verlauf der Transpirationsraten [$\text{ml m}^{-2} \text{min}^{-1}$], Leitfähigkeit für Wasserdampf [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] und Ozonflüsse [$\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] von Buche (bezogen auf projizierte Blatt- bzw. Kronenoberfläche) unter $1xO_3$ und $2xO_3$ an sonnigen Tagen (vom 08.07.06 bis 13.07.06), auf Basis der Xylemflussmessung im Stamm, des Ozonzufnahme-Modells, der Gaswechselformung in der Astkuvette und der Xylemflussmessung auf Astebene.

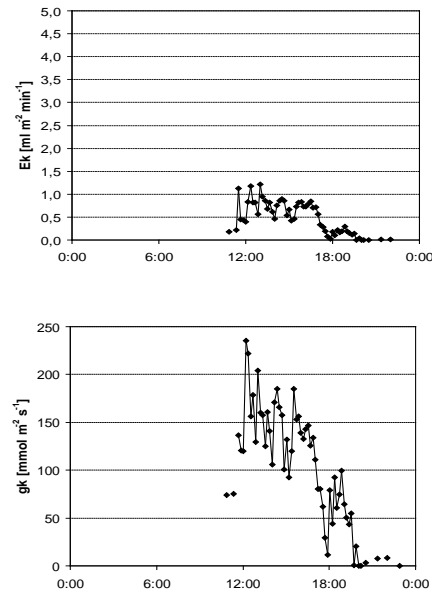
Xylemflussmessung im Stamm



Ozonaufnahme-Modell



Gaswechselformel Astkuvette



Xylemflussmessung auf Astebene

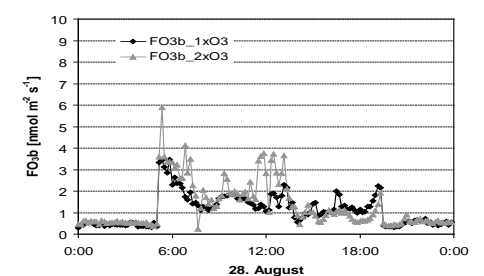
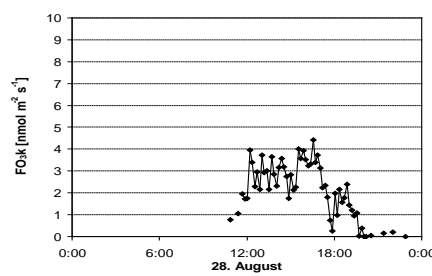
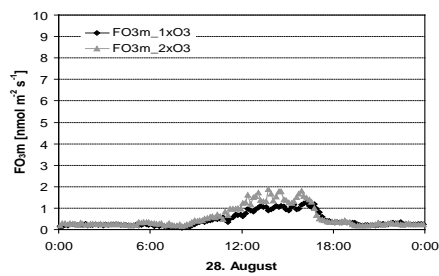
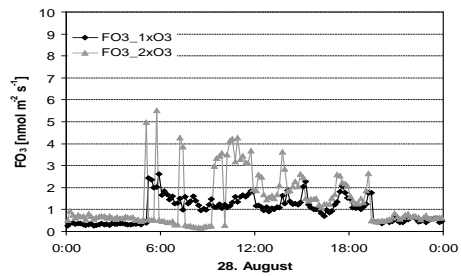
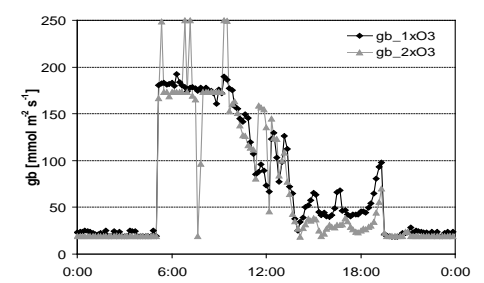
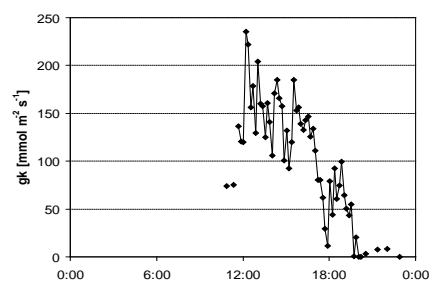
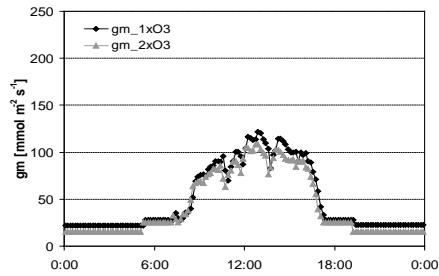
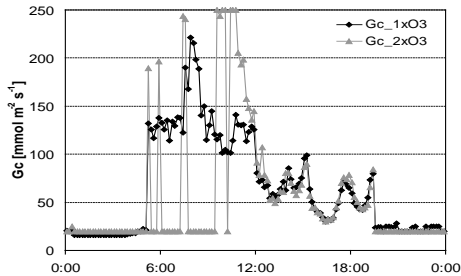
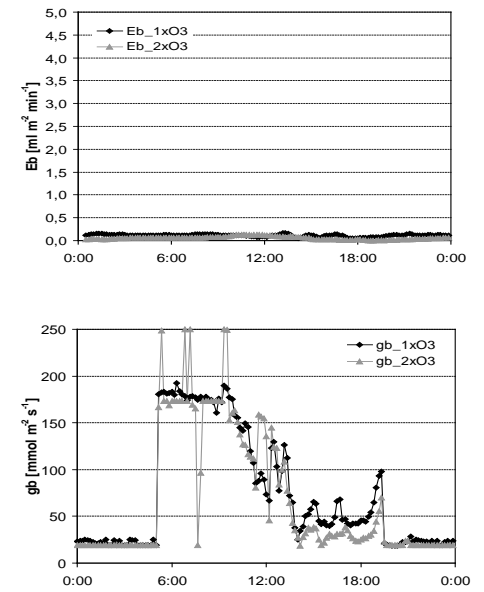
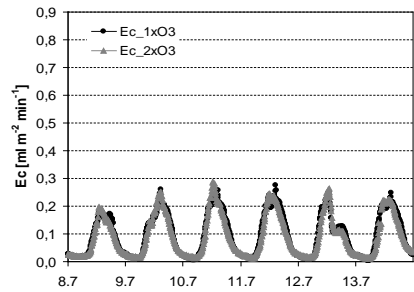
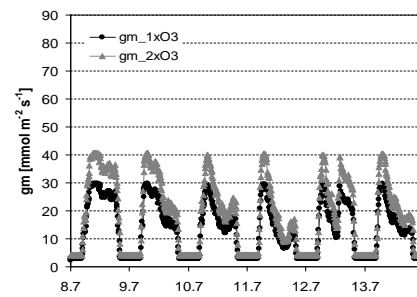
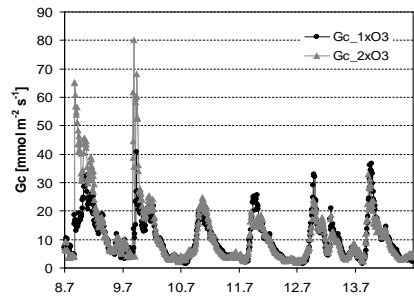


Abbildung 3.28: Verlauf der Transpirationsraten [$\text{ml m}^{-2} \text{min}^{-1}$], Leitfähigkeit für Wasserdampf [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] und Ozonflüsse [$\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] von Buche (bezogen auf projizierte Blatt- bzw. Kronenoberfläche) unter $1xO_3$ und $2xO_3$ an einem regnerischen Tag (28.08.09) auf Basis der Xylemflussmessung im Stamm, des Ozonaufnahme-Modells, der Gaswechselformel in der Astkuvette und der Xylemflussmessung auf Astebene. Die Lücke in der Transpirationsaufzeichnung der Astkuvette bei Regen ist verursacht durch Wasserkondensation. Diese entsteht, sobald der Taupunkt der vorgegebenen Luftfeuchte in der Kuvette über die Temperatur an der kältesten Stelle der Kühlkörper steigt (Götz 1996). In solchen Fällen war die Transpiration nicht berechenbar (Götz 1996).

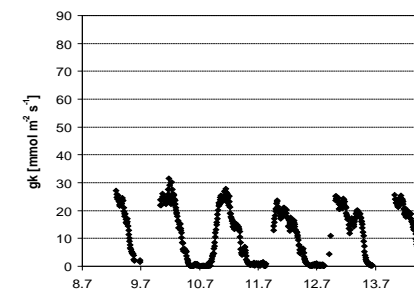
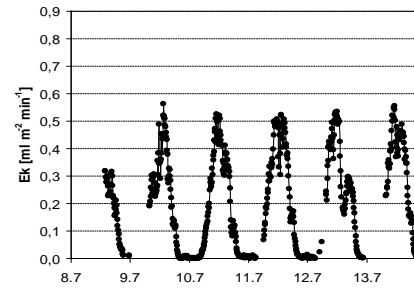
Xylemflussmessung im Stamm



Ozonaufnahme-Modell



Gaswechselformung Astkuvette



Xylemflussmessung auf Astebene

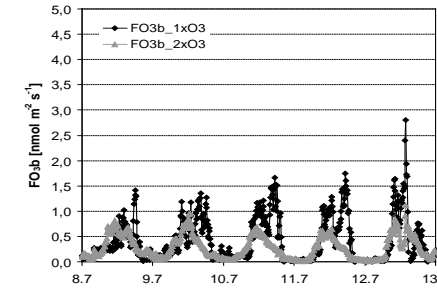
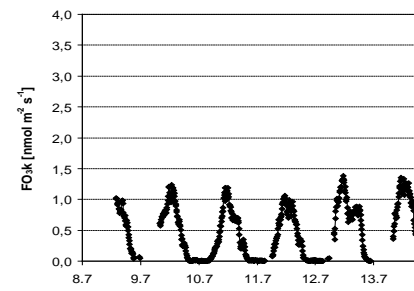
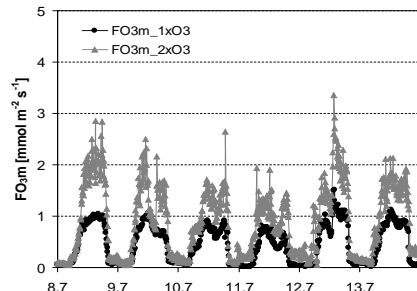
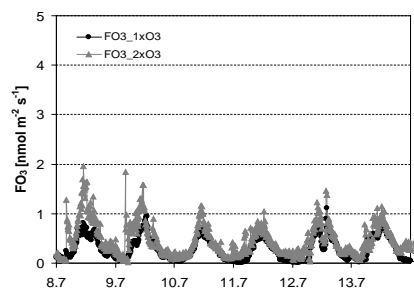
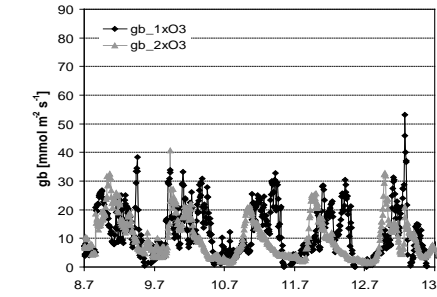
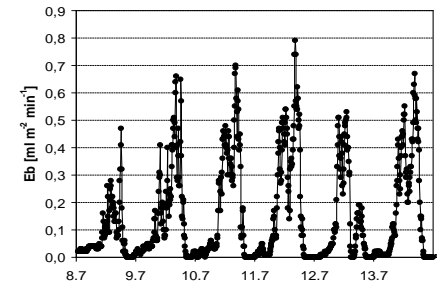
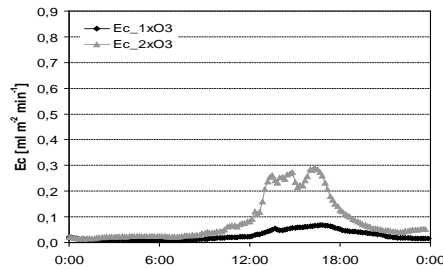
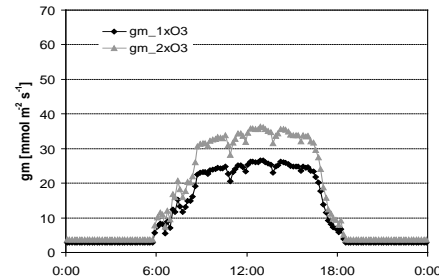


Abbildung 3.29: Verlauf der Transpirationsraten [$\text{ml m}^{-2} \text{min}^{-1}$], Leitfähigkeit für Wasserdampf [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] und Ozonflüsse [$\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] von Fichte (bezogen auf gesamte Nadel- bzw. Kronenoberfläche) unter $1xO_3$ und $2xO_3$ an sonnigen Tagen (vom 08.07.06 bis 13.07.06), auf Basis der Xylemflussmessung im Stamm, des Ozonaufnahme-Modells, der Gaswechselformung in der Astkuvette und der Xylemflussmessung auf Astebene.

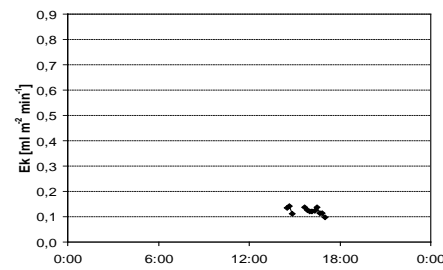
Xylemflussmessung im Stamm



Ozonzufnahme-Modell



Gaswechsellmessung Astkuvette



Xylemflussmessung auf Astebene

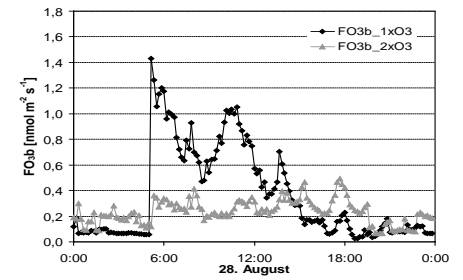
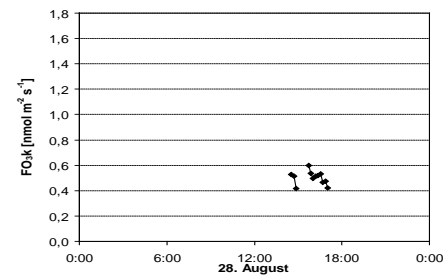
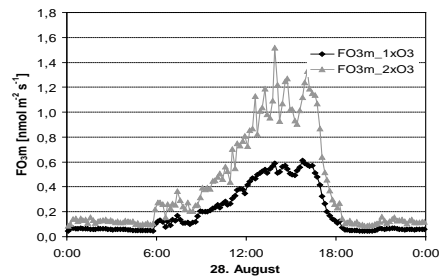
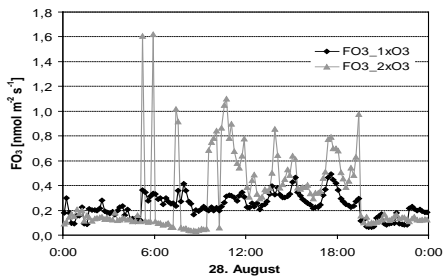
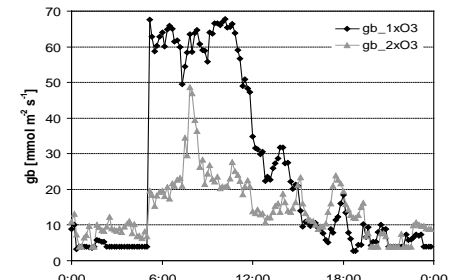
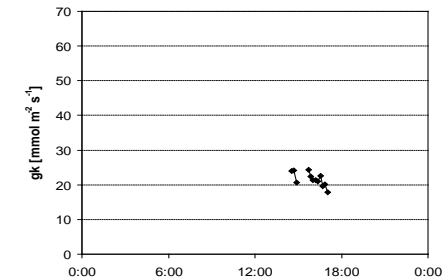
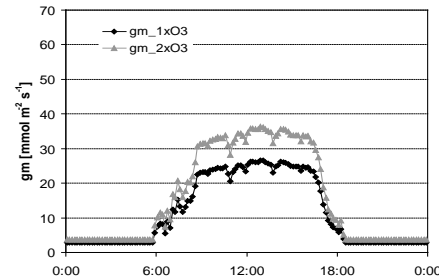
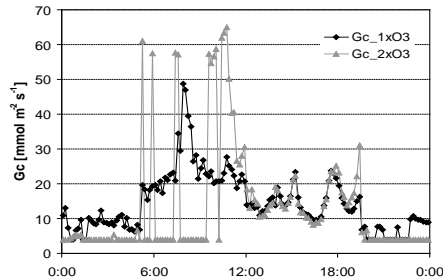
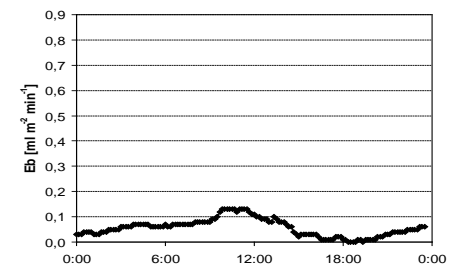


Abbildung 3.30: Verlauf der Transpirationsraten [$\text{ml m}^{-2} \text{min}^{-1}$], Leitfähigkeit für Wasserdampf [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] und Ozonflüsse [$\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] von Fichte (bezogen auf die gesamte Nadel- bzw. Kronenoberfläche) unter $1xO_3$ und $2xO_3$ an einem regnerischen Tag (28.08.09) auf Basis der Xylemflussmessung im Stamm, des Ozonaufnahme-Modells, der Gaswechsellmessung in der Astkuvette und der Xylemflussmessung auf Astebene. Die Lücke in der Transpirationsaufzeichnung der Astkuvette bei Regen ist verursacht durch Wasserkondensation. Diese entsteht, sobald der Taupunkt der vorgegebenen Luftfeuchte in der Kuvette über die Temperatur an der kältesten Stelle der Kühlkörper steigt (Götz 1996). In solchen Fällen war die Transpiration nicht berechenbar (Götz 1996).

3.8 Methodenvergleich

Im Folgenden werden die monatlichen Transpirationssummen, monatlich gemittelten Leitfähigkeiten für Wasserdampf und monatlichen Ozonaufnahmesummen auf Kronenebene, Astebene und Sonnenkronenebene, ermittelt mit Hilfe der Xylemflussmessung im Stamm (THB), der Gaswechselformung in der Astküvette bzw. des Ozonaufnahme-Modells, miteinander verglichen. Hierfür werden jeweils die Ergebnisse der Xylemflussmessung im Stamm denen des Modells und der Gaswechselformung in der Astküvette gegenübergestellt.

Durch diesen Vergleich soll ein möglicher Einfluss der Grenzschichten auf die physiologischen Parameter kenntlich gemacht werden. Nur durch die Xylemflussmessung im Stamm (THB) werden die Luftgrenzschichten vor Ort erfasst, wohingegen die Grenzschichten in der Astküvette durch die vom Ventilator verursachte Luftzirkulation fast gänzlich abgebaut sind (Wullschleger et al. 1998). Im Ozonaufnahme-Modell (Emberson et al. 2000a, Nunn et al. 2005) finden Grenzschichten ebenfalls keine Berücksichtigung. Somit wird das Verfahren mit „realer Grenzschicht“ (THB) dem Verfahren mit „minimaler Grenzschicht“ (Gaswechselformung in der Astküvette) und „ohne Grenzschicht“ (Ozonaufnahme-Modell) gegenübergestellt. Es wird erwartet, dass sich der Einfluss der Luftgrenzschichten limitierend auf Transpiration, Leitfähigkeit für Wasserdampf und Ozonaufnahme auswirkt (Wullschleger et al. 1998).

Außerdem wurde der Datensatz auf Tage mit und ohne Regen aufgeteilt, um einen möglichen Einfluss der Wasserverfügbarkeit auf die Methoden aufzuzeigen. Transpiration, Leitfähigkeit für Wasserdampf und Ozonaufnahme der Buchen werden in den folgenden Kapiteln auf die projizierte Blatt- bzw. Kronenoberfläche bezogen, und die der Fichten auf die gesamte Nadel- bzw. Kronenoberfläche.

3.8.1 Xylemflussmessung im Stamm versus Gaswechselformung in der Astküvette

3.8.1.1 Transpiration

Sonniges Wetter:

Buche:

Die Kronentranspirationssummen_{THB} der Buchen fielen unter $1 \times O_3$ von Juni bis Oktober um 17 % bis 69 % geringer aus als die Transpirationssummen in der Astküvette (siehe Tabelle 3.34). Dabei wichen in allen betrachteten Monaten die monatlichen Transpirationssummen_{Astküvette} signifikant von den Transpirationssummen_{THB} ab (siehe Tabelle 3.35). Die Ursache der z. T. hohen prozentualen Abweichungen können zum einen in einem Einfluss der Grenzschichten, zum anderen aber auch daran liegen, dass die über

die Gaswechselformel berechnete Transpiration die Transpiration eines Sonnenastes darstellt und nicht die einer gesamten Baumkrone.

Tabelle 3.34: Verhältnis der Transpirationssummen der Buchen und Fichten zwischen der auf der Xylemflussmessung im Stamm basierenden Methode (THB) und der auf der Gaswechselformel in der Astküvette basierenden Methode bei sonnigem und humidem Wetter (Transpirationssummen der Gaswechselformel in der Astküvette = 100 %). Negative Vorzeichen bedeuten eine geringere Transpirationssumme als die der Gaswechselformel in der Astküvette.

Vergleich der Transpirationssummen [%]		
Buche	Sonniges Wetter THB/Astküvette	Humides Wetter THB/Astküvette
	1xO ₃	1xO ₃
Juni	-69	-69
Juli	-76	-73
August	-47	-48
September	-17	-14
Oktober	-61	-13
Fichte	Sonniges Wetter THB/Astküvette	Humides Wetter THB/Astküvette
	2xO ₃	2xO ₃
Juni	87	54
Juli	31	13
August	32	51
September	88	59
Oktober	-37	-56

Fichte:

Bei Fichte waren die Kronentranspirationssummen_{THB} pro gesamter Kronenoberfläche unter 2xO₃ um 31 % bis 88 % höher als die Transpirationssummen_{Astküvette} (siehe Tabelle 3.34). Die hohe prozentuale Abweichung kann eine Folge der Auswahl des in der Küvette eingeschlossenen Astes sein. Ein für die Baumkrone nicht repräsentativer Fichten-Sonnenast in der Gaswechselformel kann im unteren Streubereich der Transpirationsleistung der gesamten Baumkrone liegen. Eine Ausnahme stellte der Oktober dar, in dem die Transpirationssumme der Fichten auf Kronenebene um 37 % geringer ausfiel als in der Astküvette. Die mit Hilfe der Astküvette ermittelten Transpirationssummen haben sich signifikant von denen mit Hilfe der Xylemflussmessung im Stamm unterschieden (siehe Tabelle 3.35).

Tabelle 3.35: Signifikanzen, errechnet durch den Mittelwertvergleich der Transpirationssummen_{Astküvette} mit den Transpirationssummen_{THB}, (SPSS, Mittelwertvergleich, T-Test bei einer Stichprobe (* = $p < 0,05$)).

Transpiration	Sonniges Wetter		Humides Wetter	
	Bu 1xO ₃	Fi 2xO ₃	Bu 1xO ₃	Fi 2xO ₃
Juni	0,02*	0,01*	0,02*	0,01*
Juli	0,03*	0,01*	0,03*	0,01*
August	0,02*	0,00*	0,02*	0,01*
September	0,01*	0,01*	0,01*	0,02*
Oktober	0,03*	0,03*	0,10	0,02*

Regen

Buche:

Mit Hilfe der Xylemflussmessung im Stamm (THB) wurden im Vergleich zur Gaswechsellmessung in der Astküvette bei humidem Wetter signifikant niedrigere Transpirationssummen berechnet (siehe Tabelle 3.35). So fielen – abgesehen von Oktober – die monatlichen Transpirationssummen der Buchen bei Regen auf Kronenebene um 13 % bis 73 % geringer aus als in der Astküvette (siehe Tabelle 3.34).

Fichte:

Wie bei sonnigem Wetter war die Kronentranspiration_{THB} auch bei Regen signifikant höher als die Transpiration_{Astküvette} (siehe Tabelle 3.34 und Tabelle 3.35).

3.8.1.2 Leitfähigkeit für Wasserdampf

Sonniges Wetter

Buche:

Die Kronenleitfähigkeit_{THB} der Buchen fiel bei sonnigem Wetter mit $p \leq 0,04$ signifikant um 12 % bis 72 % geringer aus als die stomatäre Leitfähigkeit_{Astküvette} (siehe Tabelle 3.36 und Tabelle 3.37).

Tabelle 3.36: Verhältnis der Leitfähigkeiten für Wasserdampf der Buchen und Fichten zwischen der auf der Xylemflussmessung im Stamm basierenden Methode (THB) und der auf der Gaswechselformel in der Astküvette basierenden Methode bei sonnigem und humidem Wetter (Leitfähigkeit der Gaswechselformel in der Astküvette = 100 %). Negative Vorzeichen bedeuten eine geringere Leitfähigkeit als die der Gaswechselformel in der Astküvette.

Vergleich der gemittelten Leitfähigkeiten für Wasserdampf [%]		
Buche	Sonniges Wetter THB/Astküvette	Humides Wetter THB/Astküvette
	1xO ₃	1xO ₃
Juni	-44	-48
Juli	-64	-54
August	-12	-12
September	-20	-19
Oktober	-72	-47
Fichte	Sonniges Wetter THB/Astküvette	Humides Wetter THB/Astküvette
	2xO ₃	2xO ₃
Juni	51	-12
Juli	95	78
August	108	141
September	206	138
Oktober	-44	-40

Tabelle 3.37: Signifikanzen, errechnet durch den Mittelwertvergleich der Leitfähigkeit_{Astküvette} mit der Leitfähigkeit_{THB}, (SPSS, Mittelwertvergleich, T-Test bei einer Stichprobe (* = p < 0,05)).

Leitfähigkeit	Sonniges Wetter		Humides Wetter	
	Bu 1xO ₃	Fi 2xO ₃	Bu 1xO ₃	Fi 2xO ₃
Juni	0,04*	0,03*	0,34	0,06
Juli	0,01*	0,65	0,03*	0,61
August	0,01*	0,56	0,03*	0,98
September	0,01*	0,06	0,05	0,07
Oktober	0,00*	0,14	0,01*	0,95

Fichte:

Wie für die Kronentranspiration_{THB} der Fichten gezeigt, fiel auch die Kronenleitfähigkeit_{THB} der Fichten bei sonnigem Wetter höher aus als die Leitfähigkeit_{Astküvette} (siehe Tabelle 3.36). Im Oktober sank die Kronenleitfähigkeit_{THB} auf nur mehr 44 % der Leitfähigkeit_{Astküvette}. Abgesehen vom Juni, wick die Leitfähigkeit_{Astküvette} nicht signifikant von der Kronenleitfähigkeit_{THB} ab (siehe Tabelle 3.37).

Regen**Buche:**

Bei Regen wurde für Buche eine bis zu 54 % geringere Kronenleitfähigkeit_{THB} als Leitfähigkeit_{Astküvette} ermittelt (siehe Tabelle 3.36), letztere wich, abgesehen vom Juni, signifikant von der Kronenleitfähigkeit_{THB} ab (siehe Tabelle 3.37).

Fichte:

Die für die Fichten ermittelte Kronenleitfähigkeit_{THB} fiel bei Regen im Juni um 12 % und Oktober um 40 % geringer aus als die Leitfähigkeit_{Astküvette} (siehe Tabelle 3.36). Im Juli bis August dagegen war die Kronenleitfähigkeit_{THB} höher als die Leitfähigkeit_{Astküvette} (siehe Tabelle 3.36). Eine signifikante Abweichung lag nicht vor.

3.8.1.3 OzonaufnahmeSonniges Wetter**Buche:**

Die Ozonaufnahme_{THB} der Buchen unter $1xO_3$ fiel signifikant geringer aus als die Ozonaufnahme_{Astküvette} (siehe Tabelle 3.38 und Tabelle 3.39).

Tabelle 3.38: Verhältnis der Ozonaufnahmesummen der Buchen und Fichten zwischen der auf der Xylemflussmessung im Stamm basierenden Methode (THB) und der auf der Gaswechsellmessung in der Astküvette basierenden Methode bei sonnigem und humidem Wetter (Ozonaufnahmesummen der Gaswechsellmessung in der Astküvette = 100 %). Negative Vorzeichen bedeuten eine geringere Ozonaufnahmesumme als die der Gaswechsellmessung in der Astküvette.

Vergleich der Ozonaufnahmesummen [%]		
Buche	Sonniges Wetter THB/Astküvette	Humides Wetter THB/Astküvette
	$1xO_3$	$1xO_3$
Juni	-50	-51
Juli	-65	-55
August	-21	-19
September	-19	-29
Oktober	-61	-41
Fichte	Sonniges Wetter THB/Astküvette	Humides Wetter THB/Astküvette
	$2xO_3$	$2xO_3$
Juni	140	30
Juli	163	150
August	194	260
September	332	234
Oktober	-20	4

Tabelle 3.39: Signifikanzen, errechnet durch den Mittelwertvergleich der Ozonaufnahme_{Astküvette} mit der Ozonaufnahme_{THB}, (SPSS, Mittelwertvergleich, T-Test bei einer Stichprobe (* = $p < 0,05$)).

Ozonaufnahme	Sonniges Wetter		Humides Wetter	
	Bu 1xO ₃	Fi 2xO ₃	Bu 1xO ₃	Fi 2xO ₃
Juni	0,01*	0,02*	0,01*	0,04*
Juli	0,01*	0,09	0,01*	0,04*
August	0,01*	0,21	0,01*	0,01*
September	0,00*	0,12	0,00*	0,06
Oktober	0,01*	0,25	0,01*	0,07

Fichte:

Die Ozonaufnahme_{THB} der Fichten fiel höher aus als die Ozonaufnahme_{Astküvette} (siehe Tabelle 3.38). Der T-Test (SPSS, Mittelwertvergleich) ergab, dass die Ozonaufnahmen_{Astküvette} – abgesehen vom Mai – im Wertebereich der Ozonaufnahmen_{THB} lagen (siehe Tabelle 3.39).

Regen:

Buche:

Bei Regen war die Ozonaufnahme_{THB} der Buchen bis zu 55 % signifikant geringer als die Ozonaufnahme_{Astküvette} (siehe Tabelle 3.38 und Tabelle 3.39).

Fichte:

Wie bei sonnigem Wetter, so fiel auch bei Regen die Ozonaufnahme_{THB} der Fichten höher aus als die Ozonaufnahme_{Astküvette} (siehe Tabelle 3.38). Diese Abweichung war in den Monaten Juni, Juli und August signifikant (siehe Tabelle 3.39).

3.8.2 Xylemflussmessung im Stamm versus Ozonaufnahme-Modell

3.8.2.1 Leitfähigkeit für Wasserdampf

Sonniges Wetter

Buche:

Unter 1xO₃ fiel die Kronenleitfähigkeit_{THB} von Mai bis September bis zu 58 % geringer aus als die über das Modell berechnete Leitfähigkeit (siehe Tabelle 3.40). Im Oktober war sie jedoch um 10 % höher. Dabei wich die Leitfähigkeit_{Modell} von Juni bis September signifikant vom Wertebereich der Kronenleitfähigkeit_{THB} ab (siehe Tabelle 3.41). Ursache für die geringere Kronenleitfähigkeit_{THB} als Leitfähigkeit_{Modell} dürfte der Einfluss der Grenzschichten auf die Leitfähigkeit für Wasserdampf sein. Wie unter 1xO₃ war unter 2xO₃ die Kronenleitfähigkeit_{THB} im Vergleich zur Leitfähigkeit_{Modell} ebenfalls reduziert, im Mai jedoch um 4 % erhöht, was an der Parametrisierung des Ozonaufnahme-Modells liegen kann, wonach die Leitfähigkeit im Frühjahr im Vergleich zum Sommer eingeschränkt ist (siehe Tabelle 3.40). In den Monaten Juni, Juli und August wich die Leitfähigkeit_{Modell} signifikant von der Kronenleitfähigkeit_{THB} ab (siehe Tabelle 3.41).

Tabelle 3.40: Verhältnis der gemittelten Leitfähigkeiten für Wasserdampf der Buchen und Fichten zwischen der auf der Xylemflussmessung im Stamm basierenden Methode (THB) und der auf dem Ozonaufnahme-Modell basierenden Methode bei sonnigem und humidem Wetter (Leitfähigkeiten des Ozonaufnahme-Modells = 100 %). Negative Vorzeichen bedeuten eine geringere Leitfähigkeit als die des Ozonaufnahme-Modells.

Vergleich der gemittelten Leitfähigkeiten für Wasserdampf [%]				
Buche	Sonniges Wetter THB/Modell		Humides Wetter THB/Modell	
	1xO ₃	2xO ₃	1xO ₃	2xO ₃
Mai	-4	4	57	92
Juni	-56	-48	-25	-15
Juli	-58	-57	-46	-53
August	-47	-24	-7	3
September	-31	-9	-9	9
Oktober	10	-41	55	0
Fichte	Sonniges Wetter THB/Modell		Humides Wetter THB/Modell	
	1xO ₃	2xO ₃	1xO ₃	2xO ₃
Mai	87	49	147	88
Juni	-6	-21	45	3
Juli	-21	-40	0	-45
August	-3	-18	29	-15
September	45	-5	85	-6
Oktober	90	-5	176	54

Fichte:

Der Monat Mai fiel dadurch auf, dass die Kronenleitfähigkeit_{THB} unter 1xO₃ um 87 % und unter 2xO₃ signifikant um 49 % ($p = 0,01$) höher ausfiel als die Leitfähigkeit_{Modell}. Ein Grund dafür kann die Parametrisierung des Ozonaufnahme-Modells sein, wonach die Leitfähigkeit im Frühjahr im Vergleich zum Sommer reduziert ist. In den Monaten Juni bis August war die Kronenleitfähigkeit_{THB} unter 1xO₃ um 3 % bis 21 % geringer als die Leitfähigkeit_{Modell}, im September und Oktober war die Kronenleitfähigkeit_{THB} wiederum 45 % bis 90 % höher als die Leitfähigkeit_{Modell} (siehe Tabelle 3.40). Die Leitfähigkeit_{Modell} wich bei Fichte nicht signifikant vom Wertebereich der Kronenleitfähigkeit_{THB} ab (siehe Tabelle 3.41). Auch unter 2xO₃ war die Kronenleitfähigkeit_{THB} von Juni bis Oktober geringer als die Leitfähigkeit_{Modell} (siehe Tabelle 3.40), eine signifikante Abweichung lag jedoch nicht vor (siehe Tabelle 3.41).

Tabelle 3.41: Signifikanzen, errechnet durch den Mittelwertvergleich der Leitfähigkeit_{Modell} mit der Leitfähigkeit_{THB}, (SPSS, Mittelwertvergleich, T-Test bei einer Stichprobe (* = $p < 0,05$)).

Leitfähigkeit für Wasserdampf	Sonniges Wetter			
	1xO ₃		2xO ₃	
	Bu	Fi	Bu	Fi
Mai	0,57	0,30	0,69	0,01*
Juni	0,05*	0,53	0,01*	0,95
Juli	0,03*	0,24	0,01*	0,25
August	0,01*	0,61	0,03*	0,48
September	0,01*	0,49	0,13	0,35
Oktober	0,01*	0,26	0,01*	0,35
Leitfähigkeit für Wasserdampf	Humides Wetter			
	1xO ₃		2xO ₃	
	Bu	Fi	Bu	Fi
Mai	0,02*	0,11	0,04*	0,03*
Juni	0,02*	0,53	0,26	0,48
Juli	0,02*	0,77	0,01*	0,41
August	0,01*	0,60	0,38	0,44
September	0,05	0,24	0,47	0,32
Oktober	0,03*	0,14	0,12	0,09

Regen

Buche:

Für die Buchen konnte bei Regen unter 1xO₃ eine bis zu 57 % höhere Kronenleitfähigkeit_{THB} als Leitfähigkeit_{Modell} berechnet werden und unter 2xO₃ eine bis zu 92 % höhere Kronenleitfähigkeit_{THB} (siehe Tabelle 3.40). Die Leitfähigkeit_{Modell} wich dabei unter 1xO₃ mit $p = 0,01$ bis $0,05$ signifikant von der Kronenleitfähigkeit_{THB} ab (SPSS, Mittelwertvergleich, T-Test mit einer Stichprobe). Unter 2xO₃ lagen die Leitfähigkeiten_{Modell} nur in den Monaten Mai und Juli signifikant außerhalb des Wertebereiches der Kronenleitfähigkeiten_{THB}. In den übrigen Monaten war keine signifikante Abweichung vorhanden (siehe Tabelle 3.41).

Fichte:

Die Kronenleitfähigkeit_{THB} der Fichten bei Regen war unter 1xO₃ um bis zu 147 % höher als die Leitfähigkeit_{Modell} und unter 2xO₃ um bis zu 88 % höher (siehe Tabelle 3.40). Diese Abweichung der Leitfähigkeiten war – abgesehen vom Mai unter 2xO₃ – nicht signifikant (siehe Tabelle 3.41).

3.8.2.2 Ozonaufnahme

Sonniges Wetter:

Buche:

In den Monaten Juni bis September fiel die Ozonaufnahme_{THB} unter 1xO₃ bis zu 29 % geringer aus als die Ozonaufnahme_{Modell} (siehe Tabelle 3.42), dabei wich die

Ozonzufnahme_{Modell} mit $p = 0,01$ signifikant von der Ozonzufnahme_{THB} ab (siehe Tabelle 3.43), was für einen Einfluss der Grenzschichten auf die Ozonzufnahme_{THB} spricht. Dagegen fiel – bedingt durch die Parametrisierung des Ozonzufnahme-Modells – die Ozonzufnahme_{THB} im Mai um 37 % und im Oktober um 91 % höher aus als die Ozonzufnahme_{Modell}, eine signifikante Abweichung lag jedoch nicht vor (siehe Tabelle 3.43). Unter $2xO_3$ war im Juni, Juli und Oktober die Ozonzufnahme_{THB} im Vergleich zur Ozonzufnahme_{Modell} um 6 % bis 27 % reduziert, in den übrigen Monaten um bis zu 64 % erhöht (siehe Tabelle 3.42). Von Juni bis September lag eine signifikante Abweichung der Ozonzufnahme_{Modell} von der Ozonzufnahme_{THB} vor (siehe Tabelle 3.43).

Tabelle 3.42: Verhältnis der Ozonzufnahmesummen der Buchen und Fichten zwischen der auf der Xylemflussmessung im Stamm basierenden Methode (THB) und der auf dem Ozonzufnahme-Modell basierenden Methode bei sonnigem und humidem Wetter (Ozonzufnahmesummen des Ozonzufnahme-Modells = 100 %). Negative Vorzeichen bedeuten eine geringere Ozonzufnahme als die des Ozonzufnahme-Modells.

Vergleich der Ozonzufnahmesummen [%]				
Buche	Sonniges Wetter THB/Modell		Humides Wetter THB/Modell	
	1xO ₃	2xO ₃	1xO ₃	2xO ₃
Mai	37	64	222	220
Juni	-29	-21	19	28
Juli	-26	-27	-12	-18
August	-16	6	53	68
September	-1	12	25	48
Oktober	91	-6	204	86
Fichte	Sonniges Wetter THB/Modell		Humides Wetter THB/Modell	
	1xO ₃	2xO ₃	1xO ₃	2xO ₃
Mai	102	39	284	85
Juni	-17	-30	23	-10
Juli	-21	-45	-16	-48
August	-17	-34	11	-23
September	8	-32	35	-29
Oktober	44	-36	133	36

Fichte:

Für Fichte konnte auf Basis der Xylemflussmessung im Stamm im Mai unter $1xO_3$ eine um 102 % höhere Ozonzufnahme und unter $2xO_3$ eine um 39 % höhere Ozonzufnahme berechnet werden als auf Basis des Modells (siehe Tabelle 3.42). Dieser Unterschied war unter $1xO_3$ jedoch mit $p = 0,49$ nicht signifikant, unter $2xO_3$ dagegen lag mit $p = 0,02$ eine signifikante Abweichung der Ozonzufnahme_{Modell} von der Ozonzufnahme_{THB} vor (siehe Tabelle 3.43). In den Monaten Juni bis August fiel die Ozonzufnahme_{THB} der Fichten unter $1xO_3$ 17 % bis 21 % geringer aus als die Ozonzufnahme_{Modell}, im September und Oktober dagegen um 8 % bis 44 % höher als die Ozonzufnahme_{Modell}. Die Abweichung der

Ozonzufnahme_{Modell} von der Ozonzufnahme_{THB} war in den Monaten Juni bis September unter 1xO₃ signifikant (siehe Tabelle 3.43). Unter 2xO₃ war die Ozonzufnahme_{THB} von Juni bis Oktober um 30 % bis 35 % geringer als die Ozonzufnahme_{Modell}. Für die gesamte Vegetationsperiode wich unter 2xO₃ die Ozonzufnahme_{Modell} signifikant vom Wertebereich der Ozonzufnahme_{THB} ab (siehe Tabelle 3.43).

Tabelle 3.43: Signifikanzen, errechnet durch den Mittelwertvergleich der Ozonzufnahme_{Modell} mit der Ozonzufnahme_{THB}, (SPSS, Mittelwertvergleich, T-Test bei einer Stichprobe (* = p < 0,05)).

Ozonzufnahme	Sonniges Wetter			
	1xO ₃		2xO ₃	
	Bu	Fi	Bu	Fi
Mai	0,46	0,49	0,88	0,02*
Juni	0,01*	0,02*	0,01*	0,01*
Juli	0,01*	0,01*	0,01*	0,01*
August	0,01*	0,01*	0,02*	0,01*
September	0,01*	0,04*	0,05*	0,01*
Oktober	0,40	0,18	0,07	0,01*
Ozonzufnahme	Humides Wetter			
	1xO ₃		2xO ₃	
	Bu	Fi	Bu	Fi
Mai	0,02*	0,31	0,01*	0,20
Juni	0,09	0,08	0,01*	0,02*
Juli	0,02*	0,01*	0,01*	0,00*
August	0,48	0,03*	0,88	0,01*
September	0,01*	0,18	0,40	0,01*
Oktober	0,11	0,58	0,50	0,39

Regen

Buche:

Ein Vergleich der Ozonzufnahme der Buchen bei Regen, berechnet mit Hilfe der Xylemflussmessung im Stamm und dem Ozonzufnahme-Modell, zeigte unter 1xO₃ (mit Ausnahme von August) eine um bis zu 222 % höhere Ozonzufnahme_{THB} als Ozonzufnahme_{Modell} und unter 2xO₃ eine um bis zu 220 % höhere Ozonzufnahme_{THB} als Ozonzufnahme_{Modell} (siehe Tabelle 3.42). Dieser hohe prozentuale Unterschied liegt unter Umständen an der Parametrisierung des Modells, wonach bei humidem Wetter mitunter auf Grund der im Modell vorgegebenen exponentiellen Abhängigkeit der stomatären Leitfähigkeit von der Strahlung geringe Leitfähigkeiten berechnet werden. Unter 1xO₃ lag in den Monaten Juni, August und Oktober die Ozonzufnahme_{Modell} im Wertebereich der Ozonzufnahme_{THB}, in den Monaten Juni, August, und September wich die Ozonzufnahme_{Modell} signifikant von der Ozonzufnahme_{THB} ab (siehe Tabelle 3.43). Unter 2xO₃ lag nur in den Monaten Mai bis Juli eine signifikante Abweichung der Ozonzufnahme_{Modell} von der Ozonzufnahme_{THB} vor.

Fichte:

Die Ozonaufnahme_{THB} der Fichten unter $1xO_3$ fiel 11 % bis 284 % höher aus als die Ozonaufnahme_{Modell}, im Juli aber um 16 % geringer (siehe Tabelle 3.42). Eine signifikante Abweichung der Ozonaufnahme_{Modell} von der Ozonaufnahme_{THB} lag bei Fichte unter $1xO_3$ nur in den Monaten Juli und August vor. Unter $2xO_3$ war die Ozonaufnahme_{THB} der Fichten nur im Mai und Oktober höher als die Ozonaufnahme_{Modell} (siehe Tabelle 3.42), die übrigen Monate der Vegetationsperiode waren die Ozonaufnahmen_{THB} um bis zu 48 % geringer als die Ozonaufnahmen_{Modell}. Von Juni bis September wich die Ozonaufnahme_{Modell} unter $2xO_3$ signifikant von den Ozonaufnahmen_{THB} ab (siehe Tabelle 3.43).

4 Diskussion

4.1 Entwicklung der Phänologie unter Ozoneinfluss

Austrieb

Der Austrieb der Blätter und Nadeln wird durch genetische Faktoren, Temperatur und Tageslichtdauer gesteuert (Schütt et al. 1992), kann aber durch weitere abiotische und biotische Stressoren beeinflusst werden. Karnosky et al. (2005) berichten von einem verzögertem Blattaustrieb bei jungen Aspen, Ahorn und Birken unter erhöhter Ozonkonzentration. Dagegen konnte – wie in 3.2 dargestellt – für die **Buchen** im Kranzberger Forst kein signifikanter Ozoneinfluss in Form eines verzögerten Blattaustriebes festgestellt werden. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass die in vorliegender Studie untersuchten Bäume adult waren und nicht wie bei Karnosky et al. (2005) 7-jährige Bäume, die zudem zu den Pionier-Arten zählen, welche nach Skärby et al. (1998) empfindlicher auf Ozon reagieren als langsamer wachsende Klimax-Arten. Auch Nunn (2005) konnte für die Jahre 2000 bis 2002 keinen signifikanten Einfluss von Ozon auf das Austriebsverhalten der Buchen des Kranzberger Forstes feststellen. Für die Zeitreihe des Free-Air Ozonbegasungs-Experiments im Kranzberger Forst von 1999 bis 2006 lässt sich für Buche lediglich die Tendenz eines verzögerten Austriebs erkennen (Nunn, persönliche Mitteilung).

Somit muss für die Buchen im Kranzberger Forst Hypothese 3 (siehe Kap. 1.4) bezüglich des Austriebs im Jahr 2006 negiert werden. Ozon hatte auf das Austriebsverhalten der Buchen im Kranzberger Forst keinen signifikanten und einheitlichen Einfluss in Form eines verzögerten Austriebs unter $2xO_3$.

Die **Fichten** im Kranzberger Forst hatten, wie unter 3.2 berichtet, einen signifikant früheren Nadelaustrieb unter $2xO_3$ als unter $1xO_3$. Möglicherweise lag eine Art „Memory-Effekt“ der Nadeln gegenüber Ozon vor (Nunn 2005, Langebartels et al. 1998). Matyssek und Sandermann (2003) bezeichnen Memory-Effekte als typische Kennzeichen von chronischer Ozonbelastung. Diese können neben dem veränderten Austriebsverhalten auch zu Nadelverlusten bei Fichte und einer Zunahme der Johannistrieb-Ausbildung führen. Die Feststellung eines beschleunigten Austriebs der Fichten unter $2xO_3$ deckt sich mit den Erkenntnissen aus den Jahren 2000 bis 2002, in denen die Fichten des Kranzberger Forstes sowohl in den Sonnen- als auch in den Schattenkronen unter $2xO_3$ früher austrieben als unter $1xO_3$ (Nunn 2005). Ein konsistenter Ozoneinfluss konnte jedoch über die Jahre 2000 bis 2006 nicht beobachtet werden (Nunn, persönliche Mitteilung), zu sehr können Umweltbedingungen und andere Stressoren mögliche Ozoneffekte maskieren (Tausz et al. 2007). Hypothese 3 muss daher für die Fichten des Kranzberger Forstes abgelehnt werden; der Ozoneinfluss führte im Jahr 2006 nicht zu einem verzögerten Austrieb, sondern zu einem signifikant beschleunigten Austriebsverhalten unter $2xO_3$.

Seneszenz

Die herbstliche Blattverfärbung (Seneszenz) bei sommergrünen Pflanzen ist ein natürlicher Alterungsprozess. Er wird sowohl genetisch als auch durch abiotische Faktoren wie die Temperatur und abnehmende Tageslängen gesteuert (Lüttge et al. 1999). Stressoren wie Ozon und andere Schadstoffe können diesen Alterungsprozess beeinflussen. So berichten Matyssek und Sandermann (2003), dass erhöhte Ozonkonzentration zu einer verfrühten Seneszenz führen kann, wofür Chlorophyllabbau durch reaktive Sauerstoffpezies verantwortlich gemacht wird (Dizengremel 2001). Die durch Ozon induzierte Ethylenbildung (siehe Kap.1.2) leitet eine Gewebeerstörung ein (Nunn 2005, Dizengremel 2001). Die verfrühte Seneszenz ähnelt der herbstlichen zwar nicht in allen Teilprozessen, bedeutet aber für die Pflanze eine kürzere Vegetationsperiode (Matyssek und Sandermann 2003).

War im ersten Jahr der Ozonbehandlung (2000) in der Versuchsfläche Kranzberger Forst ein signifikant verfrühter herbstlicher Blattfall unter $2xO_3$ im Vergleich zu $1xO_3$ aufgetreten, so nahm der Unterschied im Seneszenzverhalten zwischen $1xO_3$ und $2xO_3$ in den folgenden Jahren kontinuierlich ab (Nunn 2005). Gielen et al. (2007) konnten noch für das Jahr 2005 an den Buchen der Versuchsanlage Kranzberger Forst den Trend einer beschleunigten Seneszenz unter erhöhtem Ozon feststellen. 2006 war schließlich kein signifikanter Ozoneinfluss mehr nachweisbar (SPSS, GLM, Univariate Varianzanalyse, $p = 0,435$ in der Schattenkrone und $p = 0,972$ in der Sonnenkrone), auch wenn der Zeitpunkt, an dem 50 % der Blätter seneszent waren, unter $2xO_3$ in der Schattenkrone immerhin noch 3 Tage und in der Sonnenkrone 1 Tag früher auftrat als unter $1xO_3$.

Dies steht allerdings in Widerspruch zu Untersuchungen von Karnosky et al. (2005), die an jungen Aspen, Ahorn und Birken eine beschleunigte Seneszenz unter erhöhter Ozonkonzentration feststellten. Möglich ist, dass sich die Buchen des Kranzberger Forstes an die chronisch erhöhte Ozonkonzentration während der Vegetationsperiode akklimatisierten.

Für die Zeitreihe der Ozonbegasung im Kranzberger Forst (2000 bis 2006) sind zwar Einflüsse des erhöhten Ozonregimes auf die Seneszenz zu erkennen, aufgrund fehlender Signifikanzen muss die Hypothese 3 aber für das Jahr 2006 abgelehnt werden.

4.2 Transpiration und deren Reaktion auf erhöhte Ozonkonzentration

Grundlegendes zur Transpiration

Im Rahmen der Untersuchung zu Transpirationsleistungen konnten in vorliegender Studie Unterschiede im Verhalten der Sonnen- und Schattenkrone beobachtet werden. Die Transpiration in den Schattenkronen der Buchen und Fichten fiel signifikant geringer aus als in den Sonnenkronen, was sich durch die Porometermessung bestätigen lässt, wonach die Schattenblätter unter $1xO_3$ gemittelt nur das 0,2-fache und unter $2xO_3$ das 0,3-fache der

Sonnenblätter transpirierten. Eine geringere Transpiration der Schattenkrone als die der Sonnenkrone wurde auch an Eiche (*Quercus ilex L.*) festgestellt (Manes et al. 2007). Manes et al. (2007) führten dies auf das geringere Lichtangebot in der Schattenkrone im Vergleich zur Sonnenkrone zurück. Dagegen halten Daudet et al. (1999) das VPD in der Luft als den „Lenker“ der Transpiration und erst zweitrangig das Licht. Schulze et al. (1985) konnten ebenfalls an Fichtennadeln der Schattenkrone eine geringere Transpiration messen als in der Sonnenkrone. Die Autoren (Schulze et al. 1985) führen zwar aus, dass Porometer- und Gaswechsellkuvettenmessungen eine genaue Messung des Gaswechsels ermöglichen, aber eher ein Maximum der Transpirationsraten wiedergeben. Eine Extrapolation dieser Daten auf Kronenebene ist schwierig, da in den Küvetten vom Freiland abweichende Grenzschichten, Licht- und Feuchtebedingungen herrschen (Schulze et al. 1985).

In vorliegender Studie wurde ein durchschnittlich 2-stündiger Versatz zwischen Sonnenaufgang und Beginn des Xylemflusses im Stamm der Buchen und Fichten ermittelt. Untersuchungen von Matyssek et al. (2009) zeigten an den Buchen und Fichten im Kranzberger Forst in den Jahren 1999 bis 2001 einen zeitlichen Versatz zwischen Sonnenaufgang und Beginn des Xylemflusses im Stamm von 3 bis 4 Stunden. Dieser zeitliche Versatz des Xylemflusses wurde auch in montanen Lagen bestätigt, jedoch nicht bei solitär stehenden Bäumen im Gebirge, deren Bestattung fast bis zum Boden reichte (Matyssek et al. 2009). Bereits Schulze et al. (1985) zeigten, dass die Transpiration aufgrund von Wasserspeichern, die sich im Kronenraum befinden, in der Krone zwei bis drei Stunden früher beginnt als der Xylemfluss im Stamm. Die Autoren (Schulze et al. 1985) berechneten, dass dieser Wasserspeicher bei Lärche und Fichte bis zu etwa 24 % des gesamten täglichen Wasserverlustes umfasst.

Burgess und Dawson (2008) stellten eine große Variabilität des Saffflusses in Ästen an verschiedenen Stellen der Krone dar. Beginn und Ablauf des Saffflusses hängen demnach von der täglichen Bestrahlung ab. Dies zeigte sich auch in vorliegender Studie: die Kronentranspiration zeigte eine höhere Korrelation mit PPF_D als mit VPD (siehe Kapitel 3.4.1.1). Wullschleger et al. (2000) machen deutlich, dass die tägliche Variation des Xylemflusses eines Baumes von Bestrahlung und Feuchtedefizit abhängt, die Variation des Xylemflusses von Baum zu Baum dagegen von der Kronenstruktur und Position eines jeden einzelnen Baumes im Bestand.

Bei Regen tritt, wie in vorliegender Studie gezeigt (siehe Kap. 3.7), eine Reduktion der Transpiration ein. Auch wenn die Baumkrone gänzlich durchfeuchtet ist, läuft die Transpiration auf geringem Niveau weiter (Wullschleger et al. 2000, Schulze et al. 1985, Moren et al. 2000).

Einfluss von Ozon auf die Transpiration

Von einer Reduktion der Transpiration von Fichtenästen, die in Gaswechsellküvetten erhöhter Ozonkonzentration ausgesetzt wurden, berichtet bereits Götz (1996). Dieser Effekt wurde durch die Kombination von Ozon und Trockenheit verstärkt (Götz 1996). Peters et al. (2008) wiesen ebenfalls eine ozonbedingte Reduktion der Transpiration an Kiefern (*Pinus canariensis*) nach. Auch He et al. (2007) und Wang et al. (2009) haben aufgrund des Ozoneinflusses bei *Ginkgo biloba* bzw. *Quercus mongolica* eine verringerte Transpirationsleistung festgestellt. Wang et al. (2009) führten diese Ergebnisse darauf zurück, dass durch Ozon ein partieller Stomataschluss resultiert, der eine zusätzliche Ozonaufnahme verhindert. Sie stellten eine Abnahme der interzellulären CO₂-Konzentration unter erhöhter Ozonkonzentration fest.

Auch an den Buchen im Kranzberger Forst wurde von Kitao et al. (2009) eine Abnahme der interzellulären CO₂-Konzentration und ein Schließen der Stomata unter chronisch erhöhter Ozonkonzentration (2xO₃) gemessen.

Diese Beobachtung konnte auch in vorliegender Studie gemacht werden: Die chronisch erhöhte Ozonkonzentration bewirkte bei den Buchen und Fichten im Kranzberger Forst eine Reduktion der Transpiration. Die Reduktion der Transpiration unter 2xO₃, basierend auf der Xylemflussmessung im Stamm (THB), fiel jedoch nicht signifikant aus (Buche: p = 0,394; Fichte: p = 0,347; SPSS, GLM Messwertwiederholung). Ähnliches gilt für die Xylemflussmessung an ausgewählten Ästen (SHB) und die Gaswechsellmessung an ausgewählten Blättern der Buchen: Sowohl in der Sonnen- als auch Schattenkrone fiel die Transpiration unter 2xO₃ zwar geringer aus als unter 1xO₃, jedoch nicht signifikant.

Aufgrund fehlender Signifikanzen bei allen angewandten Methoden zur Berechnung der Transpiration muss Hypothese 3 (Einfluss erhöhter Ozonkonzentration auf Transpiration und Leitfähigkeit) abgelehnt werden, wenngleich physiologische Reaktionen der Bäume auf das erhöhte Ozonregime in Form geringerer Transpirationen deutlich zu erkennen sind.

Auswirkungen einer reduzierten Transpiration unter erhöhtem Ozonregime

Die Reduktion der Transpiration unter erhöhter Ozonkonzentration war zwar bei beiden Baumarten nicht signifikant, stimmt jedoch im Hinblick auf eine Klimaerwärmung bedenklich. Vor dem Hintergrund hoch bleibender und z. T. ansteigender Ozon-Hintergrundkonzentrationen (Vingarzan 2004), könnte eine Reduktion der Transpiration infolge einer erhöhten Ozonkonzentration den Klimawandel an sich verstärken. Es könnte dann weniger Wasser an die Atmosphäre abgegeben werden, wodurch es zu einem weiteren Anstieg der Erdoberflächentemperatur, einer Abnahme der Feuchte und einer

Änderung regionaler Regenfälle und atmosphärischer Zirkulation kommen könnte (Wittig et al. 2009).

4.3 Leitfähigkeit für Wasserdampf und deren Reaktion auf erhöhte Ozonkonzentration

Grundlegendes zur Leitfähigkeit für Wasserdampf

Leitfähigkeiten stellen ein Maß für die mittlere Öffnungsweite der Stomata dar (Lüttge et al. 1999). Dabei wird das Öffnen und Schließen der Stomata durch Strahlung, Temperatur, Luft- und Bodenfeuchte sowie Nährstoffversorgung der Pflanzen beeinflusst (Götz 1996, Lüttge et al. 1999).

Unabhängig vom Ozonregime konnte in vorliegender Studie mit Hilfe der Xylemflussmessung auf Astebene (SHB) gezeigt werden, dass die Leitfähigkeit der Sonnenästen höher ausfällt als die der Schattenäste (siehe Kap. 3.4.2.2). Dies steht im Einklang mit Untersuchungen von Warren et al. (2007), die an den Buchen des Kranzberger Forstes eine zwei mal so hohe Leitfähigkeit in Sonnenblättern wie in Schattenblättern ermittelten. Hierzu stehen Untersuchungen von Moren et al. (2000) im Widerspruch: Die Autoren maßen bei gegebenem Licht und VPD in den Schattenkronen von Fichten und Kiefern eine höhere Leitfähigkeit als in den Sonnenkronen.

Nach Granier et al. (2000) variiert die Leitfähigkeit für Wasserdampf hauptsächlich mit der Strahlung. Die Autoren untersuchten die Leitfähigkeit an verschiedenen Waldstandorten und fanden heraus, dass LAI (Leaf Area Index) einen größeren Einfluss auf die Leitfähigkeit hat als die Artzusammensetzung eines Bestandes.

Einfluss von Ozon auf die Leitfähigkeit für Wasserdampf

Zahlreiche Wissenschaftler haben bereits eine Reduktion der Leitfähigkeit für Wasserdampf unter Ozoneinfluss nachgewiesen. Nach Nali et al. (2004) ist unter erhöhtem Ozon die osmotische Kontrolle der Schließzellen gestört. Wieser und Emberson (2004) berichten von einer signifikanten Reduktion der Leitfähigkeit von Fichte ab einer mittleren Ozonkonzentration von über 120 nl l^{-1} . Auch Paoletti und Grulke (2005) berichten von Reduktionen der stomatären Leitfähigkeit unter erhöhter Ozonkonzentration, was jedoch nicht als eine direkte Reaktion auf das Ozon angesehen wird, sondern als Folge einer erhöhten internen CO_2 -Konzentration durch eine Hemmung der Kohlenstoffassimilierung. Das Schließen der Stomata ist nach Matyssek et al. (2010c) mit einer Zunahme des photosynthetischen WUE und des $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Verhältnisses (Kitao et al. 2009) verbunden. Havranek et al. (1990) konnten zeigen, dass bei jungen Fichten eine Abnahme der stomatären Leitfähigkeit um 10 % bis 30 % vorlag, wenn sie im Vergleich zur Umgebungsluft einer erhöhten Ozonkonzentration (über 100 nl l^{-1}) ausgesetzt wurden. Die Autoren führten diese Reaktion auf die gleichzeitig reduzierte Carboxylierungs-Effizienz zurück, woraus sie

den Schluss zogen, dass die CO₂-Fixierung als erstes von Ozon beeinträchtigt wird. Unter kontrollierten Bedingungen führt Ozonexposition zu einer erhöhten Zellpermeabilität für K⁺, was das Schließen der Stomata zur Folge hat (Heath und Taylor, 1997). Taylor et al. (1988) nennen als Ursache für die Reduktion der stomatären Leitfähigkeit unter Ozonbehandlung die erhöhte Produktion von Ethylen. Maier-Maercker (1997) geht davon aus, dass die Stomata ozongeschädigter Fichtennadeln in Folge einer reduzierten Lignifizierung der Zellwände nicht mehr gänzlich schließen können. In Untersuchungen von He et al. (2007) zeigte sich mit Hilfe von Porometermessungen an Gingko-Bäumen eine reduzierte Leitfähigkeit unter erhöhter Ozonkonzentration. Warren et al. (2007) präsentierten eine signifikante Reduktion der stomatären Leitfähigkeit der Buchen im Kranzberger Forst unter 2xO₃ von 25 % im Vergleich zu 1xO₃. Auch Löw et al. (2006 und 2007) konnten an denselben Buchen geringere Leitfähigkeiten unter erhöhtem Ozon messen. In vorliegender Studie konnte eine nicht signifikant geringere stomatäre Leitfähigkeit unter 2xO₃ anhand der Gaswechselformung auf Blattebene bei Buche gezeigt werden (siehe Kap. 3.5.2). Zudem war die Kronenleitfähigkeit der Buchen und Fichten unter 2xO₃ reduziert, jedoch nicht signifikant.

Als physiologische Reaktion auf das erhöhte Ozon trat zwar tatsächlich eine Reduktion der Kronenleitfähigkeit bei den Buchen und Fichten auf, da diese Reduktion jedoch nicht signifikant war, muss Hypothese 3 (Einfluss des Ozons auf Transpiration und Leitfähigkeit) abgelehnt werden.

Auswirkungen einer reduzierten Leitfähigkeit unter erhöhtem Ozonregime

Eine unter Ozon reduzierte Leitfähigkeit für Wasserdampf kann nicht nur eine reduzierte Abgabe von Wasserdampf an die Umgebung, sondern mitunter auch eine reduzierte Assimilierung von CO₂ bedeuten. Eine zusätzlich unter Ozon erhöhte Atmung und reduzierte Photosyntheseleistung führen zu einem reduzierten Kohlenstoffgewinn (Matyssek et al. 2010c). Dadurch kann es zu einer Reduktion des Stammwachstums kommen.

4.4 Ozonaufnahme in den beiden Ozonregimen

Grundlegendes zur Ozonaufnahme

Mit Hilfe der Xylemflussmessung auf Astebene (SHB) konnte für Buche und Fichte gezeigt werden, dass in den Schattenkronen eine signifikant geringere Ozonaufnahme stattfand als in den Sonnenkronen. Nach Körner und Perterer (1988) führt ein Mehr an Licht zu einer Öffnung der Stomata und somit zu einer höheren Ozonaufnahme, weswegen in der Sonnenkrone die Ozonaufnahme höher ausfällt als in der Schattenkrone. Nach Wieser und Havranek (1993) waren die Stomata von Fichten in der Sonnenkrone weiter offen als in der Schattenkrone, so dass in der Sonnenkrone 75 % der Gesamt-Baum-Ozonaufnahme

stattfind. Die Autoren zeigten, dass durch Stomataschluss die Ozonaufnahme in den Schattenkronen von Fichten früher begrenzt wurde als in den Sonnenkronen; mit Zunahme des VPD's setzte das Schließen der Stomata ein (Wieser und Havranek 1993).

In den Schattenkronen stellt die Aufnahme von Ozon ein größeres Gefährdungspotential für die Pflanze dar, da in Schattenkronen aufgrund der Licht-Limitierung die Entgiftungskapazität bei oxidativem Stress geringer ausfällt als in Sonnenkronen (Kolb und Matyssek 2001). Auch in den Schattenkronen von Eichen (*Quercus ilex L.*) wurde aufgrund des geringeren Lichtangebotes eine geringere Ozonaufnahme als in Sonnenkronen gemessen (Manes et al. 2007).

Ein weiteres Verfahren zur Berechnung der Ozonaufnahme ist die Eddy-Covarianz-Methode. Mit Hilfe dieser Methode wird der gesamte Ozonfluss auf Bestandesebene ermittelt, der sich aus stomatärem und nicht-stomatärem Ozonfluss zusammensetzt. Letzterer ist die Deposition des Ozons auf allen externen Oberflächen der Pflanzen und auf Böden (Cieslik 2004). Dieser nicht-stomatäre Ozonfluss macht nach Untersuchungen von Nunn et al. (2010) etwa 70 % des gesamten Ozonflusses aus. Mikkelsen et al. (2000) und Gerosa et al. (2005) konnten zeigen, dass der gesamte Ozonfluss (Eddy-Covarianz-Verfahren) morgens höher ausfällt als am Nachmittag. Gerosa et al. (2005) begründen den hohen Ozonfluss am Morgen mit dem Vorhandensein von chemischen Senken für Ozon, wie z. B. NO, und Mikkelsen et al. (2000) mit der morgens verstärkten Produktion von biogenen VOC's, die ebenfalls als Ozonsenken wirken können.

Einfluss der Ozonkonzentration auf die Ozonaufnahme

Warren et al. (2007) stellten fest, dass bei den Buchen des Kranzberger Forstes der Unterschied in der Ozonaufnahme zwischen $1xO_3$ und $2xO_3$ geringer ausfiel als zwischen Sonnen- und Schattenkrone. In vorliegender Studie war die Ozonaufnahme der Buchen und Fichten unter $2xO_3$ im Vergleich zu $1xO_3$ signifikant erhöht. So fiel die Ozonaufnahme der Buchen mit $p = 0,000$ (SPSS, GLM, Messwertwiederholung) um das 1,5-fache höher aus als unter $1xO_3$, und die Ozonaufnahme der Fichten mit $p = 0,000$ um das 1,2-fache höher.

Die höchsten Ozonaufnahmen wurden in beiden Ozonregimen im Frühjahr (Mai/Juni) ermittelt, die geringsten im Oktober. Die Ursache für die hohen Ozonaufnahmen im Frühjahr sind in erster Linie die gute Wasserversorgung der Böden im Kranzberger Forst sowie die hohen Ozonkonzentrationen. Durch die gute Wasserversorgung waren die Bäume nicht gezwungen ihre Stomata zu schließen und konnten somit das Ozon aufnehmen. Die Ozonkonzentrationen in den Monaten Mai und Juni waren zwar nicht so hoch wie die im Juli, aber deutlich höher als in den Monaten August bis September (siehe Ergebnisse Kap. 3.1). Untersuchungen von Karlsson et al. (2007b) zeigen ein ähnliches Bild für skandinavische Länder, wo im April hohe Ozonkonzentrationen auftreten und in deren Folge hohe

Ozонаufnahmen für Fichten berechnet wurden. Hinzu kommt, dass junge Blätter/Nadeln im Frühjahr höhere Leitfähigkeiten und somit eine höhere Ozonaufnahme haben als alte Blätter/Nadeln (Nunn et al. 2006). Junge Blätter/Nadeln sind jedoch gegenüber Ozon besonders empfindlich, wodurch es zu einer vermehrten Bildung von Blattschädigungen in Form von Nekrosen kommt (Nunn 2005).

4.5 Methodenvergleich

4.5.1 Xylemflussmessung im Stamm versus Gaswechselformung in der Astküvette

Durch einen Vergleich der physiologischen Parameter, die aus der Xylemflussmessung im Stamm (THB) und aus der Gaswechselformung in der Astküvette ermittelt wurden, wird das Verfahren mit „realer Grenzschicht“ (THB) dem Verfahren mit „minimaler Grenzschicht“ an den Blättern (Astküvette) gegenübergestellt.

Die im Rahmen vorliegender Studie ermittelte geringere Ozonaufnahme_{THB} auf Kronenebene der **Buchen** im Vergleich zur Ozonaufnahme_{Astküvette} steht im Einklang mit Untersuchungen von Matyssek et al. (2004) und Wieser et al. (2008). Beide Autorenguppen geben zu bedenken, dass die Berechnung der Ozonaufnahme mit Hilfe von Gaswechselformungen eine potentiell maximale Ozonaufnahme wiedergibt. Von Willert et al. (1995) und Wullschleger et al. (1998) begründen dies mit stark minimierten Grenzschichten in Gaswechselformungen. Die Anwesenheit von Grenzschichten bewirkt einen diffusiven Widerstand, der die Transpiration vermindert (Wullschleger et al. 1998). Dies ist ein Grund, weswegen in vorliegender Studie die Kronentranspiration_{THB} der Buchen signifikant geringer ausfiel als die Transpiration_{Astküvette}. Dieselbe Erklärung trifft auch für die geringere Kronenleitfähigkeit_{THB} und Ozonaufnahme_{THB} als Leitfähigkeit_{Astküvette} und Ozonaufnahme_{Astküvette} bei Buche zu. Ein zweiter Grund für die geringere Kronentranspiration und Kronenleitfähigkeit aus der Xylemflussmessung im Stamm im Vergleich zu der Transpiration und Leitfähigkeit der Gaswechselformungen in der Astküvette ist die Tatsache, dass mit Hilfe der Gaswechselformung nur Aussagen zu einem Ast getroffen werden können – in vorliegender Studie zu einem Sonnenast. Bei Anwendung der Xylemflussmessung im Stamm sind dagegen inhärent die unterschiedlichen physiologischen Eigenschaften der Sonnen- und Schattenkrone enthalten, weswegen hier Kronentranspiration und Kronenleitfähigkeit geringer ausfallen als die des Sonnenastes. Ein einzelner Ast ist nicht repräsentativ für eine gesamte Baumkrone. Daher sehen Wullschleger et al. (1998), Dawson (1996) und Schulze et al. (1985) die alleinige Messung des Gaswechsels eines Astes und die anschließende Hochrechnung auf die gesamte Baumkrone als problematisch an. Mit einem Sonnenast als Ausgangspunkt kommt es zu einer Überschätzung der Ozonaufnahme auf Kronenebene (Wullschleger et al. 1998,

Dawson 1996, Schulze et al. 1985). Darüber hinaus können die unterschiedlichen Lichtverhältnisse in Sonnen- und Schattenkronen ein unterschiedliches Öffnen der Stomata bewirken (Körner und Perterer 1988). Burgess und Dawson (2008) erläutern, dass der Xylemfluss im Stamm auf die maximale Kronenbestrahlung reagiert, welche sich aber von der Bestrahlung einzelner Äste unterscheidet.

Bei den **Fichten** im Kranzberger Forst fiel die Kronentranspiration_{THB}, Kronenleitfähigkeit_{THB} und Ozonaufnahme_{THB} höher aus als die Transpiration_{Astküvette}, Kronenleitfähigkeit_{Astküvette} und Ozonaufnahme_{Astküvette}. Eine mögliche Ursache ist, dass der für die Astküvette gewählte Sonnenast weder für die Sonnenkrone noch für die gesamte Baumkrone repräsentativ war, weswegen er niedrigere Werte erreichte als die Krone. Des Weiteren wurde der Fichtenast im Verlauf eines Tages teilweise beschattet, was die geringe Transpiration erklären könnte. Eine weitere Ursache könnte in einer Schädigung der Stomata liegen. Maier-Maercker (1998) stellten an ozonbegasten Fichtenzweigen ein verzögertes Schließen der Stomata fest, wodurch hohe Transpirationsraten erreicht wurden. Durch eine solche Störung kann es zu Trockenstress kommen, wie es McLaughlin et al. (2007a, b) für Eichen, Kiefern und Pappeln berichten. Die Stomata alter Nadeljahrgänge können möglicherweise durch das chronisch erhöhte Ozonregime der Vorjahre bereits geschädigt sein, wie Karlsson et al. (2000) für Fichte folgern. Die in vorliegender Studie höhere Kronenleitfähigkeit_{THB} als Leitfähigkeit_{Astküvette} steht im Widerspruch zu Untersuchungen von Ryan et al. (2000), die an *Pinus ponderosa* feststellten, dass die Kronenleitfähigkeit geringer ausfällt als die Nadelleitfähigkeit in der Sonnenkrone.

Regen bewirkte keine Änderung des Verhältnisses der Xylemflussmessung im Stamm und Gaswechselformung in der Astküvette bei Buche und Fichte und der jeweils abgeleiteten Ozonaufnahme. Granier et al. (2000) maßen bei Regen eine im Vergleich zu sonnigem Wetter reduzierte Transpiration. Moren et al. (2000) zeigten an 70-jährigen Fichten und Kiefern, dass die Transpiration trotz eines starken Regenschauers anhielt, wenn auch geringer als bei sonnigem Wetter.

Im Vergleich zur Gaswechselformung in der Astküvette ist der Xylemflussmessung im Stamm der Vorzug zu geben, da letztere das Integral der Äste der gesamten Baumkrone in Anwesenheit der Grenzschichten erfasst und somit die ökophysiologisch relevante Transpiration wiedergibt, als Basis für die hieraus berechnete Leitfähigkeit und Ozonaufnahme.

Zudem scheidet bei Anwendung der Xylemflussmessung im Stamm zur Ermittlung der Ozonaufnahme eine mögliche Fehlerquelle durch die Auswahl eines nicht repräsentativen Astes für die Gaswechselfmessung in der Astküvette aus.

Hypothese 1 (Grenzschichten wirken sich reduzierend auf die Ozonaufnahme aus) wird für Buche bei sonnigem und humidem Wetter bestätigt. Für Fichte muss die Hypothese negiert werden. Die Ozonaufnahme_{THB} der Fichten fiel höher aus als die Ozonaufnahme_{Astküvette}. Eine Schädigung der Stomata der alten Nadeln durch das chronisch erhöhte Ozon wird als mögliche Ursache angesehen.

4.5.2 Xylemflussmessung im Stamm versus Ozonaufnahme-Modell

Martin et al. (1999) und Wullschleger et al. (1998) berichten, dass der Einfluss der stomatären Bewegung auf die Transpiration durch den Grenzschichtwiderstand gemindert wird. In der Parametrisierung des in vorliegender Studie angewandten Ozonaufnahme-Modells wurden Grenzschichten nicht berücksichtigt (Emberson et al. 2000a, Nunn 2005).

Bei sonnigem Wetter fiel die Kronenleitfähigkeit_{THB} für Wasserdampf der **Buchen** unter $1xO_3$ signifikant und unter $2xO_3$ nur in einigen Monaten signifikant geringer aus als die Leitfähigkeit_{Modell}.

Ein weiterer Grund für die nach der Modellrechnung erhöhten Leitfähigkeit_{Modell} und Ozonaufnahme_{Modell} ist, dass das Modell keine Aussagen zur Beschaffenheit der gesamten Baumkrone treffen kann, sondern nur die Sonnenkrone berücksichtigt. Das Ozonaufnahme-Modell wurde in vorliegender Studie mit den Leitfähigkeiten des Sonnenastes in der Astküvette parametrisiert. Schattenkronen, die bei Buchen etwa 70 % der gesamten Baumkrone ausmachen (Patzner 2004), zeichnen sich durch eine geringere Leitfähigkeit und somit auch Ozonaufnahme aus als Sonnenkronen (Wieser und Havranek 1993). Dadurch fallen im Mittel die Leitfähigkeit und die Ozonaufnahme der gesamten Baumkrone geringer aus als bei alleiniger Betrachtung der Sonnenkrone. Die in der Krone herrschenden unterschiedlichen Lichtverhältnisse können eine unterschiedlich starke Reaktion der Leitfähigkeit der Blätter auf Ozon hervorrufen (Paoletti 2007). Die unterschiedliche Lichtverteilung innerhalb der Baumkrone und die unterschiedliche Reaktion von Licht in Kombination mit Ozon können durch das Modell nicht erfasst werden. Matyssek et al. (2004) berichten, dass die auf Gesamtblattfläche bezogene Leitfähigkeit nicht nur zwischen unterschiedlichen Baumarten variiert, sondern auch innerhalb eines Baumes. Unterschiedliche mikroklimatische Bedingungen in der Sonnen- und Schattenkrone beeinflussen den Blattaufbau und die Physiologie der Stomata und somit die Ozonaufnahme. Zum Teil waren im Mai und Oktober die Kronenleitfähigkeit_{THB} und Ozonaufnahme_{THB} höher als die Leitfähigkeit_{Modell} und Ozonaufnahme_{Modell}. Die Unterschätzung der Leitfähigkeit und

Ozонаufnahme durch das Modell im Mai liegt an der Parametrisierung des Ozonaufnahme-Modells. Beginnend mit Austriebsstufe 3, dem Start der Vegetationsperiode, berechnet das Modell eine stomatäre Leitfähigkeit, die erst 50 Tage nach Erreichen der Austriebsstufe 3 ihr Maximum erreicht (Nunn 2005). Auch Altimir et al. (2004) stellten im Frühjahr an Kiefern eine Unterschätzung der Leitfähigkeit von Kiefern durch das Ozonaufnahme-Modell von 25 % bis 60 % fest. Die Ursache für die Unterschätzung der stomatären Leitfähigkeit durch das Modell im Oktober liegt in vorliegender Studie in der Parametrisierung der phänologischen Funktion (Nunn 2005), wonach bereits 50 Tage vor Erreichen des 50 %-Seneszenzstadiums eine altersbedingte stomatäre Limitierung der Leitfähigkeit einsetzt und mit Erreichen des 50 %-Seneszenzstadiums das Ende der Vegetationsperiode und damit der Endwert der phänologischen Funktion erreicht wird. Im Gegensatz dazu konnte mit Hilfe der Xylemflussmessung im Stamm im Oktober die ökophysiologisch relevante vorherrschende Leitfähigkeit ermittelt werden.

Von Juni bis August unter $1xO_3$ und von Juni bis Oktober unter $2xO_3$ fiel die Kronenleitfähigkeit_{THB} und Ozonaufnahme_{THB} der **Fichten** geringer aus als die Leitfähigkeit_{Modell} und Ozonaufnahme_{Modell}. Ursache ist der Einfluss der Grenzschichten. In den restlichen Monaten war die Kronenleitfähigkeit_{THB} höher als die Leitfähigkeit_{Modell}. Dies liegt im Mai zum einen an der Parametrisierung des Modells, wonach das Modell im Frühjahr erst mit Erreichen der Austriebsstufe 3 eine stomatäre Leitfähigkeit berechnet, wohingegen mit Hilfe der Xylemflussmessung im Stamm die real vor Ort aufgetretene Kronenleitfähigkeit erfasst werden kann. Zum anderen aber spielt bei Fichte auch die Tatsache eine Rolle, dass mit Hilfe der Xylemflussmessung im Stamm alle Nadeljahrgänge erfasst werden, somit auch die alten Nadeln, die nach Falge et al. (2000) eine bis zu 50 % geringere Leitfähigkeit haben können als junge, während der laufenden Vegetationsperiode gebildete Nadeln.

Zudem fällt die Kronenleitfähigkeit_{THB} und Ozonaufnahme_{THB} geringer aus als Leitfähigkeit_{Modell} und Ozonaufnahme_{Modell}, da mit Hilfe der Xylemflussmethode die gesamte Baumkrone erfasst wird, wohingegen das in vorliegender Studie angewandte Modell nur die Sonnenkrone berücksichtigt, da bei der Parametrisierung der Leitfähigkeit_{Modell} die auf Blattebene ermittelten Leitfähigkeiten von Sonnenblättern verwendet wurden.

Auch bei Regen fielen für die gesamte Vegetationsperiode gemittelt die Kronenleitfähigkeit_{THB} und Ozonaufnahme_{THB} der Buchen und Fichten in beiden Ozonregimen höher aus als die Leitfähigkeit_{Modell} und Ozonaufnahme_{Modell}. Grund hierfür ist, dass die Stomata bei Regen zumindest partiell offen sind. So zeigten Lange et al. (1971), dass sich die Stomata bei zunehmender Luftfeuchte öffnen. Das Ozonaufnahme-Modell konnte in vorliegender Studie die bei Regen offenen Stomata nicht wiedergeben: das Ozonaufnahme-Modell besitzt eine Lichtfunktion, wonach eine Veränderung der stomatären Leitfähigkeit durch die unterschiedliche Strahlungsintensitäten beschrieben wird. Eine

maximale stomatäre Leitfähigkeit kann demnach nur bei ausreichender Strahlungsintensität erreicht werden. Letztere fällt jedoch bei Regen gering aus und entsprechend niedrig ist auch die stomatäre Leitfähigkeit. Zusätzlich hängt die stomatäre Leitfähigkeit von der Temperatur ab, was im Ozonaufnahme-Modell durch die Temperaturfunktion beschrieben wird. Das Temperaturoptimum in der Temperaturfunktion der Buchen liegt nach Nunn (2005) bei 21°C und der Fichte bei 19°C. Ein Unterschreiten dieser Temperaturen z. B. bei Regen geht mit einer Reduktion der stomatären Leitfähigkeit im Ozonaufnahme-Modell einher.

Durch den Vergleich der Werte des Ozonaufnahme-Modells mit denen der Xylemflussmessung im Stamm zeigte sich, dass letztere Messmethode die vor Ort herrschenden Einflussgrößen berücksichtigt. Das Ozonaufnahme-Modell berechnet die Ozonaufnahme ohne den Einfluss der Grenzschichten, zudem geht es von nicht naturgetreuen Annahmen im Frühjahr und Herbst aus. Dies ist besonders für Länder der mittleren und nördlichen geographischen Breiten von Bedeutung, denn dort treten im Frühjahr hohe Ozonkonzentrationen in Kombination mit Klimabedingungen auf, die nach Simpson et al. (2007) ein Öffnen der Stomata begünstigen. Die Bäume sind dann in der Lage, Ozon aufzunehmen, was mit Hilfe der Xylemflussmessung ermittelt werden kann.

Auch wenn bei Buche unter sonnigem Wetter ein Grenzschichteneinfluss auf die Ozonaufnahme festgestellt wurde, kann Hypothese 1 (Grenzschichteneinfluss führt zu einer Reduktion der Ozonaufnahme) nicht bestätigt werden, da bei Regen die Leitfähigkeit_{THB} und Ozonaufnahme_{THB} höher ausfielen als die Leitfähigkeit_{Modell} und Ozonaufnahme_{Modell} und somit kein limitierender Grenzschichteneinfluss nachzuweisen war.

Obgleich für die Fichten unter 2xO₃ eine geringere Ozonaufnahme_{THB} als Ozonaufnahme_{Modell} berechnet wurde, muss Hypothese 1 für sie ebenfalls abgelehnt werden, da unter 1xO₃ kein durchgehender Einfluss der Grenzschichten auf die Ozonaufnahme festgestellt werden konnte. Über die gesamte Vegetationsperiode gemittelt, hatten die Fichten hier eine höhere Ozonaufnahme_{THB} als Ozonaufnahme_{Modell}. Zudem fiel bei Regen die Ozonaufnahme_{THB} der Fichten in beiden Ozonregimen höher aus als die Ozonaufnahme_{Modell}.

4.6 Buche und Fichte: Gesamtbetrachtung

Der Zeitpunkt des Nadel- bzw. Blattaustriebes trat bei Fichte später ein als bei Buche (siehe Kap. 4.1). Im Gegensatz zur Buche war der Austrieb bei Fichte unter $2xO_3$ signifikant beschleunigt. Die Buchen erreichten unter $1xO_3$ und $2xO_3$ signifikant höhere Transpirationssummen als die Fichten. Dies berechneten auch Matyssek et al. (2009) für den Kranzberger Forst, wohingegen sie in montaner Lage nur mehr die Tendenz eines solchen Unterschiedes der Transpiration zwischen den Baumarten feststellen konnten. Die Leitfähigkeit für Wasserdampf und die Ozonaufnahme der Buchen fielen in vorliegender Studie ebenfalls höher aus als die der Fichten. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen auch Matyssek et al. (2004) bei Untersuchungen im Kranzberger Forst. In vorliegender Studie nahmen die Buchen unter $1xO_3$ und $2xO_3$ signifikant mehr Ozon auf als die Fichten. Hypothese 2 (die Ozonaufnahme bei Buche fällt höher aus als bei Fichte) kann somit bestätigt werden.

Bei der Ermittlung der Leitfähigkeit mit Hilfe der Gaswechselformel in der Astkuvette als auch mit Hilfe des Porometers zeigte sich für Buche (bezogen auf die projizierte Blattoberfläche) und Fichte (bezogen auf die gesamte Nadeloberfläche) ein unterschiedlicher Einfluss der Grenzschichten. Bei der Ermittlung des Gaswechsels in der Astkuvette wurde die Leitfähigkeit zunächst ohne Grenzschichten erfasst (die Luftzirkulation in den Küvetten baute die Grenzschichten gänzlich ab), die Grenzschichten wurden erst später nach der Formel von von Willert et al. (1995) berechnet. Auf diese Weise liegt ein Datensatz von Leitfähigkeiten mit und ohne Grenzschichten vor.

Abbildung 4.1 zeigt, dass der in der Kuvette eingeschlossene Buchenast ohne den Einfluss von Grenzschichten im Durchschnitt um 16 % höhere Leitfähigkeiten erreichte als mit Grenzschichten. Dabei wurde der Unterschied zwischen den Leitfähigkeiten mit und ohne Grenzschicht im Laufe der Vegetationsperiode größer. Der in der Kuvette eingeschlossene Fichtenast dagegen erreichte mit und ohne Grenzschichten ähnliche Leitfähigkeiten: so fielen die Leitfähigkeiten ohne Grenzschichten im Durchschnitt 1 % höher aus als die mit Grenzschichten.

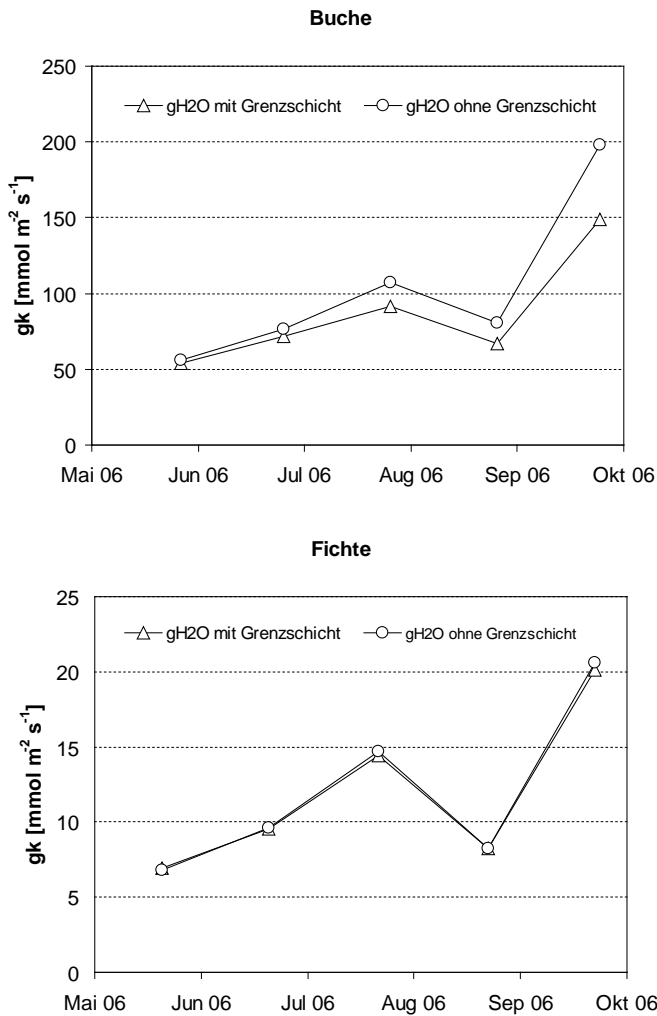


Abbildung 4.1: Verlauf der Leitfähigkeiten mit und ohne Grenzschicht bei Buche (oben) und Fichte (unten) in der Vegetationsperiode 2006. Die y-Achsen sind unterschiedlich skaliert.

Die anhand der Gaswechselformung auf Blattebene berechnete Ozonaufnahme fiel bei Buche höher aus als die mit Hilfe der Xylemflussmessung im Stamm berechnete (siehe Abbildung 4.2). Der Grund hierfür liegt darin, dass das Porometer den Gaswechsel ohne Grenzschichten misst, da die Grenzschichten mit Ansetzen der Blattküvette gänzlich zerstört werden (Wullschleger et al. 1998, Pleijel et al. 1996). Damit steht dieses Ergebnis im Einklang mit den Ergebnissen aus dem Vergleich THB versus Gaswechselformung in der Astküvette, wonach sich bei Buche Grenzschichten in Form einer geringeren Ozonaufnahme auswirken.

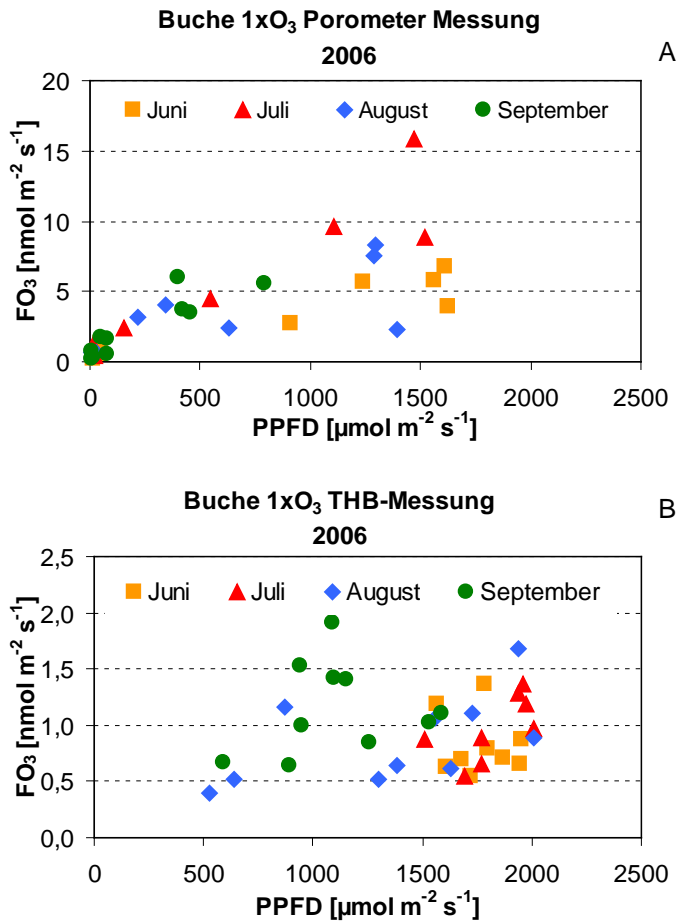


Abbildung 4.2: Gegenüberstellung von Strahlung und der monatlich aufsummierten Ozonaufnahme (FO₃) von Buche (1xO₃), berechnet mit Hilfe (A) des Porometers, (B) der Xylemflussmessung im Stamm.

Die Ozonaufnahme-Werte der Fichten fielen bei der Xylemflussmessung im Stamm höher aus als bei der Porometrie (siehe Abbildung 4.3). Dieses Ergebnis steht im Einklang mit dem Vergleich THB und Gaswechsellmessung in der Astküvette bei Fichte und mit den oben dargestellten Leitfähigkeiten in der Astküvette. Da bei den Fichten die Grenzschichten von geringerer Mächtigkeit sind, stellen sie nicht einen solchen Widerstand für die Ozonmoleküle dar, wie bei den Buchen (Karlsson et al. 2007b, Martin et al. 1999).

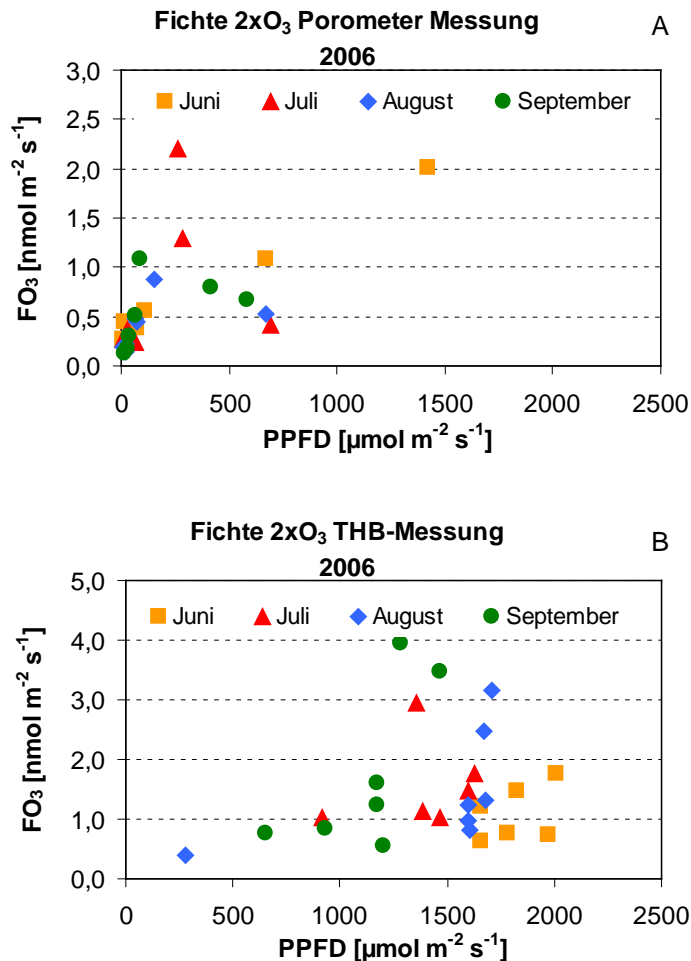


Abbildung 4.3: Gegenüberstellung von Strahlung und der monatlich aufsummierten Ozonaufnahme (FO_3) von Fichte ($2x\text{O}_3$), berechnet mit Hilfe (A) des Porometers, (B) der Xylemflussmessung im Stamm.

In der Literatur wird über die Ozonempfindlichkeit der Buchen und insbesondere der Fichten diskutiert (Reich 1987, Baumgarten et al. 2009, Sandermann 1996, Rennenberg et al. 2004, Ammer et al. 2005). Besonders in Anbetracht einer bevorstehenden Klimaerwärmung wird in Bayern auf die autochthone Buche gesetzt (Matyssek et al. 2009, Baumgarten et al. 2009). Sie gilt als konkurrenzfähigste Baumart Mitteleuropas, da sie sich besser als andere Baumarten an Klimaänderungen anpassen können soll und zudem als wenig empfindlich gegenüber pilzlichen und tierischen Schädlingen angesehen wird (Walentowski et al. 2004). Erreichten die Buchen in vorliegender Studie ihre maximalen Transpirationssummen unter $1x\text{O}_3$ und $2x\text{O}_3$ im Juli, so erreichten die Fichten dies bereits im Mai/Juni. Fichten als immergrüne Nadelbäume können schon im Frühjahr Gaswechsel betreiben, also in Zeiten in denen die Blätter der laubwerfenden Buche noch nicht vorhanden bzw. vollständig ausgebildet sind. Im Frühjahr sind jedoch auch die Ozonkonzentrationen hoch, wodurch die Fichten relativ viel Ozon aufnehmen können, zumal die klimatischen Bedingungen und die Wasserverfügbarkeit im Frühjahr ein Öffnen der Stomata oftmals begünstigen. Im

Winterhalbjahr nehmen die Fichten trotz geringerer Ozonkonzentration als im Sommer etwa 1/5 der jährlichen Ozon-Dosis auf (Nunn 2005). Buchen nehmen zwar in der Vegetationsperiode deutlich mehr Ozon auf als Fichten, dafür aber außerhalb der Vegetationsperiode keines, da das Ozon nur über die Stomata aufgenommen werden kann (Cieslik 2004, Laisk 1989). Eine Aufnahme von Ozon über Lentizellen der Rinde ist nach Wittmann et al. (2007) vernachlässigbar. Körner und Perterer (1988) schätzten die mittägliche Leitfähigkeit für Wasserdampf und Photosyntheserate von Fichten während der Wintersaison auf 50 % der maximalen Sommeraktivität an. Im Hochwinter erreichten die Fichten 5 % bis 10 % der Ozonaufnahme vom Sommer (Körner und Perterer 1986). Dabei wird die Aufnahme von Schadgasen im Winter primär von der Temperatur gesteuert (Körner und Perterer 1986). Problematisch ist, dass die Fichten in dieser Jahreszeit eine geringere Photosynthese betreiben und ihnen damit weniger Energie zum Abbau und zur Entgiftung des Ozons zur Verfügung steht (Matyssek et al. 1995b, 2008, Nunn 2005).

Einen gewissen Schutz erfahren die Fichten, wenn in Wintermonaten in mindestens drei Nächten hintereinander eine mittlere Minimaltemperatur von -4°C erreicht wird, denn dann bleiben die Stomata auch tagsüber unabhängig vom Wetter geschlossen (Körner und Perterer 1988). Somit kann kein Ozon aufgenommen werden.

Nach Sandermann (1996) stellen die geringere Transpiration, Leitfähigkeit und Ozonaufnahme der Fichten im Vergleich zu denen der Buchen den Grund dafür dar, weswegen Fichten weniger ozonempfindlich sind als Buchen. Eine geringere Ozonempfindlichkeit von Koniferen gegenüber laubwerfenden Bäume stellen auch Skärby et al. (1998) fest.

Einen weiteren Einfluss auf die geringere Ozonaufnahme der Fichten im Vergleich zu der der Buchen dürfte auch das unterschiedliche Nadelalter bei den Fichten haben. Während Buchen nur diesjährige Blätter haben, können Nadeln der Fichten über neun Jahren alt werden (Nunn, 2005), wobei etwa 20 % der Fichten-Nadeln älter als fünf Jahre sind (Matyssek et al. 1995b, Nunn et al. 2006). Dabei gilt, dass ältere Nadeln eine geringere Leitfähigkeit haben als jüngere Nadeln (Peters et al. 2008, Nunn et al. 2006) und damit einhergehend auch weniger Ozon aufnehmen (Nunn et al. 2006). Nach Nunn (2005) benötigen Fichtennadeln etwa 3,7 bis 5,4 Jahre, um dieselbe Menge an Ozon aufzunehmen wie Buchenblätter in einer Vegetationsperiode.

Auf einen möglicherweise erheblichen Einfluss auf die Holzerträge von Buchen und Fichten durch erhöhte Ozonkonzentrationen weisen Pretzsch et al. (2010) hin: Die Buchen im Kranzberger Forst reagierten auf die chronisch erhöhte Ozonkonzentration ($2x\text{O}_3$) mit einem Zuwachsverlust von $10 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Fichte konnte dagegen einen Zuwachsgewinn von $0,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ verbuchen. Das Höhen-Durchmesserverhältniss änderte sich bei den Buchen dahingehend, dass sie unter $2x\text{O}_3$ im Kronenbereich schlanker wurden, Fichten dagegen

vollholziger. Bei Fichte war der Grundflächenzuwachs unter $2xO_3$ um 12 % reduziert, der Höhenzuwachs nahm jedoch um 70 % zu, so dass der Höhenzuwachs die Grundflächenreduktion überkompensierte (Pretzsch et al. 2010).

4.7 AOT40, SUM0 und COU

Ein Effekt der erhöhten Ozonkonzentration auf die drei Stressindizes SUM0 (**S**um of Ozone > **0**), AOT40 (**A**ccumulated **O**₃ exposure above **T**hreshold of **40** nl O₃ l⁻¹) und COU (**C**umulative **O**zone **U**ptake) zeigte sich in Form einer Reduktion der Werte (siehe Abbildung 4.4). Dabei hatte das erhöhte Ozonregime einen signifikanten Einfluss auf AOT40 und SUM0. Konnten bereits Warren et al. (2007) an den Buchen des Kranzberger Forstes zeigen, dass der proportionale Unterschied zwischen $1xO_3$ und $2xO_3$ bei AOT40 höher ausfiel als bei COU, so traf dasselbe im Rahmen dieser Studie zu (siehe Tabelle 4.1).

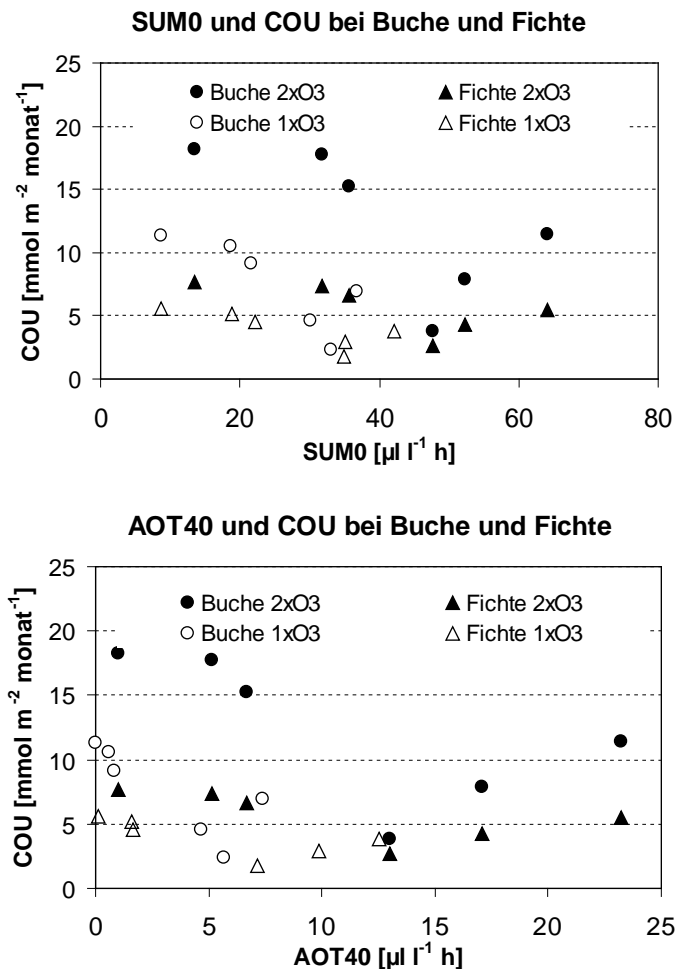


Abbildung 4.4: Vergleich der monatlich ermittelten SUM0- (oben) bzw. AOT40-Werte (unten) gegenüber den COU-Werten bei Buchen und Fichten unter $1xO_3$ und $2xO_3$ im Jahr 2006.

Tabelle 4.1: Verhältnis von AOT40, SUM0 und AOT40 zwischen $1xO_3$ zu $2xO_3$ ($2xO_3 = 100\%$).

	Verhältnis von $2xO_3$ zu $1xO_3$	
	Buche	Fichte
AOT40	5,1	2,5
COU	1,7	1,4
SUM0	1,6	1,5

Die proportionalen Unterschiede zwischen $1xO_3$ und $2xO_3$ bei COU und SUM0 fielen deutlich geringer aus als bei AOT40 (siehe Tabelle 4.1). Die berechneten Quotienten in Tabelle 4.1 liegen im Wertebereich der von Nunn et al. (2006) berechneten Quotienten. Sie berechneten für die Sonnenkronen der Buchen im Kranzberger Forst unter $2xO_3$ ein SUM0-Wert, der um den Faktor 1,8 höher ausfiel als unter $1xO_3$, und einen AOT40-Wert, der unter $2xO_3$ um den Faktor 4,3 höher ausfiel als unter $1xO_3$ (Nunn et al. 2006). Nach Matyssek et al. (2004) variiert die kumulative Ozonaufnahme bei gegebenem AOT40 um $25 \pm 11\%$. Cieslik (2009) konnte zeigen, dass der gesamte Ozonfluss (= stomatäre Ozonaufnahme, Ozondeposition an der Blatt- und Pflanzenoberfläche und Ozondeposition an pflanzenexternen Oberflächen) zwar mit AOT40 korreliert, aber AOT40 keine Erklärung für eine physiologisch relevante Ozonaufnahme liefert.

Baumgarten et al. (2009) und Matyssek et al. (2004) berichten, dass bei der Berechnung von AOT40 die unterschiedlichen Baumarten, Genotypen und Standorte nicht einfließen. Zudem gehen bei der Bestimmung des AOT40 nur die Ozonkonzentrationen mit ein, die untertags gemessen werden. Die Ozonkonzentrationen in der Nacht werden vernachlässigt (Matyssek und Innes 1999). Nach Matyssek und Innes (1999) stellt das Vernachlässigen der Ozonkonzentrationen in der Nacht ein Problem dar: nachts können die Stomata z. T. offen sein, wodurch Ozon aufgenommen wird (Matyssek et al. 1995b). Nach Karlsson et al. (2000) unterliegt AOT40 bei Betrachtung einer längeren Zeitreihe einem größeren Schwankungsbereich als COU. Simpson et al. (2007) zeigten, dass AOT40 einen deutlich größeren Gradienten zwischen Süd- und Nordeuropa aufweist als ein Ozonaufnahmemodell. Die Ursache hierfür ist in der unterschiedlichen Öffnungsweite der Stomata der Pflanzen in Süd- und Nordeuropa zu sehen. Das Ozonaufnahme-Modell gibt die stärker geschlossenen Stomata der Pflanzen und somit die geringere Ozonaufnahme in Südeuropa wieder, wohingegen das AOT40-Konzept nur die höhere Ozonkonzentration in Südeuropa widerspiegelt.

In vorliegender Studie traten bei hohen AOT40-Werten geringe COU-Werte auf (siehe Abbildung 4.4) und bei geringen AOT40 häufig hohe COU-Werte. Eine Erklärung hierfür ist, dass AOT40 als rein expositionsbezogener Index zur Risikoabschätzung nicht die Menge an Ozon wiedergeben kann, die von den Pflanzen unter aktuellen Klima- und Standortsbedingungen aufgenommen wird. Das bedeutet, dass zu Zeiten, in denen die

Expositionsbelastung durch Ozon und damit AOT40 und SUM0 hoch sind (wie z. B. um die Mittagszeit und im Hochsommer), von den Pflanzen wenig Ozon aufgenommen wird, da es zu einem Schließen der Stomata kommt. Auch Karlsson et al. (2004) konnten an Fichten zeigen, dass COU bei geringem AOT40 hoch war. Baumgarten et al. (2009) schildern, dass AOT40 bei heißem und trockenem Wetter stark anstieg, die Ozonaufnahme dagegen nicht. Auf eine Überschätzung des Risikos von Ozon durch das AOT40-Konzept bei trockenem und warmem Wetter im Vergleich zur stomatären Ozonaufnahme wiesen auch Gerosa et al. (2005) hin. Löw et al. (2006) stellten für die Buchen im Kranzberger Forst in den humiden Sommern 2002 und 2004 trotz geringer Ozonkonzentration höhere Ozonaufnahmen fest als im trockenen und warmen Sommer 2003 mit seinen hohen Ozonkonzentrationen. Karlsson et al. (2004) berichten von einer hohen Korrelation zwischen Ozonfluss und AOT40, jedoch geben Baumgarten et al. (2009), Schaub et al. (2007) und Löw et al. (2006) zu bedenken, dass dies nur unter humiden und für die stomatäre Leitfähigkeit nicht limitierenden Bedingungen der Fall ist. Im heißen und trockenen Sommer 2003 war eine solche Korrelation nicht zu finden, da der Ozonfluss bedingt durch Stomata-Schluss abnahm, wohingegen AOT40 weiter anstieg (Löw et al. 2006, Matyssek et al. 2007).

Im Vergleich zu der anhand der kumulativen Ozonaufnahme gezeigten Belastung durch Ozon für die Bäume, wurde mit Hilfe von AOT40 unter $1xO_3$ für die Buchen und Fichten im Kranzberger Forst ein geringes Risiko durch das externe Ozon festgestellt (siehe Abbildung 4.5).

Unter $2xO_3$ dagegen wies AOT40 ein hohes Ozonrisiko auf, wohingegen COU hier eine geringere Ozonbelastung zeigte. Somit überschätzte AOT40 unter $2xO_3$ das Risiko durch Ozon für die Pflanzen. Grünhage und Jäger (2003) verglichen die tägliche Variation der stomatären Ozonaufnahme und von AOT40. Es zeigte sich, dass ein großer Teil der toxikologisch wirksamen stomatären Aufnahme vor der Mittagszeit stattfindet, wohingegen die AOT40-Werte von den Ozonkonzentrationen des Nachmittags dominiert werden.

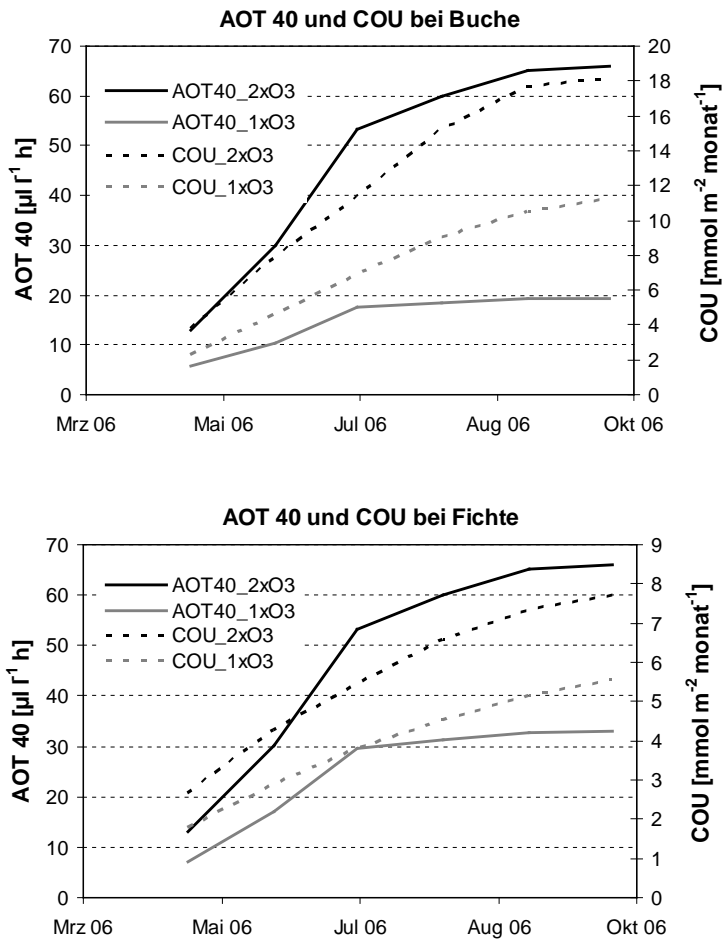


Abbildung 4.5: Verläufe von AOT40 und COU der Buchen (oben) und Fichten (unten) unter 1xO₃ und 2xO₃ im Jahr 2006. Die y-Achsen COU sind unterschiedlich skaliert.

SUM0 gab für die Buchen und Fichten im Kranzberger Forst in beiden Ozonregimen ein geringeres Risiko durch Ozon an, als COU eine Belastung durch Ozon für die Bäume zeigte. SUM0 hat das Risiko durch Ozon für die Bäume im Vergleich zur Belastungsangabe durch COU unterschätzt (siehe Abbildung 4.6). Zu Beginn der Vegetationsperiode fielen die COU-Werte der Buchen und Fichten höher aus als die SUM0-Werte. Dies unterstreicht bisherige Erkenntnisse, wonach besonders im Frühjahr bei steigenden Temperaturen und Ozonkonzentrationen und bei noch ausreichend feuchten Böden von Bäumen – z. B. insbesondere von Fichten – bereits viel Ozon aufgenommen wird (Karlsson et al. 2007b, Baumgarten et al. 2009), auch wenn die externe Ozonkonzentration noch nicht so hoch ist wie im Hochsommer. In den letzten Monaten der Vegetationsperiode nahm vor allem unter 2xO₃ COU der Buchen zu, während SUM0 keinen solchen Kurvenanstieg zeigte.

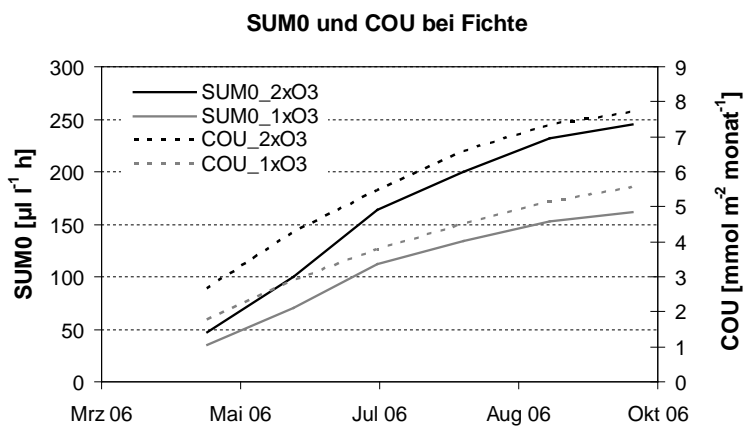
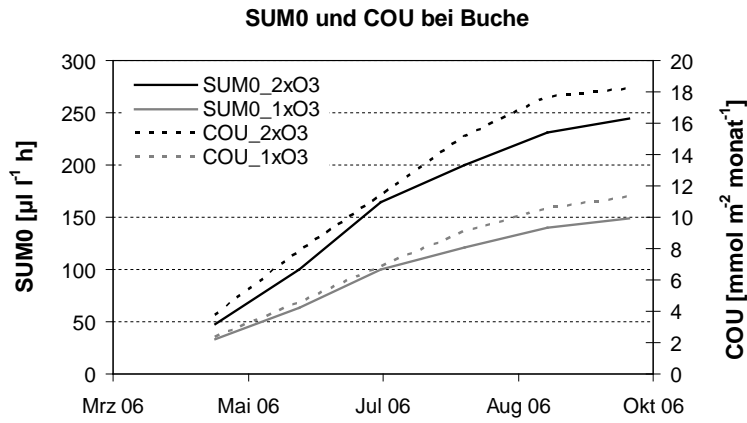


Abbildung 4.6: Verläufe von SUM0 und COU der Buchen (oben) und Fichten (unten) unter 1xO₃ und 2xO₃ im Jahr 2006. Die y-Achsen COU sind unterschiedlich skaliert.

5 Folgerungen & Ausblick

5.1 Folgerungen

Bisher wird zur Einschätzung der Gefährdung von Ozon auf Bäume das Grenzwertkonzept AOT40 herangezogen (UNECE 2004). Der derzeit gültige Grenzwert für Waldbäume liegt bei einem AOT40 von $5 \mu\text{l l}^{-1} \text{ h}$ (UNECE 2004), ab diesem Wert wird eine Produktionseinbuße von 5 % Biomasse angenommen. Matyssek und Innes (1999) nennen als Schwachpunkt von AOT40, dass der Wert von 40 ppb aus wenigen empirischen Studien an jungen Bäumen abgeleitet wurde und somit für adulte Waldbäume nicht aussagekräftig ist. Karlsson et al. (2004) führten eine Studie an Jungbäumen durch und forderten erfolgreich die Herabsetzung des ehemals gültigen Grenzwertes von $10 \mu\text{l l}^{-1} \text{ h}$ auf $5 \mu\text{l l}^{-1} \text{ h}$. Wie bereits in der Einleitung dargestellt, ist eine Übertragung der Ergebnisse aus Untersuchungen an Jungbäumen in Kammernversuchen auf Altbäume im Freiland nicht zielführend, da Jung- und Altbäume in ihren physiologischen Prozessen sehr verschieden reagieren. Der Grenzwert von $5 \mu\text{l l}^{-1} \text{ h}$, der sich anhand der externen Ozonkonzentration berechnet, wird in Europa vielfach überschritten (Baumgarten et al. 2009, Matyssek und Innes 1999), so auch im Kranzberger Forst, wo AOT40 unter $1 \times \text{O}_3$ in den Jahren 1999 bis 2002 Werte von $10 \mu\text{l l}^{-1} \text{ h}$ bis $15 \mu\text{l l}^{-1} \text{ h}$ erreichte, in den Jahren 2003 bis 2005 $12 \mu\text{l l}^{-1} \text{ h}$ bis $33 \mu\text{l l}^{-1} \text{ h}$ und im Jahr 2006 $19 \mu\text{l l}^{-1} \text{ h}$. Einen Beleg, dass ab einem AOT40 von $5 \mu\text{l l}^{-1} \text{ h}$ Schäden an ausgewachsenen Waldbäumen entstehen, gibt es dennoch nicht. Baumgarten et al. (2009) konnten bei Überschreitung des Grenzwertes aber vereinzelt schwache ozonbedingte Schadsymptome an Blättern feststellen. AOT40 berücksichtigt die Ansprüche unterschiedlicher Baumarten nicht und hat keinen Standortbezug (Baumgarten et al. 2009). Bei der Berechnung von AOT40 fließen weder das stomatare Verhalten, noch die aktuelle Ozonaufnahme, noch biochemische Abwehrpotentiale einer Pflanze ein (Matyssek et al. 2004). Der expositionsbezogene Risiko-Index AOT40 ist nicht in der Lage, die aufgenommene Ozonmenge wiederzugeben. Sowohl eine Über- als auch eine Unterschätzung des Risikos durch Ozon für Buchen und Fichten im Kranzberger Forst war in vorliegender Studie durch die Anwendung von AOT40 im Vergleich zu COU aufgetreten (siehe auch Paoletti 2007 und Simpson et al. 2007). Daher wird von der UNECE angestrebt, das AOT40-Konzept durch ein Ozon-Fluss-Konzept zu ersetzen (Grünhage und Jäger 2003, Matyssek et al. 2007), da nur letzteres die physiologisch wirksame Ozon-Dosis wiedergeben kann. Nach Grünhage et al. (2004) bestehen bei der Berechnung von Ozon-Dosen jedoch Unsicherheiten, da stomatare Leitfähigkeit und nicht-stomatare Deposition modelliert werden müssen. Im Gegensatz dazu wird die stomatare Leitfähigkeit mit Hilfe der Xylemflussmessung im Stamm empirisch erhoben (Nunn et al. 2010).

Grünhage et al. (2004) halten für eine realistische Fluss-Effekt-Beziehung die Ermittlung des Flusses auf Kronenebene für nötig. Aus diesem Grund ist es nötig, die Risiko-Abschätzung von Ozon für Pflanzen auf Methoden zu stützen, die die tatsächlich von Pflanzen aufgenommene Menge von Ozon berechnen. Eine solche Methode stellt die in vorliegender Studie angewandte Xylemflussmessung im Stamm (THB) dar. Neben dieser wurden in vorliegender Studie andere Methoden zur Berechnung der Ozonaufnahme (Gaswechselformel mit Hilfe der Astküvette, Gaswechselformel auf Blattebene und Ozonaufnahme-Modell) angewandt und miteinander verglichen. Dabei konnte die Xylemflussmessung im Stamm (THB) als einzige Methode alle Standortparameter berücksichtigen und die Dynamik eines jeden Baumindividuums erfassen.

Als Vorteil der Xylemflussmessung im Stamm (THB) soll hier insbesondere die Erfassung der **nächtlichen Ozonaufnahme** erwähnt werden (siehe Abbildung 5.1). Mit einem Referenzversuch haben Matyssek et al. (1995a) nachgewiesen, dass sich bei Birke durch nächtlich aufgenommenes Ozon die Biomasseproduktion verringert und das Spross-Wurzelverhältnis erhöht haben und Blattschäden aufgetreten sind.

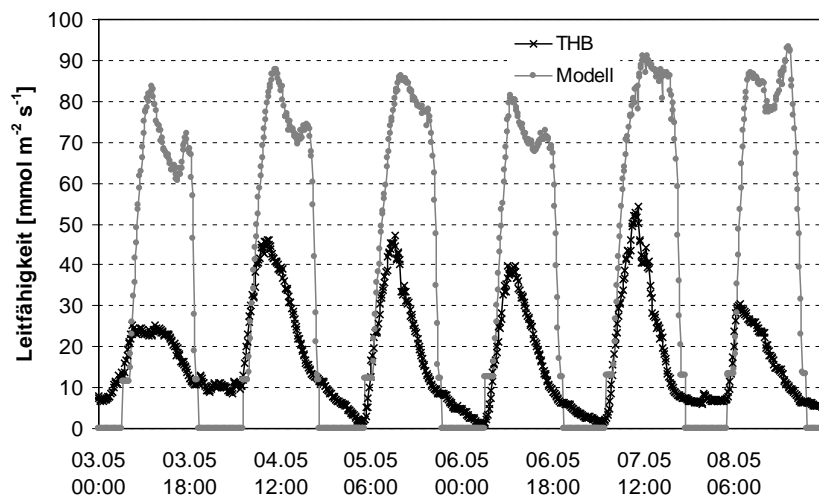


Abbildung 5.1: Tagesgänge der Leitfähigkeit von Buche unter $1xO_3$, berechnet mit Hilfe des Ozonaufnahme-Modells (grau) und der Xylemflussmessung im Stamm (THB) (schwarz) vom 03.05.2006 bis 08.05.2006.

In Abbildung 5.1 ist beispielhaft für Buche unter $1xO_3$ an ausgewählten Tagen der direkte Vergleich der Leitfähigkeit der Xylemflussmessung im Stamm (THB) und des Modells dargestellt. Die Leitfähigkeit im Modell sinkt nachts auf Null, wohingegen die Leitfähigkeit der Xylemflussmessung im Stamm (THB) erst in den frühen Morgenstunden kurzfristig auf Null absinkt. Ursachen dieser Beobachtung sind zum einen das Füllen der Wasserspeicher in der Nacht und zum anderen die dann tatsächlich stattfindende Transpiration und somit Leitfähigkeit der Bäume (Matyssek et al. 1995a, Dawson et al. 2007, Daley und Philips 2006). Das in vorliegender Studie angewandte Modell konnte diese Reaktion nicht

wiedergeben. So konnten Marks und Lechowicz (2007) zeigen, dass nachts Safffluss stattfindet, dieser jedoch deutlich niedriger ist als der der Schattenkrone untertags. Nach Daley und Phillips (2006) muss besonders in Anbetracht einer Klimaerwärmung dem Sachverhalt der nachts stattfindenden Transpiration Aufmerksamkeit geschenkt werden, da bei höheren nächtlichen Temperaturen im vermehrten Maße die Stomata offen bleiben. Dies führt nicht nur zu einer höheren Ozonaufnahme, sondern kann auch zu einer Änderung des Wasserhaushalts von Wäldern in Form höherer Wasserverluste führen. Die Autoren vertreten die Meinung, dass es sich beim nachts gemessenen Safffluss bei *Betula papyrifera* nicht um ein Auffüllen der Wasserspeicher handelt, sondern um tatsächlich stattfindende Transpiration, da das Verhältnis Safffluss zu VPD sich in der Nacht nicht von dem am Tag unterschied. Das Auffüllen der Wasserspeicher würde bei *Betula papyrifera* demnach tagsüber stattfinden (Daley und Philips 2006). Dawson et al. (2007) stellten dagegen fest, dass sich nachts erst die Wasserspeicher füllen, danach aber wieder Safffluss stattfindet, der deutlich geringer ist als tagsüber. Bleiben nachts die Stomata zumindest partiell geöffnet, kann dann auch Ozonaufnahme stattfinden. Matyssek et al. (1995a) stellten an Birken fest, dass Pflanzen mit nächtlicher Ozonaufnahme empfänglicher für Schädigung durch Ozon sind, da bei Licht, wenn Photosynthese betrieben wird, die Entgiftung von Oxidantien effizienter abläuft. Die nächtliche Ozonaufnahme darf bei der Erfassung einer physiologisch relevanten Ozonaufnahme nicht außer Acht gelassen werden, zumal, wie Mereu et al. (2009) berichten, bei nachts offenen Stomata die gesamte Ozonaufnahme an einem Tag um 10 % bis 20 % höher ausfällt als wenn nachts die Stomata geschlossen wären. Der Xylemflussmessung im Stamm (THB) muss im Gegensatz zum Ozonaufnahme-Modell bei der Ermittlung der Ozonaufnahme der Vorzug gegeben werden, da das Ozonaufnahme-Modell nicht die physiologischen Prozesse in der Nacht naturgetreu wiedergeben kann.

Ein weiterer Vorteil bei der Berechnung der Ozonaufnahme mit Hilfe der Xylemflussmessung im Stamm (THB) ist die Erfassung der herrschenden **Grenzschichten**. Bei Fichte wurde z.T. kein bzw. nur ein sehr geringer Einfluss der Grenzschichten auf die Ozonaufnahme festgestellt.

Mit Hilfe der Xylemflussmessung im Stamm (THB) kann die Ozonaufnahme für die **gesamte Baumkrone** ermittelt werden, wohingegen alle anderen für die vorliegende Studie angewandten Methoden entweder nur Aussagen zur Sonnenkrone, zu Sonnen- oder Schattenästen oder zu Sonnen- oder Schattenblätter/-nadeln treffen konnten. Die Betrachtung eines einzelnen Astes und anschließende Hochrechnung auf Kronenebene führt zu Fehleinschätzungen, da in der Sonnenkrone Transpiration, Leitfähigkeit und Ozonaufnahme höher sind als in der Schattenkrone (Manes et al. 2007, Peters et al. 2008). Dadurch, dass die Xylemflussmessung im Stamm (THB) die Ozonaufnahme der gesamten Baumkrone erfasst (Köstner et al. 1992), werden inhärent auch die unterschiedlichen

Lichtverhältnisse in der Baumkrone und die daraus resultierenden unterschiedlichen Reaktionen auf Ozon berücksichtigt. Dies kann bei einer Hochrechnung von Gaswechselfdaten aus Astküvetten oder Porometern nicht erfüllt werden (Paoletti 2007).

Im Gegensatz zur Xylemflussmessung im Stamm (THB) kann das Modell die Leitfähigkeit zu Beginn der Vegetationsperiode im **Frühjahr** und der Seneszenz im **Herbst** nicht richtig darstellen. So fielen die Ozonaufnahmen, berechnet mit Hilfe von THB, im Frühjahr und im Herbst höher aus als die des Modells.

Der Vergleich der Xylemflussmessung im Stamm (THB) mit den anderen in vorliegender Studie angewandten Methoden erlaubt den Schluss, dass bei **Regen** die Stomata zumindest partiell offen sind und Transpiration stattfindet. Im Vergleich zur Xylemflussmessung im Stamm (THB) berechnet das Modell bei Regen eine zu geringe Leitfähigkeit.

Zudem ist darauf hinzuweisen, dass aufgrund der kontinuierlichen Messung des Xylemflusses im Stamm auch ein kontinuierlicher Datensatz zur Ozonaufnahme im Verlauf der Vegetation erhoben wird. Das Ozonaufnahme-Modell basiert dagegen auf diskreten Porometer-Gaswechselfmessungen. Deshalb sind die Ozonaufnahmewerte, die durch die Xylemflussmessung im Stamm ermittelt werden, auf die Datenbasis bezogen realitätsnäher.

Fazit:

Auch wenn zur Berechnung der Ozonaufnahme mit Hilfe der Xylemflussmessung im Stamm (THB) neben der Saftflussmessung Daten wie Luftfeuchte, Temperatur und Druck erhoben werden müssen, stellt THB ein praxistaugliches, einfaches und verlässliches Verfahren dar, die Ozonaufnahme zu berechnen, wie sie an den jeweiligen Standorten und unter den örtlich herrschenden Klimabedingungen stattfindet. Damit lässt sich die für die Pflanzen physiologisch relevante Ozon-Dosis quantifizieren. Mit Hilfe der Xylemflussmessung im Stamm, die die Kronentranspiration und Ozonaufnahme integrativ koppelt, konnte gezeigt werden, dass eine chronisch erhöhte Ozonkonzentration Einfluss auf Transpiration, Leitfähigkeit für Wasserdampf und Ozonaufnahme bei Buche und Fichte hat. Die Stärken der Ozonaufnahmeberechnung mit Hilfe der Xylemflussmessung im Stamm zeigten sich neben den beinhalteten Grenzschichten besonders deutlich im Frühjahr und Herbst, aber auch bei Nacht und unter humiden Bedingungen. Aufgrund der gezeigten Ergebnisse ist es für eine bessere Risikoabschätzung von Ozon auf Bäume zwingend, zukünftig für Fluss- bzw. Ozonaufnahmebestimmungen die Xylemflussmessung im Stamm anzuwenden. Darüber hinaus wurde eine Basis geschaffen, bisheriger Fluss- und Ozonaufnahme-Modelle zu validieren.

5.2 Ausblick

Muzika et al. (2004) konnten anhand von Untersuchungsflächen mit hohem bzw. geringem Luftverschmutzungseintrag in den Karpaten zeigen, dass Buchen auf Ozon mit einem Rückgang des Grundflächenzuwachses von durchschnittlich 50 % reagierten, wohingegen Fichten einen Rückgang von 20 % zeigten. Pretzsch et al. (2010) stellten an Fichten und Buchen unter $2 \times O_3$ in der Versuchsanlage Kranzberger Forst Änderungen in der Stammschaffform fest. Diese wirkte sich insbesondere bei Buche nachteilig auf den Zuwachs aus. Derzeit wird von der forstlichen Praxis noch keine ozonbedingte Abnahme des Zuwachses beobachtet, was zum einen an einer fehlenden Kontrolle liegt, zum anderen aber auch daran, dass erhöhte N- und CO_2 -Einträge, längere Vegetationsperioden und eine gezielte Waldbewirtschaftung eine Zunahme des Baumwachstums bewirken (Matyssek und Innes 1999).

Es ist bisher nicht möglich, Rückschlüsse zu ziehen, ab welcher aufgenommenen Ozonmenge tatsächlich Schädigungen an Pflanzen entstehen. Nach Matyssek et al. (2008) fehlen für die Berechnung einer effektiven Ozon-Dosis Daten zur Entgiftungskapazität der Pflanzen. Eine Variante, die potentiell mögliche Entgiftungskapazität zu berechnen, schlagen Wieser et al. (2002) vor. Hierfür muss die Konzentration von Antioxidationsmittel, wie z. B. Ascorbat, pro Blattfläche in den Nadeln/Blättern bestimmt werden und diese durch die maximale Ozonaufnahme dividiert werden. Matyssek et al. (2007 und 2008) empfehlen, die Entgiftungskapazität mit Hilfe der SLA zu bestimmen. Kolb und Matyssek (2001) und Massman 2004 schlagen vor, die Abwehrfähigkeit von Pflanzen gegenüber Ozon aus dem Verhältnis der Photosynthese zu Ozonaufnahme in Kombination mit der spezifischen Blattfläche zu berechnen.

Der nächste Schritt auf dem Weg zur Ermittlung einer effektiven Ozon-Dosis für ausgewachsene Waldbäume sollte eine Verknüpfung der mit Hilfe der Xylemflussmessung im Stamm (THB) berechneten Ozonaufnahmen mit waldwachstumskundlichen Parametern sein.

Nach Pretzsch et al. (2010) muss Ozon als ein globaler Akteur der Klimaänderung angesehen werden, der das Potential hat, den Zuwachs von Bäumen zu reduzieren (Sitch et al. 2007). Für den Kranzberger Forst konnte eine Reduktion des Stammwachstums bei Buche unter erhöhtem Ozonregime gezeigt werden (Matyssek et al. 2010c, Pretzsch et al. 2010). Der in vorliegender Studie gezeigte Einfluss der erhöhten Ozonkonzentration auf Transpiration und Leitfähigkeit und die Untersuchungen von Pretzsch et al. (2010) verdeutlichen die potentiell möglichen Auswirkungen von erhöhten und z. T. steigenden Ozonkonzentrationen auf Waldbäume. Besonders im Hinblick auf Umtriebszeiten der Bäume von vielen Jahrzehnten sollte dem Ozon und seiner Wirkungen auf Wald-Ökosysteme weiterhin große Aufmerksamkeit geschenkt werden (Sitch et al. 2007), zumal bereits nach

nur 8 Jahren Ozonbehandlung Effekte auf das Baumwachstum und die Physiologie der Bäume im Kranzberger Forst gezeigt werden konnten.

Um vergleichbare Aussagen auch außerhalb der Versuchsanlage Kranzberger Forst treffen zu können, sollte die Methode der Xylemflussmessung im Stamm an weiteren Baumarten und Standorten im In- und Ausland angewendet werden. Somit ließen sich nicht nur ein möglicher Einfluss unterschiedlicher Nährstoff- und Wasserversorgung auf die Ozonaufnahme von adulten Bäumen aufzeigen, sondern auch an verschiedenen weltweiten Standorten unterschiedliche Ozon-Dosen.

Als Validierung der Eddy-Covarianz-Methode sollte die Kombination der Xylemflussmessung im Stamm mit der Eddy-Covarianz-Methode, wie ihn Nunn et al. (2010) darstellten, weiter verfolgt werden. Denkwürdig wäre auch ein Einsatz der über THB ermittelten Kronenleitfähigkeit in das Ozonaufnahme-Modell, wodurch inhärent Blatt- und Kronengrenzschichten, alle Standortparameter und die gesamte Baumkrone erfasst wären.

Langfristig sollte die Xylemfluss-Methode von der UNECE als Ozon-Dosis-Konzept übernommen werden. Durch die Ermittlung einer möglichst genauen Ozon-Dosis für gesamte Bäume mit Hilfe der Xylemflussmessung im Stamm besteht eine Grundlage, die eine Umstellung vom Expositions-Konzept (AOT40) auf das Dosis-Konzept auf politischer Ebene für eine Ozon-Risiko-Abschätzung von Bäumen ermöglicht.

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Tagesgang der Ozonkonzentration in städtischen (ausgeprägter Tagesgang) und in ländlichen Gebieten (gering ausgeprägter Tagesgang) (Grünhage et al. 2004).	2
Abbildung 2.1: Lage der Versuchsfläche (Reiter 2004).	14
Abbildung 2.2: Versuchsbestand Kranzberger Forst, vom Baukran aus fotografiert. Innerhalb des Gerüsts sind die Buchen vor Laubaustrieb zu sehen (Häberle et al. 2003).....	16
Abbildung 2.3: Schwarze Ringe = $1 \times \text{O}_3$, roter Ring = $2 \times \text{O}_3$; T = Turm.	17
Abbildung 2.4: Schematische Darstellung der Free-Air Ozonbegasungsanlage im Kranzberger Forst (Fabian et al. 2005).	18
Abbildung 2.5: Eingenetzter Ast zur Ermittlung der abgefallenen Blattfläche und Protokollierung des Verlaufes der Seneszenz.	20
Abbildung 2.6: Gaswechsellkuvette (Walz, Effeltrich, DE).....	24
Abbildung 2.7: Links: Porometer CIRAS-2 der Firma PP Systems (Hitchin, UK), rechts: dazugehörige Gaswechsellkuvette (PP Systems, Hitchin, UK) für Laubgehölze.	27
Abbildung 2.8: Links nicht eingebauter Xylemflusssensor (THB); rechts eingebauter Xylemflusssensor (THB): die obere Sonde wird beheizt, die untere dient der Referenzmessung.....	29
Abbildung 2.9: Der Stammquerschnitt teilt sich in Ringflächen von 2 cm, 4 cm, 6 cm und 8 cm + Rest auf.	32
Abbildung 2.10: Xylemflusssensor nach Cermak/Kucera (EMS, Brno, CZ). Links im geschlossenen Zustand, am Ast montiert. Rechts im offenen Zustand (Nadeln und Heizspirale sichtbar).....	33
Abbildung 2.11: Zeitliche Angleichung des Xylemflusses im Stamm mit Δw und Strahlung (Matyssek et al. 2004).	36
Abbildung 3.1: Darstellung des Klimas im Jahr 2006: (A) Tagessummen Niederschlag [mm]; (B) Tagesmittelwerte Relative Luftfeuchte [%]; (C) Tagesmittelwerte Temperatur [C°]; (D) Tagesmittelwerte Δw [Pa kPa ⁻¹]; (E) Tagesmittelwerte Ozonkonzentration [nl l ⁻¹]; (F) Tagesmittelwerte Strahlung PPF [μmol m ⁻² s ⁻¹].	47
Abbildung 3.2: Verlauf des Bodenwasserpotentials pro Stunde [MPa] während der Vegetationsperiode 2006 auf der Versuchsfläche (gemessen mit Equitensiometer der Firma Ecomatik, Dr. Liu, Dachau, DE).	48
Abbildung 3.3: Zeitpunkt (doy = Tag im Jahr), an dem die Austriebsstufe 3 unter $1 \times \text{O}_3$ und $2 \times \text{O}_3$ (A) in den Sonnenkronen und (B) in den Schattenkronen der untersuchten Buchen, (C) in den Sonnenkronen und (D) in den Schattenkronen der untersuchten Fichten im Jahr 2006 erreicht wurde.	50
Abbildung 3.4: Zeitpunkt des Eintretens des 50 %-Stadiums der Seneszenz (doy = Tag im Jahr) (A) in den Sonnenkronen und (B) in den Schattenkronen der untersuchten Buchen.	51
Abbildung 3.5: Länge der Vegetationsperiode (Tage) im Jahr 2006 (A) in den Sonnenkronen und (B) in den Schattenkronen der untersuchten Buchen.	52
Abbildung 3.6: SLA [m ² kg ⁻¹], gemittelt über drei Messungen an jedem Messast pro Behandlung. Fichte (weiß) und Buche (grau) unter $1 \times \text{O}_3$ und $2 \times \text{O}_3$ (SE: n = 4 - 5).	53
Abbildung 3.7: SLA-Höhen-Gradient der Buchen (399, 408, 409, 412, 410) unter $1 \times \text{O}_3$ im Jahr 2006.	53
Abbildung 3.8: Aus drei SLA-Blattproben an der Astspitze, an der Astmitte und am Anstansatz gemittelter SLA-Gradient der Buche 412 ($1 \times \text{O}_3$), gemessen an je einem Ast, in 24,2 m Höhe über Boden, in 22,9 m Höhe über Boden und in 21,8 m Höhe über Boden.	54
Abbildung 3.9: Gemitteltetes Tiefenprofil der Flusssdichte bei Buche und Fichte [%]: Prozentuale Abnahme der Flusssdichten vom Splintholz in das Kernholz.	55
Abbildung 3.10: Verlauf der Flusssdichten [%] in 40 mm, 60 mm und 80 mm Splinttiefe bezogen auf die Flusssdichte in 20 mm Tiefe in der Vegetationsperiode 2006 bei Buche (oben) und Fichte (unten).....	56
Abbildung 3.11: Darstellung eines Tagesganges (am 9. Juli 2006) von PPF [μmol m ⁻² min ⁻¹], des Xylemflusses der Buche 412 [ml min ⁻¹], der Leitfähigkeit Gc [mmol m ⁻² s ⁻¹] und von Δw [Pa kPa ⁻¹]. Die rote gestrichelte Linie gibt den Beginn der Strahlung und den Anstieg von Δw an. Der Xylemfluss, gemessen im Stamm in Brusthöhe, startet mit einiger Verzögerung im Vergleich zum Sonnenaufgang. Durch ein zeitliches Zurücksetzen des Xylemflusses (blauer Pfeil) wird die Kronentranspiration mit der Strahlung und Δw synchronisiert	57
Abbildung 3.12: Oben: Tagesgang der Transpirationsrate (Ec) [ml m ⁻² min ⁻¹] von Buche 482 und PPF [μmol m ⁻² min ⁻¹]. Unten: Tagesgang der Transpirationsrate (Ec) [ml m ⁻² min ⁻¹] von Buche 482 und des Wasserdampfättigungsdefizites der Luft (VPD) [hPa].	58

Abbildung 3.13: Korrelation der Buchen-Transpirationsraten [$\text{ml m}^{-2} \text{min}^{-1}$] unter $1xO_3$ und $2xO_3$ mit PFD [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{min}^{-1}$] und VPD [hPa].	59
Abbildung 3.14: Monatliche Transpirationssummen pro projizierter Lauboberfläche E_c [$\text{l m}^{-2} \text{monat}^{-1}$] bei Buche und pro gesamter Nadeloberfläche bei Fichte unter $1xO_3$ und $2xO_3$ im Jahr 2006 (SE: $n = 4 - 5$).	60
Abbildung 3.15: Verlauf der Kronenleitfähigkeiten G_c [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] der Buchen (links) und Fichten (rechts) bei Tag und bei Nacht (Monatsmittelwerte), berechnet auf Basis der Xylemflussmessung im Stamm in Brusthöhe unter $1xO_3$ und $2xO_3$ im Jahr 2006 (SE: $n = 4 - 5$).	65
Abbildung 3.16: Monatliche kumulative Ozonaufnahme COU_m [$\text{mmol m}^{-2} \text{monat}^{-1}$] pro projizierte Kronenoberfläche der untersuchten Buchen und pro gesamter Kronenoberfläche der untersuchten Fichten unter $1xO_3$ und $2xO_3$ im Jahr 2006 (SE: $n = 4 - 5$).	66
Abbildung 3.17: Kumulative Ozonaufnahme in der Vegetationsperiode (COU_v) [$\text{mmol m}^{-2} \text{veg.periode}^{-1}$] der Buchen und Fichten unter $1xO_3$ und $2xO_3$ (SE: $n = 4 - 5$).	68
Abbildung 3.18: Gesamtübersicht der Verläufe der Ozonflüsse FO_3 [$\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$], der Kronenleitfähigkeiten für Wasserdampf G_c [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$], der Transpirationsrate E_c [$\text{ml m}^{-2} \text{min}^{-1}$], der Ozonkonzentrationen $[O_3]$ [nl l^{-1}], des Δw [Pa kPa^{-1}] und der Strahlung PFD [$\mu\text{mol Photonen m}^{-2} \text{s}^{-1}$] während der Vegetationsperiode im Jahr 2006 für (A) Buche unter $1xO_3$, (B) Buche unter $2xO_3$, (C) Fichte unter $1xO_3$, (D) Fichte unter $2xO_3$.	71
Abbildung 3.19: Vergleich der Transpirationsrate pro projizierter Blattoberfläche [$\text{ml m}^{-2} \text{min}^{-1}$] auf Astebene und auf Kronenebene. Weiße Dreiecke stellen die Transpiration des Sonnenastes, graue Kästchen die Transpiration des Schattenastes und schwarze Kreise die Transpiration der Krone (projizierte Kronenoberfläche) [$\text{ml m}^{-2} \text{min}^{-1}$] der Buche 412 am 14.06.06 dar.	74
Abbildung 3.20: Verlauf der monatlich pro Ozonregime und Kronenzone gemittelten Leitfähigkeit für Wasserdampf (g_b) [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] der Sonnen- (grau) und Schattenäste (schwarz) (A) der Buchen unter $1xO_3$ und (B) der Buchen unter $2xO_3$ und (C) der Fichten unter $1xO_3$ im Jahr 2006 (SE: $n = 2 - 3$).	76
Abbildung 3.21: Verlauf der monatlichen kumulativen Ozonaufnahme (COU_b_m) [$\text{mmol m}^{-2} \text{monat}^{-1}$] der Sonnen- und Schattenäste (A) der Buchen unter $1xO_3$ pro projizierter Blattoberfläche und (B) der Buchen unter $2xO_3$ pro projizierter Blattoberfläche und (C) der Fichten unter $1xO_3$ pro gesamter Nadeloberfläche. (SE: $n = 2 - 3$).	78
Abbildung 3.22: Tagesgang der Transpiration (E_k) [$\text{ml m}^{-2} \text{min}^{-1}$ bzw. $\text{mmol m}^{-2} \text{min}^{-1}$] gemessen mit Hilfe der Gaswechsellkuvetten an Buche 417 pro projizierter Blattoberfläche und Fichte 419 pro gesamter Nadeloberfläche. Die y-Achsen sind unterschiedlich skaliert.	80
Abbildung 3.23: Verlauf der monatlich gemittelten Leitfähigkeit für Wasserdampf (g_k) bei Tag und bei Nacht [$\text{mmol m}^{-2} \text{monat}^{-1}$] pro projizierter Blattoberfläche bei Buche 417 (links) und pro gesamter Nadeloberfläche bei Fichte 419 (rechts) im Jahr 2006. Die y-Achsen sind unterschiedlich skaliert.	82
Abbildung 3.24: Kumulative Ozonaufnahme in der Vegetationsperiode (COU_v) [$\text{nmol m}^{-2} \text{veg.periode}^{-1}$] des in der Gaswechsellkuvette eingeschlossenen Buchenastes 417 und Fichtenastes 419.	83
Abbildung 3.25: Lichtabhängigkeitskurven der Photosyntheserate PN [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] von Buchen gemessen an Blättern der Sonnen (links)- und Schattenkrone (rechts) unter $1xO_3$ (oben) und $2xO_3$ (unten) im Juni und September 2006 (SE: $n = 3$).	87
Abbildung 3.26: Lichtabhängigkeitskurven der Photosyntheseraten PN [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] von Fichten gemessen an Nadeln der Sonnen- (links) und Schattenkrone (rechts) unter $1xO_3$ (oben) und $2xO_3$ (unten) im Juni und September 2006 (SE: $n = 2 - 3$).	89
Abbildung 3.27: Verlauf der Transpirationsraten [$\text{ml m}^{-2} \text{min}^{-1}$], Leitfähigkeit für Wasserdampf [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] und Ozonflüsse [$\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] von Buche (bezogen auf projizierte Blatt- bzw. Kronenoberfläche) unter $1xO_3$ und $2xO_3$ an sonnigen Tagen (vom 08.07.06 bis 13.07.06), auf Basis der Xylemflussmessung im Stamm, des Ozonaufnahme-Modells, der Gaswechsellmessung in der Astkuvette und der Xylemflussmessung auf Astebene.	103
Abbildung 3.28: Verlauf der Transpirationsraten [$\text{ml m}^{-2} \text{min}^{-1}$], Leitfähigkeit für Wasserdampf [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] und Ozonflüsse [$\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] von Buche (bezogen auf projizierte Blatt- bzw. Kronenoberfläche) unter $1xO_3$ und $2xO_3$ an einem regnerischen Tag (28.08.09) auf Basis der Xylemflussmessung im Stamm, des Ozonaufnahme-Modells, der Gaswechsellmessung in der Astkuvette und der Xylemflussmessung auf Astebene. Die Lücke in der Transpirationsaufzeichnung der Astkuvette bei Regen ist verursacht durch Wasserkondensation. Diese entsteht, sobald der Taupunkt der vorgegebenen Luftfeuchte in der Kuvette über die Temperatur an der kältesten Stelle der Kühlkörper steigt (Götz 1996). In solchen Fällen war die Transpiration nicht berechenbar (Götz 1996).	104
Abbildung 3.29: Verlauf der Transpirationsraten [$\text{ml m}^{-2} \text{min}^{-1}$], Leitfähigkeit für Wasserdampf [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] und Ozonflüsse [$\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] von Fichte (bezogen auf gesamte Nadel- bzw.	

Kronenoberfläche) unter $1xO_3$ und $2xO_3$ an sonnigen Tagen (vom 08.07.06 bis 13.07.06), auf Basis der Xylemflussmessung im Stamm, des Ozonaufnahme-Modells, der Gaswechselflussmessung in der Astküvette und der Xylemflussmessung auf Astebene.....	105
Abbildung 3.30: Verlauf der Transpirationsraten [$ml\ m^{-2}\ min^{-1}$], Leitfähigkeit für Wasserdampf [$mmol\ m^{-2}\ s^{-1}$] und Ozonflüsse [$nmol\ m^{-2}\ s^{-1}$] von Fichte (bezogen auf die gesamte Nadel- bzw. Kronenoberfläche) unter $1xO_3$ und $2xO_3$ an einem regnerischen Tag (28.08.09) auf Basis der Xylemflussmessung im Stamm, des Ozonaufnahme-Modells, der Gaswechselflussmessung in der Astküvette und der Xylemflussmessung auf Astebene. Die Lücke in der Transpirationsaufzeichnung der Astküvette bei Regen ist verursacht durch Wasserkondensation. Diese entsteht, sobald der Taupunkt der vorgegebenen Luftfeuchte in der Küvette über die Temperatur an der kältesten Stelle der Kühlkörper steigt (Götz 1996). In solchen Fällen war die Transpiration nicht berechenbar (Götz 1996).....	106
Abbildung 4.1: Verlauf der Leitfähigkeiten mit und ohne Grenzschicht bei Buche (oben) und Fichte (unten) in der Vegetationsperiode 2006. Die y-Achsen sind unterschiedlich skaliert.	131
Abbildung 4.2: Gegenüberstellung von Strahlung und der monatlich aufsummierten Ozonaufnahme (FO_3) von Buche ($1xO_3$), berechnet mit Hilfe (A) des Porometers, (B) der Xylemflussmessung im Stamm.....	132
Abbildung 4.3: Gegenüberstellung von Strahlung und der monatlich aufsummierten Ozonaufnahme (FO_3) von Fichte ($2xO_3$), berechnet mit Hilfe (A) des Porometers, (B) der Xylemflussmessung im Stamm.....	133
Abbildung 4.4: Vergleich der monatlich ermittelten SUM0- (oben) bzw. AOT40-Werte (unten) gegenüber den COU-Werten bei Buchen und Fichten unter $1xO_3$ und $2xO_3$ im Jahr 2006.	135
Abbildung 4.5: Verläufe von AOT40 und COU der Buchen (oben) und Fichten (unten) unter $1xO_3$ und $2xO_3$ im Jahr 2006. Die y-Achsen COU sind unterschiedlich skaliert.	138
Abbildung 4.6: Verläufe von SUM0 und COU der Buchen (oben) und Fichten (unten) unter $1xO_3$ und $2xO_3$ im Jahr 2006. Die y-Achsen COU sind unterschiedlich skaliert.	139
Abbildung 5.1: Tagesgänge der Leitfähigkeit von Buche unter $1xO_3$, berechnet mit Hilfe des Ozonaufnahme-Modells (grau) und der Xylemflussmessung im Stamm (THB) (schwarz) vom 03.05.2006 bis 08.05.2006.	141

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Aufnahmekatalog (Boniturschlüssel) des Austriebs bei Buche und Fichte	19
Tabelle 2.2: Parameter des Ozonaufnahme-Modells nach Emberson et al. 2000a, b und Nunn 2005: f_{night_m} beschreibt die Steigung der linearen Regression und f_{night_t} den y-Abschnitt der linearen Regression, die den Anstieg der nächtlichen Leitfähigkeit während der Vegetationsperiode wiedergibt.	41
Tabelle 2.3: Übersicht der erhobenen Datensätze, Methoden und der Bearbeiter.....	44
Tabelle 3.1: Monatlich ermittelte Niederschlagssummen Nd [mm], gemittelter Luftdruck P [hPa], gemittelte Temperatur T [C°] in der Sonnen- und Schattenkrone unter $1xO_3$ und $2xO_3$, gemittelt Wasserdampfsättigungsdefizit VPD [hPa], gemittelte Differenz der Wasserdampfmolenbrüche zwischen Blatt und Umgebungsluft Δw [Pa kPa ⁻¹], gemittelte Ozonkonzentration ($1xO_3$, $2xO_3$) [nl l ⁻¹], gemittelte Strahlung PPFD [$\mu\text{mol min}^{-1} \text{m}^{-2}$] und monatlich gemittelte Luftfeuchte RH [%] im Jahr 2006.	46
Tabelle 3.2: Über die Vegetationsperiode hinweg gemittelte Ozonkonzentration [nl l ⁻¹], SUM0 [$\mu\text{l l}^{-1} \text{h}$] und AOT40 [$\mu\text{l l}^{-1} \text{h}$] in der Vegetationsperiode 2006.	48
Tabelle 3.3: Blatt- bzw. Nadel-Austrieb bei Buche und Fichte im Jahr 2006: Erreichen der Austriebsstufe 3.	49
Tabelle 3.4: Datum des Erreichens des 50 %-Seneszenzstadiums im Jahr 2006 bei Buche.	51
Tabelle 3.5: Projizierte Kronenoberflächen [m ²] der Buchen und gesamte Kronenoberflächen [m ²] der Fichten unter $1xO_3$ und $2xO_3$ im Jahr 2006.....	54
Tabelle 3.6: Transpirationssummen pro projizierter Lauboberfläche für Buche und pro gesamter Nadeloberfläche für Fichte [$\text{l m}^{-2} \text{monat}^{-1}$] unter $1xO_3$ und $2xO_3$ (SE: n = 4 - 5).	61
Tabelle 3.7: Prozentualer Vergleich der Transpirationssummen [%] mit dem jeweiligen Vormonat im Jahr 2006 bei Buche und Fichte unter $1xO_3$ und $2xO_3$. Wert des Vormonats wurde als Referenzwert genommen (= 100 %), Minuszeichen bedeuten eine geringere Transpirationssumme als im Vormonat.	61
Tabelle 3.8: Verhältnis der Transpirationssummen [%] von Buchen und Fichten zwischen $1xO_3$ und $2xO_3$ ($2xO_3 = 100\%$) und Verhältnis der Transpirationssummen [%] zwischen Buchen und Fichten (Fichte = 100 %) unter $1xO_3$ und $2xO_3$	62
Tabelle 3.9: Monatliche gemittelte Kronenleitfähigkeit für Wasserdampf pro projizierte Kronenoberfläche für Buche unter $1xO_3$ und $2xO_3$ [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] (SE: n = 5).....	63
Tabelle 3.10: Monatlich gemittelte Kronenleitfähigkeit pro gesamter Kronenoberfläche [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] der Fichten unter $1xO_3$ und $2xO_3$ (SE: n = 4 - 5).	64
Tabelle 3.11: Kronenleitfähigkeit [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] der Buchen und Fichten unter $1xO_3$ und $2xO_3$ bei Tag und bei Nacht im Jahr 2006 (SE: n = 4 - 5).	65
Tabelle 3.12.: Monatliche kumulative Ozonaufnahmen (COU_m) [$\text{mmol m}^{-2} \text{monat}^{-1}$] pro projizierter Kronenoberfläche der Buchen unter $1xO_3$ und $2xO_3$ im Jahre 2006 (SE: n = 5).	66
Tabelle 3.13: Monatliche kumulative Ozonaufnahmen (COU_m) [$\text{mmol m}^{-2} \text{monat}^{-1}$] pro gesamter Kronenoberfläche der Fichten unter $1xO_3$ und $2xO_3$. (SE: n = 4 - 5).	67
Tabelle 3.14: Monatliche Transpirationssummen (Eb) [$\text{l m}^{-2} \text{monat}^{-1}$] der Sonnen (sun)- und Schattenäste (sha) der untersuchten Buchen pro projizierter Blattoberfläche und der untersuchten Fichten pro gesamter Nadeloberfläche unter $1xO_3$ und $2xO_3$	73
Tabelle 3.15: Leitfähigkeit für Wasserdampf gb [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] der Sonnenäste (sun) und Schattenäste (sha) der Buchen pro projizierte Blattoberfläche unter $1xO_3$ und $2xO_3$ und der Fichten pro gesamter Nadeloberfläche unter $1xO_3$	75
Tabelle 3.16: Monatliche kumulative Ozonaufnahme (COU_b_m) [$\text{mmol m}^{-2} \text{monat}^{-1}$] der Sonnen- und Schattenästen der Buchen unter $1xO_3$ und $2xO_3$ und der Fichten unter $1xO_3$	79
Tabelle 3.17: Monatliche Transpirationssummen (Ek) [$\text{l m}^{-2} \text{monat}^{-1}$] eines Sonnenastes bei Buche (417) pro projizierter Blattoberfläche und bei Fichte (419) pro gesamter Blattfläche, gemessen in der Astküvette.	80
Tabelle 3.18: Monatlich gemittelte Blattleitfähigkeit für Wasserdampf (gk) [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] pro projizierter Blattoberfläche bei Buche (417) und pro gesamter Nadeloberfläche bei Fichte (419).	81
Tabelle 3.19: Monatliche kumulative Ozonaufnahme (COU_k_m) [$\text{mmol m}^{-2} \text{monat}^{-1}$] des in der Gaswechselküvette eingeschlossenen Buchenastes 417 und Fichtenastes 419 im Jahr 2006.	82
Tabelle 3.20: Monatliche Mittelwerte der Photosyntheseraten (PN) [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$], der Leitfähigkeit für Wasserdampf (gs) [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] und der Transpirationsraten (EI) [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] der Buchenblätter und Fichtennadeln, gemessen mit dem Porometer CIRAS-2 unter Umgebungsbedingungen (Buchen SE: n = 4 - 5, Fichten SE: n = 3 - 4).	84

Tabelle 3.21: Maximale Photosyntheserate A_{\max} [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$], photosynthetische Effizienz ph_{eff} [Steigung der Regressionsgeraden zwischen A und PPFD $\leq 80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$], maximale Leitfähigkeit g_{\max} [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$], maximale Transpiration E_{\max} [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] und photosynthetische Wassernutzungseffizienz WUE [mmol mol^{-1}] der Buchenblätter bei einem PPFD von $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; (SE: n = 2 - 4).....	88
Tabelle 3.22: Maximale Photosyntheserate A_{\max} [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$], photosynthetische Effizienz ph_{eff} [Steigung der Regressionsgeraden zwischen A und PPFD $\leq 80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$], maximale Leitfähigkeit g_{\max} [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$], maximale Transpiration E_{\max} [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] und photosynthetische Wassernutzungseffizienz WUE [mmol mol^{-1}] der Fichtennadeln bei einem PPFD von $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$; (SE: n = 3 - 4).....	90
Tabelle 3.23: Photosynthese bei Nacht PN_{Nacht} [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$], Leitfähigkeit für Wasserdampf bei Nacht g_{Nacht} [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] und Transpirationsrate bei Nacht E_{Nacht} [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] von Buchenblättern und Fichtennadeln, gemessen mit dem Porometer CIRAS-2 unter Umgebungsbedingungen (SE: n = 3).	92
Tabelle 3.24: Ozonaufnahmesummen (FO_3) [$\text{nmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] der Buchen (SE: n = 4 - 5) und Fichten (SE: n = 3 - 4), berechnet anhand der mit dem Porometer CIRAS-2 gemessenen Leitfähigkeit.....	93
Tabelle 3.25: Monatlich gemittelte stomatäre Leitfähigkeit für Wasserdampf (g_m) [$\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] bei Buche (bezogen auf die projizierte Blattoberfläche) und Fichte (bezogen auf die gesamte Nadeloberfläche) unter $1x\text{O}_3$ und $2x\text{O}_3$ während der Vegetationsperiode 2006, berechnet über das Ozonaufnahme-Modell nach Emberson et al. (2000a), angepasst von Nunn (2005).....	94
Tabelle 3.26: Monatliche kumulative Ozonaufnahme (COU_m) [$\text{mmol m}^{-2} \text{monat}^{-1}$] bei Buche (bezogen auf projizierte Blattoberfläche) und Fichte (bezogen auf gesamte Nadeloberfläche) unter $1x\text{O}_3$ und $2x\text{O}_3$ im Jahr 2006, berechnet über das Ozonaufnahme-Modell.....	95
Tabelle 3.27: Kumulative Ozonaufnahme in der Vegetationsperiode (COU_v) [$\text{mmol m}^{-2} \text{veg.periode}^{-1}$] bei Buche (bezogen auf die projizierte Blattoberfläche) und Fichte (bezogen auf die gesamte Nadeloberfläche) unter $1x\text{O}_3$ und $2x\text{O}_3$ im Jahr 2006, berechnet über das Ozonaufnahme-Modell.	96
Tabelle 3.28: Monatliche Transpirationssummen der Buchen (bezogen auf die projizierte Blatt - bzw. Kronenoberfläche) bei sonnigem und humidem Wetter während der Vegetationsperiode 2006.....	97
Tabelle 3.29: Monatlich gemittelte Leitfähigkeit für Wasserdampf der Buchen (bezogen auf die projizierte Blatt- bzw. Kronenoberfläche) bei sonnigem und humidem Wetter während der Vegetationsperiode 2006.....	98
Tabelle 3.30: Monatliche Ozonaufnahmesummen der Buchen (bezogen auf die projizierte Blatt- bzw. Kronenoberfläche) bei sonnigem und humidem Wetter während der Vegetationsperiode 2006.....	99
Tabelle 3.31: Monatliche Transpirationssummen der Fichten (bezogen auf die gesamte Nadel- bzw. Kronenoberfläche) bei sonnigem und humidem Wetter während der Vegetationsperiode 2006.....	100
Tabelle 3.32: Monatlich gemittelte Leitfähigkeit für Wasserdampf der Fichten bei sonnigem Wetter und Regen in der Vegetationsperiode 2006.....	101
Tabelle 3.33: Monatliche Ozonaufnahmesummen der Fichten (bezogen auf die gesamte Nadel- bzw. Kronenoberfläche) bei sonnigem und humidem Wetter während der Vegetationsperiode 2006.....	102
Tabelle 3.34: Verhältnis der Transpirationssummen der Buchen und Fichten zwischen der auf der Xylemflussmessung im Stamm basierenden Methode (THB) und der auf der Gaswechsellmessung in der Astküvette basierenden Methode bei sonnigem und humidem Wetter (Transpirationssummen der Gaswechsellmessung in der Astküvette = 100 %). Negative Vorzeichen bedeuten eine geringere Transpirationssumme als die der Gaswechsellmessung in der Astküvette.....	108
Tabelle 3.35: Signifikanzen, errechnet durch den Mittelwertvergleich der Transpirationssummen $A_{\text{Astküvette}}$ mit den Transpirationssummen A_{THB} , (SPSS, Mittelwertvergleich, T-Test bei einer Stichprobe (* = p < 0,05)).....	109
Tabelle 3.36: Verhältnis der Leitfähigkeiten für Wasserdampf der Buchen und Fichten zwischen der auf der Xylemflussmessung im Stamm basierenden Methode (THB) und der auf der Gaswechsellmessung in der Astküvette basierenden Methode bei sonnigem und humidem Wetter (Leitfähigkeit der Gaswechsellmessung in der Astküvette = 100 %). Negative Vorzeichen bedeuten eine geringere Leitfähigkeit als die der Gaswechsellmessung in der Astküvette.	110
Tabelle 3.37: Signifikanzen, errechnet durch den Mittelwertvergleich der Leitfähigkeit $A_{\text{Astküvette}}$ mit der Leitfähigkeit A_{THB} , (SPSS, Mittelwertvergleich, T-Test bei einer Stichprobe (* = p < 0,05)).....	110

Tabelle 3.38: Verhältnis der Ozonaufnahmesummen der Buchen und Fichten zwischen der auf der Xylemflussmessung im Stamm basierenden Methode (THB) und der auf der Gaswechselformel basierenden Methode bei sonnigem und humidem Wetter (Ozonzufnahmesummen der Gaswechselformel in der Astküvette = 100 %). Negative Vorzeichen bedeuten eine geringere Ozonzufnahmesumme als die der Gaswechselformel in der Astküvette. 111

Tabelle 3.39: Signifikanzen, errechnet durch den Mittelwertvergleich der Ozonzufnahme_{Astküvette} mit der Ozonzufnahme_{THB}, (SPSS, Mittelwertvergleich, T-Test bei einer Stichprobe (* = p < 0,05))..... 112

Tabelle 3.40: Verhältnis der gemittelten Leitfähigkeiten für Wasserdampf der Buchen und Fichten zwischen der auf der Xylemflussmessung im Stamm basierenden Methode (THB) und der auf dem Ozonzufnahme-Modell basierenden Methode bei sonnigem und humidem Wetter (Leitfähigkeiten des Ozonzufnahme-Modells = 100 %). Negative Vorzeichen bedeuten eine geringere Leitfähigkeit als die des Ozonzufnahme-Modells. 113

Tabelle 3.41: Signifikanzen, errechnet durch den Mittelwertvergleich der Leitfähigkeit_{Modell} mit der Leitfähigkeit_{THB}, (SPSS, Mittelwertvergleich, T-Test bei einer Stichprobe (* = p < 0,05))..... 114

Tabelle 3.42: Verhältnis der Ozonzufnahmesummen der Buchen und Fichten zwischen der auf der Xylemflussmessung im Stamm basierenden Methode (THB) und der auf dem Ozonzufnahme-Modell basierenden Methode bei sonnigem und humidem Wetter (Ozonzufnahmesummen des Ozonzufnahme-Modells = 100 %). Negative Vorzeichen bedeuten eine geringere Ozonzufnahme als die des Ozonzufnahme-Modells. 115

Tabelle 3.43: Signifikanzen, errechnet durch den Mittelwertvergleich der Ozonzufnahme_{Modell} mit der Ozonzufnahme_{THB}, (SPSS, Mittelwertvergleich, T-Test bei einer Stichprobe (* = p < 0,05)). 116

Tabelle 4.1: Verhältnis von AOT40, SUM0 und AOT40 zwischen 1xO₃ zu 2xO₃ (2xO₃ = 100 %). 136

8 Literaturverzeichnis

- ABELES F.B., MORGAN P.W. UND SALVEIT M.E. (1992): Ethylene in plant biology; 2. Aufl.; Academic Press; San Diego
- ALSHEIMER M. (1997): Xylemflussmessung zur Charakterisierung raum-zeitlicher Heterogenitäten in der Transpiration montaner Fichtenbestände (*Picea abies* (L.) Karst.); BAYREUTHER INSTITUT FÜR TERRESTRISCHE ÖKOSYSTEMFORSCHUNG, HRSG. (Bayreuther Forum Ökologie; 49)
- ALTIMIR N., TUOVINEN J.-P., VESALA T., KULMALA M. UND HARI P. (2004): Measurements of ozone removal by Scots pine shoots: calibration of a stomatal uptake model including the non-stomatal component; Atmospheric Environment; 38; S. 2387–2398
- AMMER C., ALBRECHT L. BORCHERT H., BROSINGER F., DITTMAR C., ELLING W., EWALD J., FELBERMEIER B., GILSA H. VON, HUSS J., KENK G., KÖLLING C., KOHNLE U., MAYER P., MOSANDL R., MOSSMAYER H.U., PALMER S. REIF A., REHUFUESS K.-E. UND STIMM B. (2005): Zur Zukunft der Buche (*Fagus sylvatica* L.) in Mitteleuropa - Kritische Anmerkungen zu einem Beitrag von Rennenberg et al. (2004); Allgemeine Forst- und Jagdzeitung; 176; S. 60–67
- ANDERSEN C. (2003): Source-sink balance and carbon allocation below ground in plants exposed to ozone; New Phytologist; 157; S. 213–228
- ASHMORE M. (2005): Assessing the future global impacts of ozone on vegetation; Plant, Cell and Environment; 28; S. 949–964
- BAUMGARTEN M., WERNER H., HÄBERLE K.-H., EMBERSON L., FABIAN P. UND MATYSSEK R. (2000): Seasonal ozone response of mature beech trees (*Fagus sylvatica*) at high altitude in the the Bavarian forest (Germany) in comparison with young beech grown in the field and in phytotrons; Environmental Pollution; 109; S. 431–442
- BAUMGARTEN M., HUBER C., BÜKER P., EMBERSON L., DIETRICH H.-P., NUNN A.J., HEERDT C., BEUDERT B. UND MATYSSEK R. (2009): Are Bavarian Forests (southern Germany) at risk from ground-level ozone? Assessment using exposure and flux based ozone indices; Environmental Pollution; 157; S. 2091–2107
- BAUMGARTEN M., HUBER C., DIETRICH H.-P. UND MATYSSEK R. (2010): Beurteilung des Ozonrisikos für die Waldregionen Bayerns am Beispiel des Jahres 2002 und des Extremtrockenjahres 2003 auf der Basis der externen Ozonexposition und der internen Ozonaufnahme; Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung; 22, S. 579–595
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (2008): Waldzustandsbericht 2008; BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN, HRSG.; München
- BENECKE U., SCHULZE E.-D., MATYSSEK R. UND HAVRANEK W.M. (1981): Environmental control of CO₂-assimilation and leaf conductance in *Larix decidua* Mill. I. A comparison of contrasting natural environments; Oecologia; 50; S. 54–61
- BEYERS J.L., RIECHERS G.H. UND TEMPLE P.J. (1992): Effects of long-term ozone exposure and drought on the photosynthetic capacity of ponderosa pine (*Pinus ponderosa* Laws.); New Phytologist; 122; S. 81–90
- BLACK V.J., STEWART C.A., ROBERTS J.A. UND BLACK C.R. (2007): Ozone affects gas exchange, growth and reproductive development in *Brassica campestris* (Wisconsin Fast Plants); New Phytologist; 176; S. 150–163
- BLUMENRÖTHER M.C., LÖW M., MATYSSEK R. UND ORWALD W. (2007): Flux-based response of sucrose and starch in leaves of adult beech trees (*Fagus sylvatica* L.) under chronic free-air fumigation; Plant Biology; 9; S. 207–214
- BRAUN S., SCHINDLER CH. UND LEUZINGER S. (2010): Use of sap flow measurements to validate stomatal functions for mature beech (*Fagus sylvatica*) in view of ozone uptake calculations; Environmental Pollution; 158; S. 2954–2963
- BROADMEADOW M. (1998): Ozone and forest trees; New Phytologist; 139; S. 123–125
- BRÖNNIMANN S. (2002): Ozon in der Atmosphäre; Verlag Paul Haupt; Bern, Stuttgart, Wien

- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2007): Bericht über den Zustand des Waldes 2006; BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (BMELV), HRSG.; Berlin
- BURGER H. (1950): Holz, Blattmenge und Zuwachs. V. Mitteilung: Fichten und Föhren verschiedener Herkunft auf verschiedenen Kulturorten. BURGER H. HRSG.; Mitteilungen der Schweizerischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen; Kommissionsverlag von Beer & CIE; Zürich
- BURGESS S.S.O. UND DAWSON T.E. (2008): Using branch and basal trunk sap flow measurements to estimate whole-plant water capacitance: a caution; *Plant Soil*; 305; S. 5–13
- CERMAK J., KUCERA J. UND NADEZHINA N. (2004): Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands; *Trees*; 18; S. 529–546
- CHAPPELKA A.H. UND SAMUELSON L.J. (1998): Ambient ozone effects on forest trees of the eastern United States: a review; *New Phytologist*; 139; S. 91–108
- CIESLIK S. (2004): Ozone uptake by various surface types: a comparison between dose and exposure; *Atmospheric Environment*; 38; S. 2409–2420
- CIESLIK S. (2009): Ozone fluxes over various plant ecosystems in Italy: A review; *Environmental Pollution*; 157; S. 1487–1496
- DALEY M.J. UND PHILLIPS N.G. (2006): Interspecific variation in nighttime transpiration and stomatal conductance in a mixed New England deciduous forest; *Tree Physiology*; 26; S. 411–419
- DAUDET F.A., LE ROUX X., SINOQUET H. UND ADAM B. (1999): Wind speed and leaf boundary layer conductance variation within tree crown. Consequences on leaf-to-atmosphere coupling and tree functions; *Agricultural and Forest Meteorology*; 97; S. 171–185
- DAWSON T.E. (1996): Determining water use by trees and forests from isotopic, energy balance and transpiration analyses: the roles of tree size and hydraulic lift; *Tree Physiology*; 16; S. 263–272
- DAWSON T.E., BURGESS S.S.O., TU K.P., OLIVEIRA R.S., SANTIAGO L.S., FISHER J.B., SIMONIN K.A. UND AMBROSE A.R. (2007): Nighttime transpiration in woody plants from contrasting ecosystems; *Tree Physiology*; 27; S. 561–575
- DECKMYN G., OP DE BECK M., LÖW M., THEN C., VERBEECK H., WIPFLER P. UND CEULEMANS R. (2007): Modelling ozone effects on adult beech trees through simulation of defence, damage, and repair costs: Implementation of the CASIROZ ozone model in the ANAFORE forest model; *Plant Biology*; 9; S. 320–330
- DITTMAR C., PFAFFELMOSER K., RÖTZER T. UND ELLING W. (2005): Quantifying ozone uptake and its effects on the stand level of common beech (*Fagus sylvatica* L.) in Southern Germany; *Environmental Pollution*; 134; S. 1–4
- DIXON M., LE THIEC D. UND GARREC J.P. (1998): Reactions of Norway spruce and beech trees to two years of ozone exposure and episodic drought; *Environmental and Experimental Botany*; 40; S. 77–91
- DIZENGREMEL P. (2001): Effects of ozone on the carbon metabolism of forest trees; *Plant Physiology and Biochemistry*; 39; S. 729–742
- DIZENGREMEL P., LE THIEC D., BAGARD M. UND JOLIVET Y. (2008): Ozone risk assessment for plants: central role of metabolism-dependent changes in reducing power; *Environmental Pollution*; 156; S. 11–15
- ELLENBERG H. (1996): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht; 5. Auflage; Eugen Ulmer Verlag; Stuttgart
- EMBERSON L., ASHMORE M., CAMBRIDGE H.M., SIMPSON D. UND TUOVINEN J.-P. (2000a): Modelling stomatal ozone flux across Europe; *Environmental Pollution*; 109; S. 403–413
- EMBERSON L., WIESER G. UND ASHMORE M. (2000b): Modelling of stomatal conductance and ozone flux of Norway spruce: comparison with field data; *Environmental Pollution*; 109; S. 393–402
- EMBERSON L., BÜKER P. UND ASHMORE M. (2007): Assessing the risk caused by ground level ozone to European forest trees: A case study in pine, beech and oak across different climate regions; *Environmental Pollution*; 147; S. 454–466

- EWERS B.E. UND OREN R. (2000): Analyses of assumptions and errors in the calculation of stomatal conductance from sap flux measurements; *Tree Physiology*; 20; S. 579–589
- EWERS B.E., OREN R., PHILLIPS N., STRÖMGREN M. UND LINDER S. (2001): Mean canopy stomatal conductance responses to water and nutrient availabilities in *Picea abies* and *Pinus taeda*; *Tree Physiology*; 21; S. 841–850
- EWERS B.E., GOWER S.T., BOND-LAMBERTY B. UND WAND C.K. (2005): Effects of stand age and tree species on canopy transpiration and average stomatal conductance of boreal forests; *Plant, Cell and Environment*; 28; S. 660–678
- FABIAN P. (1995): Veränderung der stratosphärischen Ozonschicht durch menschliche Eingriffe; *Wetter und Leben, Sonderdruck*; 47; S. 235–249
- FABIAN P. (2002): *Leben im Treibhaus: Unser Klimasystem - und was wir daraus machen*; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg
- FABIAN P., HÄBERLE K.-H., HEERDT C., PRETZSCH H., WERNER H. UND WIPFLER P. (2005): Kranzberg Forest Experiment: Plot characterization and free-air ozone fumigation. Proc. Casiroz UN/ECE Workshop "Critical levels of ozone" Obergurgel/Austria, Nov.15-19, 2005 (G. Wieser, Ed.); www.casiroz.de.
- FALGE E., RYEL R., ALSHEIMER M. UND TENHUNEN J.D. (1997): Effects of stand structure and physiology on forest gas exchange: a simulation study for Norway spruce; *Trees*; 11; S. 436–448
- FALGE E., TENHUNEN J.D., RYEL R., ALSHEIMER M. UND KÖSTNER B. (2000): Modelling age- and density-related gas exchange of *Picea abies* canopies in the Fichtelgebirge, Germany; *Annals of Forest Sciences*; 57; S. 229–243
- FARMAN J.C., GARDINER B.G. UND SHANKLIN J.D. (1985): Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction; *Nature*; 315; S. 207–210
- FERRETTI M., FAGNANO M., AMORIELLO T., BADIANI M., BALLARIN-DENTI A., BUFFONI A., BUSSOTTI F., CASTAGNA A., CIESLIK S., COSTANTINI A., DE MARCO A., GEROSA G., LORENZINI G., MANES F., MEROLA G., NALI C., PAOLETTI E., PETRICCIONE B., RACALBUTO S., RANA G., RANIERI A., TAGLIAFERRI A., VIALETTO G. UND VITALE M. (2007): Measuring, modelling and testing ozone exposure, flux and effects on vegetation in southern European conditions - What does not work? A review from Italy; *Environmental Pollution*; 146; S. 648–658
- FISCHER J.B., BALDOCCHI D.D., MISSON L., DAWSON T.E. UND GOLDSTEIN A.H. (2007): What the towers don't see at night: nocturnal sap flow in trees and shrubs at two AmeriFlux sites in California; *Tree Physiology*; 27; S. 597–610
- FOWLER D., CAPE J.N., COYLE M., FLECHARD C., KUYLENSTIERNA J., HICKS K., DERWENT D., JOHNSIN C. UND STEVENSON D. (1999): The global exposure of forests to air pollutants; *Water, Air, and Soil Pollution*; 116; S. 5–32
- FOWLER D., AMANN M., ANDERSON R., ASHMORE M., COX P.M., DEPLEDGE M., DERWENT D., GRENNFELT P., HEWITT N., HOV O., JENKIN M., KELLY F., LISS P., PILLING M., PYLE J., SLINGO J. UND STEFENSON D. (2008): Ground-level ozone in the 21st century: Future trends, impacts and policy implications; *The Royal Society Policy Document*; S. 5-132
- FREDERICKSEN T.S., JOYCE B.J., SKELLY J.M., STEINER K.C., KOLB T.E., KOUTERICK K.B., SAVAGE J.E. UND SNYDER K.R. (1995): Physiology, morphology, and ozone uptake of leaves of black cherry seedlings, saplings, and canopy trees; *Environmental Pollution*; 89; S. 273–283
- FUHRER J. (1994): The critical level for ozone to protect agricultural crops - an assessment of data from European open-top chamber experiments. FUHRER J. & ACHERMANN B., HRSG.; *Critical levels for ozone. A UN-ECE workshop report*, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene, FAC-Report, vol. 16. Liebefeld-Bern, Schweiz, S. 42–57
- FUHRER J., SKÄRBY L. UND ASHMORE M. (1997): Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe; *Environmental Pollution*; 97; S. 91–106
- GEROSA G., VITALE M., FINCO A., MANES F., DENTI A.B. UND CIESLIK S. (2005): Ozone uptake by an evergreen Mediterranean Forest (*Quercus ilex*) in Italy. Part I: Micrometeorological flux measurements and flux partitioning; *Atmospheric Environment*; 39; S. 3255–3266

- GIELEN B., LÖW M., DECKMYN G., METZGER U., FRANCK F., HEERDT C., MATYSSEK R., VALCKE R. UND CEULEMANS R. (2007): Chronic ozone exposure affects leaf senescence of beech: a chlorophyll fluorescence approach; *Journal of Experimental Botany*; 58; (4); S. 785–795
- GOLDSTEIN A.H., MCKAY M., KURPIUS M.R., SCHADE G.W., LEE A., HOLZINGER R. UND RASMUSSEN R.A. (2004): Forest thinning experiment confirms ozone deposition to forest canopy is dominated by reaction with biogenic VOCs; *Geophysical Research Letters*; 31; L22106, S. 1-4
- GÖTTLEIN A., RODENKIRCHEN H., HÄBERLE K.-H. UND MATYSSEK R. (2009): Nutritional effects by the extreme summer 2003 in the free air ozone fumigation experiment at the Kranzberger Forst; *European Journal of Forest Research*; 128; S. 129–134
- GÖTZ, B. (1996): Ozon und Trockenstress: Wirkungen auf den Gaswechsel von Fichte: IHW-Verlag, Eching. (Libri Botanici; 16)
- GRAMS T.E.E., KOZOVITS A.R., REITER I.M., WINKLER J.B., SOMMERKORN M., BLASCHKE H., HÄBERLE K.-H. UND MATYSSEK R. (2002): Quantifying competitiveness in woody plants; *Plant Biology*; 4; S. 153–158
- GRANIER A. (1985): Une nouvelle methode pour la mesure de flux de seve brute dans le tronc des arbres; *Annals of Forest Sciences*; 42; S. 193–200
- GRANIER A. (1987): Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements; *Tree Physiology*; 3; S. 309–320
- GRANIER A., BIRON P. UND LEMOINE D. (2000): Water balance, transpiration and canopy conductance in two beech stands; *Agricultural and Forest Meteorology*; 10; S. 291-308
- GREITNER C.S., PELL E.J. UND WINNER W.E. (1994): Analysis of aspen foliage exposed to multiple stresses: ozone, nitrogen deficiency and drought; *New Phytologist*; 127; S. 579–589
- GROTE R. (2002): Foliage and branch biomass estimation of coniferous and deciduous tree species; *Silva Fennica*; 36; (4); S. 779–788
- GROTE R. (2003): Estimation of crown radii and crown projection area stem size and tree position; *Annals of Forest Sciences*; 60; S. 393–402
- GRULKE N.E. UND RETZLAFF W.A. (2001): Changes in physiological attributes of ponderosa pine from seedling to mature tree; *Tree Physiology*; 21; S. 275–286
- GRULKE N.E., PREISLER H.K, ROSE C., KIRSCH J. UND BALDUAN L. (2002): O₃ uptake and drought stress effects on carbon acquisition of ponderosa pine in natural stands; *New Phytologist*; 154; S. 621–631
- GRULKE N.E., JOHNSON R., ESPERANZA A., JONES D., NGUYEN T., POSCH S. UND TAUSZ M. (2003): Canopy transpiration of Jeffrey pine in mesic and xeric microsites: O₃ uptake and injury response; *Tree Physiology*; 17; S. 292–298
- GRULKE N.E., ALONSO R., NGUYEN T., CASCIO C. UND DOBROWOLSKI W. (2004): Stomata open at night in pole sized and mature ponderosa pine: implications for O₃ exposure metrics; *Tree Physiology*; 24; S. 1001–1010
- GRULKE N.E., PAOLETTI E. UND HEATH R.L. (2007a): Chronic vs. short-term acute O₃ exposure effects on nocturnal transpiration in two californian oaks; *The Scientific World Journal*; 7; (S1): S. 134–140
- GRULKE N.E., PAOLETTI E. UND HEATH R.L. (2007b): Comparison of calculated and measured foliar O₃ flux in crop and forest species; *Environmental Pollution*; 146; S. 640–647
- GRÜNHAGE L. UND JÄGER H.-J. (2003): From critical levels to critical loads for ozone: a discussion of a new experimental and modelling approach for establishing flux-response relationships for agricultural crops and native plant species; *Environmental Pollution*; 125; S. 99–100
- GRÜNHAGE L., KRUPA S.V., LEGGE A.H. UND JÄGER H.-J. (2004): Ambient flux-based critical values of ozone for protecting vegetation: differing spatial scales and uncertainties in risk assessment; *Atmospheric Environment*; 38; S. 2433–2437
- GÜNTHARDT-GOERG M.S., MATYSSEK R. UND KELLER T. (1993): Birke (*Betula pendula*): Mögliche Akklimatisierung an Ozon-Streß; *Forstwissenschaftliches Centralblatt*; 112; S. 46–49

- HÄBERLE K.-H., REITER I.M., NUNN A.J., GRUPPE A., SIMON U., GOSSNER M., WERNER H., LEUCHNER M., HEERDT C., FABIAN P. UND MATYSSEK R. (2003): KROCO, Freising, Germany, canopy research in a temperature mixed forest of Southern Germany; BASSET Y., HORLYCK V. UND WRIGHT S.J., HRSG.; Studying forest canopies from above: the international canopy crane network, Smithsonian Tropical Research Institute and UNEP; Panama, S. 71-78
- HÄGELE T. (2001): Wachstum und Safffluss von Fichten (*Picea abies* L. (Karst.)) und Buchen (*Fagus sylvatica* L.) während des Austriebs im Frühjahr [Diplomarbeit]. Fachgebiet Gartenbau. FH WEIHESTEPHAN; Freising
- HAVRANEK W.M., PFEIFHOFER H. UND GRILL D. (1990): Pigmentgehalte und Gaswechsel von Tief- und Hochlagenfichten nach chronischer Ozonbelastung; Forstwissenschaftliches Centralblatt; 109; S. 200–209
- HE X.-Y., FU S.-L., CHEN W., ZHAO T.-H., XU S. UND TUBA Z. (2007): Changes in effects of ozone exposure on growth, photosynthesis, and respiration of *Ginkgo biloba* in Shenyang urban area; Photosynthetica; 45; (4); S. 555–561
- HEATH R.L. UND TAYLOR G.E. (JR.) (1997): Physiological process and plant response to ozone exposure. In: SANDERMANN H., WELLBURN F.M. & HEATH R.L., HRSG.; Forest decline and ozone (Ecological Studies; 127); Springer Verlag; Berlin; S. 317-368
- HETHERINGTON A.M. UND WOODWARD F.I. (2003): The role of stomata in sensing and driving environmental change; Nature; 424; S. 901–908
- JANSSEN J. UND LAATZ W. (2007): Statistische Datenanalyse mit SPSS für Windows; 6. Aufl.; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York
- JARVIS P. (1976): Interpretation of variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field; Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B - Biological Sciences; 273; S. 593–610
- JONES H.G. (1998): Stomatal control of photosynthesis and transpiration; Journal of Experimental Botany; 49; S. 387–398
- KANGASJÄRVI J., TALVINEN J., UTRIAINEN M. UND KARJALAINEN R. (1994): Plant defence systems induced by ozone; Plant, Cell and Environment; 17; S. 783–794
- KANGASJÄRVI J., PELLINEN R., TUOMINEN H., JULKUNEN-TIITTO R. UND KIISKINEN M. (1996): Ozone-induced defense reactions in birch (*Betula pendula* Roth.); AHNJA M.R., BOERJAN W. UND NEALE D.B., HRSG.; Somatic cell genetics and molecular genetics of trees; Dordrecht; Kluwer Academic Publishers; S. 265-271
- KARLSSON P.E., PLEIJEL H., KARLSSON G.P., MEDIN E.L. UND SKÄRBY L. (2000): Simulations of stomatal conductance and ozone uptake to Norway spruce saplings in open-top chambers; Environmental Pollution; 109; S. 443–451
- KARLSSON P.E., UDDLING J., BRAUN S., BROADMEADOW M., ELVIRA S., GIMENO B.S., LE THIEC D., OKSANEN E., VANDERMEIREN K., WILKINSON M. UND EMBERSON L. (2004): New critical levels for ozone effects on young trees based on AOT40 and simulated cumulative leaf uptake of ozone; Atmospheric Environment; 38; S. 2283–2294
- KARLSSON P.E., HANSSON M., HÖGLUND H.-O. UND PLEIJEL H. (2006): Ozone concentration gradients and wind conditions in Norway spruce (*Picea abies*) forests in Sweden; Atmospheric Environment; 40; S. 1610–1618
- KARLSSON P.E., BRAUN S., BROADMEADOW M., ELVIRA S., EMBERSON L., GIMENO B.S., LE THIEC D., NOVAK K., OKSANEN E., SCHAUB M., UDDLING J. UND WILKINSON M. (2007a): Risk assessments for forest trees: the performance of the ozone flux versus the AOT concepts; Environmental Pollution; 146; S. 608–616
- KARLSSON P.E., TANG L., SUNDBERG J., CHEN D., LINDSKOG A. UND PLEIJEL H. (2007b): Increasing risk for negative ozone impacts on vegetation in northern Sweden; Environmental Pollution; 150; S. 96–106
- KARNOSKY D.F., PREGITZER K.S., ZAK D.R., KUBISKE M.E., HENDREY G.R., WEINSTEIN D., NOSAL M. UND PERCY K.E. (2005): Scaling ozone responses of forest trees to the ecosystem level in a changing climate; Plant, Cell and Environment; 28; S. 965–981

- KARNOSKY D.F., SKELLY J.M., PERCY K.E. UND CHAPPELKA A.H. (2007a): Perspectives regarding 50 years of research on effects of tropospheric ozone air pollution on US forests; *Environmental Pollution*; 147; S. 489–506
- KARNOSKY D.F., WERNER H., HOLOPAINEN T., PERCY K.E., OKSANEN T., OKSANEN E., HEERDT C., FABIAN P., NAGY J., HEILMAN W., COX R., NELSON N.D. UND MATYSSEK R. (2007b): Free-air exposure systems to scale up ozone research to mature trees; *Plant Biology*; 9; S. 181–190
- KELLIHER F.M., LEUNING R., RAUPACH M.R. UND SCHULZE E.-D. (1995): Maximum conductances for evaporation from global vegetation types; *Agricultural and Forest Meteorology*; 73; S. 1–16
- KERSTIENS G. UND LENDZIAN K. (1989): Interactions between ozone and plant cuticles II. Water permeability; *New Phytologist*; 112; S. 121–127
- KITAO M., LÖW M., HEERDT C., GRAMS T.E.E., HÄBERLE K.-H. UND MATYSSEK R. (2009): Effects of chronic elevated ozone exposure on gas exchange responses of adult beech trees (*Fagus sylvatica*) as related to the within-canopy light gradient; *Environmental Pollution*; 157; S. 537–544
- KOCH J.R., CREELMAN R.A., ESHITA S.M., SESKAR M., MULLET J.E. UND DAVIS K.R. (2000): Ozone sensitivity in hybrid poplar correlates with insensitivity to both salicylic acid and jasmonic acid. The role of programmed cell death in lesion formation; *Plant Physiology*; 123; S. 487–496
- KOLB T.T. UND MATYSSEK R. (2001): Limitations and perspectives about scaling ozone impacts in trees; *Environmental Pollution*; 115; S. 373–393
- KÖRNER C. UND PERTERER J. (1988): Nehmen immergrüne Waldbäume im Winter Schadgase auf?; *Berichte der Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (GSF) Neuherberg/München*
- KÖRNER C. (2003): Carbon limitation in trees; *Journal of Ecology*; 91; S. 4–17
- KOSTIAINEN K., KAAKINEN S., WARSTA E., KUBISKE M.E., NELSON N.D., SOBER J., KARNOSKY D.F., SARANPÄÄ P. UND VAPAAVUORI E. (2008): Wood properties of trembling aspen and paper birch after 5 years of exposure to elevated concentrations of CO₂ and O₃; *Tree Physiology*; 28; S. 805–813
- KÖSTNER B.M.M., SCHULZE E.-D., KELLIHER F.M., HOLLINGER D.Y., BYERS J.N., HUNT J.E., MCSEVENY T.M., MESERTH R. UND WEIR P.L. (1992): Transpiration and canopy conductance in a pristine broad-leaved forest of *Nothofagus*: an analysis of xylem sap flow and eddy correlation measurements; *Oecologia*; 91; S. 350–359
- KÖSTNER B., MATYSSEK R., HEILMEIER H., CLAUSNITZER F. UND NUNN A.J. (2008): Sap flow measurements as a basis for assessing trace-gas exchange of trees; *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*; 103; (1); S. 14–33
- KOZOVITS A. R., MATYSSEK R., WINKLER J.B., GÖTTLEIN A., BLASCHKE H. UND GRAMS T.E.E. (2005a): Above-ground space sequestration determines competitive success in juvenile beech and spruce trees; *New Phytologist*; 167; S. 181–196
- KOZOVITS A. R., MATYSSEK R., BLASCHKE H., GÖTTLEIN A. UND GRAMS T.E.E. (2005b): Competition increasingly dominates the responsiveness of juvenile beech and spruce to elevated CO₂ and /or O₃ concentrations throughout two subsequent growing seasons; *Global Change Biology*; 11; S. 1387–1401
- KUBISKE M.E., QUINN V.S., MARQUARDT P.E. UND KARNOSKY D.F. (2007): Effects of elevated atmospheric CO₂ and/or O₃ on intra- and interspecific competitive ability of aspen; *Plant Biology*; 9; S. 342–355
- KURPIUS M.R., PANEK J.A., NIKOLOV N.T., MCKAY M. UND GOLDSTEIN A.H. (2003): Partitioning of water flux in a Sierra Nevada ponderosa pine plantation; *Agricultural and Forest Meteorology*; 117; S. 173–192
- LAISK A., KULL O. UND MOLDAU H. (1989): Ozone concentration in leaf intercellular air spaces is close to zero; *Plant Physiology*; 90; S. 1163–1167
- LANGE O.L., LÖSCH R., SCHULZE E.-D. UND KAPPEN L. (1971): Responses of stomata to changes in humidity; *Planta*; 100; S. 76–86

- LANGEBARTELS C., HELLER W., FÜHRER G., LIPPERT M., SIMONS S. UND SANDERMANN H. (JR.) (1998): Memory effects in the action of ozone on conifers; *Ecotoxicology and Environmental Safety*; 41; S. 62–72
- LANGEBARTELS C. UND KANGASJÄRVI J. (2004): Ethylene and jasmonate as regulators of cell death in disease resistance; SANDERMANN H., HRSG.; *Molecular Ecotoxicology of Plants*, (Ecological Studies; 170); Springer Verlag; Berlin, Heidelberg
- LEUZINGER S., ZOTZ G., ASSHOFF R. UND KÖRNER C. (2005): Responses of deciduous forest to severe drought in Central Europe; *Tree Physiology*; 25; S. 641–650
- LIPPERT M., STEINER K., PAYER H.-D., SIMONS S., LANGEBARTELS C. UND SANDERMANN H. (JR.) (1996): Assessing the impact of ozone on photosynthesis of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in environmental chambers; *Trees*; 10; S. 268–275
- LÖW M., HERBINGER K., NUNN A.J., HÄBERLE K.-H., LEUCHNER M., HEERDT C., WERNER H., WIPFLER P., PRETZSCH H., TAUSZ M. UND MATYSSEK R. (2006): Extraordinary drought of 2003 overrules ozone impact on adult beech trees (*Fagus sylvatica*); *Trees*; 20; S. 539–548
- LÖW M., HÄBERLE K.-H., WARREN C.R. UND MATYSSEK R. (2007): O₃ flux-related responsiveness of photosynthesis, respiration, and stomatal conductance of adult *Fagus sylvatica* to experimentally enhanced free-air O₃ exposure; *Plant Biology*; 9; S. 197–206
- LUNDBLAD M. UND LINDROTH A. (2002): Stand transpiration and sapflow density in relation to weather, soil moisture and stand characteristics; *Basic and Applied Ecology*; 3; S. 229–243
- LÜTTGE U., KLUGE M. UND BAUER G. (1999): Botanik; 3. Auflage; WILEY-VCH Verlag GmbH Weinheim, New York, Chichester, Brisbane, Singapore, Toronto
- MAIER C.A. UND TESKEY R.O. (1992): Internal and external control of net photosynthesis and stomatal conductance of mature eastern white pine (*Pinus strobus*); *Canadian Journal of Forest Research*; 22; S. 1387–1394
- MAIER-MAERCKER U. (1997): Experiments on the water balance of individual attached twigs of *Picea abies* L. Karst. in pure and ozone-enriched air; *Trees*; 11; S. 229–239
- MAIER-MAERCKER U. (1998): Image analysis of the stomatal cell walls of *Picea abies* (L.) Karst. in pure and ozone enriched air; *Trees*; 12; S. 181–185
- MANES F., VITALE M., FABI A.M., DE SANTIS F. UND ZONA D. (2007): Estimates of potential ozone stomatal uptake in mature trees of *Quercus ilex* in a Mediterranean climate; *Environmental and Experimental Botany*; 59; S. 235–241
- MARKS C.O. UND LECHOWICZ M.J. (2007): The ecological and functional correlates of nocturnal transpiration; *Tree Physiology*; 27; S. 577–584
- MARTIN T.A., BROWN K.J., CERMAK J., CEULEMANS R., KUCERA J., MEINZER F.C., ROMBOLD J.S., SPRUGEL D.G. UND HINCKLEY T.M. (1997): Crown conductance and tree and stand transpiration in a second-growth *Abies amabilis* forest; *Canadian Journal of Forest Research*; 27; S. 797–808
- MARTIN T.A., HINCKLEY T.M., MEINZER F.C. UND SPRUGEL D.G. (1999): Boundary layer conductance, leaf temperature and transpiration of *Abies amabilis* branches; *Tree Physiology*; 19; S. 435–443
- MASSMAN W. J., MUSSELMAN R. UND LEFOHN A.S. (2000): A conceptual ozone dose-response model to develop a standard to protect vegetation; *Atmospheric Environment*; 34; S. 745–759
- MASSMAN W.J. (2004): Toward an ozone standard to protect vegetation based on effective dose: a review of deposition resistances and a possible metric; *Atmospheric Environment*; 38; S. 2323–2337
- MATYSSEK R., GÜNTHARDT-GOERG M.S., MAURER S. UND KELLER T. (1995a): Nighttime exposure to ozone reduces whole-plant production in *Betula pendula*; *Tree Physiology*; 15; S. 159–165
- MATYSSEK R., REICH P.B., OREN R. UND WINNER W.E. (1995b): Response mechanisms of conifers to air pollution. SMITH W.K. & HINCKLEY T.H., HRSG.; *Physiological ecology of coniferous forests*. (Physiological ecology series); New York; Academic Press

- MATYSSEK R., HAVRANEK W.M., WIESER G. UND INNES J. (1997): Ozone and the forest in Austria and Switzerland; SANDERMANN H., WELLBURN F.M. UND HEATH J., HRSG.; Forest decline and ozone. (Ecological Studies; 127); Springer Verlag; Berlin; S. 95-134
- MATYSSEK R. UND INNES J. (1999): Ozone - a risk factor for trees and forests in Europe?; Water, Air, and Soil Pollution; 116; S. 199-226
- MATYSSEK R. UND SANDERMANN H. (JR) (2003): Impact of ozone on trees: an ecophysiological perspective; Progress in Botany; 64; S. 349-404
- MATYSSEK R., WIESER G., NUNN A.J., KOZOVITS A.R., REITER I.M., HEERDT C., WINKLER J.B., BAUMGARTEN M., HÄBERLE K.-H., GRAMS T.E.E., WERNER H., FABIAN P. UND HAVRANEK W.M. (2004): Comparison between AOT40 and ozone uptake in forest trees of different species, age and site conditions; Atmospheric Environment; 38; S. 2271-2281
- MATYSSEK R., WIESER G., NUNN A. J., LÖW M., THEN C., HERBINGER K., BLUMENRÖTHER M.C., JEHNES S., REITER I.M., HEERDT C., KOCH N., HÄBERLE K.-H., HABERER K., WERNER H., TAUSZ M., FABIAN P., RENNENBERG H., GRILL D. UND OßWALD W. (2005): How sensitive are forest trees to ozone? - New research on an old issue; OMASA K., NOUCHI I. UND DEKOK L., HRSG.; Plant responses to air pollution and global change; Springer Verlag; Tokyo
- MATYSSEK R., LE THIEC D., LÖW M., DIZENGREMEL P., NUNN A.J. UND HÄBERLE K.-H. (2006): Interactions between drought and O₃ stress in forest trees; Plant Biology; 8; S. 11-17
- MATYSSEK R., BAHNWEG G., CEULEMANS R., FABIAN P., GRILL D., HANKE D.E., KRAIGHER H., OßWALD W., RENNENBERG H., SANDERMANN H., TAUSZ M. UND WIESER G. (2007): Synopsis of the CASIROZ case study: Carbon sink strength of *Fagus sylvatica* L. in a changing environment - experimental risk assessment of mitigation by chronic ozone impact; Plant Biology; 9; S. 163-180
- MATYSSEK R. UND WIESER G. (2007): Linking ozone uptake and defense towards a mechanistic risk assessment for forest trees; New Phytologist; 174; S. 7-9
- MATYSSEK R., SANDERMANN H., WIESER G., BOOKER F., CIESLIK S., MUSSELMAN R. UND ERNST D. (2008): The challenge of making ozone risk assessment for forest trees more mechanistic; Environmental Pollution; 156; S. 567-582
- MATYSSEK R., WIESER G., PATZNER K., BLASCHKE H. UND HÄBERLE K.-H. (2009): Transpiration of forest trees and stands at different altitude: consistencies rather than contrasts?; European Journal of Forest Research; 128; S. 579-596
- MATYSSEK R., FROMM J., RENNENBERG H. UND ROLOFF G. (2010a): Biologie der Bäume: Von der Zelle zur globalen Ebene; Eugen Ulmer Verlag; Stuttgart
- MATYSSEK R., KARNOSKY D.F., WIESER G., PERCY K.E., OKSANEN E., GRAMS T.E.E., KUBISKE M.E., HANKE D.E. UND PRETZSCH H. (2010b): Advances in understanding ozone impact on forest trees: messages from novel phytotron and free-air fumigation studies; Environmental Pollution; 158; S. 1990-2006
- MATYSSEK R., WIESER G., CEULEMANS R., RENNENBERG H., PRETZSCH H., HABERER K., LÖW M., NUNN A.J., WERNER H., WIPFLER P., OßWALD W., NIKOLOVA P., HANKE D.E., KRAIGHER H., TAUSZ M., BAHNWEG G., KITAO M., DIELER J., SANDERMANN H., HERBINGER K., GREBENC T., BLUMENRÖTHER M.C., DECKMYN G., GRAMS T.E.E., HEERDT C., LEUCHNER M., FABIAN P. UND HÄBERLE K.-H. (2010c): Enhanced ozone strongly reduces carbon sink strength of adult beech (*Fagus sylvatica*) - Resume from free-air fumigation study at Kranzberger Forest; Environmental Pollution; 158; S. 2527-2532
- MCLAUGHLIN S.B., NOSAL M., WULLSCHLEGER S.D. UND SUN G. (2007a): Interactive effects of ozone and climate on tree growth and water use in a southern Appalachian forest in the USA; New Phytologist; 174; S. 109-124
- MCLAUGHLIN S.B., WULLSCHLEGER S.D. UND SUN G., N. M. (2007b): Interactive effects of ozone and climate on water use, soil moisture content and streamflow in a southern Appalachian forest in the USA; New Phytologist; 174; S. 125-136
- MENZEL A., HEERDT C. UND WERNER H. (2004): Sommer 2003: Mehr Hitze, mehr Ozon; LWF aktuell; 43; S. 7-8

- MEREU S., FINCO A., GEROSA G., FUSARO L., MUYS B. UND MANES F. (2009): Night-time ozone uptake by mediterranean species; *Biogeosciences Discussions*; 6; S. 2007–2038
- MIKKELSEN T.N. UND RO-POULSEN H. (1994): Exposure of Norway spruces to ozone increases the sensitivity of current year needles to photoinhibition and desiccation; *New Phytologist*; 128; S. 153–163
- MIKKELSEN T.N., RO-POULSEN H., PILEGAARD K., HOVMAND M.F., JENSEN N.O., CHRISTENSEN C.S. UND HUMMELSHOEJ P. (2000): Ozone uptake by an evergreen forest canopy: temporal variation and possible mechanisms; *Environmental Pollution*; 109; S. 423–429
- MILLER P.R. UND MCBRIDE J.M. (1999): Oxidant air pollution impacts in the montane forest of southern California: A case study of the San Bernardino Mountains; Springer Verlag; New York
- MOLINA M.J. UND ROWLAND F.S. (1974): Stratospheric sink for chlorofluoromethans: chlorine atom-catalysed destruction of ozone; *Nature*; 249; S. 810–812
- MOREN A.-S., LINDROTH A., FLOWER-ELLIS J., CIENCIALA E. UND MÖLDER M. (2000): Branch transpiration of pine and spruce scaled to tree and canopy using needle biomass distributions; *Trees*; 14; S. 384–397
- MUSSELMAN R.C., LEFOHN A.S., MASSMAN W.J. UND HEATH R.L. (2006): A critical review and analysis of the use of exposure- and flux-based ozone indices for predicting vegetation effects; *Atmospheric Environment*; 40; S. 1869–1888
- MUZIKA R.M., GUYETTE R.P., ZIELONKA T. UND LIEBHOLD A.M. (2004): The influence of O₃, NO₂ and SO₂ on growth of *Picea abies* and *Fagus sylvatica* in the Carpathian Mountains; *Environmental Pollution*; 130; S. 65–71
- NALI C., PAOLETTI E., MARABOTTINI R., DELLA ROCCA G., LORENZINI G., PAOLACCI A.R., CIAFFI M. UND BADIANI M. (2004): Ecophysiological and biochemical strategies of response to ozone in Mediterranean evergreen broadleaf species; *Atmospheric Environment*; 38; S. 2247–2257
- NUNN A.J., REITER I.M., HÄBERLE K.-H., WERNER H., LANGEBARTELS C., SANDERMANN H., HEERDT C., FABIAN P. UND MATYSSEK R. (2002): "Free-Air" ozone canopy fumigation in an old-growth mixed forest: concept and observations in beech; *Phyton (Austria) Special issue: "Global Change"*; 42; S. 105–119
- NUNN A. J. (2005): Risiko-Einschätzung der chronisch erhöhten Ozonbelastung mittels "Free-Air"-Begasung von Buchen (*Fagus sylvatica*) und Fichten (*Picea abies*) eines forstlich begründeten Mischbestandes [Dissertation]. Lehrstuhl für Ökophysiologie der Pflanzen, Department für Ökologie, Wissenschaftszentrum Weihenstephan. TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN; Freising
- NUNN A.J., KOZOVITS A. R., REITER I.M., HEERDT C., LEUCHNER M., LÜTZ C., LIU X., LÖW M., WINKLER J. B., GRAMS T.E.E., HÄBERLE K.-H., WERNER H., FABIAN P., RENNENBERG H. UND MATYSSEK R. (2005): Comparison of ozone uptake and sensitivity between a phytotron study with young beech and a field experiment with adult beech (*Fagus sylvatica*); *Environmental Pollution*; 137; S. 494–506
- NUNN A.J., WIESER G., REITER I.M., HÄBERLE K.-H., GROTE R., HAVRANEK W.M. UND MATYSSEK R. (2006): Testing the unifying theory of ozone sensitivity with mature trees of *Fagus sylvatica* and *Picea abies*; *Tree Physiology*; 26; S. 1391–1401
- NUNN A.J., WIESER G., METZGER U., LÖW M., WIPFLER P., HÄBERLE K.-H. UND MATYSSEK R. (2007): Exemplifying whole-plant ozone uptake in adult forest trees of contrasting species and site conditions; *Environmental Pollution*; 146; S. 629–639
- NUNN A.J., CIESLIK S., METZGER U., WIESER G. UND MATYSSEK R. (2010): Combining sap flow and eddy covariance approaches to derive stomatal and non-stomatal O₃ fluxes in a forest stand; *Environmental Pollution*; 158; S. 2014–2022
- OKSANEN E. (2003): Physiological response of birch (*Betula pendula*) to ozone: a comparison between open-soil-grown trees for six growing seasons and potted seedlings exposed for one season; *Tree Physiology*; 23; S. 603–614
- OKSANEN E., HÄIKIÖ E., SOBER J. UND KARNOSKY D.F. (2003): Ozone-induced H₂O₂ accumulation in field-grown aspen and birch is linked to foliar ultrastructure and peroxisomal activity; *New Phytologist*; 161; S. 791–799

- OP DE BECK M., LÖW M., VERBEECK H. UND DECKMYN G. (2007): Suitability of a combined stomatal conductance and photosynthesis model for calculation of leaf-level ozone fluxes; *Plant Biology*; 9; S. 331–341
- OREN R., SCHULZE E.-D., MATYSSEK R. UND ZIMMERMANN R. (1986): Estimating photosynthetic rate and annual carbon gain in conifers from specific leaf weight and leaf biomass; *Oecologia*; 70; S. 187–193
- OREN R., PHILLIPS N., EWERS B.E., PATAKI D.E. UND MEGONIGAL J.P. (1999): Sap-flux-scaled transpiration responses to light, vapor pressure deficit, and leaf area reduction in a flooded *Taxodium distichum* forest; *Tree Physiology*; 19; S. 337–347
- OREN R., SPERRY J.S., EWERS B.E., PATAKI D.E., PHILLIPS N. UND MEGONIGAL J.P. (2001): Sensitivity of mean canopy stomatal conductance to vapor pressure deficit in a flooded *Taxodium distichum* L. forest: hydraulic and non-hydraulic effects; *Oecologia*; 126; S. 21–29
- OVERMYER K., TUOMINEN H., KETTUNEN C., BETZ C., LANGEBARTELS C., SANDERMANN H. UND KANGASJÄRVI J. (2000): The ozone-sensitive Arabidopsis rcd 1 mutant reveals opposite roles for ethylene and jasmonate signaling pathways in regulating superoxide-dependent cell death; *The Plant Cell*; 12; S. 1849–1862
- OVERMYER K., BROSCHE M. UND KANGASJÄRVI J. (2003): Reactive oxygen species and hormonal control of cell death; *Trends in Plant Science*; 8; (7); S. 335–342
- PAOLETTI E. UND GRULKE N.E. (2005): Does living in elevated CO₂ ameliorate tree response to ozone? A review on stomatal responses; *Environmental Pollution*; 137; S. 483–493
- PAOLETTI E. (2006): The impact of ozone on Mediterranean forests: A review; *Environmental Pollution*; 144; S. 463–474
- PAOLETTI E. (2007): Ozone impacts on forests; *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*; 2; No. 068; doi: 10.1079/PAVSNR20072068
- PAOLETTI E., BYTNEROWICZ A., ANDERSEN C., AUGUSTAITIS A., FERRETTI M., GRULKE N.E., GÜNTHARDT-GOERG M.S., INNES J., JOHNSON D., KARNOSKY D.F., LUANGJAME J., MATYSSEK R., MCNULTY S., MÜLLER-STARCK G., MUSSELMAN R. UND PERCY K.E. (2007): Impacts of air pollution and climate change on forest ecosystems - emerging research needs; *The Scientific World Journal*; 7(S1); S. 1–8
- PAOLETTI E. UND MANNING W. J. (2007): Toward a biologically significant and usable standard for ozone that will also protect plants; *Environmental Pollution*; 150; S. 85–95
- PAOLETTI E. (2009): Ozone and urban forests in Italy; *Environmental Pollution*; 157; S. 1506–1512
- PAOLETTI E., CONTRAN N., BERNASCONI P., GÜNTHARDT-GOERG M.S. UND VOLLENWEIDER P. (2009): Structural and physiological responses to ozone in Manna ash (*Fraxinus ornus* L.) leaves of seedlings and mature trees under controlled and ambient conditions; *Science of the Total Environment*; 407; S. 1631–1643
- PATAKI D.E., OREN R. UND PHILLIPS N. (1998): Responses of sap flux and stomatal conductance of *Pinus taeda* L. trees to stepwise reductions in leaf area; *Journal of Experimental Botany*; 49; (322); S. 871–878
- PATZNER K.M. (2004): Die Transpiration von Waldbäumen als Grundlage der Validierung und Modellierung der Bestandestranspiration in einem Wassereinzugsgebiet des Flusses "Ammer" [Dissertation]. Lehrstuhl für Ökophysiologie der Pflanzen, Department für Ökologie, Wissenschaftszentrum Weihenstephan. TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN; Freising
- PEARSON M. UND MANSFIELD T.A. (1993): Interacting effects of ozone and water stress on the stomatal resistance of beech; *New Phytologist*; 123; S. 351–358
- PELL E., SCHLAGNHAUFER C. UND ARTECA R. (1997): Ozone-induced oxidative stress: Mechanisms of action and reaction; *Physiologia Plantarum*; 100; S. 264–273
- PERCY K.E., NOSAL M., HEILMAN W., DANN T., SOBER J., LEGGE A.H. UND KARNOSKY D.F. (2007): New exposure-based metric approach for evaluating O₃ risk to north american aspen forests; *Environmental Pollution*; 147; S. 554–566

- PERCY K.E., MANNINEN S., HÄBERLE K.-H., HEERDT C., WERNER H., HENDERSON G.W. UND MATYSSEK R. (2009): Effect of 3 years' free-air exposure to elevated ozone on mature Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) needle epicuticular wax physiochemical characteristics; *Environmental Pollution*; 157; S. 1657–1665
- PETERS J., GONZALEZ-RODRIGUEZ A.M., JIMENEZ M.S., MORALES D. UND WIESER G. (2008): Influence of canopy position, needle age and season on the foliar gas exchange of *Pinus canariensis*; *European Journal of Forest Research*; 127; S. 293–299
- PIIKKI K., KLINGBERG J., KARLSSON G.P., KARLSSON P.E. UND PLEIJEL H. (2009): Estimates of AOT ozone indices from time-integrated ozone data and hourly air temperature measurements in southwest Sweden; *Environmental Pollution*; 157; S. 3051–3508
- PLEIJEL H., WALLIN G., KARLSSON P.E. UND SKÄRBY L. (1996): Ozone gradients in a spruce forest stand in relation to wind speed and time of the day; *Atmospheric Environment*; 30; (23); S. 4077–4084
- PRETZSCH H., KAHN M. UND GROTE R. (1998): Die Fichten-Buchen-Mischbestände des Sonderforschungsbereiches "Wachstum oder Parasitenabwehr?" im Kranzberger Forst; *Forstwissenschaftliches Centralblatt*; 117; S. 241–257
- PRETZSCH H. UND SCHÜTZE G. (2005): Crown allometry and growing space efficiency of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) in pure and mixed stands; *Plant Biology*; 7; S. 628–639
- PRETZSCH H., DIELER J., MATYSSEK R. UND WIPFLER P. (2010): Tree and stand growth of mature Norway spruce and European beech under long-term ozone fumigation; *Environmental Pollution*; 158; S. 1061–1070
- REICH P.B. (1987): Quantifying plant response to ozone: a unifying theory; *Tree Physiology*; 3; S. 63–91
- REITER I.M. (2004): Space-related resource investments and gains of adult beech (*Fagus sylvatica*) and spruce (*Picea abies*) as a quantification of aboveground competitiveness [Dissertation]. Lehrstuhl für Ökophysiologie der Pflanzen, Department für Ökologie, Wissenschaftszentrum Weihenstephan. TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN; Freising
- RENNENBERG H., SEILER W., MATYSSEK R., GESSLER A. UND KREUZWIESER J. (2004): Die Buche (*Fagus sylvatica* L.) - ein Waldbaum ohne Zukunft im südlichen Mitteleuropa?; *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*; 175; S. 210–224
- ROBINSON M.F., HEATH J. UND MANSFIELD T.A. (1998): Disturbances in stomatal behaviour caused by air pollutants; *Journal of Experimental Botany*; 49; S. 461–469
- RYAN M.G., BOND B.J., LAW B.E., HUBBARD R.M., WOODRUFF D., CIENCIALA E. UND KUCERA J. (2000): Transpiration and whole-tree conductance in ponderosa pine trees of different heights; *Oecologia*; 124; S. 553–560
- SANDERMANN H. (1996): Ozone and plant health; *Annual Review of Phytopathology*; 34; S. 347–366
- SANDERMANN H., ERNST D., HEILMAN W. UND LANGENBARTELS C. (1998): Ozone: An abiotic elicitor of plant defense reactions; *Trends in Plant Science*; 3; S. 47–50
- SANDERMANN H. (JR) (2006): Ozone and plant health; *Annual Review of Phytopathology*; 34; S. 347–366
- SCHÄFER K.V.R., OREN R. UND TENHUNEN J.D. (2000): The effect of tree height on crown level stomatal conductance; *Plant, Cell and Environment*; 23; S. 365–375
- SCHAUB M., CHERUBINI P. UND KRÄUCHI N. (2004): Ozon-Auswirkungen auf den Wald; 2. Auflage; Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL
- SCHAUB M., EMBERSON L., BÜKER P. UND KRÄUCHI N. (2007): Preliminary results of modeled ozone uptake for *Fagus sylvatica* L. trees at selected EU/UN-ECE intensive monitoring plots; *Environmental Pollution*; 145; S. 636–643
- SCHUHBÄCK T. (2004): Nährelementstatus und Bodenzustand an der Bestandesgrenze Buche-Fichte im Mischwaldbestand Kranzberger Forst [Diplomarbeit]. Fachgebiet für Waldernährung und Wasserhaushalt - Department für Ökologie. TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN; Freising

- SCHULZE E.-D., CERMAK J., MATYSSEK R., PENKA M., ZIMMERMANN R. UND VASICEK F. (1985): Canopy transpiration and water fluxes in the xylem of the trunk of *larix* and *Picea* trees - a comparison of xylem flow, porometer and cuvette measurements; *Oecologia*; 66; S. 475–483
- SCHULZE E.-D., BECK E. UND MÜLLER-HOHENSTEIN K. (2002): *Pflanzenökologie*; Spektrum, Akademischer Verlag; Heidelberg, Berlin
- SCHÜTT P., SCHUCK H.J. UND STIMM B. (1992): *Lexikon der Baum- und Straucharten*; Nikol Verlagsgesellschaft mbH & Co.KG; Hamburg
- SELLERS P.J., BOUNOUA L., COLLATZ G.J., RANDALL D.A., DAZLICH D.A., LOS S.O., BERRY J.A., FUNG I., TUCKER C.J., FIELD C.B. UND JENSEN T.G. (1996): Comparison of radiative and physiological effects of doubled atmospheric CO₂ on climate; *Science*; 271; (8); S. 1402–1406
- SELLIN A. UND KUPPER P. (2004): Within-crown variation in leaf conductance of Norway spruce: effects of irradiance, vapour pressure deficit, leaf water status and plant hydraulic constraints; *Annals of Forest Sciences*; 61; S. 419–429
- SIMPSON D., ASHMORE M., EMBERSON L. UND TUOVINEN J.-P. (2007): A comparison of two different approaches for mapping potential ozone damage to vegetation. A model study; *Environmental Pollution*; 146; S. 715–725
- SITCH S., COX P.M., COLLINS W.J. UND HUNTINGFORD C. (2007): Indirect radiative forcing of climate change through ozone effects on the land-carbon sink; *Nature*; 448; S. 791–794
- SKÄRBY L., RO-POULSEN H., WELLBURN F.M. UND SHEPPARD L.J. (1998): Impacts of ozone on forests: a European perspective; *New Phytologist*; 139; S. 109–122
- SMIDT S., BOLHAR-NORDENKAMPF H. UND HERMAN F. (2007): Das Ozonrisiko für österreichische Fichtenwälder. The ozone risk for Norway spruce forests in Austria; *Austrian Journal of Forest Science, Centralblatt für das gesamte Forstwesen*; 124; (1); S. 3–35
- SODA C., BUSSOTTI F., GROSSONI P., BARNES J., MORI B. UND TANI C. (2000): Impacts of urban levels of ozone on *Pinus halepensis*; *Environmental and Experimental Botany*; 44; S. 69–82
- STOCKWELL W.R., KRAMM G., SCHEEL H.-E., MOHNEN V.A. UND SEILER W. (1997): Ozone formation, destruction and exposure in Europe and the United States. SANDERMANN H., WELLBURN F.M. & HEATH R.L., HRSG.; *Forest decline and ozone (Ecological Studies)*; 127; Springer Verlag; Berlin, S. 1-38
- STRELCOVA K., KUCERA J., FLEISCHER P., GIORGI S., GÖMÖRYOVA E., SKVARENINA J. UND DITMAROVA L. (2009): Canopy transpiration of mountain mixed forest as a function of environmental conditions in boundary layers; *Biologia*; 64; (3); S. 507–511
- TAUSZ M., GRULKE N.E. UND WIESER G. (2007): Defense and avoidance of ozone under global change; *Environmental Pollution*; 147; S. 525–531
- TAYLOR G.J., ROSS-TODD B. UND GUNDERSON C. (1988): Action of ozone on foliar gas exchange in *Glycine max* L. Merr: a potential role for endogenous stress ethylene; *New Phytologist*; 110; S. 301–307
- THEN C., BLUMENRÖTHER M.C., HABERER K., HEERDT C., ORWALD W., RENNENBERG H., GRILL D., TAUSZ M. UND WIESER G. (2007): Evidence that branch cuvettes are reasonable surrogates for estimating O₃ effects in entire tree crowns; *Plant Biology*; 9; S. 309–319
- THEN C., LÖW M., MATYSSEK R. UND WIESER G. (2008): Deriving ozone dose-response of photosynthesis in adult forest trees from branch-level cuvette gas exchange assessment; *Environmental Pollution*; 153; S. 526–528
- TUOVINEN J.-P., SIMPSON D., EMBERSON L., ASHMORE M. UND GEROSA G. (2007): Robustness of modelled ozone exposure and doses; *Environmental Pollution*; 146; S. 578–586
- UDDLING J., GÜNTHARDT-GOERG M.S., MATYSSEK R., OKSANEN E., PLEIJEL H., SELLDEN G. UND KARLSSON P.E. (2004): Biomass reduction of juvenile birch is more strongly related to stomatal uptake than to indices based on external exposure; *Atmospheric Environment*; 38; S. 4709–4719
- UMWELTBUNDESAMT (2005): Hintergrundinformation: Sommersmog; Umweltbundesamt; <http://www.umweltdaten.de/publication/fpdf-/3562.pdf>

- UMWELTBUNDESAMT (2007): Jahresbericht Ozon 2006: Umweltbundesamt; <http://ww.env-it.de/umweltbundesamt/luftdaten/documents.fwd>
- UNECE (2004): Mapping Manual 2004, UNECE Convention on long-range transboundary air pollution; Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads & levels and air pollution effects, risks and trends. 2010 revision; <http://www.icpmapping.org>
- VINGARZAN R. (2004): A review of surface ozone background levels and trends; *Atmospheric Environment*; 38; S. 3431–3442
- VOLLSNES A.V., ERIKSEN A.B., OTTERHOLT E., KVAAL K., OXAAL U. UND FUTSAETHER C.M (2009): Visible foliar injury and infrared imaging show that daylength affects short-term recovery after ozone stress in *Trifolium subterraneum*; *Journal of Experimental Botany*; 60; S. 3677–3688
- VON WILLERT D., MATYSSEK R. UND HERPPICH W. (1995): Experimentelle Pflanzenökologie: Grundlagen und Anwendungen; Georg-Thieme Verlag; Stuttgart
- WALENTOWSKI H., EWALD J., FISCHER A., KÖLLING CH. UND TÜRK W. (2004): Handbuch der natürlichen Waldgesellschaften Bayerns. BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR WALD UND FORSTWIRTSCHAFT, HRSG.; Verlag Geobotanica; Freising
- WANG L., HE X. UND CHEN W. (2009): Effects of elevated ozone on photosynthetic CO₂ exchange and chlorophyll a fluorescence in leaves of *Quercus mongolica* grown in urban area; *Bulletin Environmental Contamination Toxicology*; 82; S. 478–481
- WARNING R.H. UND RUNNING S.W. (2007): *Forest Ecosystems*; 3. Aufl.; Elsevier Verlag; Amsterdam, Boston, Heidelberg, London, New York, Oxford, Paris, San Diego, San Francisco, Singapore, Sydney, Tokyo
- WARREN C.R., LÖW M., MATYSSEK R. UND TAUSZ M. (2007): Internal conductance to CO₂ transfer of adult *Fagus sylvatica*: Variation between sun and shade leaves and due to free-air ozone fumigation; *Environmental and Experimental Botany*; 59; S. 130–138
- WERNER H. UND FABIAN P. (2002): Free-air fumigation of mature trees. A novel system for controlled ozone enrichment in grown-up beech and spruce canopies; *Environmental Science and Pollution Research*; 9; (2); S. 117–121
- WIESER G. UND HAVRANEK W.M. (1993): Ozone uptake in the sun and shade crown of spruce: quantifying the physiological effects of ozone exposure; *Trees*; 7; S. 227–232
- WIESER G., TEGISCHER K., TAUSZ M., HÄBERLE K.-H., GRAMS T.E.E. UND MATYSSEK R. (2002): Age effects on Norway spruce (*Picea abies*) susceptibility to ozone uptake: a novel approach relating stress avoidance to defense; *Tree Physiology*; 22; S. 583–590
- WIESER G., MATYSSEK R., KÖSTNER B. UND OBERHUBER W. (2003): Quantifying ozone uptake at the canopy level of spruce, pine and larch trees at the alpine timberline: an approach based on sap flow measurement; *Environmental Pollution*; 126; S. 5–8
- WIESER G. UND EMBERSON L. (2004): Evaluation of the stomatal conductance formulation in the EMEP ozone deposition model for *Picea abies*; *Atmospheric Environment*; 38; S. 2339–2348
- WIESER G., MANNING W. J., TAUSZ M. UND BYTNEROWICZ A. (2006a): Evidence for potential impacts of ozone on *Pinus cembra* L. at mountain sites in Europe: An overview; *Environmental Pollution*; 139; S. 53–58
- WIESER G., LUIS V.C. UND CUEVAS E. (2006b): Quantification of ozone uptake at the stand level in a *Pinus canariensis* forest in Tenerife, Canary Islands: An approach based on sap flow measurement; *Environmental Pollution*; 140; S. 383–386
- WIESER G., MATYSSEK R., THEN C., CIESLIK S., PAOLETTI E. UND CEULEMANS R. (2008): Upscaling ozone flux in forests from leaf to landscape; *Italian Journal of Agronomy*; 1; S. 35–41
- WIESER G., MATYSSEK R., LUZIAN R., ZWERGER P., PINDUR P., OBERHUBER W. UND GRUBER A. (2009): Effects of atmospheric and climate change at the timberline of the Central European Alps; *Annals of Forest Sciences*; 66; 402, doi: 10.1051/forest/2009023
- WINKLER J.B., LANG H., GRAF W., RETH S. UND MUNCH J.C. (2009): Experimental setup of field-lysimeters for studying effects of elevated ozone and below-ground pathogen infection on a plant-soil-system of juvenile beech (*Fagus sylvatica* L.); *Plant Soil*; 323; S. 7–19

- WIPFLER P., SEIFERT T., HEERDT C., WERNER H. UND PRETZSCH H. (2005): Growth of adult Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and European Beech (*Fagus sylvatica* L.) under Free-Air Ozone Fumigation; *Plant Biology*; 7; S. 611–618
- WITTIG V.E., AINSWORTH E.A. UND LONG S.P. (2007): To what extent do current and projected increases in surface ozone affect photosynthesis and stomatal conductance of trees? A meta-analytic review of the last 3 decades of experiments; *Plant, Cell and Environment*; 30; S. 1150–1162
- WITTIG V.E., AINSWORTH E.A., NAIDU S.L., KARNOSKY D.F. UND LONG S.P. (2009): Quantifying the impact of current and future tropospheric ozone on tree biomass, growth, physiology and biochemistry: a quantitative meta-analysis; *Global Change Biology*; 15; S. 396–424
- WITTMANN C., MATYSSEK R., PFANZ H. UND HUMAR M. (2007): Effects of ozone impact on the gas exchange and chlorophyll fluorescence of juvenile birch stems (*Betula pendula* Roth.); *Environmental Pollution*; 150; S. 258–266
- WITTMANN C., PFANZ H. UND PIETRINI F. (2005): Light-modulation of cortical CO₂-refixation in young birch stems (*Betula pendula* Roth.); *Phyton*; 45; (3); S. 195–212
- WOHLGEMUTH H. (2002): Untersuchungen zur Rolle von reaktiven Sauerstoffspezien bei ozoninduziertem Zelltod in Pflanzen [Dissertation]. Fakultät für Biologie. LUDWIG MAXIMILIANS UNIVERSITÄT; München
- WOHLGEMUTH H., MITTELSTRASS K., KSCHIESCHAN S., BENDER J., WEIGL H., OVERMYER K., KANGASJÄRVI J., SANDERMANN H. UND LANGENBARTELS C. (2002): Activation of an oxidative burst is a general feature of sensitive plants exposed to the air pollutant ozone; *Plant, Cell and Environment*; 25; S. 717–726
- WULLSCHLEGER S.D., MEINZER F.C. UND VERTESSY R.A. (1998): A review of whole-plant water use studies in trees; *Tree Physiology*; 18; S. 499–512
- WULLSCHLEGER S.D., WILSON K.B. UND HANSON P.J. (2000): Environmental control of whole-plant transpiration, canopy conductance and estimates of the decoupling coefficient for large red maple trees; *Agricultural and Forest Meteorology*; 104; S. 157–168
- ZAPLETAL M. UND CHROUST P. (2007): Ozone deposition to a coniferous and deciduous forest in the Czech Republic; *Water Air Soil Pollution*; 7; S. 187–200

Publikationen und Präsentationen

Veröffentlichungen im Zuge der Promotion

Publikationen

- Nunn A.J., Wieser G., Metzger U., Löw M., Wipfler Ph., Häberle K.-H., Matyssek R., 2007:
Exemplifying whole-plant ozone uptake in adult forest trees of contrasting species and site conditions. *Environmental Pollution* 146, 269-639.
- Gielen B., Löw M., Deckmyn G., Metzger U., Franck F., Heerd Ch., Matyssek R., Valcke R., Ceulemans R., 2007: Chronic ozone exposure affects leaf senescence of adult beech trees: a chlorophyll fluorescence approach. *Journal of Experimental Botany* Vol. 58 No. 4, 785-795.
- Nunn A.J., Cieslik S.; Metzger U., Wieser G., Matyssek R., 2010: Combining sap flow and eddy covariance approaches to derive stomatal and non-stomatal O₃-fluxes in a forest stand. *Environmental Pollution* 158, 2014-2022.

Poster

- Nunn A.J., Metzger U., Löw M., Wipfler Ph., Häberle K.-H., Matyssek R., 2005:
Ozone dose at the whole-tree level as based on sap flow measurements: forest trees under different O₃ regimes between humid and dry conditions. Workshop "Critical Levels of Ozone: Further Applying and Developing the Flux-based Concept", 15.-19. November 2005, Obergurgl, Österreich.
- Nunn A.J., Metzger U., Wipfler Ph., Heerd Ch., Häberle K.-H., Matyssek R., 2008:
Calculating O₃ uptake via sap flow measurement: Comparison of branch and trunk level data. 23rd IUFRO Conference for Specialists in Air Pollution and Climate Change Effects on Forest Ecosystems, 7.-12. September 2008, Murten, Schweiz.

Vorträge

- Metzger U., 2006: Ozonaufnahme auf der Basis der Kronentranspiration unter Grenzschichteneinfluss in Altbäumen: Notwendigkeit einer Grenzwertrevision?. DBU-Seminar, Mai 2006, Cloppenburg, Deutschland.
- Metzger U., Nunn A.J., Häberle K.-H., Heerd Ch., Wipfler P., Matyssek R., 2007:
Calculating whole-tree O₃ uptake based on sap flow measurement: beech and spruce trees under different O₃ regimes. *Proceedings of the GfÖ*, Band 37.
- Metzger U.: Ozonaufnahme auf der Basis der Kronentranspiration unter Grenzschichteneinfluss in Altbäumen. DBU-Seminar, November 2007, Benediktbeuern, Deutschland.

Metzger U., Nunn A.J., Wipfler Ph., Heerdt Ch., Häberle K.-H., Matyssek R., 2008:

Calculating O₃ uptake via sap flow measurement: Comparison of branch and trunk level data. Meeting of the specialist groups “Experimental Ecology” and “Desert Ecology” of the Ecological Society of Germany, Austria and Switzerland (GfÖ).
http://www.badr-online.de/abstracts_tharandt_2008

Metzger U., 2008: Berechnung der Ozonaufnahme mittels Xylemflussmessung. DBU-Seminar, März 2008, Benediktbeuern, Deutschland.

Danksagung

Viele Menschen haben zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen, denen ich für Unterstützung und Begleitung danken möchte.

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Rainer Matyssek, gilt mein herzlicher Dank für die hervorragende wissenschaftliche Betreuung, stete Diskussionsbereitschaft und unermüdliche Hilfestellung.

Herrn Univ.-Doz. Dr. Gerhard Wieser sei für seine Bereitschaft, das Zweitkorrektorat zu übernehmen, und Herrn Prof. Dr. Reinhard Schopf für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes besonders gedankt.

Frau Dr. Angela Nunn danke ich für die zahlreichen konstruktiven Anregungen und die fachliche Unterstützung.

Herrn Dr. Karl-Heinz Häberle danke ich für die Mithilfe bei nächtlichen Gaswechsel- und Wasserpotentialmessungen und der Klärung mathematischer Fragestellungen. Herrn Dr. Helmut Blaschke gilt mein Dank für die Ratschläge in Bezug auf die „Kucera-Sensoren“.

Bei Frau Ilse Süß möchte ich mich für die vielen Stunden bedanken, die sie mit der Herstellung von Granier-Sensoren verbrachte.

Für die Unterstützung in technischen Angelegenheiten im und außerhalb des Kranzberger Forst danke ich Herrn Dipl.-Ing. Thomas Feuerbach.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Ökophysiologie der Pflanzen, allen voran Frau Dr. Wilma Ritter und Frau Dr. Rosi Weigt, sei für die gute und freundschaftliche Arbeitsatmosphäre gedankt.

Herrn Peter Kuba, Frau Johanna Lebherz, Herrn Josef Heckmaier sowie den studentischen Hilfskräften danke ich für die Hilfe bei der Vermessung und dem Einnetzen der Messäste.

Für die Bereitstellung von Daten danke ich Herrn Dr. Christian Heerdt (Fachgebiet Ökoklimatologie, TUM), Herrn Philip Wipfler (Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, TUM), Herrn Gerhard Schütze (Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, TUM) und Herrn Dr. Jinchun Liu (Firma Ecomatik).

Meinem Arbeitgeber, der Holzforschung München (TUM), danke ich für das freundliche Entgegenkommen in der Abschlussphase der Dissertation, insbesondere Herrn Prof. Dr. Gerd Wegener und Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Glos, sowie meiner Kollegin Frau Andrea Berger-James.

Herzlich danken möchte ich Peter Hummel, meinen Eltern und Geschwistern Maria und Gert für die zuverlässige Begleitung, hilfreiche Motivation und das entgegengebrachte Verständnis für Wochenend- und Urlaubsarbeit.

Der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), namentlich Frau Dr. Hedda Schlegel-Starmann als Betreuerin meines Projektes, danke ich für das Promotionsstipendium zur finanziellen Unterstützung meiner Arbeit.

