

Der Einfluss von erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  auf  
die Physiologie und Anatomie von  
*Populus x canescens*, *Populus tremula*, *Populus alba*,  
*Populus x canadensis*, *Populus nigra* und  
*Populus deltoides*

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades Doktor rerum naturalis (Dr. rer. nat.)  
an der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften  
im Fachbereich Biologie  
der Universität Hamburg

vorgelegt von Till Ferdinand Brombach  
aus Berlin

Hamburg, 2023

Korrigierte Fassung

Erstgutachter: Herr Prof. Dr. Jörg Fromm  
Universität Hamburg  
Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften  
Fachbereich Biologie  
Institut für Holzwissenschaften  
Holzbiologie  
Leuschnerstraße 91 d  
21031 Hamburg

Zweitgutachter: Herr Prof. Dr. Bodo Saake  
Universität Hamburg  
Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften  
Fachbereich Biologie  
Institut für Holzwissenschaften  
Holzchemie  
Haidkrugsweg 1  
22885 Barsbüttel-Willinghusen

Tag der Disputation: 29.11.2023

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich des Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

I hereby declare upon oath that I have written the present dissertation independently and have not used further resources and aids than those stated in the dissertation.

Hamburg den 26.08.2023

Till Brombach

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand zwischen Dezember 2017 und August 2023 am Institut für Holzwissenschaften der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften an der Universität Hamburg.

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dr. Jörg Fromm, dass ich nach Abschluss meiner Masterarbeit auch meine Dissertation unter Ihrer Betreuung anfertigen durfte. Vielen Dank für die Themenstellung, ihre Anregungen und ihre Unterstützung während der gesamten Bearbeitungszeit.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. Bodo Saake für die Unterstützung während der Versuche in der Holzchemie und für Ihre Anregungen und Verbesserungsvorschläge während der Bearbeitungszeit.

An der Stelle möchte ich mich auch bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Holzchemie und Holzbiologie bedanken, die mich während der Versuche im Labor unterstützt haben. Durch die sehr freundliche Arbeitsatmosphäre habe ich immer gerne mit euch zusammengearbeitet.

Auch gilt mein Dank den Gärtnern, die während der Vegetationsperiode die Versuchspflanzen hervorragend versorgt haben.

Ich bedanke mich besonders bei Katharina Erdt. Vielen Dank für deine Hilfsbereitschaft und deine Unterstützung bei den Laborarbeiten. Dein Rat und deine Lösungsvorschläge waren für dieses Vorhaben sehr wertvoll. Vielen Dank für alles – oder wie man in Schweden einfach sagen würde: Tack så mycket

Auch möchte ich mich bei meinen Eltern und meinen beiden Brüdern bedanken, die mich immer unterstützt und motiviert haben.

Zum Ende bedanke ich mich besonders bei meiner Freundin Linnéa. Wie auch bereits zu Zeiten der Bachelor- und Masterarbeit standest du nun abermals wieder an meiner Seite. Vielen Dank für deine Ratschläge, Unterstützung und motivierende Worte bei unzähligen Spaziergängen, Rennrad-Touren und Abenden zuhause, bei denen so oft die Dissertation das Hauptthema war. Danke, dass du noch da bist! :)

## Zusammenfassung

Eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre kann einen Einfluss auf die Eigenschaften von Pflanzen haben. Die vorliegende Arbeit hatte das Ziel, mögliche Reaktionen von ausgewählten Pappelarten auf eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre zu untersuchen. Für die Versuche wurden zwei Pflanzengruppen eingesetzt. Bei der ersten Gruppe handelte es sich um einjährige Pflanzen der Arten *Populus tremula*, *Populus alba* und der Hybridpappel *Populus x canescens*. Die zweite Pflanzengruppe bestand aus Stecklingen der Arten *Populus nigra*, *Populus deltoides* und der Hybridpappel *Populus x canadensis*.

Im ersten Teil der Arbeit wurden Gaswechselfersuche im Gewächshaus durchgeführt, bei dem Pflanzen unter Normalbedingungen und einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration ausgesetzt worden sind. Nach der Wachstumsperiode wurden die physiologischen- und holzanatomischen Eigenschaften der Pflanzen erfasst. Ergänzend wurden die Ligin- und Kohlenhydratgehalte im Holz ermittelt und eine Elementaranalyse durchgeführt, bei der die Stickstoff- und Kohlenstoffgehalte bestimmt worden sind.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration die Nettophotosyntheserate von einjährigen Pflanzen und Stecklingen signifikant beeinflusst. Die Nettophotosyntheseraten von den Hybridpappeln waren unter einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration und unter Umgebungsbedingungen zum Teil niedriger als bei den Elternarten.

Die oberirdische Biomasse wurde ebenfalls durch eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration beeinflusst und war zum großen Teil höher als bei den Pflanzen die Umgebungsbedingungen ausgesetzt waren. Die Biomasse der Hybridpappeln war unter beiden Versuchsbedingungen höher als bei den Elternarten. Auch die holzanatomischen Eigenschaften wurden durch eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration beeinflusst. Dabei war die Gefäßgröße bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen überwiegend höher als bei den Kontrollpflanzen. Die Gefäßgröße der Elternarten war zum Teil niedriger als bei den Hybridpappeln.

Der Ligningehalt im Holz wurde nicht durch eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration beeinflusst. Zum Teil war der Ligningehalt bei den Hybridpappeln tendenziell höher als bei den Elternarten. Bei den meisten Arten war durch eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration

in der Atmosphäre der Glucose- Anteil erhöht. Bei den Hybridpappeln war der Glucose- Anteil tendenziell geringer als bei den Elternarten.

Auch der Extraktgehalt ist durch eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration beeinflusst worden und war bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen niedriger als bei den Kontrollpflanzen. Überwiegend war der Extraktgehalt geringer als bei den Elternarten.

Bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen lag überwiegend ein höheres C/N- Verhältnis vor als bei den Kontrollpflanzen. Bei der Gruppe der einjährigen Pflanzen konnte kein Unterschied zwischen Hybridpappel und Elternarten festgestellt werden. Bei der Gruppe der Stecklinge waren jedoch die C/N. Verhältnisse der Hybridpappeln bei beiden Versuchsbedingungen höher als bei den Elternarten.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass Pappeln unterschiedlich auf eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration reagieren können. Besonders Hybridpappeln scheinen sich gut unter einer erhöhten  $CO_2$ - Konzentration zu entwickeln und waren zum Teil den Elternarten überlegen.

# Inhalt

Eidesstattliche Erklärung .....	III
Vorwort .....	IV
Zusammenfassung .....	V
Inhalt .....	VII
Abbildungsverzeichnis .....	XV
Tabellenverzeichnis .....	XXI
Verwendete Abkürzungen .....	XXVIII
1 Einleitung .....	1
2 Biologische Grundlagen .....	3
2.1 Blattaufbau und Funktion .....	3
2.2 Gaswechsel .....	5
2.2.1 Transpirationsrate .....	7
2.2.2 Stomatäre Leitfähigkeit .....	9
2.2.3 Nettophotosyntheserate .....	10
2.2.4 Interzelluläre CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	11
2.3 Holzanatomie der Laubbäume .....	11
2.4 Hybridisierung .....	13
2.5 Heterosis- Effekte bei Hybridpappeln .....	16
3 Reaktionen von Pflanzen auf erhöhtes CO <sub>2</sub> .....	21
3.1 Anstieg der atmosphärischen CO <sub>2</sub> - Konzentration und die Reaktionen von Pflanzen .....	21
3.2 Erhöhtes CO <sub>2</sub> und Photosynthese .....	24
3.3 Erhöhtes CO <sub>2</sub> und Transpiration .....	25
3.4 Erhöhtes CO <sub>2</sub> und stomatäre Leitfähigkeit .....	26
3.5 Erhöhtes CO <sub>2</sub> und Blatteigenschaften .....	27
3.6 Erhöhtes CO <sub>2</sub> und Stomata-Größe .....	29
3.7 Erhöhtes CO <sub>2</sub> und Biomasse .....	31
3.8 Erhöhtes CO <sub>2</sub> und Pflanzenhöhe .....	33
3.9 Erhöhtes CO <sub>2</sub> und radialer Zuwachs .....	34
3.10 Erhöhtes CO <sub>2</sub> und holzanatomische Eigenschaften .....	34
3.11 Erhöhtes CO <sub>2</sub> und Stickstoff- Gehalt .....	36
3.12 Erhöhtes CO <sub>2</sub> und der Gehalt von Lignin und Kohlenhydraten im Holz .....	37
4 Material und Methoden .....	39
4.1 Material .....	39
4.1.1 Pflanzenmaterial .....	39
4.1.2 Gewächshaus .....	40
4.2 Methode .....	41
4.2.1 Versuchsaufbau der Gewächshausversuche .....	41
4.2.2 Gaswechsellmessungen mit dem Gaswechsellmessgerät LI- 6400 XT .....	43
4.2.3 Physiologische Messungen am lebenden Material .....	45
4.2.4 Physiologische Messungen am geernteten Material .....	45
4.2.5 Holzanatomische Untersuchungen .....	46
4.2.5.1 Gefäßgröße .....	46
4.2.5.2 Gefäßdichte .....	46

4.2.5.3	Jahringbreite.....	47
4.2.5.4	Probenpräparation für die holzanatomischen Untersuchungen .....	47
4.2.5.5	Holzanatomische Analyse im Lichtmikroskop.....	49
4.2.6	Messung der Spaltöffnungsgröße (Stomata) mittels Feldemissionsrasterelektronenmikroskop .....	50
4.2.7	Ermittlung der Lignin- und Kohlenhydratgehalte .....	52
4.2.7.1	Extraktion.....	52
4.2.7.2	Hydrolyse.....	54
4.2.7.3	Zuckeranalytik HPLC.....	57
4.2.7.4	Elementaranalyse.....	59
4.3	Statistische Auswertung der Messergebnisse .....	60
4.3.1	Mittelwert.....	60
4.3.2	Median .....	60
4.3.3	Normalverteilung .....	61
4.3.4	Mann- Whitney- U- Test .....	61
4.3.5	Signifikanztest.....	62
4.3.6	Effektstärke .....	63
4.3.7	Boxplot.....	63
5	Ergebnisse .....	65
5.1	Nettophotosyntheserate .....	65
5.1.1	Einjährige Pflanzen - Nettophotosyntheserate <i>Populus x canescens</i> .	65
5.1.2	Einjährige Pflanzen - Nettophotosyntheserate <i>Populus tremula</i> .....	66
5.1.3	Einjährige Pflanzen - Nettophotosyntheserate <i>Populus alba</i> .....	68
5.1.4	Einjährige Pflanzen - Nettophotosyntheserate Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen .....	70
5.1.5	Einjährige Pflanzen - Nettophotosyntheserate Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	72
5.1.6	Stecklinge - Nettophotosyntheserate <i>Populus x canadensis</i> .....	74
5.1.7	Stecklinge - Nettophotosyntheserate <i>Populus nigra</i> .....	76
5.1.8	Stecklinge - Nettophotosyntheserate <i>Populus deltoides</i> .....	77
5.1.9	Stecklinge – Nettophotosyntheserate Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen .....	79
5.1.10	Stecklinge – Netto-Photosynthese Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	82
5.2	Stomatäre Leitfähigkeit.....	84
5.2.1	Einjährige Pflanzen - Stomatäre Leitfähigkeit <i>Populus x canescens</i> ...	84
5.2.2	Einjährige Pflanzen - Stomatäre Leitfähigkeit <i>Populus tremula</i> .....	85
5.2.3	Einjährige Pflanzen - Stomatäre Leitfähigkeit <i>Populus alba</i> .....	87
5.2.4	Einjährige Pflanzen – Stomatäre Leitfähigkeit Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen .....	89
5.2.5	Einjährige Pflanzen – Stomatäre Leitfähigkeit Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	91
5.2.6	Stecklinge - Stomatäre Leitfähigkeit <i>Populus x canadensis</i> .....	93
5.2.7	Stecklinge - Stomatäre Leitfähigkeit <i>Populus nigra</i> .....	94
5.2.8	Stecklinge - Stomatäre Leitfähigkeit <i>Populus deltoides</i> .....	96
5.2.9	Stecklinge – Stomatäre Leitfähigkeit Hybridpappel vs. Pappel	



	unter Umgebungsbedingungen .....	98
5.2.10	Stecklinge – Stomatäre Leitfähigkeit Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	100
5.3	Transpirationsrate .....	102
5.3.1	Einjährige Pflanzen - Transpirationsrate <i>Populus x canescens</i> .....	102
5.3.2	Einjährige Pflanzen - Transpirationsrate <i>Populus tremula</i> .....	103
5.3.3	Einjährige Pflanzen - Transpirationsrate <i>Populus alba</i> .....	105
5.3.4	Einjährige Pflanzen - Transpirationsrate Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen .....	107
5.3.5	Einjährige Pflanzen - Transpirationsrate Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	109
5.3.6	Stecklinge - Transpirationsrate <i>Populus x canadensis</i> .....	111
5.3.7	Stecklinge - Transpirationsrate <i>Populus nigra</i> .....	112
5.3.8	Stecklinge - Transpirationsrate <i>Populus deltoides</i> .....	114
5.3.9	Stecklinge - Transpirationsrate Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen .....	116
5.3.10	Stecklinge - Transpirationsrate Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	118
5.4	Interzellulare CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	120
5.4.1	Einjährige Pflanzen - Interzellulare CO <sub>2</sub> - Konzentration <i>Populus x canescens</i> .....	120
5.4.2	Einjährige Pflanzen - Interzellulare CO <sub>2</sub> - Konzentration <i>Populus tremula</i> .....	121
5.4.3	Einjährige Pflanzen - Interzellulare CO <sub>2</sub> - Konzentration <i>Populus alba</i> .....	123
5.4.4	Einjährige Pflanzen - Interzellulare CO <sub>2</sub> - Konzentration Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen .....	124
5.4.5	Einjährige Pflanzen - Interzellulare CO <sub>2</sub> - Konzentration Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	126
5.4.6	Stecklinge - Interzellulare CO <sub>2</sub> - Konzentration <i>Populus x canadensis</i> .....	128
5.4.7	Stecklinge - Interzellulare CO <sub>2</sub> - Konzentration <i>Populus nigra</i> .....	129
5.4.8	Stecklinge - Interzellulare CO <sub>2</sub> - Konzentration <i>Populus deltoides</i> .....	131
5.4.9	Stecklinge - Interzellulare CO <sub>2</sub> - Konzentration Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen .....	132
5.4.10	Stecklinge - Interzellulare CO <sub>2</sub> - Konzentration Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	135
5.5	Gewicht der oberirdischen Biomasse .....	137
5.5.1	Einjährige Pflanzen – Stammgewicht <i>Populus x canescens</i> .....	137
5.5.2	Einjährige Pflanzen – Stammgewicht <i>Populus tremula</i> .....	137
5.5.3	Einjährige Pflanzen – Stammgewicht <i>Populus alba</i> .....	138
5.5.4	Einjährige Pflanzen – Stammgewicht Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen .....	138
5.5.5	Einjährige Pflanzen – Gewicht Stamm Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	139
5.5.6	Stecklinge – Stammgewicht <i>Populus x canadensis</i> .....	140

5.5.7	Stecklinge - Stammgewicht <i>Populus nigra</i> .....	140
5.5.8	Stecklinge – Stammgewicht <i>Populus deltoides</i> .....	141
5.5.9	Stecklinge - Stammgewicht Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen .....	141
5.5.10	Stecklinge – Stammgewicht Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	142
5.6	Gewicht der unterirdischen Biomasse .....	143
5.6.1	Einjährige Pflanzen - Wurzelgewicht <i>Populus x canescens</i> .....	143
5.6.2	Einjährige Pflanzen - Wurzelgewicht <i>Populus tremula</i> .....	143
5.6.3	Einjährige Pflanzen – Wurzelgewicht <i>Populus alba</i> .....	144
5.6.4	Einjährige Pflanzen – Wurzelgewicht Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen .....	144
5.6.5	Einjährige Pflanzen – Wurzelgewicht Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	145
5.6.6	Stecklinge - Wurzelgewicht <i>Populus x canadensis</i> .....	146
5.6.7	Stecklinge – Gewicht Wurzeln <i>Populus nigra</i> .....	146
5.6.8	Stecklinge – Gewicht Wurzeln <i>Populus deltoides</i> .....	147
5.6.9	Stecklinge – Wurzelgewicht Hybridpappel vs. Pappeln unter Umgebungsbedingungen .....	147
5.6.10	Stecklinge – Wurzelgewicht Hybridpappeln vs. Pappeln unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	148
5.7	Höhenzuwachs .....	149
5.7.1	Einjährige Pflanzen - Höhengzuwachs <i>Populus x canescens</i> .....	149
5.7.2	Einjährige Pflanzen - Höhengzuwachs <i>Populus tremula</i> .....	151
5.7.3	Einjährige Pflanzen - Höhengzuwachs <i>Populus alba</i> .....	153
5.7.4	Einjährige Pflanzen – Höhengzuwachs Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen .....	154
5.7.5	Einjährige Pflanzen – Höhengzuwachs Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	157
5.7.6	Stecklinge - Höhengzuwachs <i>Populus x canadensis</i> .....	159
5.7.7	Stecklinge - Höhengzuwachs <i>Populus nigra</i> .....	161
5.7.8	Stecklinge - Höhengzuwachs <i>Populus deltoides</i> .....	162
5.7.9	Stecklinge – Höhengzuwachs Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen .....	164
5.7.10	Stecklinge – Höhengzuwachs Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	166
5.8	Stammdurchmesser – radialer Zuwachs .....	168
5.8.1	Einjährige Pflanzen - Stammdurchmesser <i>Populus x. canescens</i> ....	168
5.8.2	Einjährige Pflanzen - Stammdurchmesser <i>Populus tremula</i> .....	170
5.8.3	Einjährige Pflanzen - Stammdurchmesser <i>Populus alba</i> .....	171
5.8.4	Einjährige Pflanzen – Stammdurchmesser Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen .....	173
5.8.5	Einjährige Pflanzen – Stammdurchmesser Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	175
5.8.6	Stecklinge - Stammdurchmesser <i>Populus x canadensis</i> .....	177
5.8.7	Stecklinge - Stammdurchmesser <i>Populus nigra</i> .....	179

5.8.8	Stecklinge - Stammdurchmesser <i>Populus deltoides</i> .....	180
5.8.9	Stecklinge – Stammdurchmesser Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen .....	182
5.8.10	Stecklinge – Stammdurchmesser Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	185
5.9	Blattfläche .....	187
5.9.1	Einjährige Pflanzen - Blattfläche <i>Populus x canescens</i> .....	187
5.9.2	Einjährige Pflanzen - Blattfläche <i>Populus tremula</i> .....	187
5.9.3	Einjährige Pflanzen - Blattfläche <i>Populus alba</i> .....	188
5.9.4	Einjährige Pflanzen – Blattfläche Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen .....	189
5.9.5	Einjährige Pflanzen – Blattfläche Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	189
5.9.6	Stecklinge - Blattfläche <i>Populus x canadensis</i> .....	190
5.9.7	Stecklinge – Blattfläche <i>Populus nigra</i> .....	191
5.9.8	Stecklinge – Blattfläche <i>Populus deltoides</i> .....	191
5.9.9	Stecklinge – Blattfläche Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen .....	192
5.9.10	Stecklinge – Blattfläche Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	192
5.10	Stomata – Durchmesser.....	194
5.10.1	Einjährige Pflanzen – Stomata- Durchmesser <i>Populus x canescens</i>	194
5.10.2	Einjährige Pflanzen – Stomata- Durchmesser <i>Populus tremula</i> .....	194
5.10.3	Einjährige Pflanzen – Stomata- Durchmesser <i>Populus alba</i> .....	195
5.10.4	Einjährige Pflanzen – Stomata- Durchmesser Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen .....	195
5.10.5	Einjährige Pflanzen – Stomata Durchmesser Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	196
5.10.6	Stecklinge – Stomata- Durchmesser <i>Populus x canadensis</i> .....	197
5.10.7	Stecklinge – Stomata Durchmesser <i>Populus nigra</i> .....	197
5.10.8	Stecklinge – Stomata- Durchmesser <i>Populus deltoides</i> .....	198
5.10.9	Stecklinge – Stomata- Durchmesser Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen .....	198
5.10.10	Stecklinge – Stomata- Durchmesser Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	199
5.11	Holzanatomische Eigenschaften - Gefäßfläche .....	200
5.11.1	Einjährige Pflanzen – Gefäßfläche <i>Populus x canescens</i> .....	200
5.11.2	Einjährige Pflanzen – Gefäßfläche <i>Populus tremula</i> .....	201
5.11.3	Einjährige Pflanzen – Gefäßgröße <i>Populus alba</i> .....	202
5.11.4	Einjährige Pflanzen – Gefäßfläche Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen .....	202
5.11.5	Einjährige Pflanzen – Gefäßfläche Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	203
5.11.6	Stecklinge – Gefäßgröße <i>Populus x canadensis</i> .....	204
5.11.7	Stecklinge – Gefäßgröße <i>Populus nigra</i> .....	204
5.11.8	Stecklinge – Gefäßgröße <i>Populus deltoides</i> .....	205

5.11.9	Stecklinge – Gefäßfläche Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen .....	205
5.11.10	Stecklinge – Gefäßfläche Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	206
5.12	Holzanatomische Eigenschaften – Jahrringbreite .....	207
5.12.1	Einjährige Pflanzen – Jahrringbreite <i>Populus x canescens</i> .....	207
5.12.2	Einjährige Pflanzen – Jahrringzuwachs <i>Populus tremula</i> .....	208
5.12.3	Einjährige Pflanzen – Jahrringbreite <i>Populus alba</i> .....	208
5.12.4	Einjährige Pflanzen – Jahrringbreite Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen .....	209
5.12.5	Einjährige Pflanzen – Jahrringbreite Hybridpappeln vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	209
5.12.6	Stecklinge – Jahrringbreite <i>Populus x canadensis</i> .....	211
5.12.7	Stecklinge – Jahrringbreite <i>Populus nigra</i> .....	211
5.12.8	Stecklinge – Jahrringbreite <i>Populus deltoides</i> .....	212
5.12.9	Stecklinge – Jahrringbreite Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen .....	212
5.12.10	Stecklinge – Jahrringbreite Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	213
5.13	Holzanatomische Eigenschaften - Gefäßdichte .....	214
5.13.1	Einjährige Pflanzen – Gefäßdichte <i>Populus x canescens</i> .....	214
5.13.2	Einjährige Pflanzen – Gefäßdichte <i>Populus tremula</i> .....	215
5.13.3	Einjährige Pflanzen – Gefäßdichte <i>Populus alba</i> .....	215
5.13.4	Einjährige Pflanzen – Gefäßdichte Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen .....	216
5.13.5	Einjährige Pflanzen – Gefäßdichte Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	216
5.13.6	Stecklinge – Gefäßdichte <i>Populus x canadensis</i> .....	217
5.13.7	Stecklinge – Gefäßdichte <i>Populus nigra</i> .....	218
5.13.8	Stecklinge – Gefäßdichte <i>Populus deltoides</i> .....	218
5.13.9	Stecklinge – Gefäßdichte Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen .....	219
5.13.10	Stecklinge – Gefäßdichte Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	220
5.14	Elementaranalyse – C- Konzentration Stamm .....	221
5.14.1	Einjährige Pflanzen – C- Konzentration im Stamm .....	221
5.14.2	Stecklinge – C- Konzentration im Stamm.....	223
5.15	Elementaranalyse – N- Konzentration Stamm .....	225
5.15.1	Einjährige Pflanzen – N- Konzentration im Stamm .....	225
5.15.2	Stecklinge – N- Konzentration im Stamm.....	228
5.16	Elementaranalyse – C- Konzentration Blatt.....	230
5.16.1	Einjährige Pflanzen – C- Konzentration im Blatt.....	230
5.16.2	Stecklinge – C- Konzentration im Blatt.....	232
5.17	Elementaranalyse – N- Konzentration Blatt.....	234
5.17.1	Einjährige Pflanzen – N- Konzentration im Blatt.....	234
5.17.2	Stecklinge – N- Konzentration im Blatt.....	236

5.18	Elementaranalyse – C- Konzentration Wurzel.....	238
5.18.1	Einjährige Pflanzen – C- Konzentration Wurzel .....	238
5.18.2	Stecklinge – C- Konzentration Wurzel.....	240
5.19	Elementaranalyse – N- Konzentration Wurzel.....	242
5.19.1	Einjährige Pflanzen – N- Konzentration Wurzeln .....	242
5.19.2	Stecklinge – N- Konzentration Wurzeln.....	244
5.20	Elementaranalyse – C/N- Verhältnis Stamm .....	246
5.20.1	Einjährige Pflanzen – C/N- Verhältnis Stamm.....	246
5.20.2	Stecklinge – C/N- Verhältnis Stamm .....	248
5.21	Elementaranalyse – C/N- Verhältnis Blatt .....	250
5.21.1	Einjährige Pflanzen – C/N- Verhältnis Blatt.....	250
5.21.2	Stecklinge – C/N- Verhältnis Blatt .....	252
5.22	Elementaranalyse – C/N- Verhältnis Wurzeln .....	254
5.22.1	Einjährige Pflanzen – C/N- Verhältnis Wurzeln .....	254
5.22.2	Stecklinge – C/N- Gehalt Wurzeln.....	256
5.23	Lignin- und Kohlenhydratgehalte.....	259
5.23.1	Einjährige Pflanzen – Lignin- und Kohlenhydratgehalte <i>Populus x canescens</i> .....	259
5.23.2	Einjährige Pflanzen – Lignin- und Kohlenhydratgehalte <i>Populus tremula</i> .....	260
5.23.3	Einjährige Pflanzen – Lignin- und Kohlenhydratgehalte <i>Populus alba</i> .....	261
5.23.4	Einjährige Pflanzen – Lignin- und Kohlenhydratgehalte Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen.....	261
5.23.5	Einjährige Pflanzen – Lignin- und Kohlenhydratgehalte Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration.....	263
5.23.6	Stecklinge – Lignin- und Kohlenhydratgehalte <i>Populus x canadensis</i> .....	266
5.23.7	Stecklinge – Lignin- und Kohlenhydratgehalte <i>Populus nigra</i> .....	267
5.23.8	Stecklinge – Lignin- und Kohlenhydratgehalte <i>Populus deltoides</i> .....	267
5.23.9	Stecklinge – Lignin- und Kohlenhydratgehalte Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen.....	268
5.23.10	Stecklinge – Lignin- und Kohlenhydratgehalte Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration.....	269
6	Diskussion .....	272
6.1	Physiologische Reaktionen auf eine erhöhte CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	273
6.1.1	Nettophotosyntheserate .....	273
6.1.2	Transpirationsrate .....	274
6.1.3	Stomatäre Leitfähigkeit .....	275
6.1.4	Interzelluläre CO <sub>2</sub> - Konzentration .....	276
6.1.5	Zusammenhänge und Korrelation von Gaswechselfparametern .....	277
6.2	Phänologische Untersuchungen.....	278
6.2.1	Oberirdische Biomasse .....	278
6.2.2	Unterirdische Biomasse .....	280
6.2.3	Höhenzuwachs.....	281
6.2.4	Stammdurchmesser – radialer Zuwachs .....	283

6.2.5	Blattfläche .....	284
6.2.6	Spaltöffnungen (Stomata) .....	286
6.2.7	Zusammenhänge von morphologischen Eigenschaften des Blatts ...	287
6.2.8	Holzanatomie .....	288
6.2.9	Zusammenhänge von anatomischen Eigenschaften des Holzes .....	291
6.2.10	C/N Konzentration .....	292
6.2.11	Lignin- und Kohlenhydratgehalte .....	295
7	Schlussfolgerung .....	300
8	Literaturverzeichnis .....	304
9	Anhang .....	323
9.1	Kurzfassung .....	323
9.2	Abstract .....	324
9.3	Verwendete Hilfsmittel .....	325

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vergleichsmatrix .....	2
Abbildung 2: Typischer Aufbau eines Blatts angelehnt an (Sakalli 2023).....	3
Abbildung 3: Chloroplast einer Pflanzenzelle angelehnt an (Sadava et al. 2019) .....	7
Abbildung 4: Darstellung der Photosyntheserate in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke angelehnt an (McCarthy 2007; Hensel 2014).....	10
Abbildung 5: Holzanatomie einer Pappel .....	12
Abbildung 6: Anstieg der atmosphärischen Kohlenstoffdioxid- Konzentration nach Standorten in Anlehnung an (Umweltbundesamt 2023) .....	22
Abbildung 7: Szenarien für einen zukünftigen Kohlenstoffdioxid- Gehalt in der Atmosphäre Angelehnt an (Deutscher Wetterdienst 2016).....	23
Abbildung 8: Anordnung der Versuchspflanzen im Versuchshaus 5 und 6 .....	42
Abbildung 9: Funktionsschema des Gaswechsellmessgeräts LI-6400 XT angelehnt an (LI- COR®Bioscience 2016).....	45
Abbildung 10: Beispiel für eine Lichtreflektion und Lichtabsorption in Anlehnung nach (Volgger 2008) .....	47
Abbildung 11: Gefärbter Querschnitt einer Pappel ( <i>Populus x canescens</i> ).....	48
Abbildung 12: Holzanatomische Messungen an einer gefärbten Probe .....	50
Abbildung 13: Vermessung der Stomata mittels Rasterelektronenmikroskop an <i>Populus nigra</i> .....	51
Abbildung 14: Messprinzip mittels Photometer in Anlehnung an (Hauk 2013) .....	55
Abbildung 15: Trennung des Standardgemisches der Holzzucker, in Anlehnung an (Willför et al. 2009) .....	58
Abbildung 16: Schematischer Aufbau eines <i>HPAEC-Borat</i> , in Anlehnung an (Lehnen 2022) .....	58
Abbildung 17: Aufbau eines Boxplots.....	64
Abbildung 18: Nettphotosyntheserate von <i>Populus x canescens</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm)...	66
Abbildung 19: Nettphotosyntheserate von <i>Populus tremula</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	68
Abbildung 20: Nettphotosyntheserate von <i>Populus alba</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	70
Abbildung 21: Vergleich der Nettphotosyntheseraten von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) .....	71
Abbildung 22: Vergleich der Nettphotosyntheseraten von einjährigen Pflanzen unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) .....	73
Abbildung 23: Nettphotosyntheserate von <i>Populus x canadensis</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm)...	75
Abbildung 24: Nettphotosyntheserate von <i>Populus nigra</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	77
Abbildung 25: Nettphotosyntheserate von <i>Populus deltoides</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	79

Abbildung 26: Vergleich der Nettophotosyntheseraten von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm).....	81
Abbildung 27: Vergleich der Nettophotosyntheseraten von Stecklingen unter erhöhter .....	83
Abbildung 28: Stomatäre Leitfähigkeit von <i>Populus x canescens</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm)...	85
Abbildung 29: Stomatäre Leitfähigkeit von <i>Populus tremula</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	87
Abbildung 30: Stomatäre Leitfähigkeit von <i>Populus alba</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	88
Abbildung 31: Vergleich der stomatären Leitfähigkeiten von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) .....	90
Abbildung 32: Vergleich der stomatären Leitfähigkeiten von einjährigen Pflanzen unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) .....	92
Abbildung 33: Stomatäre Leitfähigkeit von <i>Populus x canadensis</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm)...	94
Abbildung 34: Stomatäre Leitfähigkeit von <i>Populus nigra</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	96
Abbildung 35: Stomatäre Leitfähigkeit von <i>Populus deltoides</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	97
Abbildung 36: Vergleich der stomatären Leitfähigkeiten von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) .....	99
Abbildung 37: Vergleich der stomatären Leitfähigkeit von Stecklingen unter einer erhöhten CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) .....	101
Abbildung 38: Transpirationsrate von <i>Populus x canescens</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	103
Abbildung 39: Transpirationsrate von <i>Populus tremula</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	104
Abbildung 40: Transpirationsrate von <i>Populus alba</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	106
Abbildung 41: Vergleich der Transpirationsrate von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) .....	108
Abbildung 42: Vergleich der Transpirationsrate von einjährigen Pflanzen unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) .....	110
Abbildung 43: Transpirationsrate von <i>Populus x canadensis</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	112
Abbildung 44: Transpiration von <i>Populus nigra</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	114
Abbildung 45: Transpiration von <i>Populus deltoides</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	115



Abbildung 46: Vergleich der Transpirationsraten von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm).....	117
Abbildung 47: Vergleich der Transpirationsrate von Stecklingen unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration	119
Abbildung 48: Interzelluläre CO <sub>2</sub> - Konzentration von <i>Populus x canescens</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) .....	121
Abbildung 49: Interzelluläre CO <sub>2</sub> - Konzentration von <i>Populus tremula</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm)	122
Abbildung 50: Interzelluläre CO <sub>2</sub> - Konzentration von <i>Populus alba</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm)	124
Abbildung 51: Vergleich der interzellulären CO <sub>2</sub> - Konzentration von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) .....	125
Abbildung 52: Vergleich der interzellulären CO <sub>2</sub> - Konzentration von einjährigen Pflanzen unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration.....	127
Abbildung 53: Interzelluläre CO <sub>2</sub> - Konzentration von <i>Populus x canadensis</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) .....	129
Abbildung 54: Interzelluläre CO <sub>2</sub> - Konzentration von <i>Populus nigra</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).	130
Abbildung 55: Interzelluläre CO <sub>2</sub> - Konzentration von <i>Populus deltoides</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) .....	132
Abbildung 56: Vergleich der interzellulären CO <sub>2</sub> - Konzentration von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) .....	134
Abbildung 57: Vergleich der interzellulären CO <sub>2</sub> - Konzentration von Stecklingen unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) .....	136
Abbildung 58: Trockengewicht (Stamm) von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	139
Abbildung 59: Trockengewicht (Stamm) von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	142
Abbildung 60: Trockengewicht (Wurzel) von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	145
Abbildung 61: Trockengewicht (Wurzel) von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	148
Abbildung 62: Höhenzuwachs von <i>Populus x canescens</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	150
Abbildung 63: Höhenzuwachs von <i>Populus tremula</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	152
Abbildung 64: Höhenzuwachs von <i>Populus alba</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	154

Abbildung 65: Vergleich der Höhenzunahme von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm).....	156
Abbildung 66: Vergleich der Höhenzunahme von einjährigen Pflanzen unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm) .....	158
Abbildung 67: Höhenzuwachs von <i>Populus x canadensis</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm).....	160
Abbildung 68: Höhenzuwachs von <i>Populus nigra</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm).....	162
Abbildung 69: Höhenzuwachs von <i>Populus deltoides</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm).....	163
Abbildung 70: Vergleich des Höhenzuwachses von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm).....	165
Abbildung 71: Vergleich des Höhenzuwachses von Stecklingen unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm).....	167
Abbildung 72: Radialer Zuwachs von <i>Populus x canescens</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm).....	169
Abbildung 73: Radialer Zuwachs von <i>Populus tremula</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm).....	171
Abbildung 74: Radialer Zuwachs von <i>Populus alba</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm).....	172
Abbildung 75: Vergleich der Stammdurchmesser von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) .....	174
Abbildung 76: Vergleich der Stammdurchmesser von einjährigen Pflanzen unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm) .....	176
Abbildung 77: Radialer Zuwachs von <i>Populus x canadensis</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm).....	178
Abbildung 78: Radialer Zuwachs von <i>Populus nigra</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm).....	180
Abbildung 79: Radialer Zuwachs von <i>Populus deltoides</i> während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm).....	182
Abbildung 80: Vergleich der Stammdurchmesser von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) .....	184
Abbildung 81: Vergleich der Stammdurchmesser von Stecklingen unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm).....	186
Abbildung 82: Blattfläche von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	190
Abbildung 83: Blattfläche von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	193

Abbildung 84: Durchmesser der Spaltöffnungen von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	196
Abbildung 85: Durchmesser der Spaltöffnungen von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	200
Abbildung 86: Gefäßfläche von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	203
Abbildung 87: Durchmesser der Spaltöffnungen von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	207
Abbildung 88: Jahrringbreite von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	210
Abbildung 89: Jahrringbreite von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	213
Abbildung 90: Gefäßdichte von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	217
Abbildung 91: Gefäßdichte von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	220
Abbildung 92: Kohlenstoffgehalt im Stamm von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	222
Abbildung 93: Kohlenstoffgehalt im Stamm von Stecklingen, die Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	225
Abbildung 94: Stickstoffgehalt im Stamm von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	227
Abbildung 95: Stickstoffgehalt im Stamm von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	229
Abbildung 96: Kohlenstoffgehalt im Blatt von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	231
Abbildung 97: Kohlenstoffgehalt im Blatt von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	233
Abbildung 98: Stickstoffgehalt im Blatt von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	236
Abbildung 99: Stickstoffgehalt im Blatt von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	238
Abbildung 100: Kohlenstoffgehalt in den Wurzeln von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	240
Abbildung 101: Kohlenstoffgehalt in den Wurzeln von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	242

Abbildung 102: Stickstoffgehalt in den Wurzeln von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	244
Abbildung 103: Stickstoffgehalt in den Wurzeln von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	246
Abbildung 104: C/N-Verhältnis im Stamm von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	248
Abbildung 105: C/N-Verhältnis im Stamm von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	250
Abbildung 106: C/N-Verhältnis im Blatt von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	252
Abbildung 107: C/N-Verhältnis im Blatt von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	254
Abbildung 108: C/N-Verhältnis in den Wurzeln von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	256
Abbildung 109: C/N-Verhältnis in den Wurzeln von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren .....	258

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Pflanzenbestand für Gaswechselfersuche .....	40
Tabelle 2: Substrateigenschaften für die Versuchspflanzen .....	40
Tabelle 3: Klimabedingungen in den Versuchshäusern 5 und 6 .....	41
Tabelle 4: Extraktionsbedingungen .....	53
Tabelle 5: Effektstärke .....	63
Tabelle 6: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von <i>P. x canescens</i> (400 ppm) und <i>P. x canescens</i> (950 ppm) .....	66
Tabelle 7: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von <i>P. tremula</i> (400 ppm) und <i>P. tremula</i> (950 ppm) .....	68
Tabelle 8: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von <i>P. alba</i> (400 ppm) und <i>P. alba</i> (950 ppm) .....	70
Tabelle 9: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von <i>P. x canescens</i> und <i>P. tremula</i> unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) .....	72
Tabelle 10: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von <i>P. x canescens</i> und <i>P. alba</i> unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) .....	72
Tabelle 11: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von <i>P. x canescens</i> und <i>P. tremula</i> unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) .....	73
Tabelle 12: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von <i>P. x canescens</i> und <i>P. alba</i> unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) .....	74
Tabelle 13: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von <i>P. x canadensis</i> (400 ppm) und <i>P. x canadensis</i> (950 ppm) .....	75
Tabelle 14: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von <i>P. nigra</i> (400 ppm) und <i>P.</i> <i>nigra</i> (950 ppm) .....	77
Tabelle 15: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von <i>P. deltoides</i> (400 ppm) und <i>P. deltoides</i> (950 ppm) .....	79
Tabelle 16: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von <i>P. x canadensis</i> und <i>P. nigra</i> unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) .....	81
Tabelle 17: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von <i>P. x canadensis</i> und <i>P.</i> <i>deltoides</i> unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) .....	81
Tabelle 18: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von <i>P. x canadensis</i> und <i>P. nigra</i> unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) .....	83
Tabelle 19: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von <i>P. x canadensis</i> und <i>P.</i> <i>deltoides</i> unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) .....	83
Tabelle 20: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von <i>P. x canescens</i> (400 ppm) und <i>P. x canescens</i> (950 ppm) .....	85
Tabelle 21: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von <i>P. tremula</i> (400 ppm) und <i>P. tremula</i> (950 ppm) .....	87
Tabelle 22: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von <i>P. alba</i> (400 ppm) und <i>P.</i> <i>alba</i> (950 ppm) .....	89

Tabelle 23: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von <i>P. x canescens</i> und <i>P. tremula</i> unter Umgebungsbedingungen (400 ppm).....	90
Tabelle 24: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von <i>P. x canescens</i> und <i>P. alba</i> unter Umgebungsbedingungen (400 ppm).....	91
Tabelle 25: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von <i>P. x canescens</i> und <i>P. tremula</i> unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	92
Tabelle 26: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von <i>P. x canescens</i> und <i>P. alba</i> unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	92
Tabelle 27: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von <i>P. x canadensis</i> (400 ppm) und <i>P. x canadensis</i> (950 ppm).....	94
Tabelle 28: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von <i>P. nigra</i> (400 ppm) und <i>P. nigra</i> (950 ppm).....	96
Tabelle 29: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von <i>P. deltoides</i> (400 ppm) und <i>P. deltoides</i> (950 ppm).....	98
Tabelle 30: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von <i>P. x canadensis</i> und <i>P. nigra</i> unter Umgebungsbedingungen (400 ppm).....	99
Tabelle 31: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von <i>P. x canadensis</i> und <i>P. deltoides</i> unter Umgebungsbedingungen (400 ppm).....	99
Tabelle 32: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von <i>P. x canadensis</i> und <i>P. nigra</i> unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	101
Tabelle 33: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von <i>P. x canadensis</i> und <i>P. deltoides</i> unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	101
Tabelle 34: Signifikanztest zwischen der Transpirationsrate von <i>P. x canescens</i> (400 ppm) und <i>P. x canescens</i> (950 ppm).....	103
Tabelle 35: Signifikanztest zwischen der Transpirationsrate von <i>P. tremula</i> (400 ppm) und <i>P. tremula</i> (950 ppm).....	105
Tabelle 36: Signifikanztest zwischen der Transpirationsrate von <i>P. alba</i> (400 ppm) und <i>P. alba</i> (950 ppm).....	106
Tabelle 37: Signifikanztest zwischen den Transpirationsraten von <i>P. x canescens</i> und <i>P. tremula</i> unter Umgebungsbedingungen (400 ppm).....	108
Tabelle 38: Signifikanztest zwischen den Transpirationsraten von <i>P. x canescens</i> und <i>P. alba</i> unter Umgebungsbedingungen (400 ppm).....	108
Tabelle 39: Signifikanztest zwischen den Transpirationsraten von <i>P. x canescens</i> und <i>P. tremula</i> unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	110
Tabelle 40: Signifikanztest zwischen den Transpirationsraten von <i>P. x canescens</i> und <i>P. alba</i> unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	110
Tabelle 41: Signifikanztest zwischen der Transpirationsrate von <i>P. x canadensis</i> (400 ppm) und <i>P. x canadensis</i> (950 ppm).....	112
Tabelle 42: Signifikanztest zwischen der Transpirationsrate von <i>P. nigra</i> (400 ppm) und <i>P. nigra</i> (950 ppm).....	114

Tabelle 43: Signifikanztest zwischen der Transpirationsrate von <i>P. deltoides</i> (400 ppm) und <i>P. deltoides</i> (950 ppm) .....	116
Tabelle 44: Signifikanztest zwischen den Transpirationsraten von <i>P. x canadensis</i> und <i>P. nigra</i> unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) .....	117
Tabelle 45: Signifikanztest zwischen den Transpirationsraten von <i>P. x canadensis</i> und <i>P. deltoides</i> unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) .....	118
Tabelle 46: Signifikanztest zwischen den Transpirationsraten von <i>P. x canadensis</i> und <i>P. nigra</i> unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) .....	119
Tabelle 47: Signifikanztest zwischen den Transpirationsraten von <i>P. x canadensis</i> und <i>P. deltoides</i> unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) .....	119
Tabelle 48: Signifikanztest zwischen der Interzellularen CO <sub>2</sub> - Konzentration von <i>P. x canescens</i> (400 ppm) und <i>P. x canescens</i> (950 ppm) .....	121
Tabelle 49: Signifikanztest zwischen der Interzellularen CO <sub>2</sub> - Konzentration von <i>P. tremula</i> (400 ppm) und <i>P. tremula</i> (950 ppm) .....	123
Tabelle 50: Signifikanztest zwischen der Interzellularen CO <sub>2</sub> - Konzentration von <i>P. alba</i> (400 ppm) und <i>P. alba</i> (950 ppm) .....	124
Tabelle 51: Signifikanztest zwischen den interzellularen CO <sub>2</sub> - Konzentrationen von <i>P. x canescens</i> und <i>P. tremula</i> unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) .....	126
Tabelle 52: Signifikanztest zwischen den interzellularen CO <sub>2</sub> - Konzentrationen von <i>P. x canescens</i> und <i>P. alba</i> unter Umgebungsbedingungen (400 ppm).....	126
Tabelle 53: Signifikanztest zwischen den interzellularen- CO <sub>2</sub> Konzentrationen von <i>P. x canescens</i> und <i>P. tremula</i> unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) .....	127
Tabelle 54: Signifikanztest zwischen den interzellularen CO <sub>2</sub> - Konzentrationen von <i>P. x canescens</i> und <i>P. alba</i> unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	128
Tabelle 55: Signifikanztest zwischen der Interzellularen CO <sub>2</sub> - Konzentration von <i>P. x canadensis</i> (400 ppm) und <i>P. x canadensis</i> (950 ppm) .....	129
Tabelle 56: Signifikanztest zwischen der Interzellularen CO <sub>2</sub> - Konzentration von <i>P. nigra</i> (400 ppm) und <i>P. nigra</i> (950 ppm) .....	131
Tabelle 57: Signifikanztest zwischen der Interzellularen CO <sub>2</sub> - Konzentration von <i>P. deltoides</i> (400 ppm) und <i>P. deltoides</i> (950 ppm) .....	132
Tabelle 58: Signifikanztest zwischen den interzellularen CO <sub>2</sub> - Konzentrationen von <i>P. x canadensis</i> und <i>P. nigra</i> unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) .....	134
Tabelle 59: Signifikanztest zwischen den interzellularen CO <sub>2</sub> - Konzentrationen von <i>P. x canadensis</i> und <i>P. deltoides</i> unter Umgebungsbedingungen (400 ppm).....	134
Tabelle 60: Signifikanztest zwischen den interzellularen CO <sub>2</sub> - Konzentrationen von <i>P. x canadensis</i> und <i>P. nigra</i> unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) .....	136
Tabelle 61: Signifikanztest zwischen den interzellularen CO <sub>2</sub> - Konzentrationen von <i>P. x canadensis</i> und <i>P. deltoides</i> unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	136

Tabelle 62: Signifikanztest zwischen den Gewichten der oberirdischen Biomasse (Stamm) von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm) .....	140
Tabelle 63: Signifikanztest zwischen den Gewichten der oberirdischen Biomasse (Stamm) von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm) .....	143
Tabelle 64: Signifikanztest zwischen den Gewichten der unterirdischen Biomasse (Wurzeln) von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm) .....	146
Tabelle 65: Signifikanztest zwischen den Gewichten der unterirdischen Biomasse (Wurzeln) von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm).....	149
Tabelle 66: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von <i>P. x canescens</i> (400 ppm) und <i>P. x canescens</i> (950 ppm) .....	151
Tabelle 67: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von <i>P. tremula</i> (400 ppm) und <i>P. tremula</i> (950 ppm).....	152
Tabelle 68: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von <i>P. alba</i> (400 ppm) und <i>P. alba</i> (950 ppm).....	154
Tabelle 69: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von <i>P. x canescens</i> und <i>P. tremula</i> unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) .....	156
Tabelle 70: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von <i>P. x canescens</i> und <i>P. alba</i> unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) .....	156
Tabelle 71: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von <i>P. x canescens</i> und <i>P. tremula</i> unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm) .....	158
Tabelle 72: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von <i>P. x canescens</i> und <i>P. alba</i> unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm) .....	158
Tabelle 73: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von <i>P. x canadensis</i> (400 ppm) und <i>P. x canadensis</i> (950 ppm) .....	160
Tabelle 74: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von <i>P. nigra</i> (400 ppm) und <i>P. nigra</i> (950 ppm).....	162
Tabelle 75: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von <i>P. deltoides</i> (400 ppm) und <i>P. deltoides</i> (950 ppm) .....	164
Tabelle 76: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von <i>P. x canadensis</i> und <i>P. nigra</i> unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) .....	165
Tabelle 77: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von <i>P. x canadensis</i> und <i>P. deltoides</i> unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) .....	166
Tabelle 78: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von <i>P. x canadensis</i> und <i>P. nigra</i> unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm) .....	167
Tabelle 79: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von <i>P. x canadensis</i> und <i>P. deltoides</i> unter erhöhter CO <sub>2</sub> -Konzentration (950 ppm).....	168



Tabelle 80: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von <i>P. x canescens</i> (400 ppm) und <i>P. x canescens</i> (950 ppm) .....	169
Tabelle 81: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von <i>P. tremula</i> (400 ppm) und <i>P. tremula</i> (950 ppm).....	171
Tabelle 82: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von <i>P. alba</i> (400 ppm) und <i>P. alba</i> (950 ppm).....	173
Tabelle 83: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von <i>P. x canescens</i> und <i>P. tremula</i> unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) .....	174
Tabelle 84: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von <i>P. x canescens</i> und <i>P. alba</i> unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) .....	175
Tabelle 85: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von <i>P. x canescens</i> und <i>P. tremula</i> unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	177
Tabelle 86: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von <i>P. x canescens</i> und <i>P. alba</i> unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) .....	177
Tabelle 87: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von <i>P. x canadensis</i> (400 ppm) und <i>P. x canadensis</i> (950 ppm) .....	179
Tabelle 88: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von <i>P. nigra</i> (400 ppm) und <i>P. nigra</i> (950 ppm).....	180
Tabelle 89: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von <i>P. deltoides</i> (400 ppm) und <i>P. deltoides</i> (950 ppm).....	182
Tabelle 90: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von <i>P. x canadensis</i> und <i>P. nigra</i> unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) .....	184
Tabelle 91: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von <i>P. x canadensis</i> und <i>P. deltoides</i> unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) .....	184
Tabelle 92: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von <i>P. x canadensis</i> und <i>P. nigra</i> unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) .....	186
Tabelle 93: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von <i>P. x canadensis</i> und <i>P. deltoides</i> unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	187
Tabelle 94: Signifikanztest zwischen den Blattflächen von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	190
Tabelle 95: Signifikanztest zwischen den Blattflächen von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm) .....	193
Tabelle 96: Signifikanztest zwischen der Größe der Spaltöffnungen von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	197
Tabelle 97: Signifikanztest zwischen der Größe der Spaltöffnungen von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	200
Tabelle 98: Signifikanztest zwischen der Größe der Gefäßfläche von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	204
Tabelle 99: Signifikanztest zwischen der Größe der Gefäßfläche von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	207

Tabelle 100: Signifikanztest zwischen den Jahrringbreiten von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	210
Tabelle 101: Signifikanztest zwischen den Jahrringbreite von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	214
Tabelle 102: Signifikanztest zwischen den Gefäßdichten von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	217
Tabelle 103: Signifikanztest zwischen den Gefäßdichten von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	221
Tabelle 104: Signifikanztest zwischen den Kohlenstoffgehalten in den Stämmen von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	223
Tabelle 105: Signifikanztest zwischen den Kohlenstoffgehalten in den Stämmen von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).	225
Tabelle 106: Signifikanztest zwischen den Stickstoffgehalten in den Stämmen von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	227
Tabelle 107: Signifikanztest zwischen den Stickstoffgehalten in den Stämmen von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	230
Tabelle 108: Signifikanztest zwischen den Kohlenstoffgehalten in den Blättern von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	232
Tabelle 109: Signifikanztest zwischen den Kohlenstoffgehalten in den Blättern von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	234
Tabelle 110: Signifikanztest zwischen den Stickstoffgehalten in den Blättern von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).	236
Tabelle 111: Signifikanztest zwischen den Stickstoffgehalten in den Blättern von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	238
Tabelle 112: Signifikanztest zwischen den Kohlenstoffgehalten in den Wurzeln von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	240
Tabelle 113: Signifikanztest zwischen den Kohlenstoffgehalten in den Wurzeln von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	242
Tabelle 114: Signifikanztest zwischen den Stickstoffgehalten in den Wurzeln von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).	244
Tabelle 115: Signifikanztest zwischen den Stickstoffgehalten in den Wurzeln von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	246
Tabelle 116: Signifikanztest zwischen den C/N- Verhältnissen in den Stämmen von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	248

Tabelle 117: Signifikanztest zwischen den C/N- Verhältnissen in den Stämmen von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	250
Tabelle 118: Signifikanztest zwischen den C/N- Gehältern in den Blättern von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).	252
Tabelle 119: Signifikanztest zwischen den C/N- Verhältnissen in den Blättern von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	254
Tabelle 120: Signifikanztest zwischen den C/N- Verhältnis in den Wurzeln von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).	256
Tabelle 121: Signifikanztest zwischen den C/N- Verhältnissen in den Wurzeln von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO <sub>2</sub> - Konzentration (950 ppm).....	258
Tabelle 122: Signifikanztest zwischen den Lignin- und Kohlenhydratanteil im Holz von unbegasten (400 ppm) und begasten (950 ppm) einjährigen Pflanzen .....	265
Tabelle 123: Signifikanztest zwischen den Lignin- und Kohlenhydratanteil im Holz von Hybridpappeln und Elternarten (einjährige Pflanzen), unterschieden nach Versuchsbedingungen .....	265
Tabelle 124: Signifikanztest zwischen den Lignin- und Kohlenhydratanteil im Holz von unbegasten (400ppm) und begasten (950 ppm) Stecklingen .....	271
Tabelle 125: Signifikanztest zwischen den Lignin- und Kohlenhydratanteil im Holz von Hybridpappeln und Elternarten (Stecklinge), unterschieden nach Versuchsbedingungen.....	271
Tabelle 126: Korrelationsanalyse von Gaswechselfparametern mit Signifikanzanalyse .....	278
Tabelle 127: Korrelationsanalyse von morphologischen Eigenschaften des Blatts mit Signifikanzanalyse .....	288
Tabelle 128: Korrelationsanalyse von holzanatomischen Eigenschaften und Gaswechselfparameter mit Signifikanzanalyse .....	292

## Verwendete Abkürzungen

Abkürzungen	Bedeutung
ADP	Adenosindiphosphat
ASE	Accelerated Solvent Extractor
ATP	Adenosintriphosphat
C	Kohlenstoff
$CaSO_4$	Calciumsulfat
$CoSO_4$	Cobalt(II)- Sulfat
$CO_2$	Kohlenstoffdioxid
°Celsius	Grad Celsius
cm	Zentimeter
FACE	Free Air Carbon Dioxide Enrichment
F1	1. Filialgeneration
g	Gramm
H	Wasserstoff
HPAEC-Borat	High Performance Anion Exchange Chromatography Borate
HPLC	High Performance Liquid Chromatography
$H_2O$	Wasser
IRGA	Infrarot Gasanalysator
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KW	Kalenderwoche
L	Liter
m	Meter
mg	Milligramm
ml	Milliliter
mm	Millimeter
$mm^2$	Quadratmillimeter
N	Stickstoff
n	Anzahl
$NADP^+$	Nicotinamid-Adenin-Dinucleotid-Phosphat

Nm	Nanometer
$O_2$	Sauerstoff
$O_3$	Ozon
P.	Populus
pH	ph- Wert
Pi	Anorganisches Phosphat
PopFACE	Poplar Free Air Carbon Dioxide Enrichment
ppm	parts per million
$ppm\ yr^{-1}$	1 part per milion per year
RCP	representative concentration pathway
rF	Relative Luftfeuchte
THG	Treibhausgas- Emissionen
vs.	<i>versus</i> = gegen, im Vergleich zu
$\mu m$	Mikrometer
$\mu m^2$	Quadratmikrometer
$\mu mol$	Mikromol
%	Prozent
%P	Prozentpunkte

---

# 1 Einleitung

In der Evolutionsgeschichte haben Pflanzen immer wieder Ihre ausgeprägte Anpassungsfähigkeit gegenüber wechselnden Umwelteinflüssen bewiesen. Seit dem ersten Auftreten von Landpflanzen vor 430 Millionen Jahren haben Pflanzen durch diese Anpassungsfähigkeit über mehrere Erdzeitalter hinweg präsent bleiben können. Durch ein zwischenzeitliches Massenaussterben vor 251 Millionen Jahren, das durch einen drastischen Anstieg der  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre verursacht worden ist (vermutlich ausgelöst durch Flutbasalaustritte und Vulkanismus), waren zu dieser Zeit wieder nur Sporenpflanzen auf dem Land präsent (Oschmann 2016). Die Regeneration der damaligen Pflanzenwelt hat mehrere Millionen Jahre gedauert (Oschmann 2016). Hybridisierungsprozesse werden vermutlich einen wesentlichen Anteil bei der Evolution der Landpflanzen und der Rückkehr von Gymnospermen zu dieser Zeit gehabt haben.

Hybride, das heißt Kreuzungen zwischen Arten, kommen in der Pflanzenwelt viel häufiger vor als noch bis vor kurzem angenommen und scheinen eine enorme, aber bisher nur wenig untersuchte Rolle in der Evolution zu spielen. Darüber hinaus sind Hybride oft invasive Arten und stellen somit eine Herausforderung für viele Ökosysteme dar. Andererseits werden Hybridisierungseffekte in Züchtungsprogrammen genutzt und bilden eine der wichtigsten Grundlagen unserer Landwirtschaft. Vor allem in Zeiten eines globalen Klimawandels und der damit einhergehenden Verschiebungen von Artarealen ist mit einer Zunahme von Hybridisierungsereignissen zu rechnen. Sehr häufig treten beispielweise bei den Pappeln natürliche Hybride auf.

Hinsichtlich einer steigenden  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre, die durch die Nutzung von fossilen Brennstoffen ausgelöst wird, stellt sich die Frage, welche Pflanzen sich am besten in der Zukunft an eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre anpassen können. Da sehr wahrscheinlich die  $CO_2$ -Konzentration weiter ansteigen wird, besteht in dieser Hinsicht weiterer Forschungsbedarf.

Die vorliegende Arbeit soll zur Beantwortung dieser Frage beitragen. Ziel dieser Arbeit war es, die Auswirkungen einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre auf die Anatomie und Physiologie von Pappeln und Hybridpappeln zu untersuchen. Dabei sollten neben der Untersuchung der Reaktionen der einzelnen Pflanzenarten auch die

Hybridpappeln mit deren Elternarten direkt verglichen werden. Ebenfalls wurde untersucht, ob Hybridpappeln unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration eine signifikant bessere Anpassungsfähigkeit besitzen als ihre Elternarten. Dafür wurden Stecklinge und einjährige Pflanzen im Gewächshaus angezogen und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration gesetzt und deren Gaswechsel in regelmäßigen Abständen erfasst. Nach den Gaswechselfersuchen wurden die physiologischen, anatomischen sowie die Lignin- und Kohlenhydratgehalte der Pflanzen untersucht und miteinander verglichen. In der vorliegenden Arbeit wurden die vergleichenden Untersuchungen an den in Europa weit verbreiteten und wirtschaftlich relevanten hybriden Graupappel (*Populus x canescens*, Hybride aus *Populus alba x Populus tremula*) sowie Bastard-Schwarzpappel (*Populus x canadensis*, Hybride aus *Populus deltoides x Populus nigra*) durchgeführt. In Abbildung 1 ist das Vergleichsschema dieser Arbeit zusammenfassend dargestellt:

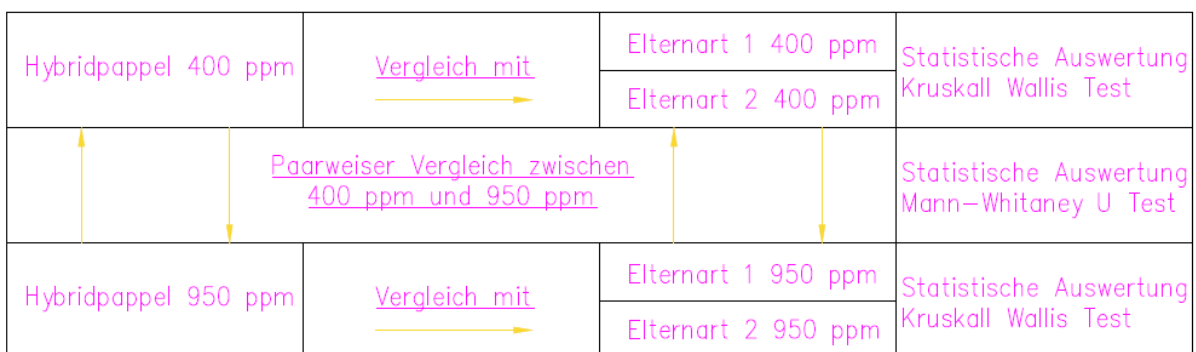


Abbildung 1: Vergleichsmatrix

## 2 Biologische Grundlagen

Die biologischen Eigenschaften bestimmen die zentralen Merkmale einer Pflanze. Im Folgenden sollen die grundlegenden Eigenschaften und Mechanismen der Pflanzen von der Zellentwicklung über das Wachstum bis hin zur Photosynthese zusammenfassend erläutert werden. Die nachfolgenden Informationen entstammen der Standard- Literatur der Pflanzenökologie und sind zusammenfassend beschrieben.

### 2.1 Blattaufbau und Funktion

Das Blatt ist das Organ der Pflanze, bei dem die Photosynthese- und Transpirationsprozesse stattfinden und somit eines der lebenswichtigsten Instrumente der Pflanze (Matyssek et al. 2010). Um die effektive Funktion dieses Organs sicherzustellen, ist zum einen die Versorgung mit Nährstoffen, Licht und Wasser und zum anderen die Ausrichtung der Blätter zur Lichtquelle hin, eine essenzielle Voraussetzung (Matyssek et al. 2010).

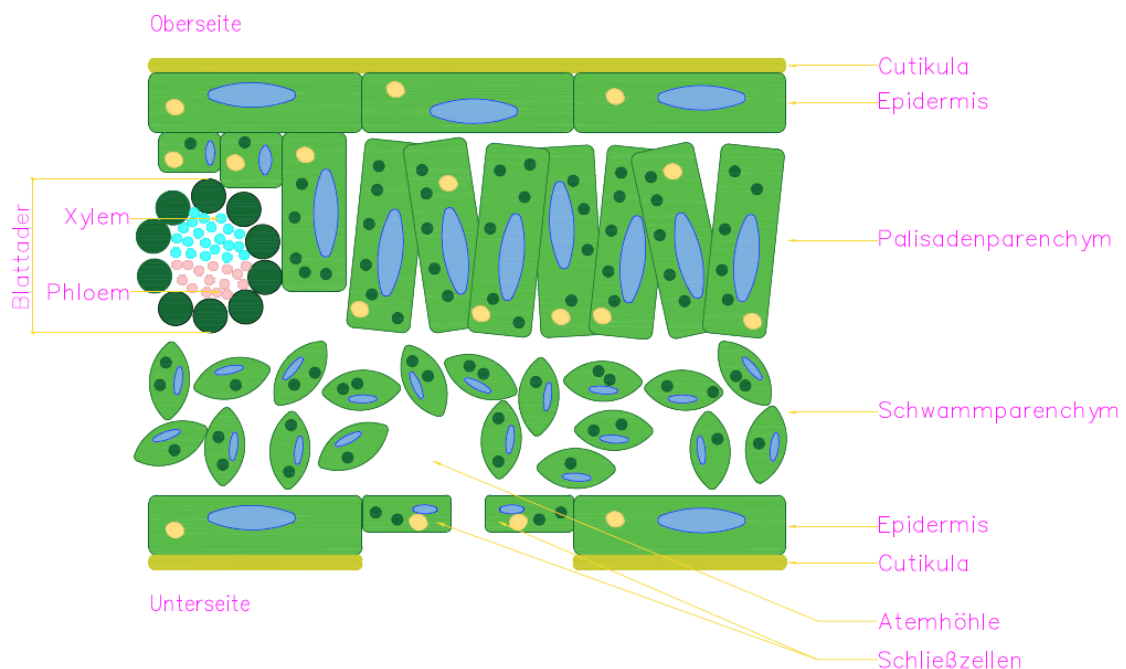


Abbildung 2: Typischer Aufbau eines Blatts angelehnt an (Sakalli 2023)



Einer der häufigsten vorkommenden Blatttypen bei Laubbäumen sind die bifazialen Blätter, deren ober- und Unterseite unterschiedlich sind und die in Abbildung 2 schematisch dargestellt sind (Matyssek et al. 2010).

Auf der Oberfläche des Blattes befindet sich eine Wachsschicht, die als Cuticula bezeichnet wird. Diese Schicht liegt unmittelbar auf der Epidermis und hat eine stabilisierende Wirkung auf das Blatt. Zudem schützt diese Schicht das Blatt vor Austrocknung und macht die Epidermis wasserundurchlässig (Matyssek et al. 2010).

Die unter der Cuticula liegende Epidermis besteht in der Regel aus einer Zellschicht und stellt das primäre Abschlussgewebe des Blattes dar. Diese Epidermis schützt das darunter liegende Mesophyll und umschließt dieses komplett. Mit der Cuticula zusammen hat die Epidermis eine festigende Wirkung und gibt dem Blatt seine Stabilität (Matyssek et al. 2010).

Das Mesophyll, bestehend aus Palisadenparenchym und Schwammparenchym, liegt unterhalb der Epidermis (Sadava et al. 2019). Das Palisadenparenchym besteht aus langgestreckten Zellen, die senkrecht zur Blattoberfläche angeordnet sind (Sadava et al. 2019). Durch die enge Struktur gibt es nur sehr kleine und enge Interzellularen (Matyssek et al. 2010). Das Palisadenparenchym beinhaltet 80 % der Chloroplasten, bei dem hauptsächlich die Photosynthesereaktion stattfindet (Matyssek et al. 2010).

Das darunter liegende Schwammparenchym hat dagegen eine inhomogene Struktur und beinhaltet größere Lufträume, die als Interzellularen bezeichnet werden (Sadava et al. 2019). Diese Hohlräume stehen in Verbindung zu den Spaltöffnungen (Stomata) des Blattes und gewährleisten eine schnelle Diffusion des  $CO_2$  zu den photosynthesebetreibenden Zellen (Sadava et al. 2019).

Durch die Spaltöffnungen wird der Wasserverlust und die  $CO_2$ -Aufnahme kontrolliert (Sadava et al. 2019). Die Stomata befinden sich bei den meisten Laubbäumen auf der Unterseite des Blattes, wobei bei manchen Pappelarten auch Stomata auf der Blattoberseite vorkommen können (Matyssek et al. 2010). Im Zuge dieser Arbeit ist festgestellt worden, dass bei den untersuchten Pappelarten die Stomata sich auf der Unterseite des Blattes befinden.

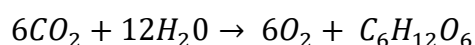
Die Stomata bestehen aus zwei Schließzellen, die um eine Öffnung bohnenförmig angeordnet sind (Sadava et al. 2019). Dieser Spaltöffnungsapparat reguliert als Ganzes den Gasaustausch zwischen dem Blattinneren und der Umgebungsluft. Dabei können die Spaltöffnungen auf Umweltreize wie Trockenstress reagieren und Schutzmaßnahmen gegen eine Austrocknung der Pflanze ergreifen (Sadava et al.

2019). In dem Fall von Trockenstress würden sich die Stomata beispielweise schließen und die Transpiration und der damit verbundene Wasserverbrauch wäre gestoppt (Matyssek et al. 2010). Die Blattadern (Leitbündel) erzielen wie die Cuticula und Epidermis eine stabilisierende Wirkung und versorgen das Blatt mit Wasser. Gleichzeitig werden durch die Leitbündel Photosyntheseprodukte abtransportiert (Kadereit et al. 2014).

Für die charakteristische grüne Farbgebung der Blätter ist der Blattfarbstoff Chlorophyll verantwortlich, der wiederum den Chloroplasten die typische Farbe gibt (Matyssek et al. 2010). Chloroplasten kommen besonders in den Mesophyllzellen der Blätter vor und sind für deren Farbgebung verantwortlich. (Matyssek et al. 2010). Die grüne Farbe überlagert weitere Farbpigmente in den Chloroplasten, zu denen zum Beispiel gelb und orange gehören (Matyssek et al. 2010). Die besonders im Herbst dominierenden Farben Orange bzw. Gelb werden unter anderem dadurch sichtbar, dass Chlorophyll sich schneller abbaut als die Blattpigmente Carotinoide und Xanthophylle, die dem Blatt im Herbst deren typische gelbe bzw. orange Farbe geben (Matyssek et al. 2010).

## 2.2 Gaswechsel

Die Photosynthese ist die Lebensgrundlage für eine Vielzahl von Organismen innerhalb der Erdatmosphäre und der zentrale Energieumwandlungsprozess in der Biosphäre, bei dem Lichtenergie in Stoffwechselenergie umgesetzt wird (Schopfer und Brennicke 2010). Dabei betreiben Landpflanzen, Algen und Cyanobakterien (Blaualgen), die unter aeroben Bedingungen leben, eine oxygene Photosynthese (Sadava et al. 2019). Bei der oxygenen Photosynthese werden mittels Lichtenergie (Strahlungsenergie der Sonne) das von der Atmosphäre aufgenommene Kohlendioxid ( $CO_2$ ) und Wasser ( $H_2O$ ) in Sauerstoff ( $O_2$ ) und Kohlenhydratbausteine umgewandelt (Sadava et al. 2019). Die nachfolgende Formel beschreibt die allgemeine Photosynthesereaktion:



Gleichung der Photosynthesereaktion

Von der gesamten Strahlungsenergie, die auf die Erdoberfläche auftritt, werden ca. 0,01 % für Photosynthese genutzt (Weiler und Nover 2008).

Die Photosynthese gliedert sich in zwei aufeinander folgende Schritte: die Lichtreaktion (Energie-Übertragungsreaktion) und die darauf folgende lichtunabhängige Reaktion (Kohlenstoff-Fixierungsreaktion) (Friedl et al. 2006). Die beiden Reaktionen finden im Chloroplast der Pflanzenzelle statt, wobei in den Thylakoiden die Lichtreaktion und im Stroma die lichtunabhängige Reaktion stattfindet (Abbildung 3) (Sadava et al. 2019).

Bei der Lichtreaktion (auch Primärreaktion genannt), wird die eingefangene Lichtenergie in chemische Energie umgewandelt (Sadava et al. 2019). Dabei werden über Rezeptormoleküle (Photosynthesepigmente) Photonen, die aus der Lichtenergie stammen, absorbiert (Sadava et al. 2019). Dabei sind die Photosynthesepigmente, zu den Chlorophyll gehört, in der Lage, nur Photonen einer bestimmten Wellenlänge und somit Photonen mit einer entsprechenden Energiemenge aufzunehmen (Sadava et al. 2019). Im Fall von Chlorophyll kann blaues und rotes Licht absorbiert werden, grünes jedoch nicht (Sadava et al. 2019).

Das Chlorophyll steht in Verbindung zur Thylakoidmembran und nimmt im sichtbaren Spektrum Photonen (blaue und rote Wellenlängen) auf. (Sadava et al. 2019). Die Strahlungsanteile des Lichtes, die nicht absorbiert (transmittiert) werden, sind photochemisch ohne Wirkung (Richter 1997). Bei der Absorption eines Photons wird das Molekül eines Pigments (Chlorophyll), in einen angeregten Zustand versetzt, wodurch die Pflanze Energie aufnimmt (Sadava et al. 2019). Diese Energie wird indirekt für die ATP- Synthese verwendet (Friedl et al. 2006). Zur gleichen Zeit wird das Wasser in der Thylakoidmembran gespalten, wobei Sauerstoff ( $O_2$ ) und Wasserstoff ( $H_2$ ) (Elektronen und Protonen) freigesetzt werden (Friedl et al. 2006).

Das Wasser ist vorher über die Wurzeln der Pflanze aufgenommen worden und ist über das Wasserleitgewebe (Xylem) der Leitbündel (Blattadern) transportiert worden (Friedl et al. 2006).

Die Elektronen werden im Anschluss von  $NADP^+$  und  $H^+$  unter der Bildung von  $NADPH$  aufgenommen (Sadava et al. 2019).

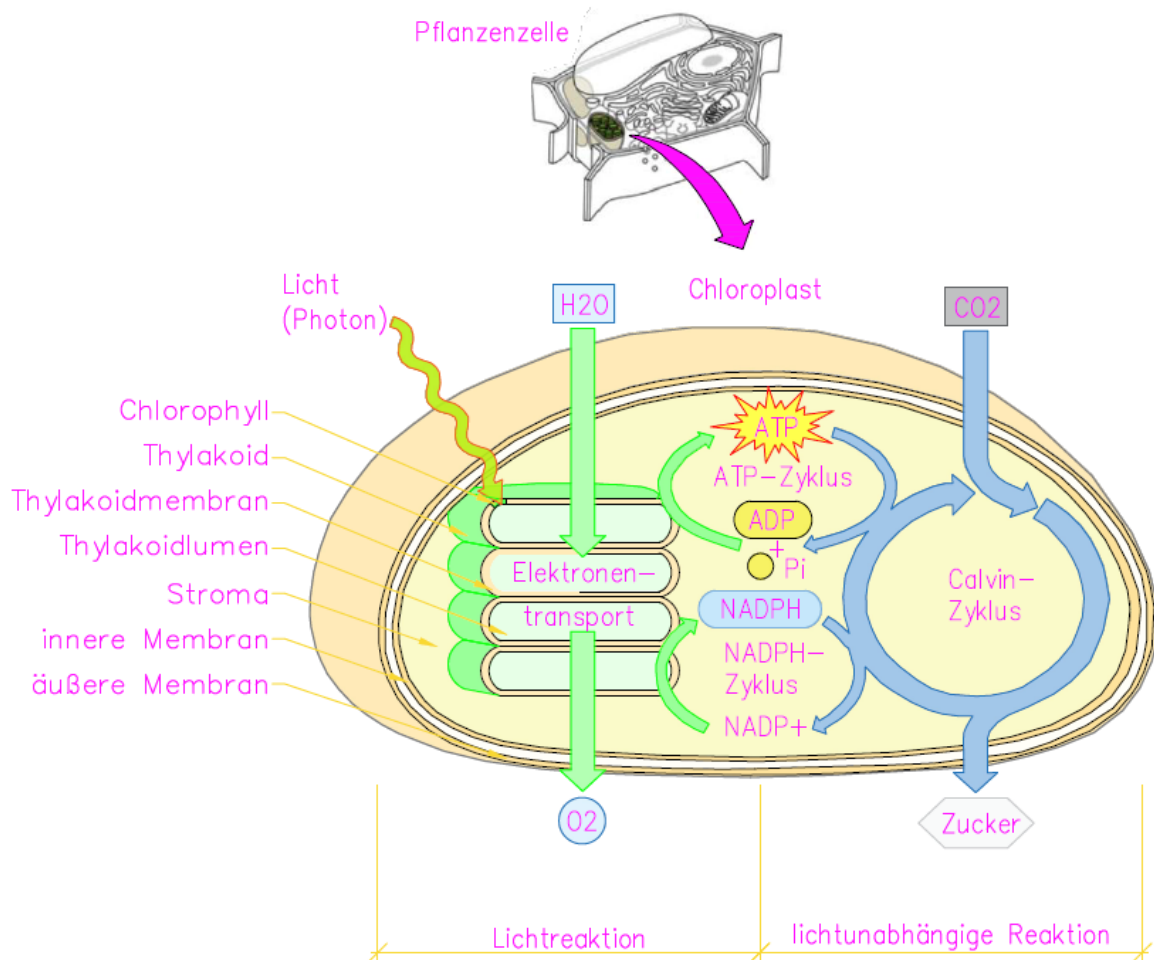


Abbildung 3: Chloroplast einer Pflanzenzelle angelehnt an (Sadava et al. 2019)

Die Kohlenstoff-Fixierungsreaktion erfolgt im Stroma der Chloroplasten (Friedl et al. 2006). Bei dieser Reaktion wird aus Kohlendioxid ( $CO_2$ ) und dem im  $NADPH$  enthaltenen Wasserstoff Zucker synthetisiert (Friedl et al. 2006). Die Energie, die für diesen Prozess benötigt wird, stammt aus  $ATP$  und  $NADPH$ , die in der Lichtreaktion gebildet werden. Diese Reihe von vielfach wiederholten Reaktionen werden als Calvin-Zyklus bezeichnet (Friedl et al. 2006). Die gebildeten Zucker werden aus dem Blatt über die Stoffleitgewebe (Phloem) der Leitbündel exportiert und im Anschluss in die photosynthetisch inaktiven Teile der Pflanze bzw. des Baumes abtransportiert (Friedl et al. 2006).

### 2.2.1 Transpirationsrate

Wasserverfügbarkeit ist für das Wachstum und für die Entwicklung einer Pflanze von zentraler Bedeutung (Matyssek et al. 2010). Um beispielweise 1 g organische

Substanz zu produzieren, muss die Pflanze 500 g Wasser über die Wurzeln aufnehmen, durch die Pflanze transportieren und wieder an die Atmosphäre abgeben (Matyssek et al. 2010). Dabei verbleiben von dem aufgenommenen Wasser nur 2-3 % in der Pflanze und werden für Wachstum und Stoffwechselprozesse eingesetzt (Matyssek et al. 2010). Der Vorgang, bei dem das Wasser in Form von Wasserdampf wieder an die Atmosphäre abgegeben wird, nennt sich Transpiration (Willert et al. 1995). Damit das in der Pflanze enthaltene Wasser von der flüssigen Phase in die Dampfphase überführt wird, ist Energie notwendig, die aus der unmittelbaren Umgebung des Verdampfungsortes entzogen wird (Willert et al. 1995). Diese Umgebung befindet sich in den Zellwänden, weshalb die für die Verdampfung benötigte Energie dem Blatt selbst entzogen wird (Willert et al. 1995). Infolgedessen kühlt sich dadurch das Blatt ab (Willert et al. 1995).

Im Allgemeinen unterscheidet man zwischen zwei Arten der Transpiration: einer cuticulären, die ca. 10 % der gesamten Transpiration ausmacht und die stomatäre Transpiration, wo der restliche Gasaustausch stattfindet (Heß 2008).

Die cuticuläre Transpiration erfolgt über die gesamte Fläche der Cuticula. Dabei ist die Cuticula eine Wachsschicht auf den Außenwänden der Epidermiszellen mit einem hohen Diffusionswiderstand, und bildet dadurch eine schützende Schicht, die den Wasserverlust in die Atmosphäre hemmt (Friedl et al. 2006; Schopfer und Brennicke 2010).

Die stomatäre Transpiration wird im Gegensatz zu der cuticulären Transpiration von der Pflanze kontrolliert und über die Spaltöffnungen gesteuert, wo auch der Gaswechsel der Pflanze stattfindet (Heß 2008).

Der überwiegende Teil des Wassers wird in Dampfform über die Stomata abgegeben und wird als stomatäre Transpiration bezeichnet (Schopfer und Brennicke 2010).

Die stomatäre Leitfähigkeit ist dabei eine wichtige Einflussgröße bei der Transpiration und ist wiederum abhängig vom Öffnungsgrad der Stomata.

Ein wichtiger Umweltfaktor, der die Transpirationsrate beeinflussen kann, ist die Temperatur (Friedl et al. 2006). Bei einem Temperaturanstieg von 10 Grad Celsius kann sich die Verdunstungsgeschwindigkeit des Wassers verdoppeln (Friedl et al. 2006). Bei der Verdunstung des Wassers wird jedoch durch Verdunstungskälte das Blatt wiederum abgekühlt, wodurch die Temperatur des Blatts deutlich verzögert ansteigt (Friedl et al. 2006). Bei Temperaturen von 30- 35 Grad Celsius schließen sich die Stomata in der Regel (Friedl et al. 2006).

Ein weiterer Umweltfaktor, der Einfluss auf die Transpirationsrate hat, ist die Luftfeuchtigkeit (Friedl et al. 2006). Grund hierfür ist, dass die Dampfdruckdifferenz zwischen dem Wasserdampfdruck in den Interzellularen und dem Wasserdampfdruck in der Atmosphäre unmittelbar über der Blattoberfläche proportional zur Transpirationsrate steigt oder fällt (Friedl et al. 2006). Das bedeutet, je höher der Wasserdampfdruck in der Atmosphäre ist, desto geringer ist die Wasserverlustrate der Pflanzen (Friedl et al. 2006). Ebenso spielt die Luftzirkulation in der Umgebung der Pflanze eine wichtige Rolle und hat einen Einfluss auf die Transpirationsrate (Friedl et al. 2006). Bei stärkerem Wind wird der Wasserdampf entfernt, der sich auf der Blattoberfläche angesammelt hat (Friedl et al. 2006). Die Entfernung des Wasserdampfes durch den Wind hat einen unmittelbaren Einfluss auf die Wasserdampfdruckdifferenz zwischen Blättern und der Blattoberfläche (Friedl et al. 2006). Ist die Luftfeuchtigkeit in der Atmosphäre sehr hoch, kann der Wind durch Kühlung des Blattes die Transpirationsrate herabsetzen (Friedl et al. 2006). Bei trockener Luft in Kombination mit stärkerem Wind geht dagegen die Transpirationsrate hoch (Friedl et al. 2006).

### *2.2.2 Stomatäre Leitfähigkeit*

Die stomatäre Leitfähigkeit beschreibt den Strom von Wasserdampf durch die Stomata hindurch in die Umgebung in Abhängigkeit von Flächen pro Zeiteinheit und verhält sich linear proportional zur Spaltweite (Larcher 1994; Bundesforschungszentrum für Wald 2023). Dabei gilt, je höher die stomatäre Leitfähigkeit ist, desto mehr Gasaustausch wird betrieben, wobei im gleichen Schritt auch mehr Wasser verbraucht wird. Wie auch bei der Transpiration, die unmittelbar mit der Wasserdampfleitfähigkeit in Zusammenhang steht, wird diese Größe zum einen durch Umwelteinflüsse wie zum Beispiel Luft- und Bodenfeuchte beeinflusst und ebenso auch durch biologische Eigenschaften der Pflanze wie die Vitalität der Blätter (Bundesforschungszentrum für Wald 2023).

### 2.2.3 Nettophotosyntheserate

Unabhängig von der Lichtintensität findet bei der Pflanze ein Energieverbrauch durch Zellatmung statt, die für Stoffwechselprozesse in der Pflanze benötigt wird. Diese Zellatmung ist mit einer Abgabe von  $CO_2$  und Wasser verbunden. Bei einer steigenden Lichtintensität steigt die Photosyntheserate der Pflanze an. Die Abgabe von  $CO_2$  reduziert sich dadurch und wird ab dem Lichtkompensationspunkt schließlich komplett ausgeglichen. Ab diesem Punkt wird mehr Kohlenstoffdioxid aufgenommen als abgegeben. Unter der Berücksichtigung bzw. Abzug der Zellatmung wird dieser Parameter daher als Nettophotosyntheserate bezeichnet. Die Brutto-Photosyntheserate beschreibt dagegen die Photosyntheserate ohne Berücksichtigung der Zellatmung und wäre dementsprechend höher (Abbildung 4)

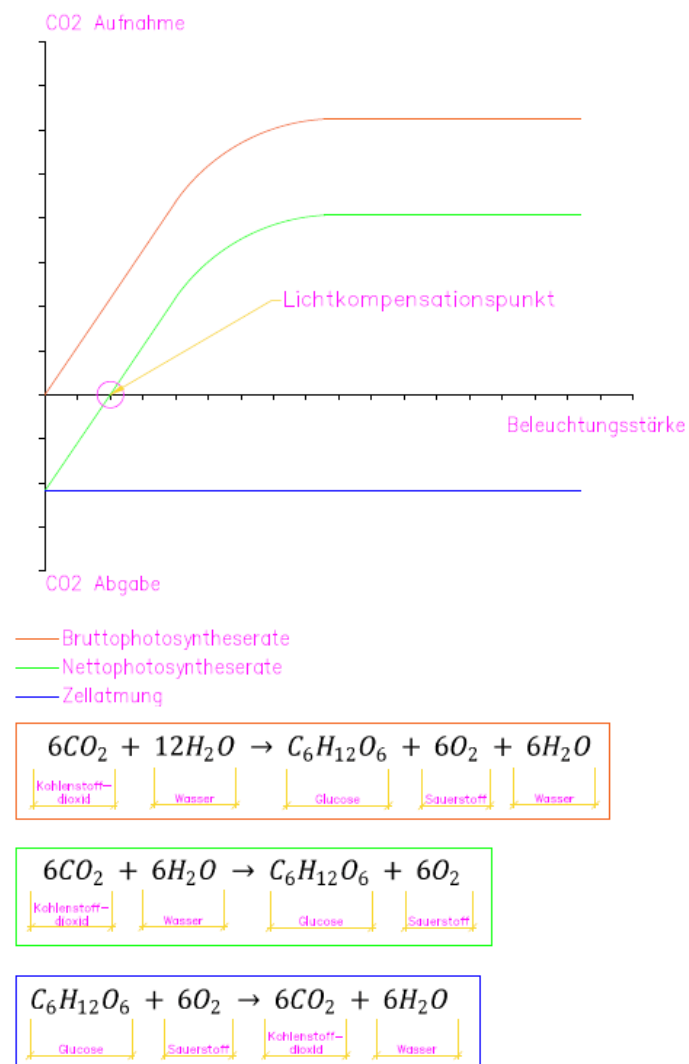


Abbildung 4: Darstellung der Photosyntheserate in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke angelehnt an (McCarthy 2007; Hensel 2014)

#### 2.2.4 Interzellulare $CO_2$ -Konzentration

Die interzellulare  $CO_2$ -Konzentration beschreibt die Kohlenstoffdioxidkonzentration im Mesophyll des Blattes, das sich unmittelbar unter den Spaltöffnungen, bzw. unter der Epidermis befindet.

### 2.3 Holzanatomie der Laubbäume

Laubbäume gehören zur Gruppe der Bedecktsamer (Angiospermen) und weisen hinsichtlich der Pflanzenevolution deutlich jüngere Baumarten auf als Nadelhölzer (Grosser 2007). Die ersten Bedecktsamer sind im Mitteljura also vor ca. 174,1-163,5 Millionen Jahren aufgetreten und haben sich über die Erdzeitalter hinweg immer mehr verbreitet (Oschmann 2016). Im direkten Vergleich haben Laubhölzer eine wesentlich komplexere Anatomie als Nadelhölzer (Grosser 2007). Dabei ist hier die Funktionstrennung der Zellen der entscheidende Unterschied (Grosser 2007). Die Tracheiden der Nadelhölzer übernehmen beispielweise mit dem Wassertransport und der Festigung des Holzgefüges zwei Funktionen gleichzeitig (Grosser 2007). Bei Laubhölzern herrscht eine Funktionstrennung, wodurch unterschiedliche Zellarten mit verschiedenen Funktionen im Holz vorkommen (Grosser 2007). Für den Wassertransport sind bei Laubhölzern die für Angiospermen typischen Tracheen (Gefäße) zuständig. Die auch als Poren bezeichneten Zellen sind oft im Querschnitt mit dem Auge erkennbar und sind im Gegensatz zu Tracheiden sehr weitlumig. Je nach Baumart durchziehen die Tracheen in verschiedenen Anordnungen in axialer Richtung den Holzkörper und können bei Eichen bis zu 18 Meter lang werden (Grosser 2007). Dadurch, dass bei Tracheen keine Tüpfelmembranen in axialer Richtung vorkommen, kann ein ungehinderter Wassertransport in axialer Richtung des Stammes stattfinden (Grosser 2007). Bei der Gefäßanordnung unterscheidet man bei den Laubgehölzen zwischen ringporig, halbringporig und zertreuporig (Grosser 2007). Ringporige Baumtypen weisen je nach Früh- oder Spätholz stark verschiedene Gefäßgrößen auf, wobei im Frühholzbereich die weitlumigen angeordnet sind und im Spätholz die englumigen (Grosser 2007). Halbringporige Hölzer haben im Frühholzbereich größere Zellen als im Spätholz oder haben im gesamten Jahrring gleich große Zellen, wobei im Frühholz besonders viele Gefäße platziert sind (Grosser



2007). Bei zerstreuporigen Laubhölzern sind die Gefäße über den Jahrring hinweg gleich groß, wobei die Gefäßanordnung sehr homogen ist (Grosser 2007). Ein typischer Vertreter zerstreuporiger Baumarten ist die Pappel, dessen Anatomie in Abbildung 5 dargestellt ist. Die Stützfunktion des gesamten Körpers übernehmen die Libriformfasern mit einem Gesamtanteil von ca. 50-70 % im Holz und Fasertracheiden (Matyssek et al. 2010). Analog zu den Nadelhölzern erfolgt die Nährstoffspeicherung im Längs- und Strahlenparenchym, wobei der Anteil dieser Zelltypen mit 17 % zum gesamten Holzgefüge deutlich höher ist als bei Nadelhölzern, bei dem der Anteil bei 8 % liegt (Matyssek et al. 2010).

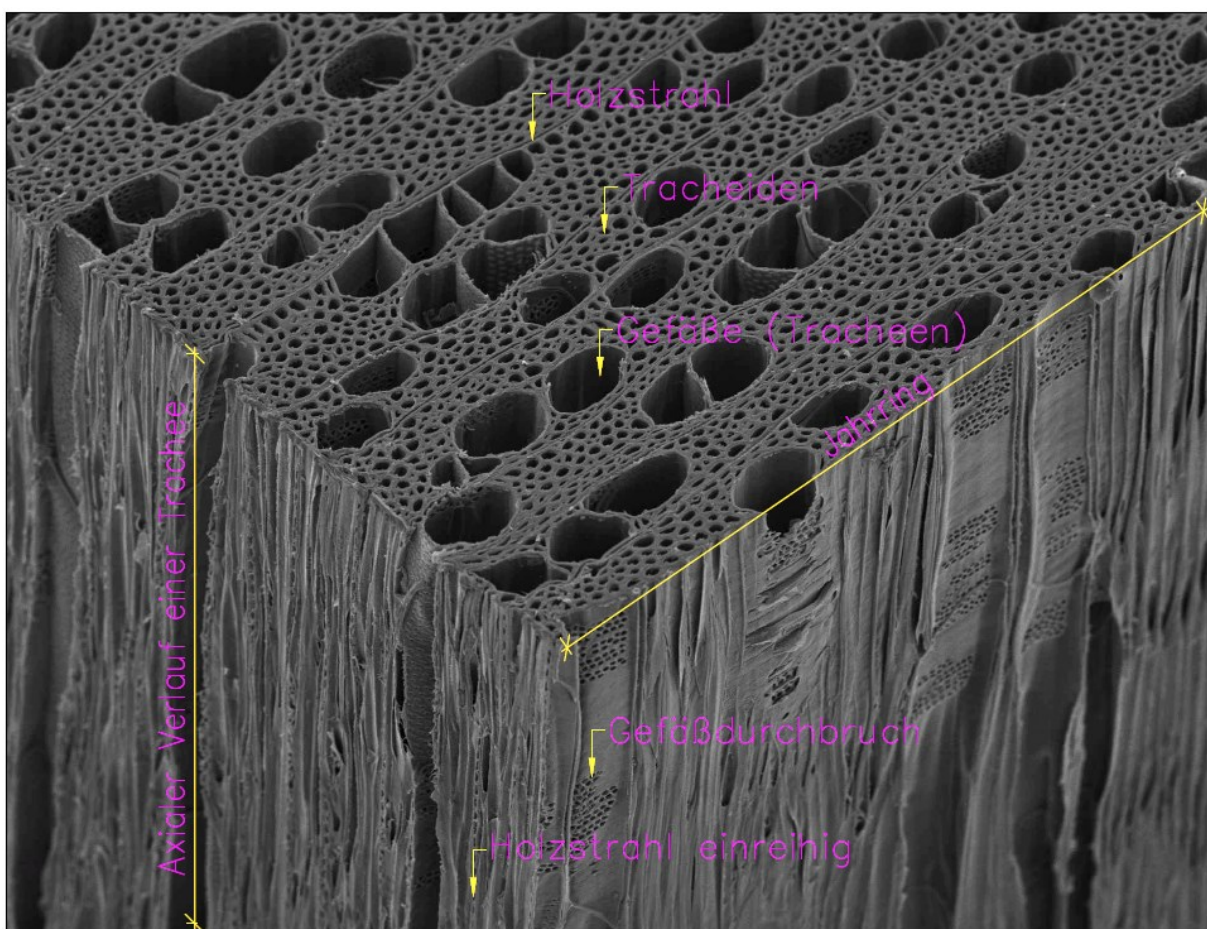


Abbildung 5: Holzanatomie einer Pappel

Bei Pappeln kommen meist homogene Holzstrahlen vor, welche ein entscheidendes Merkmal zur anatomischen Unterscheidung zwischen Pappeln und Weiden darstellen (Matyssek et al. 2010). Charakteristisch für einen homogenen Holzstrahl ist das Vorhandensein von ausschließlich liegenden Parenchymzellen (horizontal zur Stammachse).

Zum Transport von Assimilaten, wie zum Beispiel Saccharose, werden bei Laubhölzern zylinderförmige Siebröhren eingesetzt, die sich im Bast befinden und aus Cambiumzellen hervorgehen (Matyssek et al. 2010). Bei den Siebröhren sind die oberen und unteren Zellwände mit sogenannten Sieb- Poren versehen und stellen für eine für den Assimilattransport vorgesehene Zellwanddurchbrechung dar (Matyssek et al. 2010). Deren Steuerung übernehmen parenchymatische Geleitzellen, die auf den Zylindermantelflächen der Siebröhrenzellen sitzen (Matyssek et al. 2010).

## 2.4 Hybridisierung

Natürliche Hybridisierungen sind in der Pflanzenwelt stark verbreitet und ein häufiges Phänomen bei Gefäßpflanzen (López-Caamal und Tovar-Sánchez 2014). Es hat sich gezeigt, dass Hybridisierung bei Pflanzen eher die Regel als die Ausnahme ist (Wissemann 2007). Man geht davon aus, dass ca. ein Drittel aller Pflanzenarten durch eine natürliche Hybridisierung entstanden sind (Jäger et al. 2003). Hybride Arten werden auch als Schnittstelle zwischen den Prozessen der Evolution und der ökologischen Anpassung angesehen (McKown und Guy 2018). Hybridisierung ist ein weit gestreuter Begriff und kann evolutionsbiologisch verschiedene Bedeutungen haben (Wissemann 2007). Zum einen kann der Begriff „Hybrid“ auf Organismen beschränkt werden, die durch eine Kreuzung von Individuen verschiedener Arten entstanden sind (Rieseberg und Carney 1998). Zum anderen können Hybride auch als Nachkommen von Individuen bestimmter Populationen bezeichnet werden, die sich auf Grundlage von einer oder mehrerer vererbbarer Merkmale grundlegend unterscheiden (Harrison 1990). In der heutigen Forschung spricht man von Hybridisierung, wenn zwei Individuen aus klar trennbaren Arten Nachkommen bilden. Dabei wird die Elterngeneration als Parentialgeneration und die Tochtergeneration als Filialgeneration bezeichnet. Lange Zeit wurden Hybridisierungen in der Natur von der Forschung als eher selten eingestuft und den Hybriden selbst ein schwaches Leistungsvermögen zugesprochen (Wissemann 2007). Jedoch hat sich durch fortschreitende Forschung diese Annahme als falsch erwiesen (Wissemann 2007). Beispielweise hat sich gezeigt, dass Hybride ein großes Potential besitzen, sich außerhalb der typischen Wachstumsgebiete zu etablieren und zu vermehren (Friedl et al. 2006). Ebenso sind hybride Pflanzen in der Lage, Elternarten in ihren eigenen

Gebieten zu verdrängen (Wissemann 2007). Durch die Kombination von Genomen, die sich in vielen Genen unterscheiden, entsteht so ein Potential für den erzeugten Hybrid, gerade unter schwierigen Bedingungen sich am Standort durchzusetzen (Wissemann 2007). Die immer weiter steigende Zahl an invasiven exotischen Pflanzenarten in den Regionen und die Veränderung der lokalen Ökosysteme durch Menschen, begünstigen zum Teil Hybridisierungen zwischen einheimischen als auch zwischen einheimischen und eingeführten Arten (Vilà et al. 2000). Dabei kann die Ausbreitung von Hybridtaxa die einheimischen Arten einschränken oder diese auch zum Teil verdrängen (Vilà et al. 2000). Bei der Entstehung von Hybriden in Ökosystemen wird der Mensch als Hauptverursacher vermutet (Vilà et al. 2000). Eine Invasion durch Hybridisierung kann durch vier verschiedene Arten erfolgen (Vilà et al. 2000). Zum einen kann eine Hybridisierung von einheimischen Arten auftreten (Vilà et al. 2000). Auch ist eine Hybridisierung zwischen einer exotischen Art und einen einheimischen Verwandten möglich (Vilà et al. 2000). Des Weiteren kann die Hybridisierung zwischen zwei exotischen Arten erfolgen und zudem ist eine Einführung von Hybriden und eine darauffolgende Verbreitung denkbar (Vilà et al. 2000).

Als Faktoren für den Erfolg und die Konkurrenzfähigkeit von Hybriden sind unter anderem ein schnelleres Wachstum und eine höhere Resistenz gegenüber Krankheitserregern zu nennen (Vilà et al. 2000). Der Erfolg vom Hybridisierungsvorgängen hängt zudem von weiteren diversen Faktoren ab (Wissemann 2007). So ist beispielweise das Zuchtsystem, die Lebensspanne, das Gebiet und die Habitatsstruktur, Pollenausbreitung durch Wind, Wasser und Tiere, Mechanismen der Inkompabilität und die historische Häufigkeit mit entscheidend (Wissemann 2007). Dabei steht die Lebensspanne für die Schnelligkeit der Ausbreitung am Standort und der Standort selbst kann ebenfalls die Geschwindigkeit der Ausbreitung sowie den Gesamterfolg der Etablierung beeinflussen (Wissemann 2007).

Vorausgegangene Forschungsarbeiten haben mehrfach gezeigt, dass natürliche Hybridisierung am wahrscheinlichsten eintritt, wenn Blüten eines der beiden Elternarten in der Minderheit sind (Rieseberg und Carney 1998). Daher könnte Pollenkonkurrenz ein entscheidender Mechanismus sein, der die Bildung von natürlichen Hybriden verhindert (Rieseberg und Carney 1998). Damit eine neue Hybridart entstehen kann, ist die Allopolyploidie also die Verdopplung der Chromosomenanzahl eines Hybriden, entscheidend (Leitch und Bennet 1997).

Hybride Pflanzen können in Bezug auf Fruchtbarkeit und Wuchsstärke sehr variabel sein (Rieseberg und Carney 1998). Wenn diese Hybriden ihre Elternarten in vegetativer Hinsicht und in Robustheit übertreffen, spricht man von einer Heterosis (Rieseberg und Carney 1998). Die Heterosis hat wichtige Auswirkungen auf die Evolutionsbiologie und ist zum Teil eine Erklärung für den Erfolg der allopolyploiden Arten (Rieseberg und Carney 1998). Dieser Erfolg ist jedoch zum Teil auch stark abhängig von lokalen Begebenheiten (Rieseberg und Carney 1998). Daher lässt es sich schwer vorhersagen, ob ein gebildeter Hybrid schon in der ersten Generation stärker sein wird als die Elternarten (Rieseberg und Carney 1998). Untersuchungen haben zum einen ergeben, dass die Fitness der Hybriden der ersten Generation geringer sein kann als die der Elternarten (Rieseberg und Carney 1998). Jedoch haben auch Studien wiederum das gegenteilige Ergebnis ermittelt, bei dem die Hybriden der ersten Generation deutlich stärker waren als die Elternarten (Rieseberg und Carney 1998). Bei den von Witham durchgeführten Untersuchungen ist festgestellt worden, dass Hybridpappeln vermehrt mit Blattlaus- Herboviden befallen waren (Whitham 1989). Vermutlich spielen sowohl ökologische (Standort) wie auch genotypische Merkmale eine Rolle, inwieweit ein Hybrid resistent gegenüber Schädlingen sein kann (Paige und Capman 1993).

Es ist schon seit längerer Zeit bekannt, dass Pappeln die Fähigkeit besitzen sich zu hybridisieren (McKown und Guy 2018). Viele natürliche interspezifische Pappel-Hybridisierungen sind in der Natur weit verbreitet, wobei einige der Hybride sehr langlebig sind (Eckenwalder 1984). Neben der guten Anpassungsfähigkeit der Hybridpappeln, die gerade für Züchtungen sehr relevant ist, sind das schnelle Wachstum und leichte vegetative Vermehrung ebenfalls vorteilhafte Faktoren (Cain und Ormrod 1984). Aufgrund des weltweiten Mangels an Holz für die mechanische- und chemische Verarbeitung ist das Interesse an schnellwachsenden Baumarten mit der Zeit immer größer geworden. Beispielweise sind Pappelzüchtungsprogramme gestartet worden. Deren Ziel ist die Erzeugung von Klonen, die sich durch überlegenes Wachstum und Resistenz gegenüber Schädlingen auszeichnen (Orlovic et al. 1997). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass natürliche Hybridisierungseffekte sowohl positive als auch negative Auswirkungen auf das lokale Ökosystem haben können (López-Caamal und Tovar-Sánchez 2014). Zu den vorteilhaften Auswirkungen gehören beispielweise Artenvielfalt durch Artenbildung. Als negative Einflüsse sind unter anderem das Aussterben von heimischen Arten zu nennen (López-Caamal und

Tovar-Sánchez 2014). Da sich jedoch der Klimawandel stark auf die Ökosysteme auswirkt, können Hybridisierungseffekte gezielt dafür eingesetzt werden, geeignete Individuen in den vom Klimawandel stark betroffenen Regionen anzusiedeln (López-Caamal und Tovar-Sánchez 2014). Dies hat den Vorteil, dass durch die Hybridisierung eine höhere genetische Vielfalt entstehen kann als dies bei „reiner“ Mutationen der Fall wäre (López-Caamal und Tovar-Sánchez 2014).

## **2.5 Heterosis- Effekte bei Hybridpappeln**

Der Begriff Heterosis wird in der Literatur auch als der Grad der Überlegenheit von F1-Hybriden gegenüber dem Mittelwert der beiden Elternarten oder dem besseren Elternteil definiert (Li et al. 1998). Dabei zählen größenmäßige Überlegenheit, schnellere Entwicklung, größere Fruchtbarkeit und höhere Widerstandsfähigkeit zu den Eigenschaften einer positiven Heterosis (Vincent und Polnar 1968).

Für die Forschung ist die positive Heterosis, die auch als hybride Vitalität bezeichnet wird, ein schon länger im Fokus stehendes Thema, das weitaus mehr untersucht wird als die negative Heterosis (McKown und Guy 2018). Die Mechanismen, die möglicherweise für eine bestehende Heterosis verantwortlich sind, konnten noch nicht zweifelsfrei identifiziert werden (Sadava et al. 2019). Es gibt jedoch zwei Hypothesen, die eine Heterosis möglicherweise erklären könnten (Sadava et al. 2019). Dazu zählen die Dominanzhypothese und die Überdominanzhypothese (Sadava et al. 2019).

Bei der Dominanzhypothese wird vermutet, dass das überlegene Wachstum bei Hybridformen dadurch kommt, dass keine Inzuchtdepression vorliegt (Sadava et al. 2019). Die Vermutung besteht, dass es bei Hybriden unwahrscheinlich ist, dass diese für ein schädliches rezessives Allel homozygot sind (Sadava et al. 2019). Dagegen wird bei der Überdominanzhypothese vermutet, dass neue Kombinationen von Allelen der Elternstämme bei Hybridformen in Wechselwirkung treten (Sadava et al. 2019). Dadurch entstehen bei den Hybridformen besondere Eigenschaften, die sich bei den elterlichen Linien nicht herausbilden können (Sadava et al. 2019). Dadurch, dass eine große Anzahl von Merkmalen von Hybriden von mehreren Genen kontrolliert werden, haben neue Untersuchungen darauf hingedeutet, dass eine Dominanz und eine Überdominanz bei bestimmten Merkmalen zur Heterosis beitragen können (Sadava et al. 2019).

Nach Steller (1996) sind die drei Hauptziele der Hybridisierung (unter anderem bei der Gattung *Populus*) zum einen die Kombination erwünschter Eigenschaften verschiedener Arten in der F1- Nachkommenschaft, sowie die Erzielung einer Heterosis oder hybrider Vitalität und zum anderen eine phänotypische Stabilität in verschiedenen Umweltbedingungen (Stettler et al. 1988). Als F1- Hybriden, bzw. F1- Nachkommenschaft wird die erste Generation an Pflanzen aus der Kreuzung beider Elternarten bezeichnet. Interspezifische Pappelhybriden, die aus einer Kreuzung von einem Elternpaar von zwei unterschiedlichen Arten entstehen, kommen in der Natur vor, aber können auch künstlich erzeugt werden (Eckenwalder 1984; Stettler et al. 1980). Hybridpappeln, die aus einer natürlichen oder künstlichen Kreuzung hervorgehen, sind in der Regel fruchtbar und können sich über Sämlinge erfolgreich weiter vermehren (Franz Binder 2015). Dazu weisen die erzeugten Hybride oft ein stärkeres Wachstum auf als die elterlichen Klone (Bate et al. 1988; Cain und Ormrod 1984). Zu den möglichen Merkmalen, die zu einer Heterosis beitragen, gehören unter anderem die Größe der Blattzellen, Anzahl der Zellen pro Blatt, die gesamte Blattfläche, Photosyntheserate des Kronendachs und Wurzelvermögen (Li et al. 1998). Die Fähigkeit zur Hybridisierung ermöglicht es der Gattung *Populus* sich an einer Vielzahl von Waldstandorten anzusiedeln, die sich von Auwäldern bis zu Mittelgebirgen erstrecken (Orlovic et al. 1997).

Bei der Gattung *Populus* sind Heterosis- Effekte weit verbreitet (Zanewich et al. 2018). Aus diesem Grund hat das Interesse über Heterosis- Effekte bei Hybridpappeln in der Vergangenheit stark zugenommen. Versuche haben gezeigt, dass Hybridpappeln ein extrem schnelles Wachstum aufweisen, dass besonders bei Intensivkulturen mit Kurzumtrieb von großer Bedeutung ist (Stettler et al. 1988) . Durch die positiven Wachstumseigenschaften ist die Entwicklung von starkwüchsigen interspezifischen Pappelhybriden zu einem der Hauptziele der Pappelzuchtungsprogramme geworden (Campbell et al. 1993). Auch wegen des Ziels, fossile Brennstoffe zu ersetzen und den  $CO_2$ - Ausstoß zu senken, ist das Interesse an einer schnellen Erzeugung von Biomasse nochmals gewachsen (Dillen et al. 2009b). Gerade Lignozellulose bietet ein hohes Energiepotential und kann beispielweise als Rohstoff für Bioethanol dienen (Möller 2007; Schubert 2006). Die Pappel als schnellwachsende Pflanze wäre möglicherweise ein guter Kandidat für die Nutzung als Bioraffinerie- Rohstoff (Möller 2007).

Innerhalb der Gattung *Populus* gibt es große phänotypische und genetische Variationen, die in Verbindung zur Wachstumsleistung, Kronenaufbau und Baumphysiologie stehen (Cervera et al. 2005). Da die quantitativen und qualitativen Unterschiede bei den unterschiedlichen Arten der Gattung *Populus* sehr hoch sind, wurden in der Vergangenheit besonders vielversprechende Genotypen für Züchtungsprogramme herausgesucht (Genetic variation in functional and structural productivity determinants in poplar 1990; Cervera et al. 2005).

Vermeint ist festgestellt worden, dass hybride Pflanzen einen intermediären Phänotyp also eine Art Mischform des Erscheinungsbildes aus beiden Elternarten aufweisen, was auf eine additive genetische Vererbung von beiden Elternarten hinweist (McKown und Guy 2018). Ein Hybrid kann auch einen Phänotyp aufweisen, der nur einer Elternart ähnelt, was auf eine genetische Dominanz des jeweiligen Elternteils hinweist (McKown und Guy 2018). Auch können Hybride ein Erscheinungsbild aufweisen, das über den normalen Bereich der Elternarten hinausgeht (McKown und Guy 2018). Relativ viele Hybridpappelarten weisen im direkten Vergleich zu den Elternarten eine Anzahl von intermediären und heterotischen Phänotypen auf (Gom und Rood 1999). Versuche von Zanewich (2018) haben beispielweise gezeigt, dass bei kühlen, bzw. suboptimalen Temperaturbedingungen (15 Grad Celsius) Hybridpappeln eine Heterosis in Bezug auf das Höhenwachstum, Blattmasse und Wurzelmasse gegenüber den Elternarten aufgewiesen haben (Zanewich et al. 2018). Bei höheren Temperaturen war das Höhenwachstum stärker und das der Hybridpappel wieder auf dem ähnlichen Niveau wie die der beiden Elternarten, wobei das Höhenwachstum sogar von einem Elternteil (*Populus angustifolia*) das der Hybridpappel übertraf (Zanewich et al. 2018). Die Netto- Assimilationsrate von  $CO_2$  war bei allen Temperaturbedingungen bei dem Elternteil *Populus angustifolia* am höchsten, wobei die Ergebnisse der Hybridpappel *Populus. x acuminata* und *Populus deltoides* ähnliche Tendenzen aufzeigten (Zanewich et al. 2018). Beim Stickstoffgehalt der Blätter lag die Hybridpappel zwischen den beiden Elternarten (Zanewich et al. 2018). Bei niedrigen Temperaturen wiesen die Hybridpappeln eine höhere Wassernutzungseffizienz im Vergleich zu den Elternarten auf, die Unterschiede waren jedoch geringfügig (Zanewich et al. 2018). Steigende Temperaturen ließ die Wassernutzungseffizienz sinken. Bei einer Temperatur ab 24 Grad Celsius konnte beobachtet werden, dass die Wassernutzungseffizienz der Hybridpappel zwischen dem der Elternarten lag. (Zanewich et al. 2018). Zudem konnte von Zanewich et al. festgestellt werden, dass

die Blattflächen der hybriden Pflanzen größer als die der Elternarten waren (Zanewich et al. 2018). Bei der Stomatadichte konnte unabhängig von der Temperatur bei den Hybriden eine negative Heterosis beobachtet werden (Zanewich et al. 2018).

Die stomatäre Leitfähigkeit der Hybridpappeln lag zwischen denen der beiden Elternarten (Zanewich et al. 2018). Die Untersuchungen von Zanewich zeigten auch, dass sich das Gesamtmuster der Wachstumsstärke der Hybriden bei allen Temperaturbegebenheiten nicht in der photosynthetischen Leistung wiedergespiegelt hat (Zanewich et al. 2018). Jedoch hat auch Zanewich in seiner Arbeit mit hervorgehoben, dass bei Untersuchungen dieser Art die Umweltbedingungen immer mit quantifiziert werden sollten (Zanewich et al. 2018).

Die Blattfläche, einzeln oder insgesamt, steht im engen Zusammenhang mit dem Baumwachstum und gilt als ein Prädiktor für das Wachstum (Ceulemans 1990; Dillen et al. 2009b). Bei amerikanischen Pappel- Hybriden wurde beispielweise festgestellt, dass die überlegene Größe der einzelnen Blätter darauf zurückzuführen ist, dass die Hybriden die größere Zellanzahl von *Populus deltoides* und die größere Zellgröße von *Populus trichocarpa* geerbt hatten (Ridge et al. 1986). Des Weiteren korrelierte das Stammvolumen mit der Gesamtblattfläche (Ridge et al. 1986). So hatten die Hybridpappeln, die die höchste Gesamtblattfläche aufgewiesen haben, im direkten Vergleich zu den Elternarten auch das höchste Stammvolumen (Ridge et al. 1986). Bei weiteren Versuchen wurden die Hybridpappelfamilien *Populus deltoides*; *Populus nigra* und *Populus deltoides* ; *Populus trichocarpa* an zwei verschiedenen Standorten in Bezug auf Wachstumsleistung miteinander verglichen (Dillen et al. 2009a) Dabei ist festgestellt worden, dass über alle Wachstumsperioden hinweg die Heterosis (definiert nach Li 1998) bei der *Populus deltoides*; *Populus trichocarpa*- Familie stets höher war als bei der *Populus deltoides*; *Populus nigra*- Familie (Dillen et al. 2009a). Insbesondere wiesen die *Populus deltoides*; *Populus trichocarpa*- Hybriden beim Stammumfang eine erheblich größere Heterosis auf als bei der Stammhöhe, während bei der *Populus deltoides*; *Populus nigra*- Hybriden die Unterschiede hier deutlich niedriger waren (Dillen et al. 2009a). Darüber hinaus war auch die Wachstumsperiode der *Populus deltoides*; *Populus trichocarpa*- Familie länger als bei der *Populus deltoides*; *Populus nigra*- Familie (Dillen et al. 2009a). Bei dieser Untersuchung ist vermutet worden, dass unter anderem auch hier die Standortbedingungen einen Einfluss auf die zeitliche Entwicklung der Heterosis der hybriden Pappeln haben kann (Dillen et al. 2009a). Die Ergebnisse zeigten, dass der Einfluss der



Standortbedingungen auf das Wachstum von der ersten zur zweiten Wachstumsperiode zugenommen hat (Dillen et al. 2009a). Auch hier stand bei den Hybridfamilien die Blattgröße im direkten Zusammenhang mit den erreichten Baumdimensionen (Dillen et al. 2009a)

Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass beispielweise *Populus x canadensis* die am besten an das europäische gemäßigte Klima angepasste Hybridpappel ist (Clifton-Brown et al. 2019). Versuche mit Hybriden aus *Populus deltoides* und *Populus nigra* in Nordamerika haben ebenfalls ein Potential für die Anpassungsfähigkeit von Hybridpappeln in verschiedenen Regionen gezeigt (Nelson et al. 2019). Studien, die zwei Jahrzehnte andauert haben, haben ergeben, dass einige bestimmte hybride Pappeln am Versuchsstandort eine Heterosis gegenüber den Elternarten aufgewiesen haben, wobei auch hier unter anderem Umwelteinflüsse vermutlich maßgeblich am Wachstumsfortschritt beteiligt waren (Rood et al. 2017).

### 3 Reaktionen von Pflanzen auf erhöhtes $CO_2$

Im folgenden Abschnitt werden die wichtigsten Erkenntnisse wissenschaftlicher Untersuchungen zum Thema Reaktionen von Pflanzen auf erhöhtes  $CO_2$  erläutert. Dabei entstammen alle aufgeführten Informationen zu diesem Themengebiet von wissenschaftlichen Publikationen und werden anhand einer Literaturübersicht zusammenfassend erläutert.

#### 3.1 Anstieg der atmosphärischen $CO_2$ - Konzentration und die Reaktionen von Pflanzen

Es wird angenommen, dass Kohlenstoffdioxid als Luftschadstoff hohe Auswirkungen auf das Wachstum von Pflanzen hat (Dickson et al. 1998).

Die atmosphärische  $CO_2$ - Konzentration vor der Industrialisierung um 1750 wird bei 278 ppm vermutet (IPCC 2014). Zum Zeitpunkt der ersten kontinuierlichen Messungen, die im Jahr 1958 auf Hawaii (Manua Loa) gestartet worden sind und bis heute weitergeführt werden, wurde ein Wert von ca. 315 ppm gemessen (Keeling et al. 1995). Seit dem Beginn von kontinuierlichen Messungen von atmosphärischem  $CO_2$  im Jahr 1958 ist ein stetiger Anstieg von  $CO_2$  in der Atmosphäre festgestellt worden (Abbildung 6) (Keeling 1998). Dabei hat sich über die Jahre der Anstieg beschleunigt (Hofmann et al. 2009). Vor 1970 betrug die Zunahme weniger als 1 Teil Pro Million pro Jahr ( $ppm\ yr^{-1}$ ), der jedoch Anfang der 2000er Jahre auf mehr als  $2\ ppm\ yr^{-1}$  angestiegen ist (Hofmann et al. 2009). Im Jahr 2011 wurde bereits ein Wert von 324.5 ppm ermittelt (IPCC 2014). Gerade in den letzten Jahren ist der Anteil an  $CO_2$  in der Atmosphäre nochmals stark angestiegen, wobei Anfang 2018 ein durchschnittlicher Wert von 407,05 ppm gemessen worden ist. Innerhalb eines Jahres ist der Wert nochmals um 2,87 ppm auf 409,92 ppm gestiegen (Standort Havaii, Manua Loa) (Global carbon dioxide growth in 2018 reached 4th highest on record | National Oceanic and Atmospheric Administration 2022).

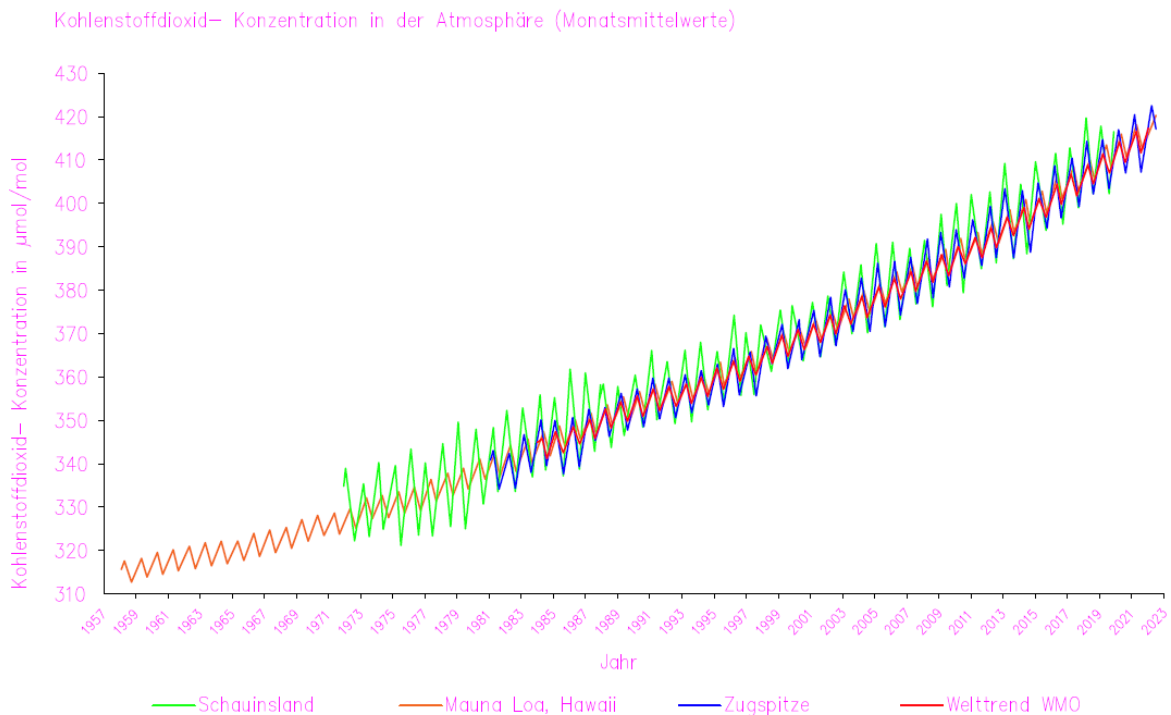


Abbildung 6: Anstieg der atmosphärischen Kohlenstoffdioxid- Konzentration nach Standorten in Anlehnung an (Umweltbundesamt 2023)

Durch eine weitere Nutzung von fossilen Brennstoffen gilt eine weitere Steigerung der  $CO_2$ - Konzentration in der Atmosphäre als sehr wahrscheinlich (Pachauri 2016). In den nächsten Jahrzehnten wird die zukünftige  $CO_2$ - Konzentration maßgeblich davon abhängig sein, in welchem Maße die Weltbevölkerung versucht, zusätzliche Treibhausgase zu vermeiden (Pachauri 2016). Prognosen deuten darauf hin, dass die  $CO_2$ - Konzentration im Jahr 2100 zwischen 450 und 950 ppm betragen wird (Pachauri 2016). In Abbildung 7 ist dargestellt, wie sich diese Konzentration in der Atmosphäre in den nächsten Jahrzehnten entwickeln kann. Dabei ist das repräsentative Konzentrationsszenario „RCP2.6“ ein Zukunftsszenario, bei dem die Bemühungen Emissionen zu verringern über den heute Stand hinaus gehen müssen (Pachauri 2016). „RCP8.5“ stellt ein Szenario mit sehr hohen THG- Emissionen dar (Pachauri 2016). Szenarien, ohne weitere Bemühungen in Zukunft die THG- Emissionen weltweit zu verringern, würden sich zwischen RCP8.5 und RCP6.0 befinden (Pachauri 2016).

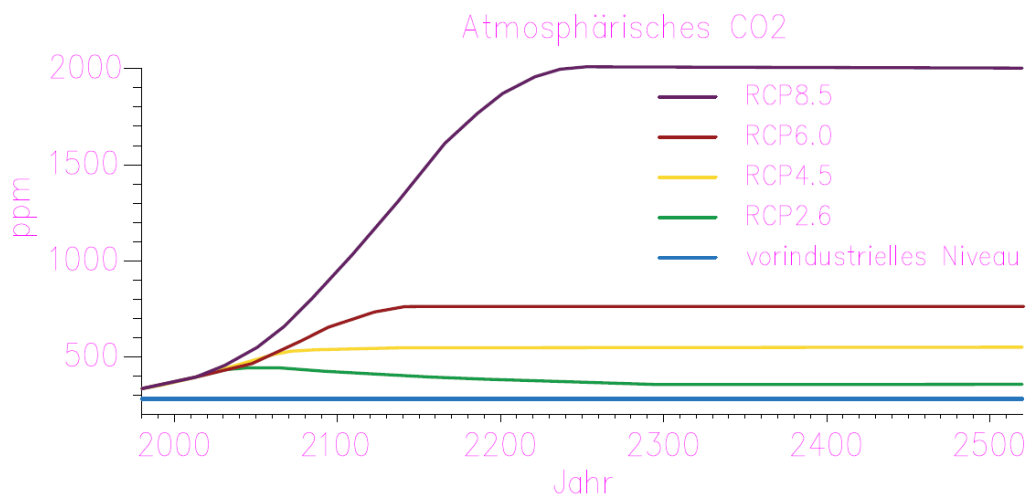


Abbildung 7: Szenarien für einen zukünftigen Kohlenstoffdioxid- Gehalt in der Atmosphäre Angelehnt an (Deutscher Wetterdienst 2016)

So wird der prognostizierte atmosphärische  $CO_2$ - Gehalt im Jahr 2050 etwa knapp unter 500 ppm liegen und kann im schlechtesten Fall bereits im Jahr 2100 bis auf 1000 ppm steigen. Diese Veränderung in der Atmosphäre hat natürlich unmittelbare Auswirkungen auf abiotische und biotische Prozesse von Nutzpflanzen (IPCC 2014). Zunächst sind Nutzpflanzen und deren Reaktion auf erhöhtes atmosphärisches  $CO_2$  untersucht worden, später folgten Untersuchungen an Bäumen und sogar in ganzen Ökosystemen in einer natürlichen Umgebung (Gielen und Ceulemans 2001). Bei den Untersuchungen ist festgestellt worden, dass erhöhtes atmosphärisches  $CO_2$  für die Pflanzen und Bäume wie ein Pflanzendünger wirken kann und nicht wie ein Schadstoff, wie es bei anderen Treibhausgasen vorkommen kann (Gielen und Ceulemans 2001). So wird bei einer anfänglichen erhöhten Konzentration von  $CO_2$  die Photosynthese stimuliert, was zu einem schnelleren Wachstum und höherer Produktion von Biomasse führen kann (Baker und Thomas 1992). An Hybridpappeln wurde bei Versuchen unter erhöhtem  $CO_2$  und  $O_3$  festgestellt, dass das  $CO_2$  die negativen Einflüsse des  $O_3$  sogar dämpfen kann (Gardner et al. 2005). Ob und wie lange der Effekt erhalten bleibt, hängt von den Wachstumsbedingungen und der Stickstoffversorgung, sowie von den Wechselwirkungen zwischen Wurzel- und Bodenprozessen ab (Norby et al. 1999). Bäume aus der Gattung *Populus* scheinen im Vergleich besonders positiv auf das erhöhte  $CO_2$  in der Atmosphäre zu reagieren (Ceulemans et al. 1995a; Ceulemans 1995; Gardner et al. 1995).

## 3.2 Erhöhtes $CO_2$ und Photosynthese

Erhöhtes atmosphärisches  $CO_2$  kann starke Auswirkungen auf die Photosynthese von Pflanzen haben, die natürlicherweise auf die  $CO_2$ -Konzentration der vorindustriellen Zeit eingestellt sind (Makino und Mae 1999). Im allgemeinen stimuliert eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration die Photosynthese und das Wachstum einer Pflanze, jedoch kann eine lang anhaltende hohe  $CO_2$ -Konzentration über Wochen bzw. Monate die Photosyntheserate nach einiger Zeit wieder verringern (Makino und Mae 1999; Ainsworth und Rogers 2007). Kurzzeitstudien haben gezeigt, dass eine erhöhte atmosphärische  $CO_2$ -Konzentration die Photosynthese von Laubbäumen bis zu 61 % steigern kann (Ceulemans R. & Mousseau M. 1994).

Beispielweise hat Ceulemans in offenen Kammern und in geschlossenen Gewächshäusern die Auswirkung vom erhöhtem  $CO_2$  auf zwei unterschiedliche Pappelhybriden (*Populus trichocarpa* x *Populus deltoides* und *Populus deltoides* x *Populus nigra*) untersucht (Ceulemans et al. 1997). Die Untersuchungen haben ergeben, dass die Reaktionen in den Gewächshauskammern und in den offenen Kammern ähnlich waren, wobei die Photosyntheserate aller Pflanzen, die unter erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, signifikant höher war als gegenüber den Pflanzen, die sich in Umgebungsbedingungen befunden haben (Ceulemans et al. 1997). Gleichzeitig waren wiederum die Photosyntheseraten der Pflanzen in der offenen begasten Kammer höher als in den geschlossenen Kammern (Ceulemans et al. 1997). Die Ergebnisse haben ebenfalls ergeben, dass bei schnell wachsenden Baumarten wie Pappeln keine Hinweise dokumentiert worden sind, dass unter vier- monatigem erhöhten  $CO_2$  keine Abwärtsklimatisierung der Photosynthese auftritt (Ceulemans et al. 1997). Weitere Untersuchungen unter offenen Kammerbedingungen haben ergeben, dass auch eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Umgebung der Pappelhybride *Populus euramericana* und *Populus trichocarpa* x *Populus deltoides* eine Stimulierung der Nettophotosyntheserate bewirkt (Ceulemans 1995).

Auch haben Untersuchungen an *Populus alba*, *Populus nigra* und *Populus euramericana* (*Populus* x *canadensis*) gezeigt, dass auch bei diesen Pappelarten eine Erhöhung der Blattphotosynthese unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration während der ersten Wachstumsperiode zu beobachten war, wobei die Untersuchungen unter Freilandbedingungen (FACE) stattgefunden haben (Bernacchi et al. 2003).

Bei der Hybridpappel *Populus x euramericana* war die Photosyntheserate unter erhöhtem  $CO_2$  ebenfalls höher, begann jedoch während der Wachstumsperiode früher zu sinken als bei Pflanzen, die den Umgebungsbedingungen ausgesetzt waren (Centritto et al. 2004)

Langzeitversuche an einer ganzen Pappelplantage, die sich über 6 Jahre erstreckten, haben zudem einen Hinweis darauf gegeben, dass die Photosyntheserate bei Pappeln unter erhöhtem  $CO_2$  sich nicht aklimatisiert (Liberloo et al. 2009). Bei den Versuchen, bei denen die Pappelarten *Populus alba*, *Populus nigra* und *Populus x euramericana* untersucht wurden, war die Photosyntheserate aller Pappelarten um durchschnittlich 31 % höher (Liberloo et al. 2009).

### 3.3 Erhöhtes $CO_2$ und Transpiration

Die Transpiration von Pflanzen wird als eine Schlüsselkomponente des terrestrischen Wasserkreislaufs gesehen (Kirschbaum und McMillan 2018). Die Transpirationsrate einer Pflanze ist von verschiedenen Umgebungsfaktoren, wie Lufttemperatur, Dampfdruckdefizit, und Nettostrahlung abhängig (Kirschbaum und McMillan 2018). Auch physiologische Faktoren wie Blattfläche des Kronendachs und besonders die stomatäre Leitfähigkeit beeinflussen die Transpiration einer Pflanze (Kirschbaum und McMillan 2018; Kirschbaum 2000).

Pflanzen reagieren bei erhöhter atmosphärischer  $CO_2$ -Konzentration in der Regel mit einer geringeren stomatären Leitfähigkeit und somit auch mit einer geringeren Transpirationsrate (Ainsworth und Rogers 2007; Kirschbaum 2000). Beispielsweise wurde bei Laubbäumen wie *Quercus robur* bei einer erhöhten atmosphärischen  $CO_2$ -Konzentration eine verringerte Blatt-Transpirationsrate beobachtet (Picon et al. 1996). Bei Untersuchungen mit *Fagus sylvatica* wurden ebenfalls geringere Transpirationsraten bei erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  während Gewächshausuntersuchungen beobachtet (Overdieck und Forstreuter 1994). Auch bei Versuchen (FACE) mit Hybridpappel-Klonen (*Populus x euamericana*), die unter erhöhter atmosphärischer  $CO_2$ -Konzentration ausgesetzt waren, war teilweise eine Abnahme der Transpirationsraten zu beobachten (Tognetti et al. 1999).

Nicht immer verringert sich aber die Transpirationsrate von Pflanzen unter erhöhtem  $CO_2$  (Amthor 1995).

Gaswechseluntersuchungen unter Feldbedingungen (FACE) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration haben beispielweise gezeigt, dass Hybridpappel-Klone (*Populus euramericana*) eine erhöhte Transpirationsrate unter diesen Bedingungen aufweisen können (Tricker et al. 2009).

Zudem haben Gewächshausversuche mit Hybridpappel-Klonen (*Populus trichocarpa x Populus deltoides*) ergeben, dass die Transpirationsraten der Pflanzen, die der erhöhtem  $CO_2$ -Konzentration ausgesetzt waren, sich fast verdoppelt haben (Johnson et al. 2002).

Ebenfalls haben Langzeitversuche, die sich über 5 Jahre erstreckten haben gezeigt, dass erhöhtes atmosphärisches  $CO_2$  die Transpiration von *Populus euramericana* steigen lassen kann (Tricker et al. 2005).

Versuche an Hybridpappeln (*Populus trichocarpa x Populus deltoides*), die unter erhöhten atmosphärischem  $CO_2$  untersucht worden sind, haben dagegen ergeben, dass bei einer weiter steigenden  $CO_2$ -Konzentration die Transpirationsrate bei reifen Blättern der Pappel immer weiter abnimmt (Miyazawa et al. 2006).

### **3.4 Erhöhtes $CO_2$ und stomatäre Leitfähigkeit**

Eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre kann bei Pflanzen die stomatäre Leitfähigkeit verringern (Ainsworth und Rogers 2007). Untersuchungen haben gezeigt, dass sich die stomatäre Leitfähigkeit typischerweise durch eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration verringert, jedoch ist dieser Effekt sehr variabel und ebenso abhängig von verschiedenen Umweltfaktoren (Ainsworth und Rogers 2007). Zahlreiche Untersuchungen haben gezeigt, dass durch eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration die stomatäre Reaktion sehr unterschiedlich ausfallen kann (Marchi et al. 2004; Amthor 1995) Bei vorausgegangenen (FACE) Untersuchungen, die miteinander verglichen worden sind, waren bei ca. 88,2 % der Versuche eine Abnahme und bei 11,8 % eine Zunahme der stomatären Leitfähigkeit beobachtet worden (Purcell et al. 2018). Die Analyse der verschiedenen Untersuchungen hat ergeben, dass die stomatäre Leitfähigkeit um ca. 19 % bei den Pflanzen gesunken ist (Purcell et al. 2018).

Zum Beispiel haben Langzeitversuche an *Populus euramericana*, die einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration ausgesetzt waren (FACE), gezeigt, dass bei den Bäumen die stomatäre Leitfähigkeit reduziert war (Tricker et al. 2005).

Dagegen haben Untersuchungen (pop FACE) an *Populus alba*, *Populus nigra* und *Populus x euramericana* gezeigt, dass eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration keinen Einfluss auf die stomatäre Leitfähigkeit der Pflanzen hatte (Bernacchi et al. 2003).

Die Untersuchungen von Radoglou et al. (1990) haben ergeben, dass bei den Pappel Klonen der Art *Populus trichocarpa* 'Columbia River', *Populus x canadensis* 'Robusta', *Populus generosa* 'Beaupre' und *Populus x interamericana* 'Raspalje' die stomatäre Leitfähigkeit unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration signifikant gesunken ist, wobei die Intensitäten je nach Pappelart verschieden war (Radoglou und Jarvis 1990). Auch bei den Gaswechselfersuchen (FACE) von Calfapietra et al. (2005) waren die stomatären Leitfähigkeiten der Pappeln *Populus x euramericana* unter erhöhter  $CO_2$  Konzentration deutlich reduziert (Calfapietra et al. 2005).

Ebenfalls haben Bosac et al. (1995) bei Gaswechselfersuchen mit Hybridpappeln (*Populus euramericana* 'Promo') eine Verminderung der stomatären Leitfähigkeit unter erhöhter  $CO_2$  Konzentration ermittelt (Bosac et al. 1995).

### 3.5 Erhöhtes $CO_2$ und Blatteigenschaften

Da das Blattwachstum im direktem Zusammenhang zur Gesamtproduktivität von Pappel- Bäumen steht, ist dafür ein Verständnis der Physiologie des Blattwachstums unter erhöhtem atmosphärischem  $CO_2$  erforderlich (Taylor et al. 2001). Bei schnellwachsenden Hybridpappeln ist die Stammholzproduktion eng mit dem Blattwachstum gekoppelt (Ridge et al. 1986). So korrelierte bei Feld- und Laborexperimenten die individuelle Blattfläche und die Blattwachstumsrate mit dem Stammvolumen (Ridge et al. 1986). Dabei hatten die Hybridpappeln im Vergleich zu den Elternarten größere Blätter (Ridge et al. 1986). Als ein Grund für die größere Blattgröße der Hybridpappeln wurde die Vererbung von der größeren Zellzahl von *Populus deltoides* in Kombination zur größeren Zellgröße von *Populus trichocarpa* vermutet (Ridge et al. 1986). Ebenso wurde bei Untersuchungen nachgewiesen, dass bei Pappelhybriden eine positive Korrelation zwischen der Biomasseproduktivität und der photosynthetischen Kapazität besteht (Ceulemans et al. 1987). Ebenfalls wurde eine positive Korrelation zwischen Biomasse und Photosyntheserate bei Pappelklonen in erstem Wachstumsjahr festgestellt, wobei 4 von 5 Pappelklonen diese positive Korrelation aufgewiesen haben. Dabei stellt *Populus x canadensis* 'robusta' mit einer



hohen Photosyntheserate und gleichzeitig einer niedrigen Biomasseproduktion eine Ausnahme dar (Barigah et al. 1994). Die Ergebnisse haben auch gezeigt, dass eine hohe Gesamt- Blattfläche pro Baum zu einer höheren Gesamt-Biomasse pro Baum führen kann (Barigah et al. 1994). In der Literatur sind aber nicht nur positive Korrelationen zwischen Photosyntheseleistung und Wachstumsrate bzw. Produktivität dokumentiert (Barigah et al. 1994).

Ob positive Effekte bei Pappeln bzw. Hybridpappeln auch unter erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  bestehen bleiben, wurde in weiteren Experimenten untersucht. Beispielweise hat Radoglu die Pappelklone „Beaupre“, „Robusta“ und „Raspalje“ und deren Wachstumsverhalten unter Umgebungsbedingungen ( $350 \mu mol mol^{-1}$ ) und unter erhöhtem  $CO_2$  ( $700 \mu mol mol^{-1}$ ) untersucht (Radoglou und Jarvis 1990). Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Stecklinge unter erhöhtem  $CO_2$  signifikant größere Gesamt- Blattfläche aufgewiesen haben als unter Umgebungsbedingungen (Radoglou und Jarvis 1990). Auch die Gesamtbiomasse war am Ende der Wachstumsperiode bei den Pflanzen höher, die unter erhöhtem  $CO_2$  gewachsen sind. Radoglu betont, dass die Unterschiede noch größer gewesen wären, wenn die Ernte früher erfolgt wäre, da die Auswirkungen von atmosphärischem  $CO_2$  nach 61 Tagen höher war als nach erst 90 Tagen als die Ernte erfolgte (Radoglou und Jarvis 1990). Die Ergebnisse zeigen, dass auch hier eine erhöhte Gesamt- Blattfläche ein Grund für höhere Biomasseerträge am Ende der Wachstumsperiode sein kann, wobei die endgültige Größe der einzelnen Blätter beider Gruppen hier ähnlich war (Radoglou und Jarvis 1990). Gardner und Taylor konnten bei Versuchen unter erhöhtem  $CO_2$  bei Hybridpappelklonen (*Populus 'unal'*, *Populus 'boelare'*, *Populus 'beaupre'* und *Populus 'primo'*) eine erhöhte Blattausdehnung bei den Pflanzen, sowie eine höhere Gesamt-Blattfläche feststellen (Gardner et al. 1995). Des weiteren berichtet Taylor, dass in einer unveröffentlichten Studie von Gardner die Wirkung von erhöhtem  $CO_2$  auf die endgültige Blattgröße von zwei Hybridpappeln, je nach Klon, unterschiedlich ausgefallen ist (Taylor et al. 1994). So nahm bei einem Hybrid- Klon die Blatt-Expansion zunächst schnell zu und nahm bei zunehmenden Alter wieder ab, wodurch die Endgröße der Blätter am Ende ähnlich war (Taylor et al. 1994). Bei den Untersuchungen von Bosac wurde eine etwas höhere Gesamt-Blattfläche bei *Populus euramericana* unter erhöhtem  $CO_2$  festgestellt, wobei die Unterschiede hier nicht signifikant waren (Bosac et al. 1995). Unter erhöhtem  $CO_2$  war hier die spezifische

Blattfläche der Hybridpappel bei 4 von 5 Fällen unter erhöhtem  $CO_2$  sogar signifikant geringer, was laut Bosac auf eine höhere Blattdicke und Gewicht hindeuten kann (Bosac et al. 1995).

Im Jahr 1987 konnte Woodward mit seinen Versuchen nachweisen, dass die Anzahl der Stomata empfindlich auf erhöhtes atmosphärisches  $CO_2$  reagieren kann (Taylor et al. 1994). So haben beispielweise Gaudillere und Mousseau (1989) bei *Populus euramericana* feststellen können, dass es unter erhöhtem  $CO_2$  signifikante Unterschiede bei der Stomatadichte gibt, wobei unter erhöhtem  $CO_2$  die Stomatadichte höher war (Gaudillere und Mousseau 1989). Bei Versuchen mit *Populus interamericana* und *Populus 'robusta'* wurde bei erhöhtem  $CO_2$  ( $700 \mu l l^{-1}$ ) ebenfalls ein Einfluss durch die  $CO_2$ -Begasung festgestellt (Ceulemans et al. 1995b). So war in den unteren und mittleren Ebenen der Pflanzen, wo meist reife und voll ausgewachsene Blätter vorkommen, keine Reduzierung der Stomatadichte durch  $CO_2$  festzustellen, wobei in den oberen Ebenen der Pflanzen, wo besonders junge und sich im Wachstum befindliche Blätter vorkommen, die Stomatadichte reduziert war (Ceulemans et al. 1995b). Bei FACE Experimenten ( $CO_2$ -Anreicherung unter freier Luft), die 5 Jahre lang andauerten, sind wechselhafte Ergebnisse ermittelt worden (Tricker et al. 2005). So waren bei den *Populus euramericana*-Klonen die Stomatadichte in den ersten zwei Jahren unter erhöhtem atmosphärischem  $CO_2$  geringer und in den Folgejahren, wo sich das Kronendach am Standort geschlossen hatte, gab es keine signifikanten Unterschiede mehr (Tricker et al. 2005).

Auch hat Radoglou bei Versuchen mit vier unterschiedlichen Pappelklonen keinen Einfluss von atmosphärischem  $CO_2$  auf die Stomatadichte bei den Blättern feststellen können, und somit vermutet, dass eine hohe  $CO_2$  Konzentration in der Luft die Stomatadichte nicht verringert (Radoglou und Jarvis 1990).

### **3.6 Erhöhtes $CO_2$ und Stomata-Größe**

Eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration kann auch einen Einfluss auf die Stomatagröße von Pflanzen haben. So kann sich durch eine erhöhte atmosphärische  $CO_2$ -Konzentration die Spaltöffnungsgröße verringern und bei einer niedrigen  $CO_2$ -Konzentration wiederum eine Vergrößerung der Stomata hervorgerufen werden (Doheny-Adams et al. 2012). Andere Untersuchungen haben gezeigt, dass erdgeschichtliche Perioden,

geprägt durch niedriges atmosphärisches  $CO_2$ , zu einer hohen Stomatadichte, bei gleichzeitig kleinen Spaltöffnungsgrößen geführt haben (Franks und Beerling 2009b). Dagegen waren in Perioden mit hohem atmosphärischem  $CO_2$  die Spaltöffnungen größer, die Stomatadichte aber jedoch geringer (Franks und Beerling 2009b). Die Untersuchungen könnten darauf hindeuten, dass Pflanzen auf eine längerfristige Änderung der  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre reagieren können, indem sie die physikalischen Eigenschaften der Spaltöffnungen verändern, um eine maximale stomatare Leitfähigkeit für Wasserdampf und  $CO_2$  zu gewährleisten (Franks und Beerling 2009a).

Neben der Stomatadichte wurde in der Vergangenheit teilweise parallel auch die Stomatagröße gemessen. Beispielweise konnte Radoglou (1990) bei den durchgeführten Messungen keinen Einfluss von erhöhtem atmosphärischem  $CO_2$  auf die Stomatagröße feststellen (Radoglou und Jarvis 1990). Auch konnte Ceulemans (1995) keine signifikanten Unterschiede der Stomatalängen bei Pappeln feststellen, die unter erhöhtem  $CO_2$  gewachsen sind (Ceulemans et al. 1995b).

Bei anderen Pflanzenarten wurden keine eindeutigen Trends bezüglich einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration und der Stomatalänge ermittelt. Beispielsweise haben Ogaya et al. 2011 festgestellt, dass eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration bei den Versuchen nur bei zwei von fünf Pflanzenarten einen signifikanten Einfluss hatte (Ogaya et al. 2011). Dabei war bei *Nothofagus cunninghamii* eine signifikante Zunahme der Stomatalänge beobachtet worden wobei bei *Taxodium distichum* wiederum eine signifikante Abnahme der Stomatalänge gemessen worden ist (Ogaya et al. 2011). Bei *Araucaria araucana*, *Metasequoia glyptostroboides* und *Sequoia sempervirens* wurden dagegen keine signifikanten Effekte durch eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration ermittelt (Ogaya et al. 2011).

Wagner et al. 1996 hat dagegen bei Langzeituntersuchungen festgestellt, dass bei *Betula pendula* die Porengröße bei zunehmender  $CO_2$ -Konzentration zugenommen hat und die Stomatadichte wiederum gesunken ist (Wagner et al. 1996).

Auch die Anzahl an Spaltöffnungen kann sich positiv auf die Biomasseproduktion auswirken (Orlovic 1993). So hat Orlovic bei Versuchen an einjährigen Pappelklonen festgestellt, dass die Anzahl der Spaltöffnungen positiv mit der Biomasseproduktion korreliert (Orlovic 1993). Die Anzahl der Spaltöffnungen und die Blattfläche kann jedoch auch standortabhängig sein (Orlovic et al. 1997). Somit ist die Blattfläche ein

weiterer relevanter Parameter, der auf die Menge der absorbierten Energie und somit direkt mit der Biomasseproduktion in Verbindung steht (Orlovic et al. 1997).

### 3.7 Erhöhtes $CO_2$ und Biomasse

Eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre kann Auswirkungen auf die Biomasseproduktion der Pflanze haben (Norby et al. 1999; Curtis und Wang 1998). Beispielsweise kann die Gesamtbiomasse bei Pflanzen, die unter erhöhtem atmosphärischem  $CO_2$  wachsen, unabhängig von Wachstumsbedingungen signifikant zunehmen (Curtis und Wang 1998).

Unter erhöhtem atmosphärischem  $CO_2$  können schnellwachsende Baumarten wie Pappeln profitieren und ihre Biomasse bis zu 22-90 % steigern, wobei hier Umweltbedingungen diesen Vorteil wieder kompensieren können (Gielen und Ceulemans 2001). So haben beispielsweise die Ergebnisse von Calfapietra (2003) gezeigt, dass die Biomasse von *Populus alba*, *Populus nigra* und *Populus x euramericana* unter erhöhtem atmosphärischem  $CO_2$  um 15 bis 27 % zugenommen hat, wobei die Anreicherung des  $CO_2$  500 ppm betrug und die Begasung unter Freilandbedingungen (FACE) durchgeführt worden ist (Calfapietra et al. 2003). *Populus deltoides*-Setzlinge, die 100 Tage in Gewächshäusern unter erhöhtem  $CO_2$  (550 ppm) ausgesetzt waren, zeigten dagegen keine Beeinflussung des erhöhten  $CO_2$  in Bezug auf die Biomasse und Wachstumsraten (Wait et al. 1999). Beim Hybridpappelklon 'primo' (*Populus deltoides* x *Populus nigra*) ist unter erhöhtem  $CO_2$  die Stammhöhe um 13 %, die Gesamtbiomasse um 38 % und die holzige Stammmasse um 31 % gestiegen (Bosac et al. 1995). Ebenso zeigten die beiden Pappel-Hybriden *Populus 'beaupre'* (*Populus trichocarpa* x *Populus deltoides*) und *Populus 'robusta'* (*Populus deltoides* x *Populus nigra*) eine Zunahme des Stammvolumens und eine erhöhte oberirdische Biomasseproduktion (Ceulemans et al. 1996).

Pappelarten zeigen im Allgemeinen eine Zunahme der endgültigen Biomasse unter erhöhtem  $CO_2$  nach wenigen Wochen, sowie auch nach bis zu drei Wachstumsperioden (Gielen und Ceulemans 2001). So wurde beispielsweise in der Vergangenheit nachgewiesen, dass unter angereicherten  $CO_2$  in der Atmosphäre, in

Verbindung mit fruchtbaren Böden, die Ernteintervalle von *Populus tremuloides*-Plantagen verkürzt werden konnten. (Curtis et al. 2000).

Wie von Norby (Norby et al. 2004) erwähnt, ist auch die unterirdische Biomasse einer Pflanze in Form von Feinwurzeln, deren Durchmesser in der Regel ca. 1 mm betragen, ein signifikanter Regulator des biogeochemischen Kreislaufs und von hoher Bedeutung (Pregitzer et al. 2002). Deren Umsatz ist eine wesentliche Komponente für die C- Bindung im Boden (Matamala et al. 2003).

Eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration in der Atmosphäre kann die Ausprägung von Wurzeln erhöhen, wodurch die Pflanze über eine verbesserte Wasser- und Nährstoffaufnahme verfügt. (Rogers et al. 1994). Beispielweise haben die Untersuchungen von Norby et al. ergeben, dass eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration die Feinwurzelausbildungen von *Liriodendron tulipifera* L.- Setzlingen signifikant erhöhen kann (Norby et al. 1992). Ebenfalls von Norby durchgeführte Langzeituntersuchungen haben gezeigt, dass eine Anreicherung der  $CO_2$ - Konzentration in der Atmosphäre dazu führen kann, dass sich bei *Liquidambar styraciflua* L. die Produktion von Feinwurzeln verdoppeln kann (Norby et al. 2004).

Auch die FACE- Versuche von Calfapietra et al. (2003) haben gezeigt, dass eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration die Wurzelmasse von *Populus nigra*, *Populus alba* und *Populus x euramericana* um 22-38 % steigern kann (Calfapietra et al. 2003).

Eine von King et al. (2001) durchgeführte Untersuchung hat ergeben, dass bei Aspen die Produktion von Feinwurzeln unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration um 113 % zugenommen hat (King et al. 2001).

Auch die Untersuchungen von Lucal et al. haben ergeben, dass eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration bei den Pappelarten *Populus alba*, *Populus nigra* und *Populus euramericana* die stehende Wurzelmasse (47-76%) und die Feinwurzelmasse (35-87%) hat stark zunehmen lassen (Lukac et al. 2003).

Dagegen haben die Untersuchungen (offene Kammern) von Brown et al. 2007 gezeigt, dass eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration die Feinwurzel-Biomasse bei Buscheichen-Beständen nicht erhöht (Brown et al. 2007). Bei diesen Langzeituntersuchungen hat sich gezeigt, dass eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration in der Atmosphäre den Hauptbestandteil des Wurzelsystems also Wurzeln mit der Größe (<0,25 mm) verringert (Brown et al. 2007).

Auch die Versuche (FACE) von Handa et al. 2008, die an *Vaccinium myrtillus*, V.

*uliginosum*, *Empetrum hermaphroditum*, *Larix decidua* und *Pinus uncinata* durchgeführt worden sind, zeigten keine signifikante Reaktion des erhöhten  $CO_2$  auf das Wurzelwachstum der untersuchten Individuen (Handa et al. 2008).

Ebenso haben Versuche an reifen Laubbaum-Beständen gezeigt, dass eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration keinen Einfluss auf die Feinwurzel-Bildung der Bäume hat (Bader et al. 2009). Tendenziell ist sogar dessen Bildung unterdrückt worden (Bader et al. 2009).

### 3.8 Erhöhtes $CO_2$ und Pflanzenhöhe

Untersuchungen bezüglich einer Einflussnahme der Pflanzenhöhe durch erhöhtes atmosphärisches  $CO_2$  haben bei vorausgegangenen Untersuchungen verschiedene Ergebnisse erbracht.

Beispielsweise haben Lou et al (2004) bei Gaswechselfersuchen (FACE) festgestellt, dass eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration die Pflanzenhöhen von *Populus x euramericana* und *Populus nigra* steigen lassen kann, jedoch bei *Populus alba* wiederum die Pflanzenhöhe unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration sinken kann (Luo et al. 2005).

Auch haben die Messungen unter erhöhtem  $CO_2$  von Radoglou und Jarvis ergeben, dass die Stecklinge (*Populus trichocarpa* „Columbia River“, *Populus interamericana* „Beaupre“, *Populus x canadensis* „Robusta“ und *Populus generosa* „Raspalje“) größere Pflanzenhöhen aufgewiesen haben (Radoglou und Jarvis 1990).

Ceulemans et al. haben bei Gaswechselfersuchen ebenfalls festgestellt, dass unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration die Pflanzenhöhe der Pappel-Klone „Robusta“ und *Populus* „Beaupre“ steigen kann (Ceulemans et al. 1995a; Ceulemans et al. 1996).

Auch hat Isebrand et al (2001) festgestellt, dass unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration die Pflanzenhöhe von *Populus tremuloides* Klonen zunimmt (Isebrand et al. 2001).

Bei Analysen von Brown et al hat an *Populus tremuloides*-Sämlingen unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration und verschiedenen N-Konzentrationen die Höhe der Pflanzen zugenommen, jedoch hat der Effekt teilweise nicht angehalten (Brown und Higginbotham 1986).

### 3.9 Erhöhtes $CO_2$ und radialer Zuwachs

Vorausgegangene Untersuchungen haben ergeben, dass eine erhöhte  $CO_2$  Konzentration einen Einfluss auf den Stammdurchmesser von Pflanzen, unter anderem auch bei Pappeln, haben kann.

So haben Neill et al. (1986) bereits festgestellt, dass bei *Liriodendron tulipifera* L- Individuen eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration den Stammdurchmesser um 19,8 % steigern kann (O'Neill et al. 1987). Ebenfalls wurde bei Begasungsversuchen mit erhöhtem  $CO_2$  festgestellt, dass erhöhtes  $CO_2$  einen signifikanten Einfluss auf den Stammdurchmesser von *Pinus tadea* L haben kann (Larigauderie et al. 1994). Auch bei *Picea rubens* Sarg- Individuen konnte ein stärkerer Stammdurchmesser unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration festgestellt werden (Samuelson und Seiler 1993). Ein ähnlicher Effekt also Steigerung des Stammdurchmessers unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration, ist auch bei *Betula pendula*- Setzlingen festgestellt worden (Mortensen 1994).

Bezugnehmend auf Pappelarten haben beispielweise Bosac et al. 1995 festgestellt, dass bei einer erhöhten  $CO_2$ - Konzentration der Stammdurchmesser von Hybridpappel- Klonen (*Populus euramericana*) signifikant zugenommen hat (Bosac et al. 1995). Ceulemans et al haben 1995 ebenfalls bei zwei Hybridpappel- Klonen eine Steigerung des Stammdurchmessers unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration feststellen können (Ceulemans et al. 1996).

Isebrands et al. (2001) hat festgestellt, dass durch eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration der Stammdurchmesser von *Populus tremuloides* Klonen zunehmen kann (Isebrand et al. 2001). Unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration haben sowohl die Hybridpappel- Klone (*Populus x euramericana*) als auch Pappel- Klone (*Populus deltoides*) positiv und somit mit einer Zunahme des Stammdurchmessers reagiert (Tognetti et al. 1999).

### 3.10 Erhöhtes $CO_2$ und holzanatomische Eigenschaften

Die anatomischen Eigenschaften eines Baumes stehen im direkten Zusammenhang mit der Holzqualität und der anschließenden Nutzung des Holzes (Lotfiomran et al. 2015). Untersuchungen haben gezeigt, dass eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration unterschiedliche Reaktionen der Pflanzen auf die anatomischen Eigenschaften und

die Holzqualität hervorrufen kann (Lotfiomran et al. 2015). Beispielweise hat eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre (700 ppm) keinen signifikanten Einfluss auf die Gefäßgröße oder Anzahl von Gefäßen pro Stamm bei *Prunus*-Pflanzen, wobei bei den gleichen Untersuchungen mit *Quercus*-Pflanzen eine signifikante Vergrößerung der Gefäße und eine höhere Gefäßanzahl ermittelt worden ist (Atkinson und Taylor 1996). Die Untersuchungen von Watanabe (2008) haben dagegen ergeben, dass *Quercus*-Pflanzen unter erhöhtem  $CO_2$ , unabhängig von der Stickstoffbehandlung, keine Reaktion bezüglich der anatomischen Eigenschaften gezeigt haben (Watanabe et al. 2008). Bei den Untersuchungen wurde zeitgleich festgestellt, dass Erlen auf das erhöhte  $CO_2$  reagiert haben, wobei die Gesamtgefäßfläche und der Gefäßanteil der Pflanzen unter erhöhtem  $CO_2$  und unter hoher N-Behandlung zugenommen hat (Watanabe et al. 2008). Auch bei Untersuchungen mit *Quercus suber* L (Korkeiche) gab es keine signifikanten Unterschiede bei der Entwicklung der Holzanatomie der Pflanzen, die unter erhöhtem  $CO_2$  gewachsen sind (Vaz et al. 2012).

Bei Buchen, die unter erhöhtem  $CO_2$  (770 ppm und 950 ppm) aufgezogen wurden, konnten signifikante Unterschiede bei der Ringbreite, der Gesamtfläche des Gefäßlumens und zum Teil bei der Gefäßdichte (nur in einem Versuchsjahr) festgestellt werden (Lotfiomran et al. 2015). Bei den Versuchen wurden ebenfalls die anatomischen Eigenschaften an *Populus x canescens* untersucht, wobei hier das erhöhte  $CO_2$  bei der Ringbreite keine signifikanten Einflüsse gehabt hat (Lotfiomran et al. 2015). Dagegen konnte eine signifikant höhere Gesamtfläche des Gefäßvolumens in beiden Versuchsjahren ermittelt werden (Lotfiomran et al. 2015). Bei der Gefäßdichte der Hybridpappeln konnten ebenso wie bei der Ringbreite keine signifikanten Unterschiede zwischen  $CO_2$ -Behandlung und normalen Bedingungen ermittelt werden (Lotfiomran et al. 2015). Bei Untersuchungen von Luo (2004) haben unter Freilandbedingungen (FACE) bei erhöhtem  $CO_2$  *Populus nigra* und *Populus x euramericana* signifikant höhere Gefäßdurchmesser entwickelt, wobei bei *Populus alba* keine Auswirkungen beobachtet wurden (2005). Die Untersuchungen von Kaakinen (2004) haben dagegen gezeigt, dass sich bei *Populus tremuloides* allein unter erhöhtem  $CO_2$  (Freilandbedingungen) keine signifikanten Auswirkungen auf die Struktur des gebildeten Holzes ergeben haben, wobei die Durchmesser der Gefäße tendenziell unter erhöhtem  $CO_2$  zugenommen haben (Kaakinen et al. 2004).



### 3.11 Erhöhtes $CO_2$ und Stickstoff- Gehalt

Eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration in der Atmosphäre kann die mengenmäßigen Anteile von chemischen Elementen im Blatt- und Pflanzengewebe stark beeinflussen (Poorter et al. 1997; Loladze 2002). Zahlreiche Untersuchungen haben ergeben, dass eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration den Stickstoffgehalt einer Pflanze verringern kann (Taub und Wang 2008). Diesbezüglich sind in der Vergangenheit einige Hypothesen aufgestellt worden, um die Reaktion der Pflanzen erklären zu können. Taub und Wang (2008) stellten diese Hypothesen in Ihrer Veröffentlichung gegenüber (Taub und Wang 2008). Unter anderem wurden Hypothesen wie „Dilution by carbohydrates“ (Gifford et al. 2000; Kuehny et al. 1991), „Delution by secondary compounds“ (Gifford et al. 2000), „Decreased N uptake due to decreased transpiration“ (van Vuuren et al. 1997; Del Pozo et al. 2007) als mögliche Gründe für einen Rückgang des Stickstoffgehalts diskutiert (Taub und Wang 2008).

Eine von Cotrufo durchgeführte Datenanalyse von verschiedenen Untersuchungen, die sich mit dem Stickstoffgehalt von Pflanzen unter erhöhtem atmosphärischem  $CO_2$  beschäftigt haben, hat ergeben, dass unabhängig von Pflanzenarten oder Versuchssystemen die Auswirkung von erhöhtem  $CO_2$  auf den Stickstoffgehalt relativ konsistent waren, wobei die N- Konzentration im Pflanzengewebe signifikant gesunken ist. (Cotrufo et al. 1998).

Das hat ergeben, dass bei erhöhtem  $CO_2$  der Stickstoffgehalt in den Pflanzen durchschnittlich um bis zu 14 % sinken kann (Cotrufo et al. 1998). Dabei zeigte sich, dass die N- Konzentration in der oberirdischen Biomasse stärker abgenommen hat (-14%) als beim unterirdischen Material (-9%) (Cotrufo et al. 1998). So kann auch ein starker Rückgang der Stickstoffkonzentration einen signifikanten Anstieg des C/N- und Lignin/N- Verhältnisses bewirken, wie am Beispiel von Buchenzweigen nachgewiesen wurde (Cotrufo und Ineson 2000).

Pflanzen der Gattung *Populus* können unterschiedliche Reaktionen auf den Stickstoffgehalt in der Biomasse unter erhöhtem  $CO_2$  aufweisen. Beispielsweise konnten bei Untersuchungen mit *Populus grandidentata*, die in offenen Kammern unter erhöhtem  $CO_2$  gewachsen sind, keine Reaktionen von veränderten N- Konzentrationen in den Blättern ermittelt werden (Curtis und Teeri 1992).

Untersuchungen von Curtis (1995) haben ergeben, dass die Stickstoffkonzentration in den Blättern von *Populus euramericana* unter erhöhtem atmosphärischem  $CO_2$  gesunken sind, unabhängig von der Bodenfruchtbarkeit, wobei in der Mitte der Wachstumsperiode die N- Konzentration unter erhöhtem  $CO_2$  und gedüngtem Boden größer war (Curtis et al. 1995). Auch haben Blätter von *Populus tremuloides* bei Versuchen unter erhöhtem  $CO_2$  eine um 24% niedrigere Stickstoffkonzentration aufgewiesen als Pflanzen, die unter natürlichen Bedingungen gewachsen sind (Lindroth et al. 1993). Diese Tendenzen konnten bei den Versuchen von Roth und Lindroth (1995) ebenfalls mit *Populus tremuloides* bestätigt werden (Roth und Lindroth 1995). Dagegen war der durch erhöhtes  $CO_2$  induzierte Anstieg des C/N- Verhältnisses des gesamten Baumes bei *Populus euramericana* vernachlässigbar, und die Verringerung der Stickstoffkonzentration nicht signifikant (Pregitzer et al. 1995).

### **3.12 Erhöhtes $CO_2$ und der Gehalt von Lignin und Kohlenhydraten im Holz**

In verholzten Pflanzen stellen Zellulose und Lignine als Strukturbestandteile wichtige Senken für reduzierten Kohlenstoff dar (Blaschke et al. 2002).

Erhöhtes atmosphärisches  $CO_2$  kann einen Einfluss auf die Mengenanteile von Lignin und Kohlenhydraten im Holz einer Pflanze haben. Beispielsweise können verringerte Konzentrationen von Lignin unter erhöhtem  $CO_2$  bei Buchenzweigen vorkommen, wobei die Lignin-Konzentration um 12% geringer war als bei Pflanzen, die natürlichen Umgebungsbedingungen ausgesetzt waren (Cotrufo und Ineson 2000).

Auch haben Untersuchungen an Weißbirken gezeigt, dass erhöhtes  $CO_2$  eine Verringerung des gravimetrischen Lignin und der Zellulose im Holz bewirken kann (Kostiainen et al. 2006). In den gleichen Versuchen wurde dagegen eine Konzentrationssteigerung der Extraktstoffe und Stärke beobachtet (Kostiainen et al. 2006).

Bei Pflanzen der Gattung *Populus* kann erhöhtes atmosphärisches  $CO_2$  ebenfalls einen Einfluss auf Mengenanteile von Lignin und Kohlenhydraten im Holz einer Pflanze haben (Luo und Polle 2009). Bei Untersuchungen an Espen- Klonen, die erhöhtem atmosphärischem  $CO_2$  ausgesetzt waren (FACE), sind keine Behandlungseinflüsse bezüglich der Mengenanteile von wie zum Beispiel gravimetrisches Lignin und Alpha-

Zellulose beobachtet worden (Kostiainen et al. 2008). Andere Untersuchungen unter Freilandbedingungen (FACE) haben dagegen gezeigt, dass erhöhtes atmosphärisches  $CO_2$  die Konzentration von Stärke und löslichen Zuckern erhöhen, und auch die Alpha Zellulose Konzentration variieren kann (Kaakinen et al. 2004). Jedoch konnten auch unterschiedliche Effekte zwischen erhöhtem atmosphärischem  $CO_2$  und den Anteilen von Lignin und Kohlenhydraten im Holz von Pappeln beobachtet werden, wie zum Beispiel bei Espen, die bezüglich der Konzentration von löslichen Zuckern und Aceton- löslichen Extraktstoffen sowohl erhöhte als auch niedrigere Konzentrationen aufgewiesen haben (Kostiainen et al. 2008). Bei Versuchen mit *Populus tremula x alba* hat eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration in der Atmosphäre den Ligningehalt im Holzgewebe erhöht (Richet et al. 2012). Auch Versuche an *Populus euramericana* mit einer Kombination von N- Düngung und erhöhtem atmosphärischem  $CO_2$  ergaben erhöhte Ligningehälter (Luo und Polle 2009).

## 4 Material und Methoden

### 4.1 Material

#### 4.1.1 Pflanzenmaterial

Für die Versuche im Gewächshaus wurden sechs verschiedene Arten von Pappeln ausgewählt, die in zwei Gruppen eingeteilt worden sind.

Gruppe eins bestand aus einjährigen Pflanzen, die von einer Baumschule bezogen wurden. Bei dieser Gruppe handelte es sich um die Pappelarten *Populus tremula* (Zitterpappel), *Populus alba* (Silber-Pappel), sowie um den natürlichen Hybrid aus den beiden genannten Arten *Populus x canescens* (Graupappel)

Bei der zweiten Gruppe handelte es sich um aufgezogene Stecklinge der Arten *Populus deltoides* (kanadische Schwarzpappel), *Populus nigra* (Schwarzpappel), sowie um den Hybrid *Populus x canadensis* (Bastard- Schwarzpappel). Die Stecklinge der Art *Populus deltoides* und *Populus nigra* stammen aus dem Bestand des Aboretum des Thünen Institut für Holzforschung. Die Stecklinge der Art *Populus x canadensis* stammen hingegen von der bayrischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft.

Alle Pflanzen beider Gruppen wurden im Februar 2018 in 10 bzw. 8 Liter Kübel eingetopft und für die Gaswechselfersuche vorbereitet und aufgezogen.

Vor dem Start der Gaswechselfersuche stand insgesamt ein Pflanzenbestand von 176 Individuen zur Verfügung (Tabelle 1).

Gaswechselfmessungen 2018		
Einjährige Pflanzen		
Pappelart	Umgebung nach CO <sub>2</sub> Gehalt	Anzahl der Pflanzen
<i>Populus x canescens</i>	400 ppm	16
	950 ppm	16
<i>Populus tremula</i>	400 ppm	14
	950 ppm	14
<i>Populus alba</i>	400 ppm	14
	950 ppm	14
Stecklinge		
<i>Populus x canadensis</i>	400 ppm	12
	950 ppm	12
<i>Populus nigra</i>	400 ppm	12
	950 ppm	12
<i>Populus deltoides</i>	400 ppm	20
	950 ppm	20

Tabelle 1: Pflanzenbestand für Gaswechselfversuche

Als Substrat ist die Einheitserde Classic der Firma Hermann Meyer KG eingesetzt worden. Die vom Hersteller angegebenen Inhaltsstoffe sind in Tabelle 2 aufgeführt:

Substrateigenschaften							
Topferde CL.T	pH	Kaliumchlorid (g/L)	Stickstoff (mg/L)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg/L)	Kaliumoxid (mg/L)	Schwefel (mg/L)	Magnesium (mg/L)
	5,8	2,5	340	380	450	130	160

Tabelle 2: Substrateigenschaften für die Versuchspflanzen

#### 4.1.2 Gewächshaus

Die Gewächshausversuche fanden im Jahr 2018 im Gewächshaus des Thünen Instituts für Holzforschung statt (Adresse: Leuschnerstraße 91 21031 Hamburg, Deutschland). Die Messungen sind in den Kammern 5 und 6 durchgeführt worden. In Kammer 5 wurde mit der vorhandenen Begasungsanlage eine atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration von 950 ppm eingestellt. In Kammer 6 herrschte die aktuelle lokale Konzentration (400 ppm). Beide Kammern waren mit einer Schattierungsanlage ausgestattet, die einer Überhitzung der Kammern entgegenwirken sollte. Die Anlagen in beiden Kammern sind identisch eingesetzt worden. Somit herrschten, mit Ausnahme

der künstlich geschaffenen  $CO_2$ - Konzentration in Kammer 5, während der Versuche gleiche klimatische Bedingungen. In Tabelle 3 sind die klimatischen Gegebenheiten wie Raumtemperatur, Raumfeuchte und  $CO_2$ - Gehalt der beiden Kammern im Saisonverlauf zusammengefasst:

Klimabedingungen Versuchshaus 6 „Umgebungsbedingungen“ (400 ppm)				
Messwochen (Kalenderwoche)	Messzeit (Tage)	Raumtemperatur (°Celsius)	Raumfeuchte (% rF)	$CO_2$ -Gehalt (ppm)
1. KW 22, 2. KW 25	29.05-22.06	24,3	70,6	401
3. KW 28	22.06-22.07	24	71,1	411
4. KW 31	22.07-17.08	24,8	72,3	425
5. KW 35	17.08-11.09	23,5	72	424
6. KW 37	11.09-01.10	23	70,5	438
<b>Mittelwert Versuchsperiode</b>		<b>23,92</b>	<b>71,3</b>	<b>419,8</b>
Klimabedingungen Versuchshaus 5 „erhöhtes $CO_2$ “ (950 ppm)				
Messwochen (Kalenderwoche)	Messzeit (Tage)	Raumtemperatur (°Celsius)	Raumfeuchte (% rF)	$CO_2$ -Gehalt (ppm)
1. KW 22, 2. KW 25	31.05-24.06	24,6	73,9	962
3. KW 28	22.06-22.07	24,4	78,5	960
4. KW 31	22.07-17.08	25,1	78,4	945
5. KW 35	17.08-11.09	24	82,7	956
6. KW 37	11.09-01.10	23,2	92,1	983
<b>Mittelwert Versuchsperiode</b>		<b>24,26</b>	<b>81,12</b>	<b>961,2</b>

Tabelle 3: Klimabedingungen in den Versuchshäusern 5 und 6

## 4.2 Methode

### 4.2.1 Versuchsaufbau der Gewächshausversuche

Zu Beginn der Gaswechselfersuche wurden alle Pflanzen zunächst auf Tische in der gesamten Kammer platziert. Im vorderen Teil der Kammer befanden sich die mehrjährigen Pflanzen und im hinteren Teil die Stecklinge. Im Laufe der Versuchsperiode (Mai-September) sind aufgrund des schnellen Wachstums der Pflanzen die Tische entfernt worden, sodass die Pflanzen bis zum Ende des Versuchs auf dem Boden platziert worden sind. Um die Platzverhältnisse maximal auszuschöpfen, sind pro Kammer 88 Pflanzen positioniert worden, wobei jede Art mit mindestens 14 Bäumen vertreten war. Während der Versuchszeit sind die Pflanzen teilweise verschoben worden, um die Platzausnutzung in der Kammer zu maximieren

und die Pflanzen von unerwünschten Einflüssen, wie dem starken Luftzug der Belüftungsanlage und vor mechanischen Einflüssen zum Beispiel bei Benutzung der Durchgangsgasse fernzuhalten. In Abbildung 8 ist die genaue Platzierung der verschiedenen Pflanzengruppen (aus der Draufsichtperspektive) dargestellt:

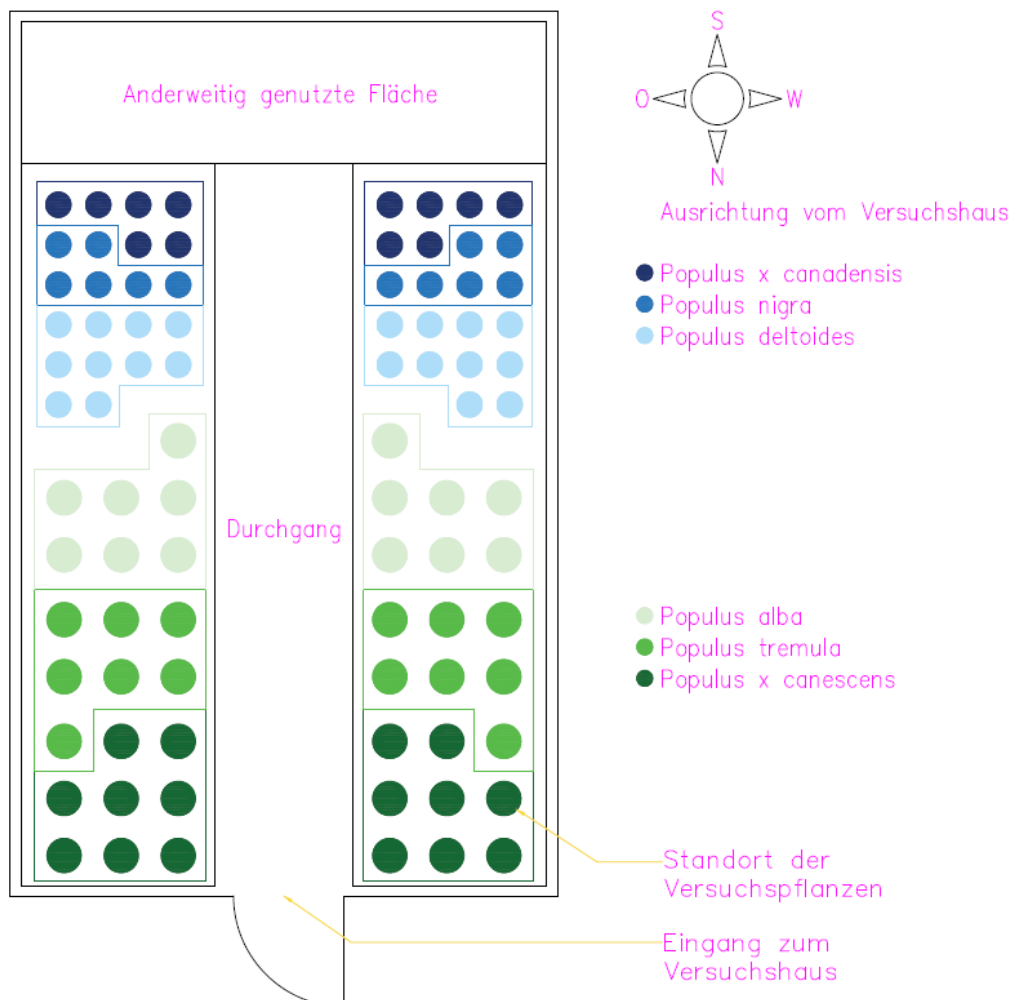


Abbildung 8: Anordnung der Versuchspflanzen im Versuchshaus 5 und 6

Die Begasung in der Kammer 5 vorhandenen Pflanzen begann am 08.05.2018 und wurde während der gesamten Vegetationsperiode durchgeführt. Die Begasung endete am 1.10.2018. Dabei wurde der festgelegte  $CO_2$ - Gehalt von ca. 950 ppm über die gesamte Versuchsperiode eingestellt.

#### 4.2.2 Gaswechselfmessungen mit dem Gaswechselfmessgerät LI- 6400 XT

Der Gaswechsel ist der Austausch von Gasen zwischen Pflanze und der unmittelbaren Umgebung (Matyssek und Herppich 2019). Während der gesamten Vegetationsperiode wurden Gaswechselfmessungen mit dem mobilen Gaswechselfmessgerät LI-6400 XT (LI-COR Biosciences GmbH) durchgeführt. Dabei wurde in einem regelmäßigen Intervall während der Vegetationsperiode der Gaswechsel von festgelegten Referenzpflanzen einer Gruppe gemessen. Im Zuge der Gewächshausversuche war vorgesehen, die Nettophotosyntheserate, Transpirationsrate, stomatare Leitfähigkeit und die interzelluläre  $CO_2$ -Konzentration an den Messtagen zu erfassen.

Das Gaswechselfmessgerät wurde am Tag der Messung in der jeweiligen Kammer aufgebaut. So sind die Parameter stets vor Ort erfasst worden. Hierfür wurden vor den Versuchen drei Bäume pro Gruppe zufällig ausgewählt, an den die Gaswechselfmessung durchgeführt werden sollte. Dabei war vorgesehen, pro Versuchsgang Messungen an drei Blättern pro Baum durchzuführen, wobei mindestens 6 Messpunkte pro Blatt aufgenommen worden sind. Somit wurden in einem Versuchsgang mindestens 54 Messpunkte pro Gruppe erfasst. Insgesamt waren 6 Messwochen pro Kammer während der gesamten Vegetationsperiode vorgesehen.

Das Gerät arbeitet auf der Grundlage eines vom Hersteller als geschlossen bezeichneten Systems (LI-COR®Bioscience). Dieses System besteht aus einem Infrarot-Gasanalytator (IGRA) mit Messkopf und Lichtquelle und einer Konsole zur Messdatenerfassung. Dabei wird bei der genutzten Luft, die angesaugt wird, zunächst über  $CO_2$ -Absorber die Konzentration von  $CO_2$  auf null herabgesetzt. Der hierfür eingesetzte chemische Absorber besteht aus einer Kartusche, die mit *Soda Lime* gefüllt ist und das  $CO_2$  bindet und somit aus der Luft entfernt. Im Anschluss wird dem Luftstrom auch das  $H_2O$  aus der Atmosphäre entzogen, das mit Hilfe eines Trocknungsmittels (98 %  $CaSO_4$ + 2 %  $CoSO_4$ ) absorbiert wird. Im Anschluss wird diesem Luftstrom wieder die gewünschte  $CO_2$ -Konzentration zugeführt, die in den jeweiligen Gewächshauskammern vorherrscht. Die Luft mit der eingestellten Konzentration wird anschließend mit einer zuvor festgelegten molaren Strömungsgeschwindigkeit von  $500 \mu mol s^{-1}$  zum Sensorkopf gepumpt. Dabei wird



der Luftstrom in zwei Ströme unterteilt. So wird 75 % für die Probenmessung und die restlichen 25 % für die Referenzmessung genutzt. Im Sensorkopf werden schließlich die Ströme unabhängig voneinander mit Infrarotsensoren vermessen. Das Blatt wurde vorher in der geschlossenen Messkammer eingespannt. So sollte verhindert werden, dass äußere Einflüsse die Messung während des Gaswechsels beeinträchtigen.

Nachdem das Blatt in der Messkammer eingespannt worden war, wurde zunächst drei Minuten gewartet, bis in der Messkammer die eingestellten Messbedingungen vorherrschten. Im Anschluss begannen die Messungen und die Aufzeichnung der Messdaten. Dabei wurde das Blatt mit  $1000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$  photosynthetisch aktiver Radiation beleuchtet und der Gaswechsel der Pflanze aufgezeichnet.

Die Messung der Transpiration und Nettophotosyntheserate wurde durch Sollwertabgleich zwischen der Mess- und Referenzkammer ermittelt. So wurde durch die zwei unabhängigen Infrarotsensoren die  $\text{CO}_2$ - und  $\text{H}_2\text{O}$ -Konzentration des Luftstroms vor und nach dem Passieren des Messblattes gemessen

(siehe Abbildung 9). Da beim Gaswechselprozess  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre aufgenommen wird und  $\text{H}_2\text{O}$  vom Blatt abgegeben wird, ergibt sich zwangsläufig eine Veränderung der Konzentrationen in der Atmosphäre, nachdem der Luftstrom das Messblatt passiert hat, also eine niedrigere  $\text{CO}_2$ -Konzentration und eine höhere  $\text{H}_2\text{O}$ -Konzentration in der Luft. Durch diese Differenz der Konzentrationen beider Kammern kann die Transpiration, Netto-  $\text{CO}_2$ -Aufnahmerate, stomatäre Leitfähigkeit und interzelluläre  $\text{CO}_2$ -Konzentration berechnet werden. Mit Einbeziehung der Fläche der Kammer des Messgeräts, die  $6 \text{ cm}^2$  betragen hat und der Stomataverteilung, die entweder einseitig oder beidseitig je nach Pflanzenart sein kann, wurde die Nettophotosyntheseleistung der Pflanze berechnet.

Im Anschluss wurden die erfassten Daten auf dem Gerät gespeichert und konnten zur Auswertung auf einem Computer übertragen werden. In Abbildung 9 ist das Funktionsprinzip des Gaswechsellmessgeräts zusammenfassend dargestellt:

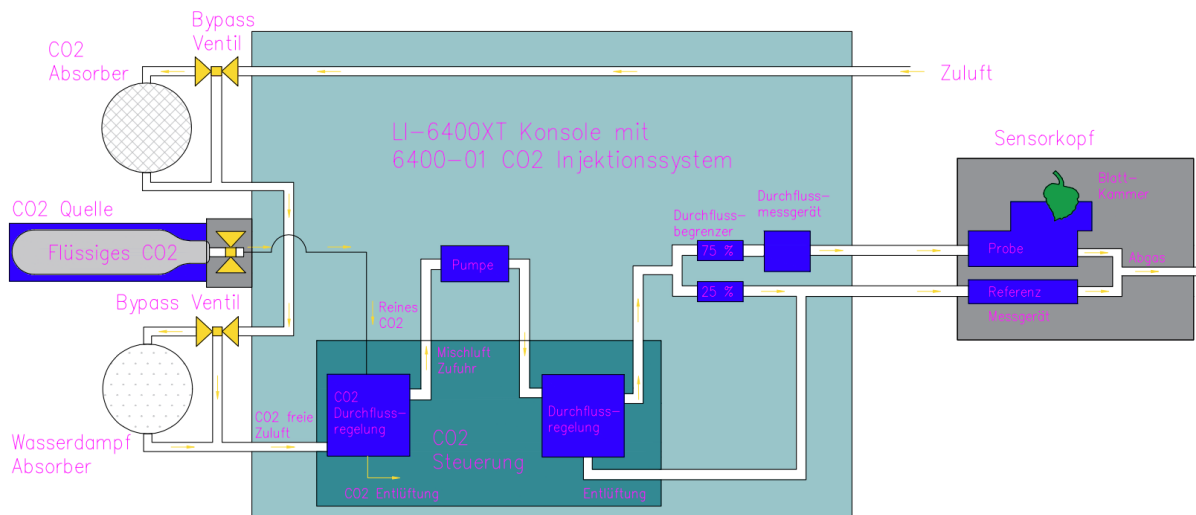


Abbildung 9: Funktionsschema des Gaswechselmessgeräts LI-6400 XT angelehnt an (LI-COR®Bioscience 2016)

#### 4.2.3 Physiologische Messungen am lebenden Material

Um eine Aussage über das Wachstum der Versuchspflanzen treffen zu können, wurden parallel zu den Gaswechselmessungen die physiologischen Eigenschaften aller Versuchspflanzen aufgenommen. Dabei ist die Vergrößerung des Stammdurchmessers und die Zunahme der Höhe der Pflanzen dokumentiert worden, um am Ende der Versuchsreihe die Zuwachsraten der einzelnen Pflanzen über den gesamten Versuchszeitraum erhalten zu können. Die Messung des Stammdurchmessers erfolgte mit einem Messschieber. Dabei ist bei den mehrjährigen Pflanzen der Stammdurchmesser 2 cm über der Substratoberfläche gemessen worden. Bei den Stecklingen erfolgte die Messung an der Unterkante vom gebildeten Spross. Die Messung des Höhenzuwachses erfolgte von Substratoberfläche bis zur Baumspitze.

#### 4.2.4 Physiologische Messungen am geernteten Material

Nach der Ernte wurden weitere Parameter, wie Trocken- und Frischgewicht der Stämme, sowie das Trockengewicht der Wurzeln aufgenommen. Hierzu wurde das Frischgewicht unmittelbar nach der Ernte gemessen. Nach der Trocknungszeit von mehreren Wochen, wurde das Trockengewicht der Pflanzenstämme aufgenommen. Ergänzend sind die vom Substrat befreiten Wurzeln ebenfalls gewogen, sowie die

Blattfläche und der Blattdurchmesser jeder Pflanze gemessen worden. Dazu wurden pro Versuchspflanze mindestens 10 Blätter zufällig ausgesucht und im Anschluss mit dem Blattmessgerät *LI-3000C LI-Cor* der Firma Licor vermessen.

#### *4.2.5 Holzanatomische Untersuchungen*

Um feststellen zu können, ob atmosphärisches  $CO_2$  einen Einfluss auf die holzanatomischen Eigenschaften hat, sind im Zuge der holzbiologischen Untersuchungen die anatomischen Charakteristika der Pflanzen erfasst worden. Als Stichproben sind die Pflanzen ausgesucht worden, an denen auch der Gaswechsel gemessen worden ist, um einen eventuellen unmittelbaren Zusammenhang der abiotischen Faktoren auf das Wachstum erfassen zu können. Hierfür ist vom Probenmaterial die Gefäßgröße, die Gefäßdichte und die Jahringbreite erfasst worden.

##### *4.2.5.1 Gefäßgröße*

Bei der Gefäßgröße handelt es sich um die gemessene Fläche einer Trachee im Querschnitt eines Jahrrings. Neben der gemessenen Fläche, wird auch der Durchmesser der Trachee erfasst. Durch die Erfassung der Gefäßgröße kann die Transportleistung des Wassers einer Pflanze und die Reaktion der Pflanze auf abiotische Faktoren abgeleitet werden.

##### *4.2.5.2 Gefäßdichte*

Die Gefäßdichte beschreibt die Anzahl an Tracheen innerhalb einer definierten Fläche im Jahrring. Wie auch bei der Erfassung der Gefäßgröße, kann auch hier eine Aussage über den Wassertransport einer Pflanze getroffen werden. Darüber hinaus kann bei Betrachtung der Fläche, die sich über den Jahrring erstreckt, eine Aussage über die Wachstumsstrategie der Pflanze getroffen werden.

#### 4.2.5.3 Jahrringbreite

Die Jahrringbreite beschreibt den Holzzuwachs innerhalb der Wachstumsperiode und wird vom Anfang bis zum Ende des Jahrrings gemessen. Die Jahrringbreiten wurden mittels Bildanalyse erfasst, um möglichst präzise den saisonalen radialen Zuwachs der Pflanze erfassen zu können.

#### 4.2.5.4 Probenpräparation für die holzanatomischen Untersuchungen

Für die holzanatomischen Untersuchungen sind als Vorbereitung alle zu untersuchenden Proben im Vorfeld gefärbt worden. Durch das Einfärben von Probenmaterial können Zell- und Gewebestrukturen besser sichtbar gemacht werden und somit farblich unterschiedlich visuell voneinander abgegrenzt werden.

Damit eine Färbung sichtbar wird, muss ein Teil des weißen Lichts, das auf das Objekt scheint, absorbiert werden (Volgger 2008). Das vom Objekt reflektierte Licht wird vom menschlichen Auge dann wiederum als Farbe wahrgenommen (siehe Abbildung 10) (Volgger 2008). Diese Farbstoffe werden als Hellfeld- Farbstoffe bezeichnet (Volgger 2008).

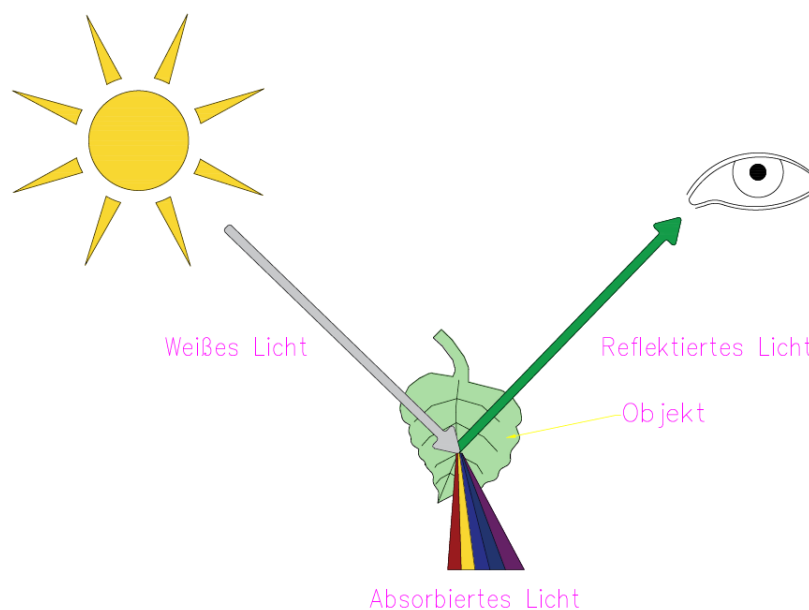


Abbildung 10: Beispiel für eine Lichtreflektion und Lichtabsorption in Anlehnung nach (Volgger 2008)

Eine Grundvoraussetzung für das Färben von Probenmaterial ist, dass sich die Farbstoffe entweder durch chemische oder physikalische Faktoren in den Zellen und Strukturen anreichern (Volgger 2008). Bei einer chemischen Bindung geht der Farbstoff eine Bindung mit Molekülen des Präparats ein (Volgger 2008). Eine physikalische Bindung dagegen kann zum Beispiel auf einer elektrostatischen Bindung basieren. Dabei sind die eingesetzten Farbstoffe kationisch also Farbstoffe mit einer positiven Ladung. Diese Farbstoffe werden durch elektrische Ladungen an entgegengesetzt geladenen Zellen gebunden. Es ergibt sich somit eine Adsorption also eine Anlagerung von Farbstoff-Molekülen an einer festen Oberfläche, von kationischen Farbstoffen wie zum Beispiel Safranin und Astrablau an der Zellwand (Volgger 2008).

Die Einfärbung von Holzproben in Astrablau und Safranin hat den Vorteil, dass bei der anschließenden Bildanalyse zwischen verholztem und nicht verholztem Gewebe unterschieden werden kann. So sind bei fertig präparierten Schnitten das verholzte Gewebe rot (Safranin) und das nicht verholzte Gewebe in Blau (Astrablau) eingefärbt (siehe Abbildung 11).

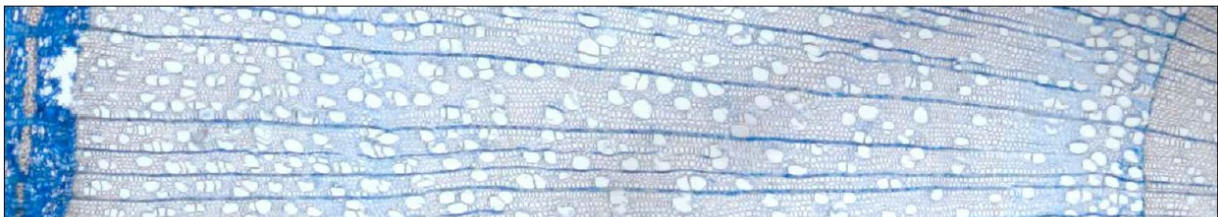


Abbildung 11: Gefärbter Querschnitt einer Pappel (*Populus x canescens*)

Für die Färbung des Probenmaterials sind Farbstoffe auf alkoholischer Basis eingesetzt worden.

Bei der Herstellung vom Safranin- Farbstoff wird auf 1 g Safranin genau 100 ml 60- %ige Ethanol aufgefüllt. Im Anschluss wird die Lösung gerührt, bis sich das Safranin- Pulver vollständig aufgelöst hat. Als nächstes wird die Lösung filtriert und bei 8 Grad Celsius aufbewahrt.

Bei der Herstellung von Astrablau- Farbstoff wird 0,5 g Astrablau mit 2 g Weinsäure und 100 ml 60- %ige Ethanol aufgefüllt. Auch hier wird analog zur Safranin- Farbstoffherstellung die Lösung im Anschluss gemischt, filtriert und im Kühlschrank aufbewahrt.

Für die anschließende Färbung des Probenmaterials wurden die Proben zur Konservierung zunächst in 75 %igen Ethanol eingelagert. Das Probenmaterial stammte dabei aus der unteren Stammsektion der Versuchspflanze (5 cm oberhalb der Substratoberfläche) und hatte eine Gesamtlänge von ca. 10 cm. Zur Herstellung der Schnitte, wurden mit einem Microtom (*Zeiss Modell Hyrax S30*) von den Proben ca. 40 µm dünne Schnitte angefertigt.

Im Anschluss wurde die Doppelfärbung mit Safranin und Astrablau durchgeführt. Diese ist eine sukzedane Färbung, bei der die Farbstoffe einzeln und hintereinander aufgetragen werden. Bei dem Färbeprozess selbst ist eine regressive Färbung vorgenommen worden, bei dem nach der Färbung der Farbüberschuss ausgewaschen wird. Dabei wurden die Schnitte für zwei Minuten in der Safraninlösung eingefärbt. Darauf folgend wurde mit 100- %igen Ethanol das überschüssige Safranin ausgewaschen. Im Anschluss erfolgte die Färbung mit Astrablau für 6 Minuten mit anschließendem Auswaschen.

Die Einbettung der Schnitte, unter Ausschluss von Sauerstoff, erfolgte abschließend in Glycerin. Im Anschluss konnten die anatomischen Eigenschaften der Pflanze im Lichtmikroskop erfasst werden.

#### *4.2.5.5 Holzanatomische Analyse im Lichtmikroskop*

Für die Holzanatomischen Untersuchungen wurde das Programm *ZENPro 2012* genutzt. Das Programm ermöglicht es, Fotos von den angefertigten Schnitten aufzunehmen und die anatomischen Eigenschaften der Holzproben zu messen. Dabei wird die eingebettete Holzprobe in ein Mikroskop eingespannt, dessen Sichtfeld durch das Programm auf dem PC dargestellt werden kann. Da alle Proben einen sehr großen Stammdurchmesser aufgewiesen haben, ist es notwendig gewesen, einzelne Bilder vom gesamten Querschnitt aufzunehmen, und diese im Anschluss mit dem Programm *Photoshop* zu einem Bild zusammenzufügen. Das angefertigte Bild kann im Anschluss wieder in das Programm *ZenPro 2012* geladen werden, und für die Vermessung eingesetzt werden. Hierfür sind mit dem Programm die einzelnen Gefäße in jedem Viertel bzw. jeder Himmelsrichtung einzeln in einer zuvor definierten Fläche, vom Beginn bis zum Ende des Jahrrings vermessen worden. Dabei wurde die Höhe,

sowie Breite der einzelnen Gefäße erfasst, wobei die Messachsen immer jeweils um ca. 90 Grad zueinander versetzt gezogen worden sind (siehe Abbildung 12).



Abbildung 12: Holzanatomische Messungen an einer gefärbten Probe  
(Querschnitt von *Populus x canescens*)

Da biotische und abiotische Faktoren die Verteilung der Gefäße innerhalb eines Stammquerschnitts beeinflussen können, wie zum Beispiel bei Zug- und Druckholz, ist eine Stichprobenanzahl von ca. 100 vermessenen Gefäßen pro Himmelsrichtung festgelegt worden. So konnte sichergestellt werden, dass eine ausreichend hohe Anzahl an Stichproben vorhanden war, um eine sichere statistische Auswertung vollziehen zu können, die nicht durch die benannten Faktoren in ihren Ergebnissen beeinflusst wird.

#### 4.2.6 Messung der Spaltöffnungsgröße (Stomata) mittels Feldemissionsrasterelektronenmikroskop

Die Spaltöffnungen der Blätter (Stomata) sind mit einem Feldemissionsrasterelektronenmikroskop der Firma Quanta, Modell FEG 250, vermessen worden. Das Feldemissionsrasterelektronenmikroskop erlaubt Untersuchungen von Nano- und Mikrostrukturen an Proben im nahezu zerstörungsfreien Zustand.

Zur Vorbereitung wurden die Blattproben bei  $-110$  °Celsius für 48 Stunden unter Vakuum zunächst gefriergetrocknet. Nach der Trocknung wurden die Proben in einem Exsikkator zwischengelagert. Im Anschluss wurden die Stiftprobenteller mit „light Stubs“ beklebt, auf denen wiederum das Probenmaterial platziert wurde. Nachfolgend

wurden die Proben mit dem Gerät *SC510* von der Firma *Biorad* unter Vakuum für 165 Sekunden mit Gold bedampft, um das Probenmaterial elektrisch leitfähig zu machen. Im Anschluss wurden die Messungen am Probenmaterial mit Hilfe des Feldemissionsrasterelektronenmikroskops unter Hochvakuum durchgeführt. Mit der Messfunktion der Software (*xT microscope Server*) wurden die Spaltöffnungen von Stomata- Anfang bis Stomata- Ende vermessen (Abbildung 13).

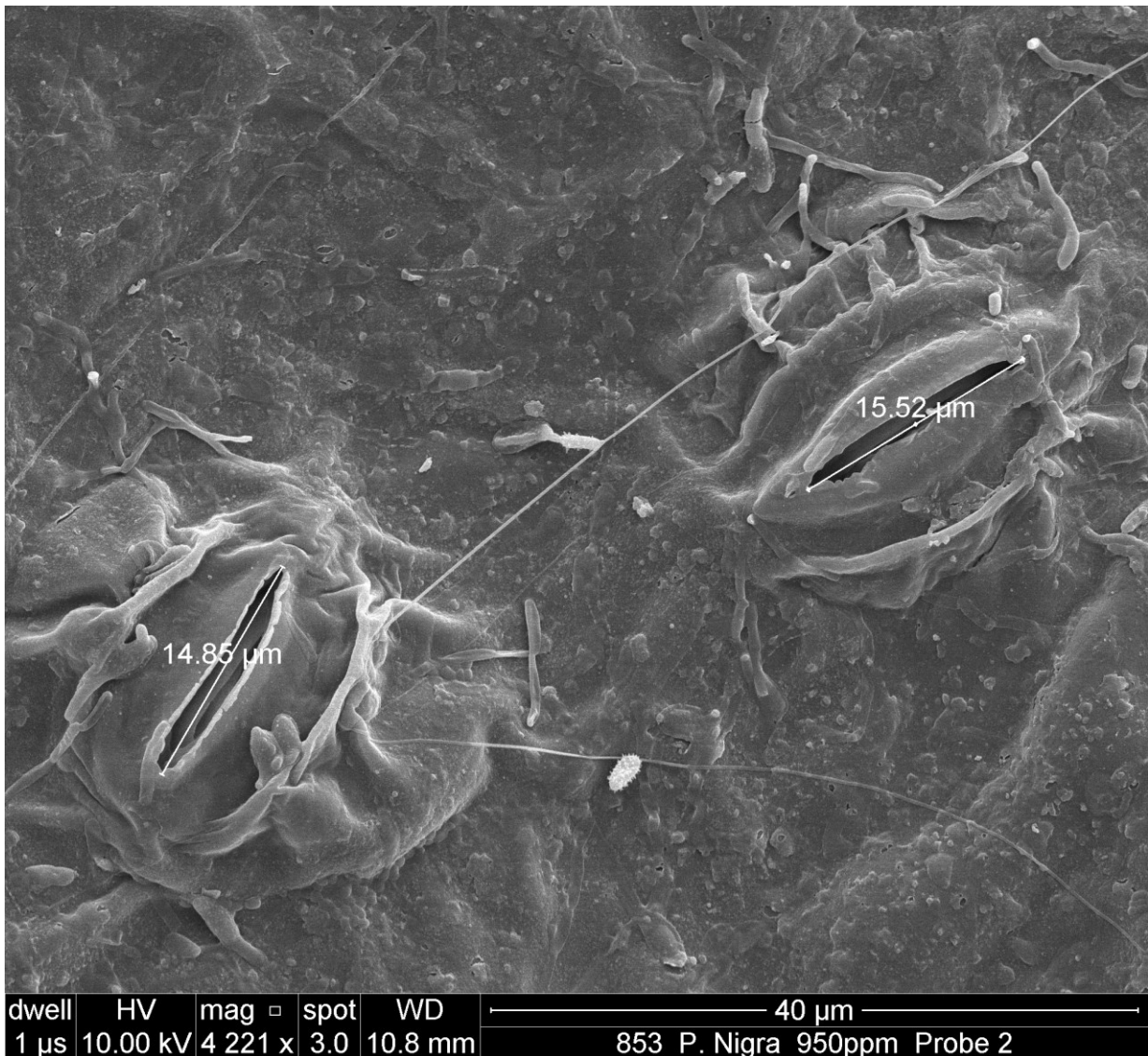


Abbildung 13: Vermessung der Stomata mittels Rasterelektronenmikroskop an *Populus nigra*



#### 4.2.7 Ermittlung der Lignin- und Kohlenhydratgehalte

Holz besteht bis zu 65- 75 % aus Kohlenhydraten (Uremovic et al. 1994). Um eine Aussage treffen zu können, welche holzchemische Zusammensetzung beim Versuchsmaterial vorgelegen hat, wurden die mengenmäßigen Anteile von Lignin, Cellulose und Hemicellulosen ermittelt.

Der Kohlenhydratbestimmung ist ein Extraktionsverfahren vorausgegangen. Dabei sollten aus dem Holzmaterial Extraktstoffe wie Fette, Öle und Stärke im Voraus aus dem Versuchsmaterial extrahiert werden.

Anschließend wurde eine zweistufige Hydrolyse der Polysaccharide durchgeführt.

Für die nachfolgende Ermittlung der qualitativen und quantitativen Kohlenhydratzusammensetzung des Versuchsmaterials, ist ein HPLC- Verfahren (Hochleistungsflüssigkeitschromatographie) eingesetzt worden.

Für die holzchemischen Untersuchungen ist ausschließlich Holzgewebe genutzt worden, das in der Wachstumsperiode 2018 im Gewächshaus entstanden ist.

##### 4.2.7.1 Extraktion

Im Holzextrakt können mehr als hundert Substanzen nachgewiesen werden (Faix 2003). Dabei zählen Fette, Öle und Stärke, die in den Extraktstoffen des Holzes vorkommen, zu den nachwachsenden Rohstoffen und sind für eine wirtschaftliche Nutzung durchaus interessant (Faix 2003). Daher wurde vor der mengenmäßigen Lignin- und Holzzuckerbestimmung eine Extraktion des Versuchsmaterials vorgenommen, um deren Mengen zu erfassen. Des Weiteren ist die Entfernung der Extraktstoffe aus dem Holz sinnvoll, da sonst die ermittelten Mengenanteile des Lignins in der späteren Hydrolyse verfälscht werden würde.

Zur Vorbereitung für die Extraktion wurde zunächst von den Holzstämmen die Rinde und der Bast entfernt. Im Anschluss wurde das Material in einer Labormühle der Firma *Ica*, Modell MF 10 zu Spänen zerkleinert und in luftdichten Behältnissen zwischengelagert. Im Anschluss ist die Extraktion mit einem Lösungsmittel- Extraktor der Firma *Dionex*, Modell ASE 350 durchgeführt worden. Dabei steht ASE für „Accelerated Solvent Extractor“ und stellt ein vollautomatisiertes System dar, bei der eine unbeaufsichtigte Extraktion der Proben möglich ist.

Für die Extraktion sind pro Holzprobe ca. 1,5 g eingewogen und in die Extraktionszellen des ASE überführt worden. Die verschlossenen Zellen wurden im Gerät in einer definierten Reihenfolge positioniert. Im Anschluss wurde die Methode und Sequenz der Extraktion programmiert. Dabei war vorgesehen, dass Petrolether, ein Aceton- Wasser Gemisch und destilliertes Wasser als Lösungsmittel eingesetzt werden. Als die Programmierung abgeschlossen war, konnte die Extraktion gestartet werden. In Tabelle 4 ist die programmierte Einstellung der durchgeführten Extraktion mit den jeweiligen Lösungsmitteln und Extraktionsbedingungen dargestellt:

Extraktionsbedingungen	Methode				
	1	2	3	4	5
Lösungsmittel	Petrolether	Aceton/H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O	Spülung	Spülung
		9:1		Petrolether-Aceton	Aceton- H <sub>2</sub> O
Zeit [Minuten]	10	10	10	1	1
Durchgänge	2	2	2	1	1
Druck [bar]	100	100	100	100	100
Temperatur [°Celsius]	70	70	90	70	70

Tabelle 4: Extraktionsbedingungen

Dabei werden beim Extraktionsmittel Petrolether Extrakte wie freie Fettsäuren, Fette, Sterine, Sterinester, Kohlenwasserstoffe und Terpene aus den Versuchsmaterial extrahiert (Faix 2003). Beim Extraktionsmittel Aceton/Wasser werden phenolische Verbindungen und Glycoside extrahiert (Faix 2003). Beim Extraktionsmittel Wasser werden dagegen Extrakte wie Stärke, Farbstoffe, Tannine und zum Teil Hemicellulosen aus dem Holzmaterial extrahiert (Faix 2003).

Nach der Extraktion wurden die Extraktionslösungen in einen Messkolben überführt und mit den jeweiligen Lösemitteln auf 25 ml aufgefüllt. Im Anschluss wurde die aufgefüllte Lösung durchmischt. In bereits vorher abgewogenen Aluschalen wurden dann die Extraktionslösungen mittels einer 10 ml Glaspipette überführt und auf eine Heizplatte gestellt. Darauf sollen schließlich die Lösungsmittel verdunsten, sodass die Extrakte im Aluminiumgefäß vorliegen. Nachdem die Lösungsmittel verdunstet waren, wurden die Schalen mit den Extrakten für einen Tag im Trockenschrank (100 Grad Celsius) aufbewahrt. Im Anschluss konnte das vorliegende Gewicht der Extrakte mittels Waage ausgewogen werden. Das Probenmaterial in den Extraktionszylindern

wurde zur Lufttrocknung in offene Gefäße überführt und zur weiteren Verarbeitung aufbewahrt.

#### 4.2.7.2 Hydrolyse

Von dem vorliegenden Holzmaterial wurde eine zweistufige Hydrolyse durchgeführt, bei dem zum einen Polysaccharide, zudem Cellulose und Hemicellulosen gehören, in Monomere aufgespalten werden. Das Lignin, das größtenteils aus Phenylpropanbausteinen besteht, lag nach der Hydrolyse als Hydrolyserückstand vor. Im Zuge dieses Verfahrens wurde eine Dreifachbestimmung vorgenommen. Es wurden also drei Proben pro Individuum hydrolysiert.

Zur Vorbereitung für die Hydrolysen wurde das getrocknete Material, das bereits das Extraktionsverfahren durchlaufen hat, in einer Laborschwingmühle der *Firma Retsch, Modell MM 400* nochmals zerkleinert, damit später bei der Hydrolyse die Säure besser in das Holz eindringen kann. Nach der Zerkleinerung wurde das nun mehlartige Probenmaterial klimatisiert und der Feststoffgehalt (Trockengehalt) bestimmt, damit dieser in der späteren Berechnung der Mengenanteile mitberücksichtigt werden konnte. Zur Hydrolyse wurden genau 200 mg Holzmaterial eingewogen, wobei die maximale Differenz der Einwaage  $\pm 10$  mg betragen sollte. Die in ein Reaktionsgefäß überführten Proben wurden zu Beginn der Vorhydrolyse mit 2 ml 72-%igen  $H_2SO_4$  (Schwefelsäure) versetzt und wurden eine Stunde bzw. genau 3600 Sekunden in einem Thermostaten der Firma *Julabo, Modell TW8* bei 30 Grad Celsius hydrolysiert. Während dieser Stunde wurden die Proben in 10 Minuten Intervall durchgemischt und geknetet, damit die Partikel sich zerkleinern und die Säure besser in das Holz eindringen kann. Nachdem die Stunde vergangen war, wurde die Hydrolyse durch Zugabe von 6 ml destilliertem Wasser gestoppt. Im Anschluss wurden die Proben mit 50 ml destilliertem Wasser in einem 100 ml fassenden Messkolben überführt.

Im Anschluss wurden die Proben der Nachhydrolyse zugeführt. Dazu wurden die in dem Messkolben befindlichen Proben in einem Autoklaven der Firma *Systec, Modell VX-75* bei 120 Grad Celsius und unter 1,2 Bar Druck für 30 Minuten nachhydrolysiert. Nach Beendigung der Nachhydrolyse wurden die Proben abgekühlt und nochmals mit destilliertem Wasser auf 100 ml aufgefüllt und gemischt. Im Anschluss wurde der Hydrolyserückstand aus der Lösung mittels G4- Glasfiltertiegel gefiltert. Dabei ist der Rückstand das kondensierte Lignin. Das Filtrat ist für die nachfolgende Zuckeranalytik

angefüllt und bei -18 Grad Celsius zwischengelagert worden. Der Rückstand in den Glasfiltertiegel wurde mit destilliertem Wasser säurefrei gewaschen. Im Anschluss wurden die Glasfiltertiegel mit dem Rückstand für einen Tag bei 105 Grad Celsius getrocknet und nachfolgend gravimetrisch bestimmt (Auswaage).

Das im Filtrat befindliche säurelösliche Lignin wurde dagegen im Anschluss mittels spektroskopischer Verfahren bestimmt.

Das Verfahren zur Erfassung des säurelöslichen Lignins beruht auf dem Lambert-Beer'schen Gesetz (Hauk 2013). Im Allgemeinen beschreibt dieses Gesetz die Abschwächung der Intensität einer Strahlung im Vergleich zur Anfangsintensität, nachdem diese ein Medium wie zum Beispiel eine Flüssigkeit durchdrungen hat (Hauk 2013). Das Maß für diese Abschwächung der Strahlung bzw. des Lichts ist die Extinktion (Hauk 2013). Zur Messung der Extinktion wurde ein UV/VIS-Spektralphotometer der Firma *Perkin Elmer, Modell 650* eingesetzt. Dieser Zweistrahlphotometer besteht aus einer Lichtquelle, Monochromator, Unterbrecher, Spiegel, Küvetten für die Proben und einem Detektor. Die von der Lichtquelle ausgehende Strahlung wurde durch den Monochromator reguliert und in einer zuvor eingestellten Wellenlänge weitergeleitet. Der Lichtstrahl wurde mit einem mechanischen Unterbrecher in einen Proben- und Referenzstrahl aufgeteilt und durchdrang die Mess- und Nullprobe, die sich in Quarzküvetten mit einer Schichtdicke von 10 mm befunden haben, mit einem Lichtstrahl gleicher Energie und gleichen Lichtpfad zeitgleich. Die in der Messprobe vorhandenen gelösten Substanzen (in dem Fall säurelösliches Lignin) konnten zum Teil die Lichtwellen absorbieren. Der weitere Teil des Lichts konnte die Lösung durchdringen und wurde im Anschluss mit dem Wert des Lichtstrahls, der die Nullprobe durchdrungen hat, verrechnet, wodurch man die Extinktion als Ergebnis erhielt (siehe Abbildung 14):

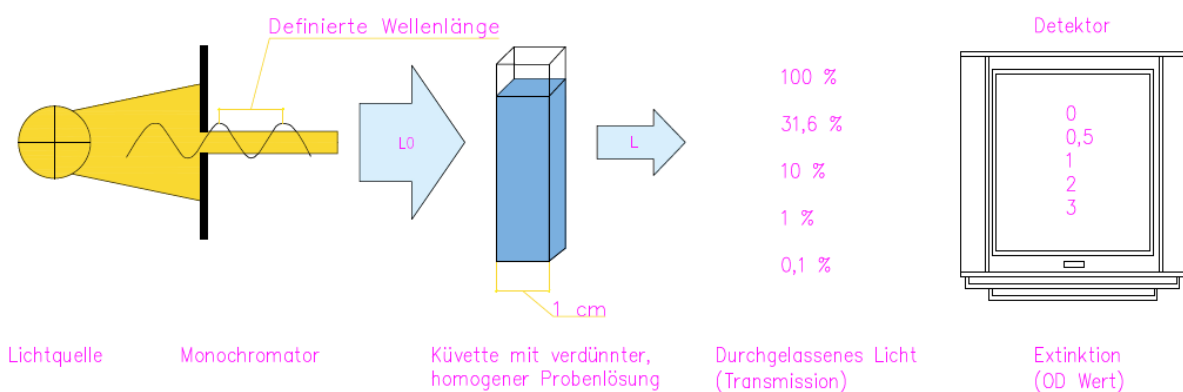


Abbildung 14: Messprinzip mittels Photometer in Anlehnung an (Hauk 2013)

Zur Verdünnung und als Nullprobe wurde 2,3- prozentige Schwefelsäure eingesetzt. Vom Filtrat wurde 0,5 ml mittels Pipette in 8 ml 2,3- prozentige Schwefelsäure überführt und durchmischt, um Lichtstreuung zu vermeiden. Die Lösung wurde im Anschluss in die Quarzküvette, die für die Messprobe vorgesehen ist, überführt und im Photometer platziert. Im Anschluss wurde die reine 2,3- prozentige Schwefelsäure in die vorgesehene Küvette für die Nullprobe überführt. Bei einer Wellenlänge von 205 nm wurde die Extinktion gemessen. Nach jeder Messung wurde die Quarzküvette mit der Probenlösung für die nachfolgende Lösung gespült und im Anschluss neu befüllt und gemessen.

Nach der Ermittlung der Extinktion konnte im Anschluss die Massenkonzentration  $\beta$  in g/l und der Massenanteil  $w$  in % berechnet werden. Die Berechnungsformel für die Massenkonzentration von  $\beta$  lautet wie folgt:

$$\beta_{Lignin} = \frac{E}{110\text{ l/g}} \times \frac{V_F + V_S}{V_F}$$

Dabei ist  $E$  die gemessene Extinktion,  $110\text{ l/g}$  der Extinktionskoeffizient,  $V_F$  das Volumen des verwendeten Filtrats in ml und  $V_S$  das Volumen der Säure, mit dem das Filtrat verdünnt worden ist.

Der Massenanteil  $w$  berechnet sich aus:

$$w_{Lignin} \equiv \beta_{Lignin} \times V_{ges} \\ 100\% \equiv m_{atro}$$

Dabei ist  $V_{ges}$ . Das Gesamtvolumen vom Filtrat in ml (bei zweistufiger Hydrolyse meistens 100 ml) und  $m_{atro}$  die atro Einwaage (absolut Trocken) der Hydrolyse in g, die in den meisten Fällen 0,2 g beträgt.

Um daraus den prozentualen Anteil von  $w_{Lignin}$  in % zu berechnen, erfolgt folgende Umrechnung in %:

$$w_{Lignin}[\%] = \frac{\beta_{Lignin}[\text{g/l}] \times V_{ges}[\text{ml}] \times 100\%}{m_{atro}[\text{g}]}$$

Wenn die Einheiten angeglichen werden, ergibt sich:

$$w_{Lignin}[\%] = \frac{\beta_{Lignin}[g/l] \times V_{ges.}[ml] \times 1l \times 100\%}{m_{atro}[g] \times 1000ml}$$

Wenn die jeweiligen Berechnungsformeln der einzelnen Größen eingesetzt werden, ergibt sich folgende Berechnung:

$$w_{Lignin}[\%] = \frac{E}{100 \text{ l/g}} \times \frac{V_F + V_S}{V_F} \times \frac{V_{ges.}[ml] \times 1l \times 100\%}{m_{atro}[g] \times 1000 \text{ ml}}$$

#### 4.2.7.3 Zuckanalytik HPLC

Die bei der Hydrolyse gewonnenen Filtrate wurden mit einem *HPLC* („High Pressure Liquid Chromatography“) Verfahren untersucht (siehe Abbildung 16). *HPLC* ist ein chromatographisches Trennverfahren, bei dem die zu untersuchenden Stoffgemische in einzelne Bestandteile aufgetrennt werden. Zur Bestimmung der Mengenanteile von Holzzuckern wurde ein *HPAEC-Borat* („High Performance Anion Exchange Chromatography Borate“) Verfahren genutzt, bei dem die sauren Hydrolysate ohne Neutralisation und ohne weitere Probenvorbereitung analysiert werden können (Willför et al. 2009). Grund hierfür ist die hohe Molarität der mobilen Phase (Boratpuffer), die eine kontinuierliche Regeneration des Ionenaustauscharzes gewährleistet (Willför et al. 2009). Dieses Prinzip zur Trennung der Holzzucker nutzt die Tatsache aus, dass Zucker in Gegenwart von Borsäure aufgrund ihrer Stereochemie anionische Komplexe bilden, bei unterschiedlicher Stabilität (Willför et al. 2009). Mit dem Säulenmaterial (stark basischer Ionenaustauscher) treten die Komplexe in Wechselwirkung und können dadurch getrennt werden (Willför et al. 2009). Abhängig von dem Grad der Wechselwirkung werden die monomeren Zucker unterschiedlich schnell von der Säule gespült und es entstehen die unterschiedlichen Retentionszeiten (Willför et al. 2009). Wenn die Stoffe den Austritt der Säule erreicht haben, können diese mit einem Detektor (*UV/VIS* Detektor) nachgewiesen werden. Dafür ist eine Nachsäulenderivatisierung mit dem Cu-bi-cinchoninat erforderlich, da andernfalls kein UV-Signal nachgewiesen werden kann.

Bei der Messung erhält man die Retentionszeiten (in Minuten), die die Zeit vom Start bis zur Detektion darstellen. Die Retentionszeiten werden graphisch in Kurven, oder

auch „Peaks“ genannt, angegeben. Die Flächen unterhalb der Peaks sind dabei proportional zur Konzentration des jeweiligen Stoffs (siehe Abbildung 15) (Willför et al. 2009). Die Ergebnisse werden im Anschluss mit Referenzdaten (Retentionszeiten) der einzelnen Zucker, die in einer Datenbank vorliegen verglichen und identifiziert.

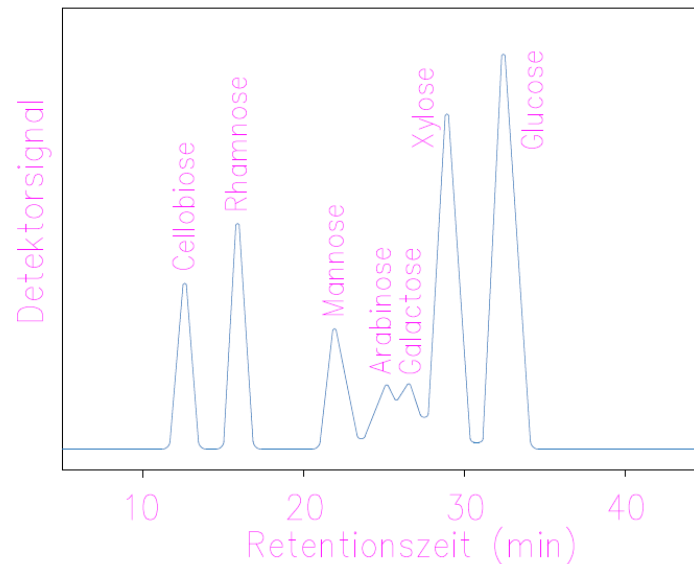


Abbildung 15: Trennung des Standardgemisches der Holzzucker, in Anlehnung an (Willför et al. 2009)

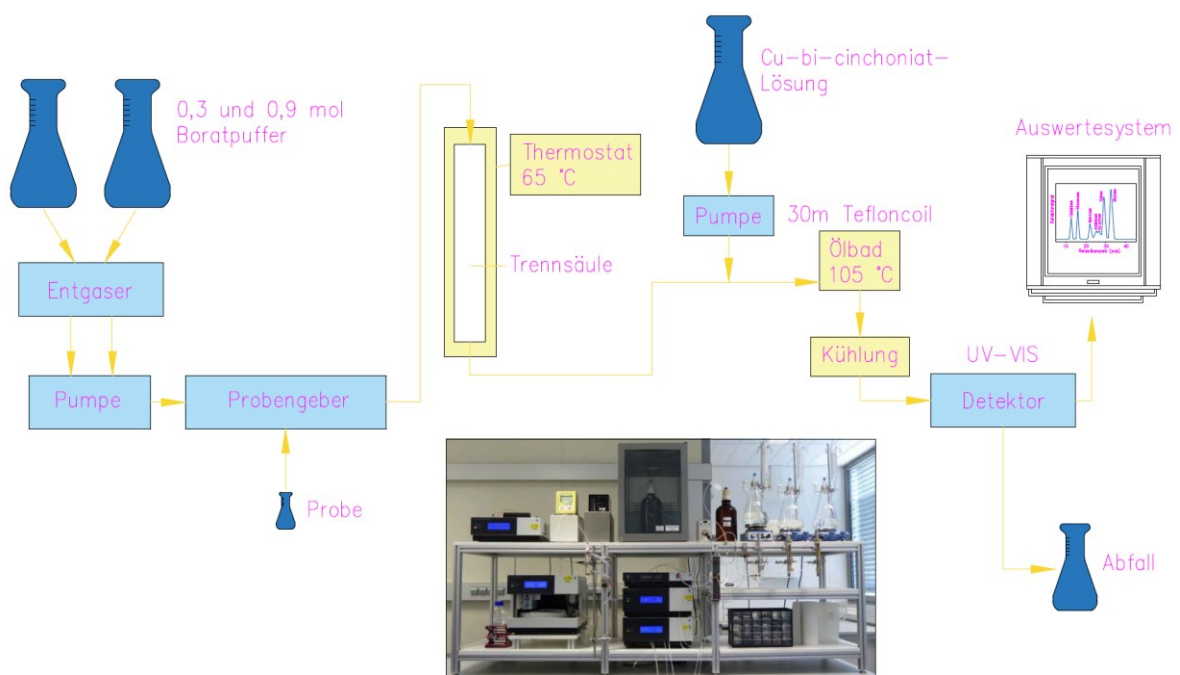


Abbildung 16: Schematischer Aufbau eines *HPAEC-Borat*, in Anlehnung an (Lehnen 2022)

#### 4.2.7.4 Elementaranalyse

Zur Ermittlung des Kohlenstoff-Stickstoff Verhältnisses (C/N-Gehalt) ist ein Elementaranalysator der Firma Elementar, *Modell Vario EL cube* eingesetzt worden. Durch die Messungen erhält man den prozentualen Elementgehalt, bezogen auf die Trockenmasse der jeweiligen eingemessenen Proben. Als Proben wurden von jeder Versuchspflanze das Blattmaterial, Wurzel und das Holzgewebe herangezogen.

Bei dieser Methode wurde das Probenmaterial zunächst für ca. drei Tage bei 105 Grad Celsius getrocknet, da zur Messung die Proben absolut frei von Wasser sein müssen. Nach der Trocknung wurden die Proben zu Pulver gemahlen und im Anschluss in Zinnbehälter eingewogen, wobei das Gewicht der Einwaage 10 mg betragen hat.

Im Elementaranalysator wurden die Proben bei 1200-1800 Grad Celsius bei Zugabe von kontrollierten Mengen an Sauerstoff innerhalb von 120 Sekunden verbrannt. Die entstehenden Stickoxide wurden mit Hilfe von dem Trägergas Helium im Anschluss an Kupferkontakte, die als Reduktionsmittel dienten, geleitet und auf Stickstoff ( $N_2$ ) und Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ) reduziert, wobei der Sauerstoffüberschuss hier entfernt wurde. In Adsorptionssäulen wurden die Stoffe aus dem Gasgemisch angereichert und nacheinander dem Wärmeleitdetektor zugeführt.  $N_2$  durchlief hier nicht die Adsorptionssäule, sondern wird vorher direkt zum Wärmeleitdetektor geleitet und gemessen. Zur Ermittlung der Menge der jeweiligen Elemente wurde die Wärmeleitfähigkeit vom reinen Helium mit der Wärmeleitfähigkeit des Gasgemisches aus der Adsorptionssäule verglichen und verrechnet.

Analog zum Prinzip der HPCL- Analyse wurde über Peaks die Konzentration der Stoffe erfasst, wobei diese über die Peakflächen ermittelt wurden und in Abhängigkeit zur Einwaage des Probenmaterials in % berechnet wurde.



### 4.3 Statistische Auswertung der Messergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die verschiedenen statistischen und mathematischen Berechnungen, die für die Ergebnisauswertung eingesetzt worden sind, beschrieben.

#### 4.3.1 Mittelwert

Der Mittelwert, der auch als arithmetisches Mittel bezeichnet wird, beschreibt den statistischen Durchschnittswert von zum Beispiel eines Datensatzes und gehört zu den Lageparametern der Statistik (Scheid und Vogl 2021). Zur Berechnung wurden die Werte des Datensatzes addiert und im Anschluss durch die Anzahl der vorhandenen Werte geteilt:

$$\bar{x}_{arithm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

#### 4.3.2 Median

Der Median ist der Wert, der exakt in der Mitte der Datenverteilung liegt. Er wird auch als Zentralwert bezeichnet (Scheid und Vogl 2021). Durch die Teilung der Messreihe ist immer eine Hälfte der gesammelten Daten kleiner als der Median und die andere Hälfte wiederum größer. Der Vorteil der Betrachtung des Medians ist die Robustheit gegenüber Ausreißerwerten, da hier die Ausreißer anders als beim Mittelwert keinen Einfluss haben. Gerade bei Gaswechselfmessungen, die möglicherweise geprägt von Ausreißerwerten sein können, ist die Betrachtung des Medians von großem Vorteil. Zur Berechnung des Medians ist es erforderlich, die Messdaten nach Größe zu sortieren (Scheid und Vogl 2021).

Bei einer ungeraden Anzahl von Messwerten gilt:

$$\tilde{x} = x_{\frac{n+1}{2}}$$

Dabei ist  $n$  die Anzahl der Messwerte,  $x$  der Messwert in der Messreihe und  $\tilde{x}$  der Median.

Bei einer geraden Anzahl von Messwerten gilt:

$$\tilde{x} = \frac{1}{2} (x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2} + 1})$$

Wie bei der Berechnung mit einer ungeraden Anzahl von Messwerten ist  $n$  die Anzahl der Messwerte,  $x$  der Messwert in der Messreihe und  $\tilde{x}$  der Median.

### 4.3.3 Normalverteilung

Die Normalverteilung beschreibt eine symmetrische Verteilungsform numerischer Daten und stellt ein Verteilungsmodell der Statistik dar (Scheid und Vogl 2021). Die Prüfung der Datensätze auf eine Normalverteilung ist ein notwendiges Instrument, um im Anschluss die richtigen Statistikverfahren auszuwählen. Beispielweise können bei einem Signifikanztest, wie dem *t-Test*, in der Regel nur normalverteilte Daten verwendet werden. Beim *Mann-Whitney-U-Test* können dagegen Daten auf signifikante Unterschiede untersucht werden, auch wenn diese nicht normalverteilt sind.

Die Prüfung auf Normalverteilung wurde mit dem *Shapiro-Wilk-Test* durchgeführt. Dafür wurde das Programm *SPSS Statistics, Version 27* eingesetzt.

### 4.3.4 Mann-Whitney-U-Test

Der *Mann-Whitney-U-Test* ist ein nicht-parametrischer Test, der eine Aussage darüber trifft, ob sich bei zwei unabhängigen Stichproben die Tendenzen signifikant voneinander unterscheiden (Scheid und Vogl 2021). Der *Mann-Whitney-U-Test* kann verwendet werden, wenn die notwendigen Voraussetzungen für den *t-Test* (z.B. Normalverteilung) nicht gegeben sind (Scheid und Vogl 2021). In dem Fall werden die Messwerte durch Ränge ersetzt und der Größe nach (aufsteigend) aufgereiht und im Anschluss rangiert. Dabei beginnt man beim kleinsten Messwert (Rang 1) und rangiert aufwärts. Dies wird für jede Messgruppe vorgenommen. Im Anschluss werden die

Rangsummen gebildet. Dabei werden die Ränge der verschiedenen Gruppen aufsummiert. Zur Berechnung der Teststatistik  $U$  wird die größere Rangsumme beider Gruppen ausgewählt (Rasch et al. 2021):

$$U = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - R_1$$

Dabei ist  $n_1$  die Stichprobengröße der Gruppe mit der höheren Rangsumme,  $n_2$  die Stichprobengröße der Gruppe mit der niedrigeren Rangsumme und  $R_1$  die höhere der beiden Rangsummen.

Zur Berechnung wurde das Programm *SPSS Statistics, Version 27* als Hilfsmittel genutzt.

#### 4.3.5 Signifikanztest

Beim Signifikanztest kann die Signifikanz berechnet werden, indem die Teststatistik  $U$  z- standardisiert wird.

Die Signifikanz kann wie folgt berechnet werden (Rasch et al. 2021):

$$z = \frac{U - \mu_U}{\sigma_U} = \frac{U - \frac{n_1 n_2}{2}}{\sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 1)}{n_{Gruppe}}}}$$

Dabei ist  $\mu_U$  der Mittelwert der U- Verteilung,  $\sigma_U$  der Standardfehler des U- Werts,  $n_1$  die Stichprobengröße der Gruppe mit der höheren Rangsumme und  $n_2$  die Stichprobengröße der Gruppe mit der niedrigeren Rangsumme.

Im Anschluss kann aus der asymptotischen Signifikanz (2-seitig) ermittelt werden, ob sich die Tendenzen voneinander signifikant unterscheiden. Dabei wurde das Signifikanzniveau bei allen Tests bei  $p < 0,05$  festgelegt.

Zur Berechnung wurde das Programm *SPSS Statistics, Version 27* genutzt.

#### 4.3.6 Effektstärke

Nach der Berechnung der Signifikanz kann die Effektstärke geschätzt werden. Die Effektstärke kann in drei Stufen unterteilt werden; in „schwach“, „mittel“ und „stark“. Zur Ermittlung der Effektstärke berechnet man den Korrelationskoeffizienten  $r$  wie folgt:

$$r = \left| \frac{z}{\sqrt{n}} \right|$$

Dabei ist  $n$  die Stichprobenanzahl im Gesamten also von beiden Gruppen. Im Anschluss kann kategorisiert werden, welche Effektstärke vorliegt. Die Effektstärken-Kategorien sind in Tabelle 5 wie folgt definiert (Cohen 1988):

$r$	Effektstärke
$r < 0,1$	schwach
$0,1 < r < 0,5$	mittel
$r > 0,5$	stark

Tabelle 5: Effektstärke

#### 4.3.7 Boxplot

Für die graphische Darstellung der Messergebnisse wurden Boxplot- Diagramme erstellt, um möglichst präzise die saisonalen Messergebnisse darstellen zu können.

In Abbildung 17 ist der Aufbau eines Boxplot- Diagramms dargestellt.

Dabei entspricht die dargestellte „Box“ dem Bereich, in dem sich die mittleren 50 % der Messergebnisse befinden (Scheid und Vogl 2021). Die Box schließt mit dem oberen und dem unteren Quartil ab. Die Länge zwischen dem oberen und dem unteren Quartil wird als Interquartilsabstand bezeichnet und ist ein Maß für die Streuung der Daten (mittlere 50 %). Innerhalb der Box befindet sich der Median, der das Boxplot-Diagramm genau mittig in zwei Bereiche aufteilt (Scheid und Vogl 2021). Innerhalb der Box als Kreuz gekennzeichnet befindet sich der Mittelwert. Außerhalb der Box befinden sich die „Whisker“, an deren Ende entweder der kleinste Datenwert oder der

größte Datenwert der Messreihe liegen. Oberhalb oder auch unterhalb der Whisker können sich gegebenenfalls Ausreißer befinden und werden als Punkte angegeben.

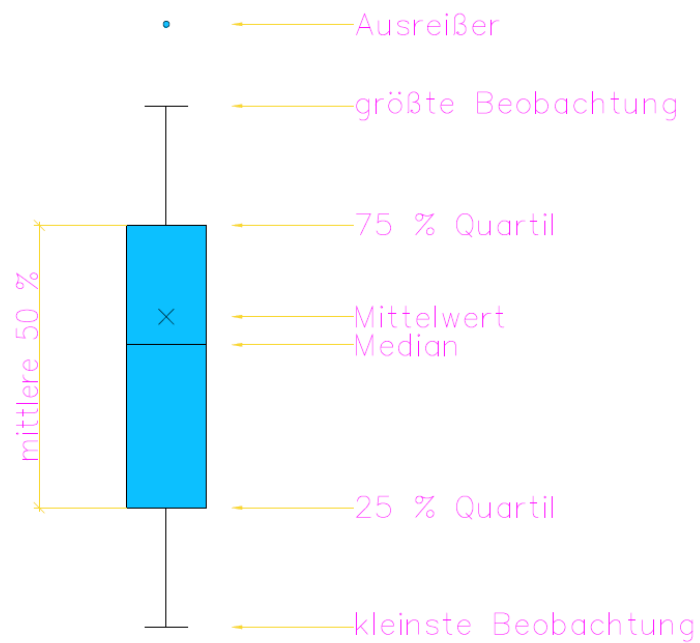


Abbildung 17: Aufbau eines Boxplots

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Nettphotosyntheserate

#### 5.1.1 Einjährige Pflanzen - Nettphotosyntheserate *Populus x canescens*

Die Nettphotosyntheseraten der Hybridpappel *Populus x canescens*, die entweder unter erhöhtem atmosphärischem  $CO_2$  oder der Umgebungsatmosphäre ausgesetzt war, unterschieden sich bis auf eine Ausnahme über den gesamten Messzeitraum signifikant voneinander. Dabei variierte die statistische Signifikanz von keinem vorhandenen signifikanten Effekt bis hin zu einer Signifikanz mit einer starken Effektstärke (Tabelle 6).

Zum Anfang der Wachstumsperiode war bei den Kontrollpflanzen und den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen ein ähnlich leichter Anstieg der Nettphotosyntheserate zu beobachten. Ab KW 25 war bei den Pflanzen der Kontrollgruppe eine stetige Abnahme der Nettphotosyntheserate erfasst worden, die bis zum Ende der Vegetationsperiode angehalten hat. Zum Ende des Messzeitraums hat sich die Abnahme der Nettphotosyntheserate nochmal verstärkt.

Bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen sind dagegen die Nettphotosyntheseraten während dem Messzeitraum abwechselnd gesunken und wieder angestiegen, wobei der Trend eher abwärts ging. Besonders ab KW 28 waren die Nettphotosyntheseraten bei den begasten Pflanzen im Vergleich zum Anfang der Messperiode reduziert. Zum Ende der Messperiode war jedoch noch ein leichter Anstieg der Nettphotosyntheseraten bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen zu beobachten. Größtenteils waren die Nettphotosyntheseraten der Pflanzen, die unter erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  gewachsen waren höher als bei Pflanzen der Kontrollgruppe, wobei in KW 28 die Nettphotosyntheseraten der Kontrollgruppe mit einer mittleren Effektstärke höher waren als die Werte der Pflanzen, die unter erhöhtem  $CO_2$  gewachsen waren. Die Spannweite der Messergebnisse war bei den begasten Pflanzen an den meisten Messtagen höher als bei den Kontrollpflanzen (Abbildung 18).

Im Saisondurchschnitt waren die Nettphotosyntheseraten der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen um 21,15 % höher als bei den Kontrollpflanzen. Dabei war der Effekt signifikant bei einer mittleren Effektstärke.

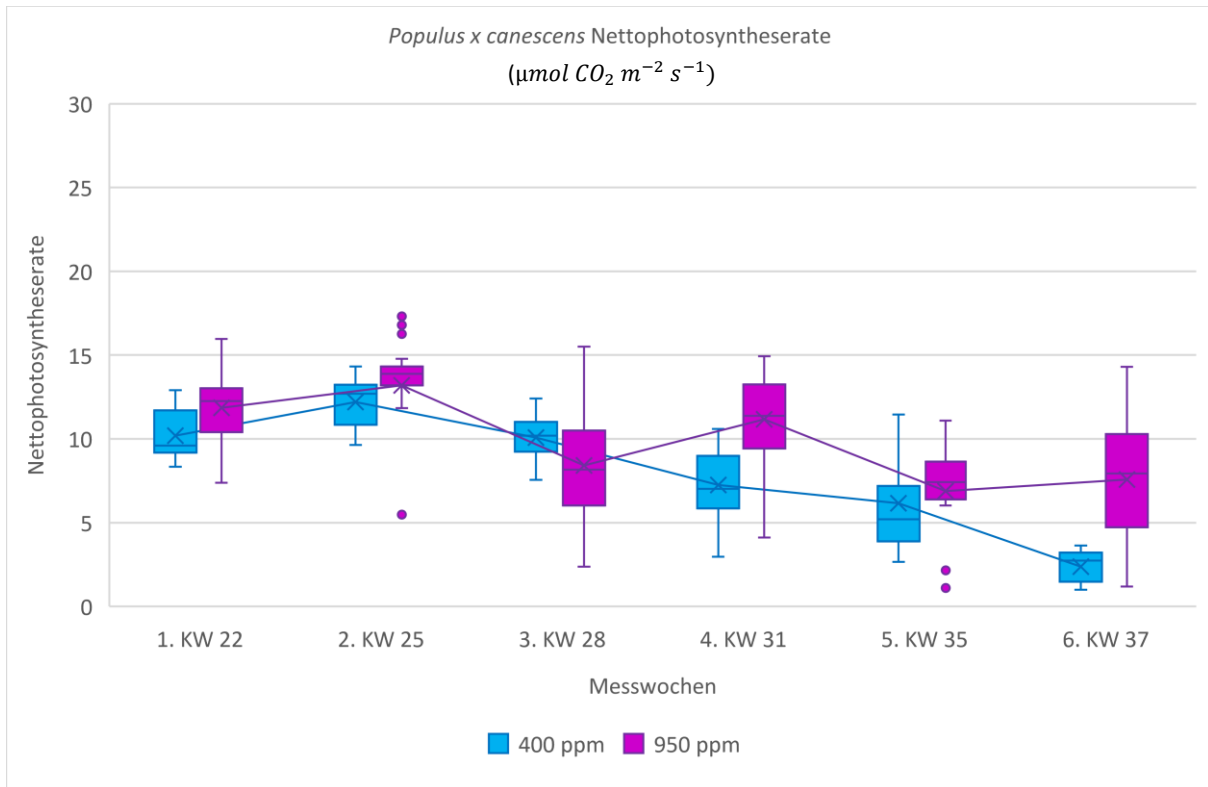


Abbildung 18: Nettophotosyntheserate von *Populus x canescens* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Nettophotosyntheserate	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,001	0,3	mittel
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,000	0,4	mittel
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,001	0,3	mittel
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,000	0,6	stark
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	nein	0,103	-	-
6. KW 37	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,000	0,5	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 400 ppm &lt; <i>P.x canescens</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,2</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 6: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von *P. x canescens* (400 ppm) und *P. x canescens* (950 ppm)

### 5.1.2 Einjährige Pflanzen - Nettophotosyntheserate *Populus tremula*

Die Nettophotosyntheserate von *Populus tremula* wurde durch die  $CO_2$ -Behandlung während der gesamten Messperiode größtenteils stark beeinflusst. Die Pflanzen, die einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration ausgesetzt waren, hatten signifikant höhere Nettophotosyntheseraten als die Kontrollpflanzen (Tabelle 7). Dabei war bei den Pflanzen, die Normalbedingungen ausgesetzt waren, zum Anfang der Messperiode

ein Anstieg der Nettophotosyntheserate zu verzeichnen. Ab KW 25 ist jedoch bei den Kontrollpflanzen die Nettophotosyntheserate immer weiter gesunken und war in KW 31 am niedrigsten. Nach einem wieder starken Anstieg in KW 35, bei dem sich die Messwerte beider Gruppen angenähert hatten, ist zum Ende der Messperiode die Nettophotosyntheserate wieder leicht gesunken (Abbildung 19).

Im direkten Vergleich waren die Nettophotosyntheseraten der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen zu jedem Zeitpunkt der Messperiode mit einer überwiegend starken Effektstärke signifikant höher als bei den Kontrollpflanzen. Dabei war die Nettophotosyntheserate der begasten Pflanzen zu Beginn der Messperiode konstant. Ab KW 25 war ein starker Rückgang der Nettophotosyntheserate zu beobachten, worauf eine konstante Periode folgte. Ab KW 31 ist die Nettophotosyntheserate der begasten Pflanzen wieder gestiegen, wobei der Trend bis zum Ende der Messperiode angehalten hat. Hohe Durchschnittswerte wie zu Beginn der Messungen wurden aber nicht erreicht. Auch ist bei den begasten Pflanzen zum großen Teil eine deutlich höhere Spannweite bei den Messergebnissen erfasst worden als bei der Kontrollgruppe. Besonders in KW 37 war die Spannweite so hoch, dass einzelne Messwerte zum Teil die Messwerte zu Beginn der Messperiode übertroffen haben (Abbildung 19).

Im Gesamtdurchschnitt waren die Nettophotosyntheseraten der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen um 63,43 % höher als bei den Kontrollpflanzen. Dabei waren die Unterschiede bei einer starken Effektstärke signifikant.



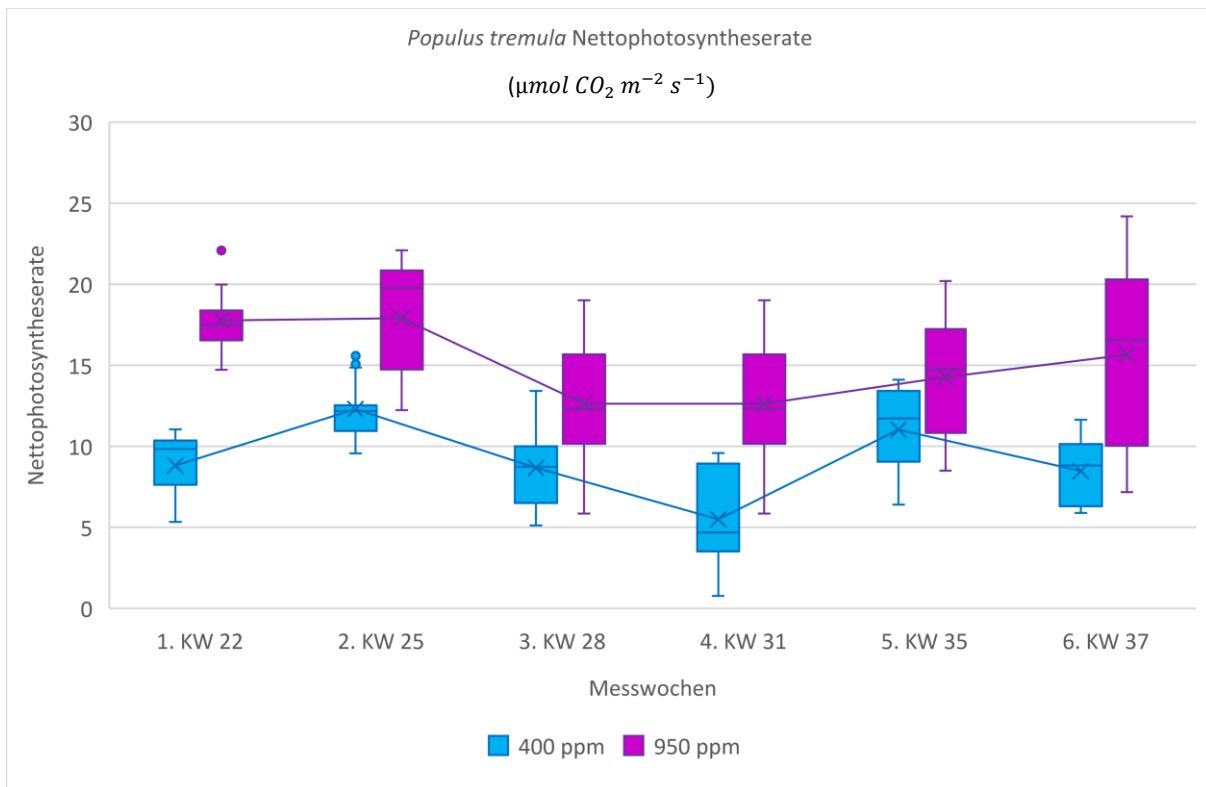


Abbildung 19: Nettophotosyntheserate von *Populus tremula* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Nettophotosyntheserate	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
2. KW 25	<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,71	stark
3. KW 28	<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,55	stark
4. KW 31	<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,77	stark
5. KW 35	<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,50	mittel
6. KW 37	<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,57	stark
Saison gesamt	<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,61	stark

Tabelle 7: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von *P. tremula* (400 ppm) und *P. tremula* (950 ppm)

### 5.1.3 Einjährige Pflanzen - Nettophotosyntheserate *Populus alba*

Die Nettophotosyntheseraten der Pappelart *Populus alba* unterschieden sich über die gesamte Messperiode stark zwischen Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren und Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen gewachsen sind.

Während der gesamten Vegetationsperiode sind signifikante Unterschiede mit einer starken Effektstärke zwischen den Messwerten beider Gruppen beobachtet worden (Tabelle 8).

Bei den Kontrollpflanzen war zu Anfang der Messperiode ein starker Anstieg bei den Nettophotosyntheseraten zu beobachten. Nach dem Anstieg folgte jedoch ein Rückgang, der bis KW 31 angehalten hat und zu dem Zeitpunkt am niedrigsten war. Darauf folgte wieder ein starker Anstieg der Nettophotosyntheserate, wobei die Messwerte sich häufig mit den Messwerten der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen überschritten haben. Zum Ende der Messperiode ist jedoch die Nettophotosyntheserate bei den Kontrollpflanzen wieder rückläufig gewesen und war unter dem Niveau als zu Beginn der Messungen (Abbildung 20).

Bei den Pflanzen, die einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration ausgesetzt waren, folgte nach einer kurzen konstanten Phase zu Beginn der Messungen auch hier ein Rückgang der Nettophotosyntheseraten, der bis KW 31 angehalten hat. Dabei waren die Unterschiede zur Kontrollgruppe zwischen KW 28 und KW 31 besonders hoch. Zum Zeitpunkt KW 31 war die Nettophotosyntheserate konstant auf einem Niveau. Am Ende der Messperiode konnte auch bei dieser Gruppe eine rückläufige Nettophotosyntheserate gemessen werden.

Im Saisondurchschnitt hatten die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen um 87,03 % höhere Nettophotosyntheseraten als die Kontrollpflanzen. Es lag ein signifikanter Effekt bei einer starken Effektstärke vor (Abbildung 20).

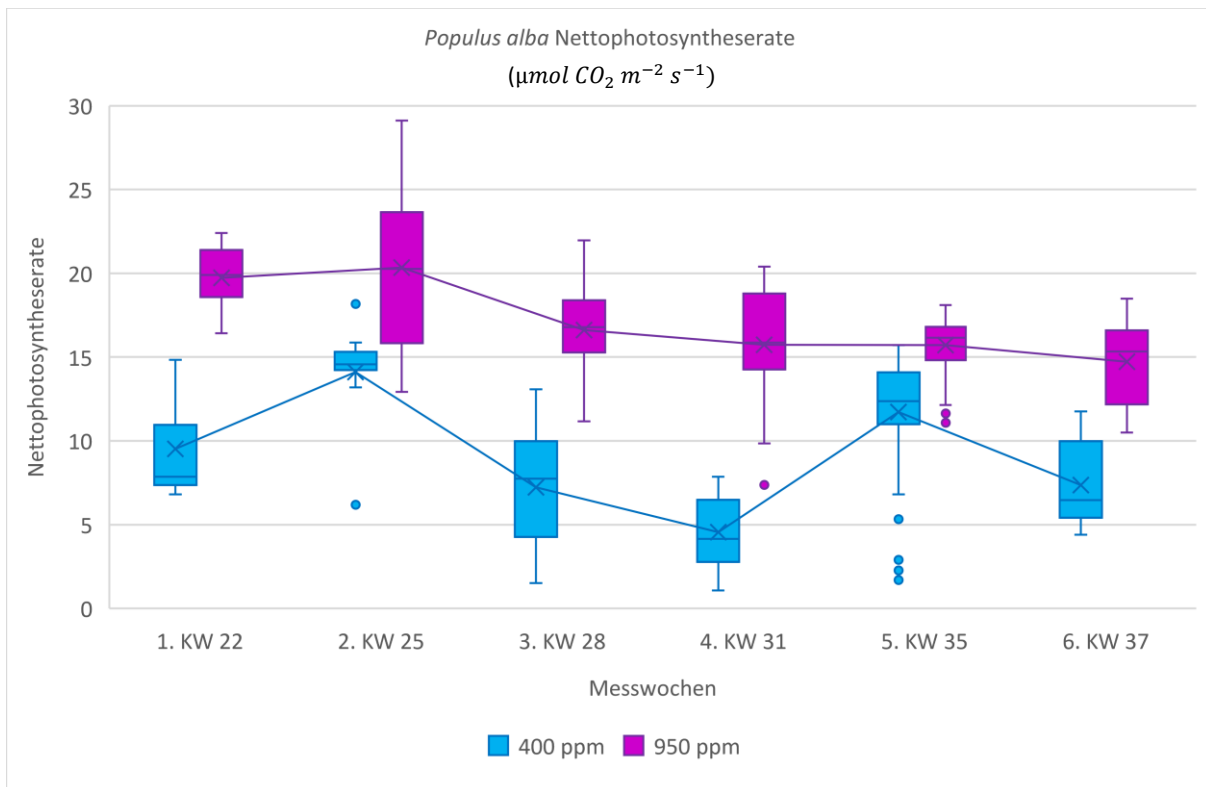


Abbildung 20: Nettphotosyntheserate von *Populus alba* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $\text{CO}_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Nettphotosyntheserate	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
2. KW 25	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,58	stark
3. KW 28	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,0000	0,84	stark
4. KW 31	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
5. KW 35	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,0000	0,67	stark
6. KW 37	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,83	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P. alba</i> 400 ppm &lt; <i>P. alba</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,73</b>	<b>stark</b>

Tabelle 8: Signifikanztest zwischen den Nettphotosyntheseraten von *P. alba* (400 ppm) und *P. alba* (950 ppm)

#### 5.1.4 Einjährige Pflanzen - Nettphotosyntheserate Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen

Unter Normalbedingungen sind zwischen der Hybridpappel *Populus x canescens* und den beiden Pappelarten *Populus tremula* und *Populus alba* wechselhafte Trends während der Vegetationsperiode beobachtet worden. Im ersten Teil der Messperiode waren die Nettphotosyntheseraten der Hybridpappeln zum Teil höher als bei den Arten *Populus tremula* und *Populus alba*. Dabei hatten alle Gruppen zunächst einen

ähnlichen Trend. Nach einem kurzen Anstieg der Nettophotosyntheseraten sind bei allen Arten die Nettophotosyntheseraten der Pflanzen wieder gesunken, wobei auch hier die Nettophotosyntheseraten der Hybridpappeln zum Teil signifikant höher waren. Dies änderte sich ab KW 35, da sich bei den Hybridpappeln der Abwärtstrend fortgesetzt hat und bei *Populus tremula* und *Populus alba* ein sehr starker Anstieg der Nettophotosyntheseraten beobachtet worden ist, wodurch sich zum Ende der Messperiode die Werte der Arten stark unterschieden haben. So waren die Nettophotosyntheseraten von *Populus tremula* und *Populus alba* so hoch, dass es bei den Messwerten zu den Hybridpappeln keine Überschneidungen gegeben hat (Abbildung 21).

Im Jahresdurchschnitt waren die Nettophotosyntheseraten der Art *Populus tremula* um 12,21 % höher als bei den Hybridpappeln. Die Werte haben sich signifikant voneinander unterschieden, bei einer mittleren Effektstärke (Tabelle 9).

Auch die Pflanzen der Art *Populus alba* waren im Saisondurchschnitt um 11,07 % höher als bei *Populus x canescens*. Jedoch haben die Werte sich im Saisondurchschnitt nicht signifikant voneinander unterschieden (Tabelle 10).

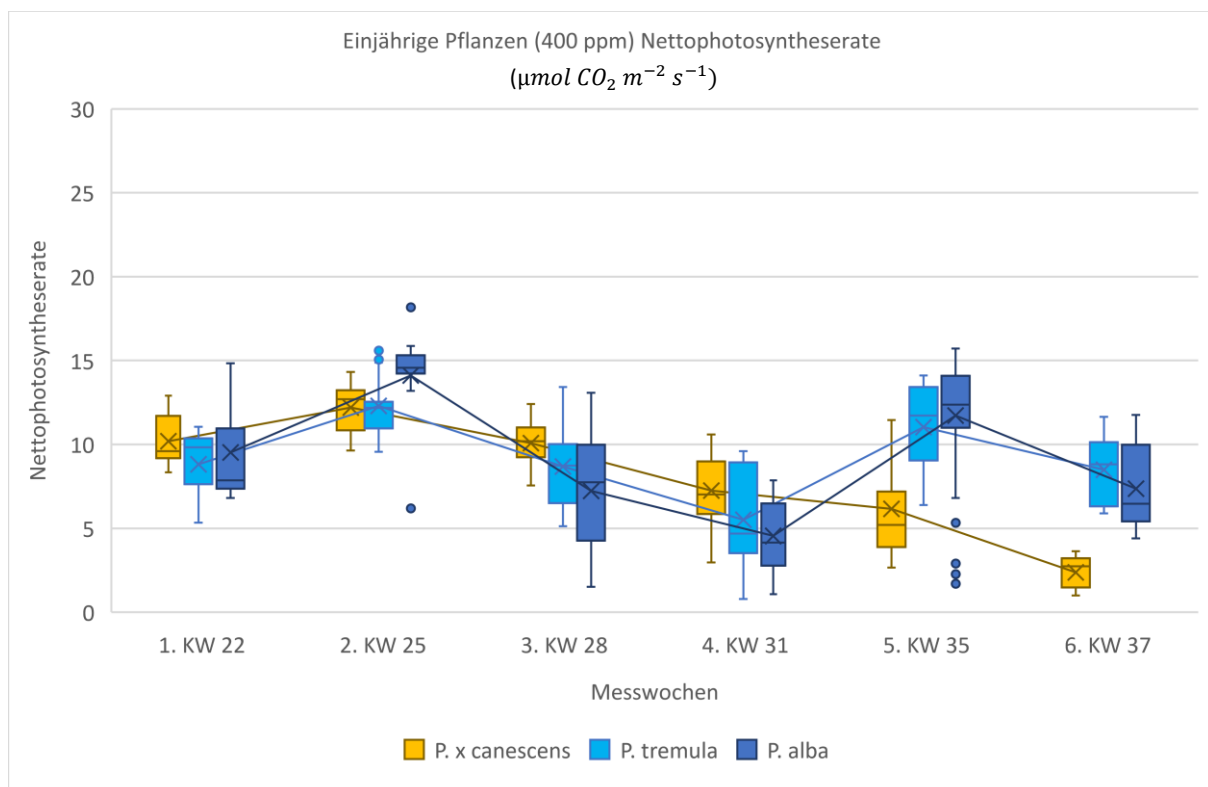


Abbildung 21: Vergleich der Nettophotosyntheseraten von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Nettophotosyntheserate	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	ja	0,007	0,29	mittel
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	nein	1,000	-	-
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	ja	0,003	0,33	mittel
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	nein	0,012	-	-
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 400 ppm	ja	0,000	0,61	stark
6. KW 37	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 400 ppm	ja	0,000	0,95	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 400 ppm &lt; <i>P. tremula</i> 400 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,009</b>	<b>0,12</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 9: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von *P. x canescens* und *P. tremula* unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Nettophotosyntheserate	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,007	0,29	mittel
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,000	0,54	stark
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,000	0,49	mittel
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,000	0,51	stark
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,000	0,72	stark
6. KW 37	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,000	0,76	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 400 ppm &lt; <i>P. alba</i> 400 ppm</b>	<b>nein</b>	<b>0,077</b>	<b>-</b>	<b>-</b>

Tabelle 10: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von *P. x canescens* und *P. alba* unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

### 5.1.5 Einjährige Pflanzen - Nettophotosyntheserate Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration

Im direkten Vergleich zwischen *Populus x canescens* und den Arten *Populus tremula* sowie *Populus alba* hatten die Hybridpappeln unter erhöhter atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration während fast der gesamten Messperiode signifikant geringere Nettophotosyntheseraten als *Populus tremula* und *Populus alba* (Tabelle 11, Tabelle 12).

Im Gesamtdurchschnitt war die Nettophotosyntheserate von *Populus tremula* um 51,37 % und bei *Populus alba* um 71,46 % höher als bei den Hybridpappeln. Bei beiden Vergleichen waren die Unterschiede signifikant, bei einer starken Effektstärke. Die Spannweite der Messergebnisse war bei allen Arten ähnlich.

Während der gesamten Messperiode wurden zwischen *Populus x canescens* und den beiden Pappelarten zum großen Teil statistisch starke Effektstärken ermittelt. Nur in KW 31 waren die Messwerte zwischen der Hybridpappel und *Populus tremula* ähnlich, wobei hier weiterhin die Unterschiede statistisch signifikant waren.

Während der gesamten Messzeit waren die Verläufe der Nettophotosyntheserate der beiden Pappelarten konstant und folgten einem mittelfristigen Trend. Bei der Hybridpappel war im direkten Vergleich der Saisonverlauf eher geprägt von stärkeren Schwankungen bei den Messwerten der Nettophotosyntheserate. Dadurch ist es gerade bei Messwochen, in denen die Nettophotosyntheserate bei den Hybridpappeln höher war, zu größeren Überschneidungen der Messwerte von den beiden Pappelarten gekommen (Abbildung 22).

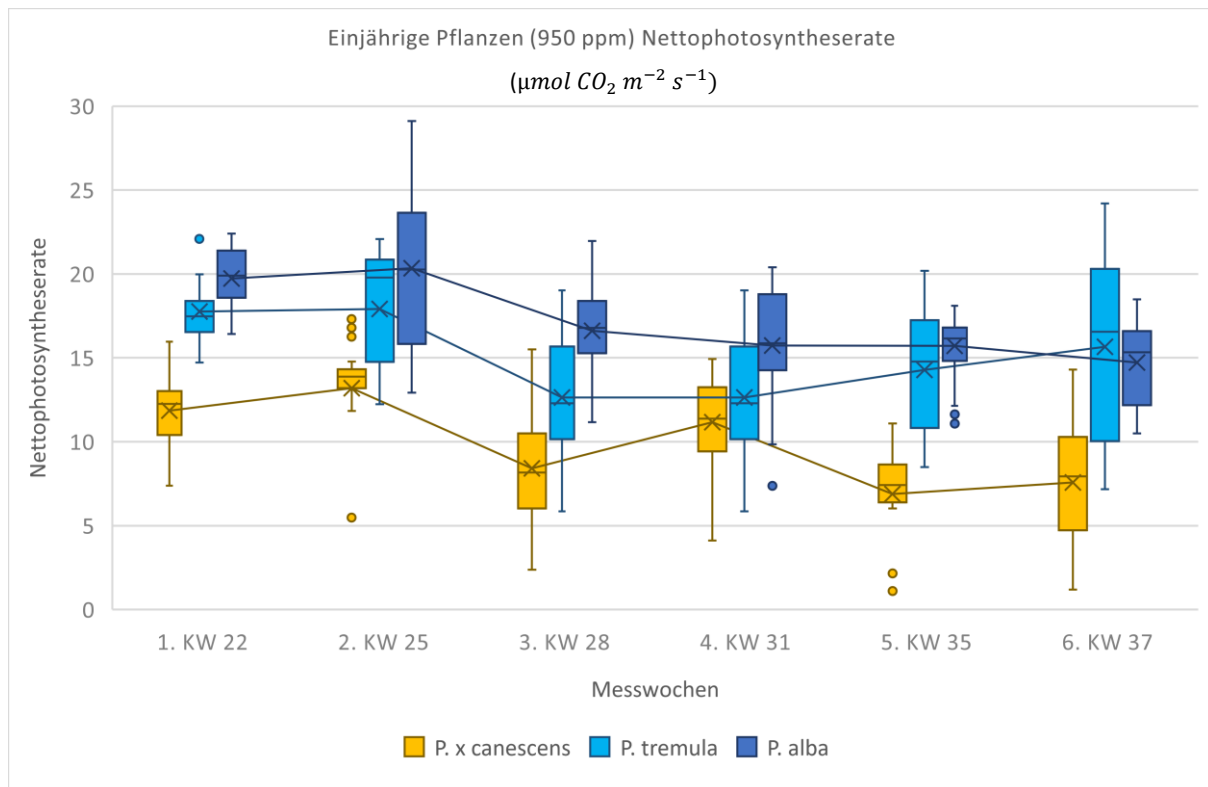


Abbildung 22: Vergleich der Nettophotosyntheseraten von einjährigen Pflanzen unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Nettophotosyntheserate	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,67	stark
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,55	stark
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,45	mittel
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,136	-	-
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,74	stark
6. KW 37	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,67	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 950 ppm &lt; <i>P. tremula</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,53</b>	<b>stark</b>

Tabelle 11: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von *P. x canescens* und *P. tremula* unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Nettophotosyntheserate	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	1,00	stark
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,71	stark
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,59	stark
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,91	stark
6. KW 37	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,67	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 950 ppm &lt; <i>P. alba</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,73</b>	<b>stark</b>

Tabelle 12: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von *P. x canescens* und *P. alba* unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

### 5.1.6 Stecklinge - Nettophotosyntheserate *Populus x canadensis*

Die Stecklinge der Hybridpappel *Populus x canadensis* wiesen abhängig von der  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre signifikant unterschiedliche Nettophotosyntheseraten auf (Tabelle 13). Dabei waren die Nettophotosyntheseraten der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen in der Regel höher als bei den Kontrollpflanzen, die Normalbedingungen ausgesetzt waren.

Bei den Kontrollpflanzen erfolgte am Anfang der Messperiode ein leichter Anstieg der Nettophotosyntheserate, die aber ab KW 25 wieder rückläufig war. Ab KW 31 sind die Werte wieder stark angestiegen, jedoch war dieser Effekt nur von kurzer Dauer, da ab KW 35 bis zum Ende der Messperiode die Nettophotosyntheserate wieder stark gesunken ist und in KW 37 am niedrigsten war.

Während der Wachstumsperiode waren bei den Stecklingen, die erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  ausgesetzt waren, die Nettophotosyntheseraten deutlich höher als bei den Kontrollpflanzen, wobei die KW 28 hier eine Ausnahme darstellt.

Von Beginn der Saison an ist bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen die Nettophotosyntheserate bis KW 28 gesunken. Zu dem Zeitpunkt waren die durchschnittlichen Werte sogar unter denen der Kontrollpflanzen, wobei die Spannweite der Messergebnisse deutlich höher war und die Spannweite der Kontrollpflanzen deutlich übertroffen wurde. Nach einem Anstieg der Werte waren ab KW 31 die Nettophotosyntheseraten der Pflanzen, die unter erhöhten  $CO_2$  gewachsen waren, relativ konstant, wobei ein leichter Abwärtstrend zu beobachten war. Dabei haben sich die Spannweiten der Messergebnisse immer weiter reduziert. Zum Ende

der Messperiode waren die Nettophotosyntheseraten der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen deutlich höher als die der Kontrollpflanzen (Abbildung 23).

Im Saisonschnitt hatten die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen um 36,43 % höhere Nettophotosyntheseraten als die Kontrollpflanzen. Es lag eine statistische Signifikanz vor, mit einer starken Effektstärke.

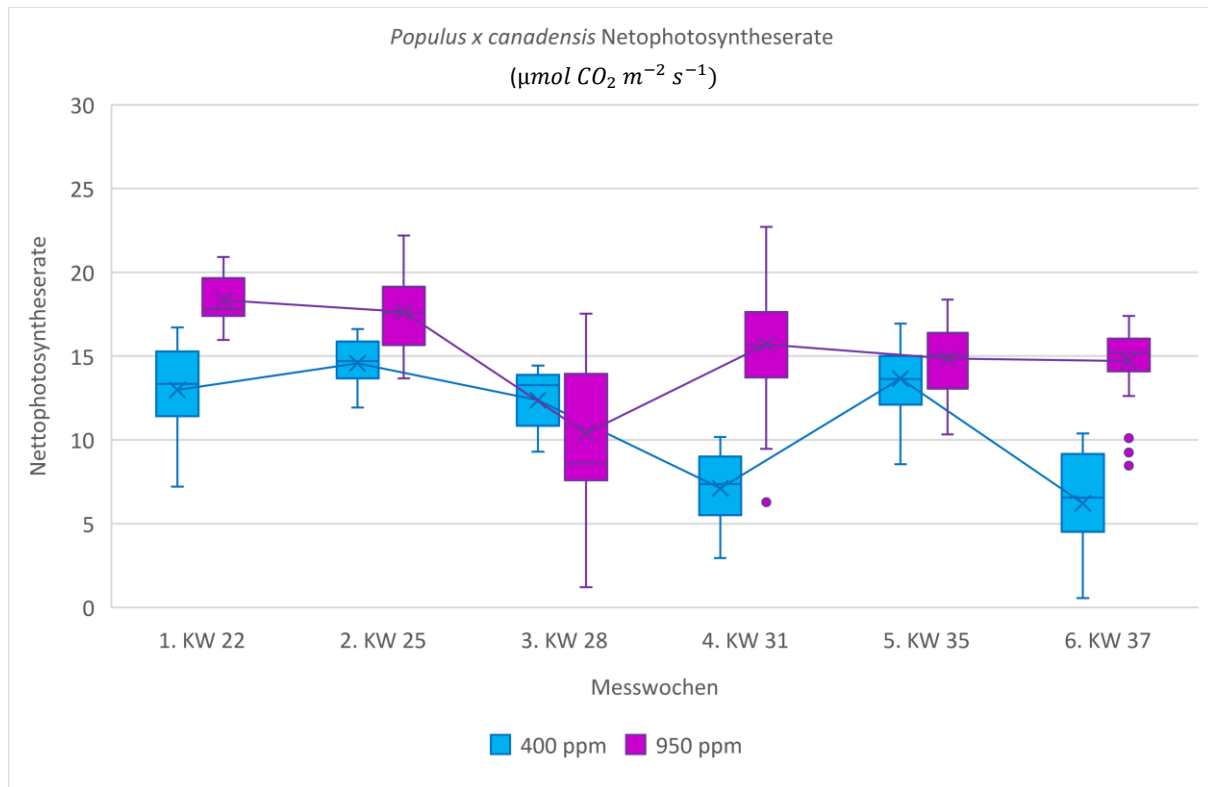


Abbildung 23: Nettophotosyntheserate von *Populus x canadensis* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Nettophotosyntheserate	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,000	0,84	stark
2. KW 25	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,000	0,61	stark
3. KW 28	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,003	0,28	mittel
4. KW 31	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,000	0,84	stark
5. KW 35	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,003	0,28	mittel
6. KW 37	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,000	0,82	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canadensis</i> 400 ppm &lt; <i>P.x canadensis</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,51</b>	<b>stark</b>

Tabelle 13: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von *P. x canadensis* (400 ppm) und *P. x canadensis* (950 ppm)



### 5.1.7 Stecklinge - Nettphotosyntheserate *Populus nigra*

Die Nettphotosyntheseraten der Art *Populus nigra*, die entweder unter erhöhten atmosphärischen  $CO_2$  oder unter Umgebungsbedingungen gewachsen sind, haben sich während der gesamten Messperiode signifikant voneinander unterschieden (Tabelle 14).

Die Pflanzen der Kontrollgruppe, die Umgebungsbedingungen ausgesetzt waren, haben zu Beginn der Messperiode eine Steigerung der Nettphotosyntheserate erfahren, wobei in KW 25 bereits der Höhepunkt erreicht worden ist. In den folgenden Messtagen ist die Nettphotosyntheserate der Kontrollpflanzen stark gesunken und erreichte den durchschnittlichen Minimalwert in KW 31. Zum Ende der Messperiode ist die Nettphotosyntheserate wieder angestiegen, am Ende der Vegetationsperiode (KW 37) aber wieder gesunken. Die Werte haben sich zum Teil mit den Werten der begasten Pflanzen überschritten. Dabei haben sich die Daten in jeder Messwoche signifikant voneinander unterschieden.

Die Nettphotosyntheseraten der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen waren im direkten Vergleich deutlich höher. Dabei variierte die ermittelte Effektstärke zwischen „mittel“ und „stark“. Die Pappeln, die unter erhöhten  $CO_2$ - Bedingungen gewachsen sind, zeigten zunächst von KW 22 bis KW 25 einen leichten Anstieg der Nettphotosynthese, die dann bis KW28 wieder gesunken ist. Während der restlichen Wachstumsperiode war die Nettphotosyntheserate konstant, wobei bis zum Messende eine leichte Zunahme der Rate zu beobachten war. Die Spannweiten der Messergebnisse beider Gruppen war über die gesamte Messperiode gesehen ähnlich und war von Schwankungen geprägt (Abbildung 24).

Die Nettphotosyntheseraten der Pflanzen, die einer erhöhten  $CO_2$ - Konzentration ausgesetzt waren, übertrafen die Werte der Kontrollpflanzen um 34,68 % im Saisondurchschnitt. Es hat eine statistische Signifikanz zwischen den Werten vorgelegen, bei einer starken Effektstärke.

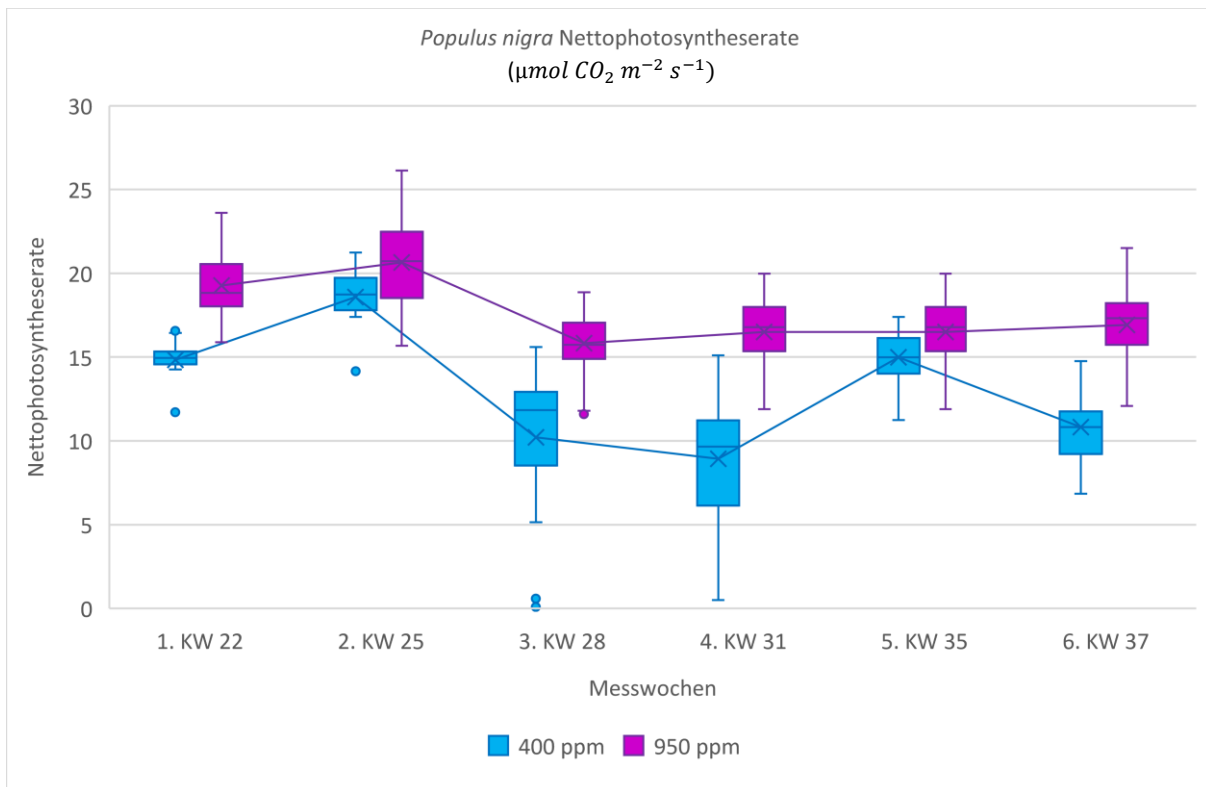


Abbildung 24: Nettophotosyntheserate von *Populus nigra* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Nettophotosyntheserate	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,85	stark
2. KW 25	<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,37	mittel
3. KW 28	<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,76	stark
4. KW 31	<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,79	stark
5. KW 35	<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,38	mittel
6. KW 37	<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,81	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P. nigra</i> 400 ppm &lt; <i>P. nigra</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,55</b>	<b>stark</b>

Tabelle 14: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von *P. nigra* (400 ppm) und *P. nigra* (950 ppm)

### 5.1.8 Stecklinge - Nettophotosyntheserate *Populus deltoides*

Die Nettophotosyntheseraten der Pappelart *Populus deltoides*, die entweder erhöhten  $CO_2$ -Bedingungen oder Umgebungsbedingungen ausgesetzt waren, haben sich während der Wachstumsperiode signifikant voneinander unterschieden (Tabelle 15). Dabei war bis auf eine Ausnahme in KW 25 die Effektstärke der Signifikanz durchweg stark.

Die Pappeln der Kontrollgruppe hatten von KW 22 zu KW 25 einen leichten Anstieg der Nettophotosyntheserate erfahren, die sich in KW 25 nah an die Werte der mit  $CO_2$  begasten Gruppe angenähert hatte. Nach einem anschließenden deutlichen Rückgang der Nettophotosyntheserate von KW 25 auf KW 28, waren ab KW 28 bis zum Ende der Wachstumsperiode die Werte auf einem konstanten Niveau, wobei bis KW 35 ein leichter Anstieg und zum Messende ein leichter Rückgang zu beobachten war.

Die Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, hatten von KW 22 auf KW 25 einen rückläufigen Trend der Nettophotosyntheserate. Im Anschluss ist bis KW 31 die Nettophotosyntheserate der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen wieder leicht angestiegen. Ab KW 31 ist die Rate kontinuierlich gesunken und hatte zum Messende auf die gesamte Messperiode gesehen den niedrigsten Wert. Auch hier haben die Messwerte beider Gruppen sich zum Teil überschritten, wobei die durchschnittlichen Werte der Kontrollgruppe deutlich unter den Werten der begasten Gruppe gelegen haben.

Die Spannweiten der Messergebnisse waren bei beiden Gruppen ähnlich und waren von Schwankungen geprägt (Abbildung 25).

Die Nettophotosyntheseraten der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen waren während der Messperiode im Durchschnitt um 68,40 % höher als bei den Kontrollpflanzen. Es lag eine Signifikanz mit einer starken Effektstärke vor.

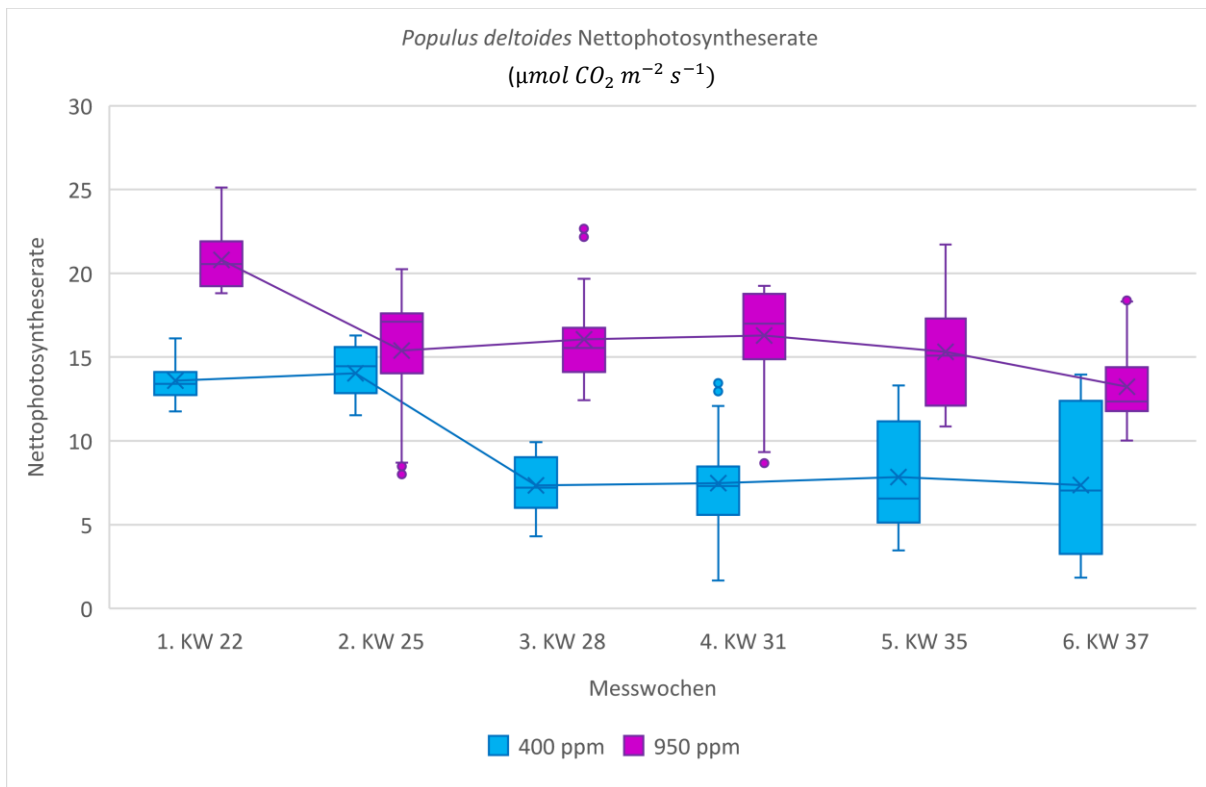


Abbildung 25: Nettophotosyntheserate von *Populus deltoides* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $\text{CO}_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Nettophotosyntheserate	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
2. KW 25	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,001	0,31	mittel
3. KW 28	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
4. KW 31	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,81	stark
5. KW 35	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,78	stark
6. KW 37	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,56	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P. deltoides</i> 400 ppm &lt; <i>P. deltoides</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,63</b>	<b>stark</b>

Tabelle 15: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von *P. deltoides* (400 ppm) und *P. deltoides* (950 ppm)

### 5.1.9 Stecklinge – Nettophotosyntheserate Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen

Beim Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canadensis* und den beiden Pappelarten *Populus nigra* und *Populus deltoides* sind unter Normalbedingungen zum Teil signifikante Unterschiede bei den Nettophotosyntheseraten erfasst worden.

Beim direkten Vergleich zwischen der Hybridpappel und *Populus deltoides* sind weniger signifikante Unterschiede während der Messperiode beobachtet worden

(Tabelle 17). Beide Arten hatten zunächst einen ähnlichen Trendverlauf. Da aber die Nettphotosyntheserate bei *Populus deltoides* ab KW 25 schneller gefallen ist als bei der Hybridpappel, konnte in KW 28 ein signifikanter Unterschied zwischen den Arten ermittelt werden. In KW 31 waren die Werte beider Arten sehr ähnlich und haben sich nicht signifikant voneinander unterschieden. Durch den danach kurz anhaltenden Anstieg der Nettphotosyntheserate der Hybridpappel waren die Werte abermals signifikant unterschiedlich. Zum Ende der Messperiode waren die Werte jedoch wieder auf einem ähnlichen Niveau. Während der gesamten Messperiode war die Nettphotosyntheserate von *Populus deltoides* um 14,28 % geringer als bei den Hybridpappeln wobei die Unterschiede signifikant waren, bei einer mittleren Effektstärke.

Zwischen der Hybridpappel und der Art *Populus nigra* waren die Unterschiede stärker. Zum großen Teil waren hier die Nettphotosyntheseraten von *Populus nigra* signifikant höher (Tabelle 16). Auch waren die Trends der beiden Gruppen ähnlich, wobei der anfängliche Anstieg der Nettphotosyntheserate bei der Art *Populus nigra* deutlich stärker war und der anschließende Rückgang deutlich schneller war als bei der Hybridpappel. Zum Ende der Messperiode haben sich die Werte beider Arten etwas angenähert. Nach einem ähnlich wiederholt starken Anstieg zu KW 35 ist zum Ende der Messperiode die Nettphotosyntheserate der Hybridpappeln schneller rückläufig gewesen (Abbildung 26). Über die gesamte Messperiode gesehen war die Nettphotosyntheserate von *Populus nigra* um 16,62 % höher als bei der Hybridpappel. Dabei waren die Unterschiede signifikant, bei einer mittleren Effektstärke.

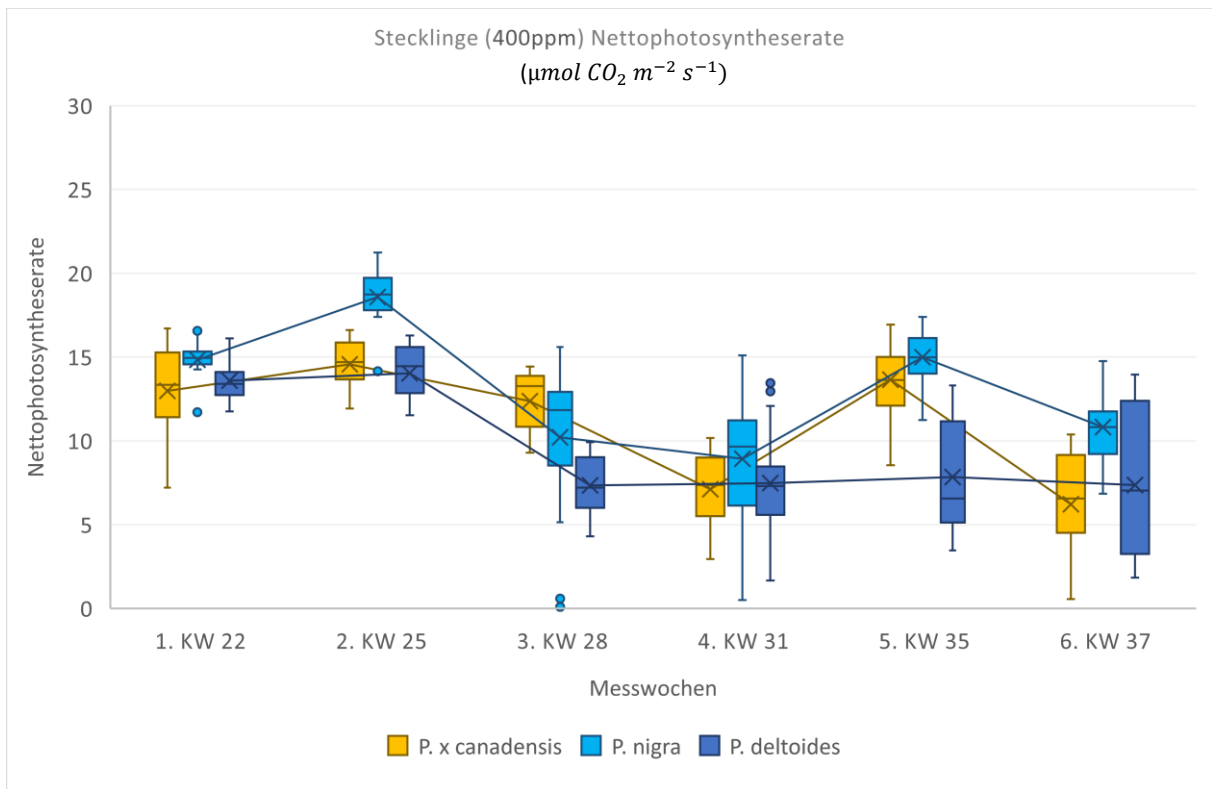


Abbildung 26: Vergleich der Nettophotosyntheseraten von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Nettophotosyntheserate	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,000	0,41	mittel
2. KW 25	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,000	0,70	stark
3. KW 28	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,007	0,29	mittel
4. KW 31	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,033	0,24	mittel
5. KW 35	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,026	0,25	mittel
6. KW 37	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,000	0,61	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canadensis</i> 400 ppm &lt; <i>P. nigra</i> 400 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,21</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 16: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von *P. x canadensis* und *P. nigra* unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Nettophotosyntheserate	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	nein	1,000	-	-
2. KW 25	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	nein	0,747	-	-
3. KW 28	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	ja	0,000	0,80	stark
4. KW 31	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	nein	1,000	-	-
5. KW 35	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	ja	0,000	0,67	stark
6. KW 37	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 400 ppm	nein	0,277	-	-
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canadensis</i> 400 ppm &gt; <i>P. deltoides</i> 400 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,19</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 17: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von *P. x canadensis* und *P. deltoides* unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

### 5.1.10 Stecklinge – Netto-Photosynthese Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration

Im direkten Vergleich hatten die Hybridpappeln *Populus x canadensis* gegenüber den Pappelarten *Populus nigra* und *Populus deltoides* größtenteils signifikant geringere Nettphotosyntheseraten.

Dabei waren die Unterschiede der Nettphotosyntheseraten zwischen *Populus x canadensis* und *Populus nigra* am höchsten, wobei die Effektstärke stark variierte (Tabelle 18). Beide Arten zeigten einen ähnlichen Verlauf der Nettphotosyntheserate während der Wachstumsperiode.

Im Saisonschnitt hatte *Populus nigra* um 15,12% höhere Nettphotosyntheseraten als die Hybridpappel *Populus x canadensis*. Dabei waren die Unterschiede signifikant bei einer mittleren Effektstärke.

Bei der Gegenüberstellung der Ergebnisse von *Populus x canadensis* und *Populus deltoides* waren die Unterschiede wechselhaft, wobei die größten Unterschiede in KW28 zu beobachten waren. Im weiteren Saisonverlauf näherten sich die Nettphotosyntheseraten beider Arten wieder an und zeigten im Rest der Wachstumsperiode konstante Werte. An zwei Messtagen war die Nettphotosyntheserate der Hybridpappel mit einer schwachen und mittleren Effektstärke höher als bei *Populus deltoides* (Tabelle 19). Bei den restlichen Versuchstagen war jedoch die Nettphotosyntheserate von *Populus deltoides* in der Regel mit einer variierenden Effektstärke signifikant höher, wobei in KW 31 und KW 32 kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Arten zu beobachten war. Die Spannweiten der Messergebnisse war bei allen Arten ähnlich, wobei die Hybridpappel-*Populus x canadensis* zum Teil sehr hohe Spannweiten im direkten Vergleich zu den beiden Pappelarten hatte (Abbildung 27).

Im Durchschnitt waren die Nettphotosyntheseraten von *Populus deltoides* um 5,79 % höher als bei den Hybridpappeln. Dabei unterschieden sich die Werte signifikant, bei einer schwachen Effektstärke.

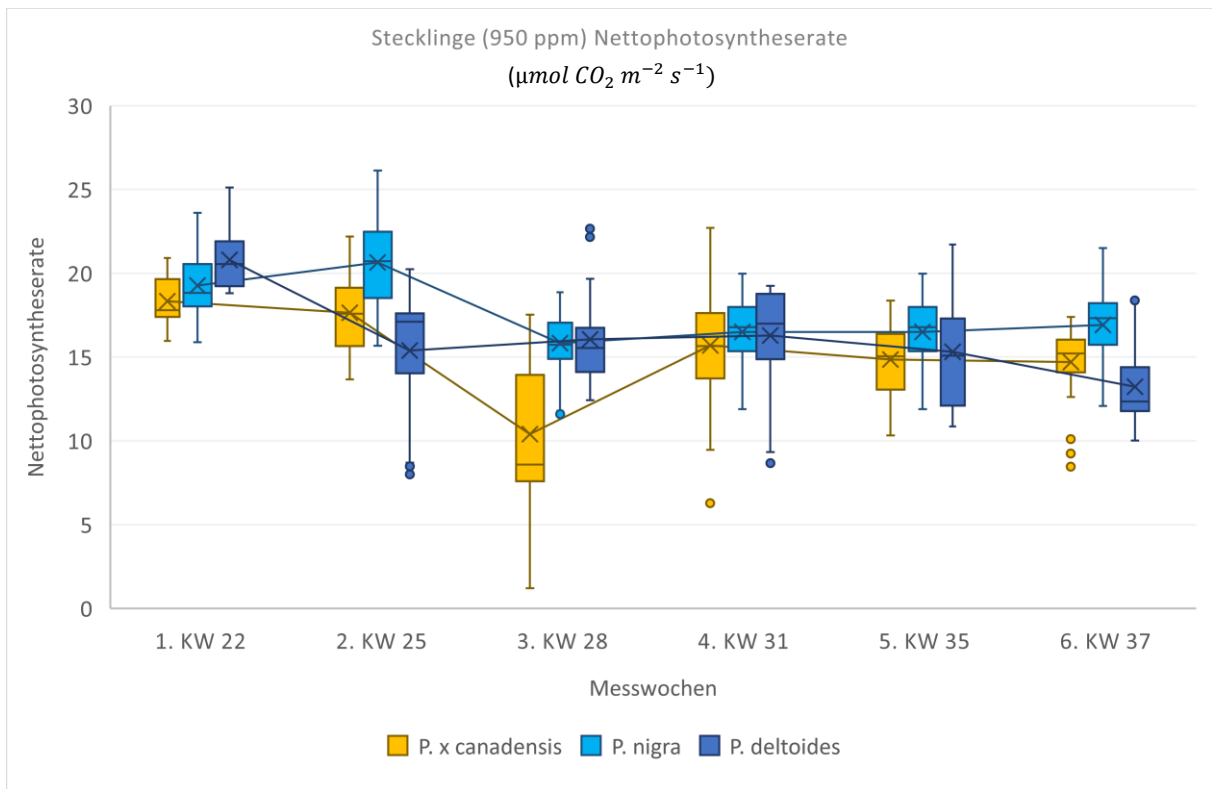


Abbildung 27: Vergleich der Nettophotosyntheseraten von Stecklingen unter erhöhter  $\text{CO}_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Nettophotosyntheserate	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,03	0,25	schwach
2. KW 25	<i>P. x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,47	mittel
3. KW 28	<i>P. x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,67	stark
4. KW 31	<i>P. x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,184	-	-
5. KW 35	<i>P. x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,002	0,32	mittel
6. KW 37	<i>P. x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,41	mittel
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P. x canadensis</i> 950 ppm &lt; <i>P. nigra</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,050</b>	<b>0,30</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 18: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von *P. x canadensis* und *P. nigra* unter erhöhter  $\text{CO}_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Nettophotosyntheserate	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,64	stark
2. KW 25	<i>P. x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,043	0,24	schwach
3. KW 28	<i>P. x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,61	stark
4. KW 31	<i>P. x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,184	-	-
5. KW 35	<i>P. x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	1,000	-	-
6. KW 37	<i>P. x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,004	0,30	mittel
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P. x canadensis</i> 950 ppm &lt; <i>P. deltoides</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,050</b>	<b>0,09</b>	<b>schwach</b>

Tabelle 19: Signifikanztest zwischen den Nettophotosyntheseraten von *P. x canadensis* und *P. deltoides* unter erhöhter  $\text{CO}_2$ -Konzentration (950 ppm)



## 5.2 Stomatäre Leitfähigkeit

### 5.2.1 Einjährige Pflanzen - Stomatäre Leitfähigkeit *Populus x canescens*

Bei der Hybridpappel *Populus x canescens* hatte eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration über die gesamte Messperiode nur zum Teil einen signifikanten Einfluss auf die stomatäre Leitfähigkeit der Pflanzen (Tabelle 20). Besonders zu Anfang und zum Ende der Messperiode waren die Unterschiede signifikant.

Bei den Pflanzen der Kontrollgruppe hat zum Anfang der Messperiode die stomatäre Leitfähigkeit zunächst zugenommen, wobei dieser Trend bis KW 28 angehalten hat. Ab KW 28 bis zum Ende der Messperiode ist die stomatäre Leitfähigkeit der Kontrollpflanzen wieder kontinuierlich gesunken und war am Ende der Messungen unter dem Niveau zu Beginn der Messungen.

Die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen hatten am Anfang der Messungen im direkten Vergleich deutlich geringere Werte bei der stomatären Leitfähigkeit. Bereits in KW 25 waren aber die Werte der begasten Pflanzen signifikant höher. Im Anschluss reduzierten sich bei den begasten Pflanzen die Werte der stomatären Leitfähigkeit kontinuierlich, wobei der Verlauf sehr ähnlich zu den Pflanzen der Kontrollgruppe war. Dabei konnten zwischen KW 28 und KW 35 keine signifikanten Unterschiede bei den Werten beobachtet werden. Zum Ende der Messperiode ist bei den begasten Pflanzen die stomatäre Leitfähigkeit nochmal leicht angestiegen und war signifikant höher als bei den Kontrollpflanzen. Ähnlich wie bei den Pflanzen der Kontrollgruppe waren die Spannweiten während der Messperiode wechselhaft, wobei sich zu jedem Zeitpunkt der Messungen die Werte der Gruppen überschneiden haben (Abbildung 28).

Im Saisondurchschnitt waren die stomatären Leitfähigkeiten beider Gruppen fast identisch. Dabei waren die Werte der begasten Pflanzen durchschnittlich nur um 0,32 % höher als bei den Kontrollpflanzen. Es konnte keine statistische Signifikanz zwischen den Ergebnissen beider Gruppen festgestellt werden.

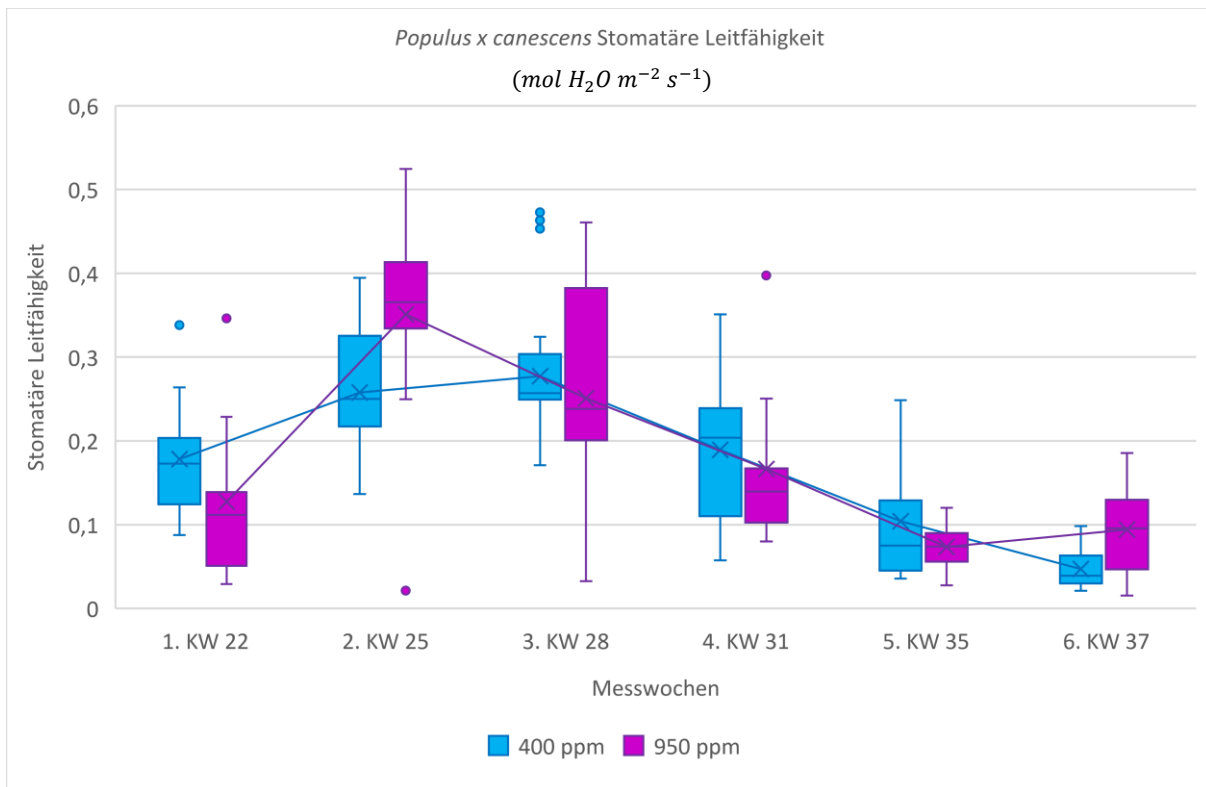


Abbildung 28: Stomatäre Leitfähigkeit von *Populus x canescens* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $\text{CO}_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stomatäre Leitfähigkeit	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,000	0,34	mittel
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,000	0,51	stark
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P.x canescens</i> 950 ppm	nein	0,117	-	-
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P.x canescens</i> 950 ppm	nein	0,063	-	-
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P.x canescens</i> 950 ppm	nein	0,365	-	-
6. KW 37	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,001	0,34	mittel
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 400 ppm &gt; <i>P.x canescens</i> 950 ppm</b>	<b>nein</b>	<b>0,146</b>	-	-

Tabelle 20: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von *P. x canescens* (400 ppm) und *P. x canescens* (950 ppm)

### 5.2.2 Einjährige Pflanzen - Stomatäre Leitfähigkeit *Populus tremula*

Bei der stomatären Leitfähigkeit von *Populus tremula* ergaben sich durch eine erhöhte  $\text{CO}_2$ -Konzentration teilweise signifikante Unterschiede zwischen den Werten der Kontrollgruppe und den der mit  $\text{CO}_2$  begasten Pflanzen (Tabelle 21). Dabei waren die Werte der Pflanzen, die unter erhöhten  $\text{CO}_2$  gewachsen sind, während der Wachstumsperiode teilweise signifikant höher als die Werte der Pflanzen aus der Kontrollgruppe.

Unter Normalbedingungen stieg die stomatäre Leitfähigkeit der Pflanzen am Anfang der Messperiode stark an und ist ab KW 25 wieder konstant gesunken, wobei der Abwärtstrend bis KW 31 angehalten hat. Ab KW 35 ist wieder die stomatäre Leitfähigkeit angestiegen und ist bis zum Messende auf einem konstanten Niveau verblieben.

Die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen zeigten ebenfalls am Anfang der Messperiode einen starken Anstieg der stomatären Leitfähigkeit, wodurch in KW 25 die Werte signifikant höher waren als bei den Pflanzen der Kontrollgruppe. Im Anschluss sind die Werte gesunken und verblieben über eine längere Zeit hinweg auf einem konstanten Niveau, bei dem die Werte zur Kontrollgruppe abwechselnd nicht signifikant und signifikant unterschiedlich waren. Durch einen starken Anstieg zum Ende der Messperiode waren die Werte der begasten Pflanzen schließlich deutlich höher als bei den Pflanzen der Kontrollgruppe.

Während der Messzeit waren die Spannweiten der Messergebnisse beider Gruppen ähnlich und haben sich überschritten (Abbildung 29).

Im Saisonschnitt waren die stomatären Leitfähigkeiten der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen um 23,42 % höher als bei den Kontrollpflanzen. Die Unterschiede waren signifikant, bei einer mittleren Effektstärke.

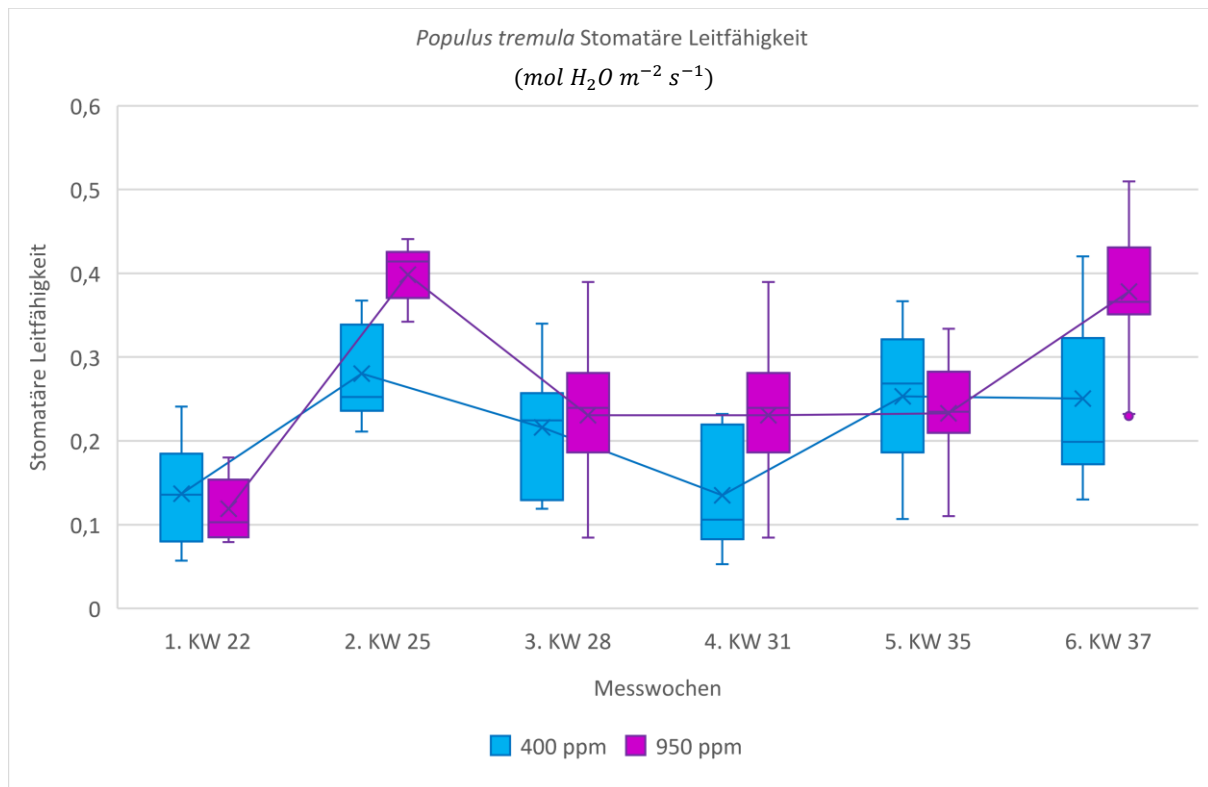


Abbildung 29: Stomatäre Leitfähigkeit von *Populus tremula* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $\text{CO}_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stomatäre Leitfähigkeit	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. tremula</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,332	-	-
2. KW 25	<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,78	stark
3. KW 28	<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,228	-	-
4. KW 31	<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,52	stark
5. KW 35	<i>P. tremula</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,141	-	-
6. KW 37	<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,56	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P. tremula</i> 400 ppm &lt; <i>P. tremula</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,22</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 21: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von *P. tremula* (400 ppm) und *P. tremula* (950 ppm)

### 5.2.3 Einjährige Pflanzen - Stomatäre Leitfähigkeit *Populus alba*

Die stomatäre Leitfähigkeit von *Populus alba* war während der Wachstumsperiode in der Regel bei den Pflanzen, die erhöhtem  $\text{CO}_2$  ausgesetzt waren signifikant höher als bei den Pflanzen der Kontrollgruppe (Tabelle 22). Die Messungen in KW 35 zum Ende der Vegetationsperiode stellen hier eine Ausnahme dar, bei der die Werte der Kontrollgruppe höher waren als bei den Pflanzen aus der mit  $\text{CO}_2$  begasten Versuchskammer.

Zum Anfang der Messperiode ist eine Zunahme der stomatären Leitfähigkeit bei den Pflanzen der Kontrollgruppe beobachtet worden. In den darauffolgenden Messwochen sind die Werte wieder gesunken und erreichten einen Tiefstand bei KW 31. Gegen Ende der Messperiode stieg die stomatäre Leitfähigkeit wieder an und reduzierte sich wieder am Ende der Vegetationsperiode (KW 37).

Auch die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen hatten zum Anfang der Messperiode eine deutliche Zunahme der stomatären Leitfähigkeit. In den darauffolgenden Messwochen sanken die Werte wieder und ab KW 31 verblieben sie auf einem gleichmäßigen Niveau. Zum Ende der Messperiode wurde nochmals ein leichter Anstieg der stomatären Leitfähigkeit beobachtet. Über die gesamte Messperiode gesehen waren die Unterschiede zwischen beiden Gruppen signifikant. Die Spannweite der Messwerte beider Gruppen war zum Teil sehr hoch und waren ähnlich (Abbildung 30). Im Durchschnitt waren über die gesamte Messzeit gesehen die Werte der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen um 27,65 % höher als bei den Pflanzen der Kontrollgruppe. Der Effekt war signifikant, bei einer mittleren Effektstärke.

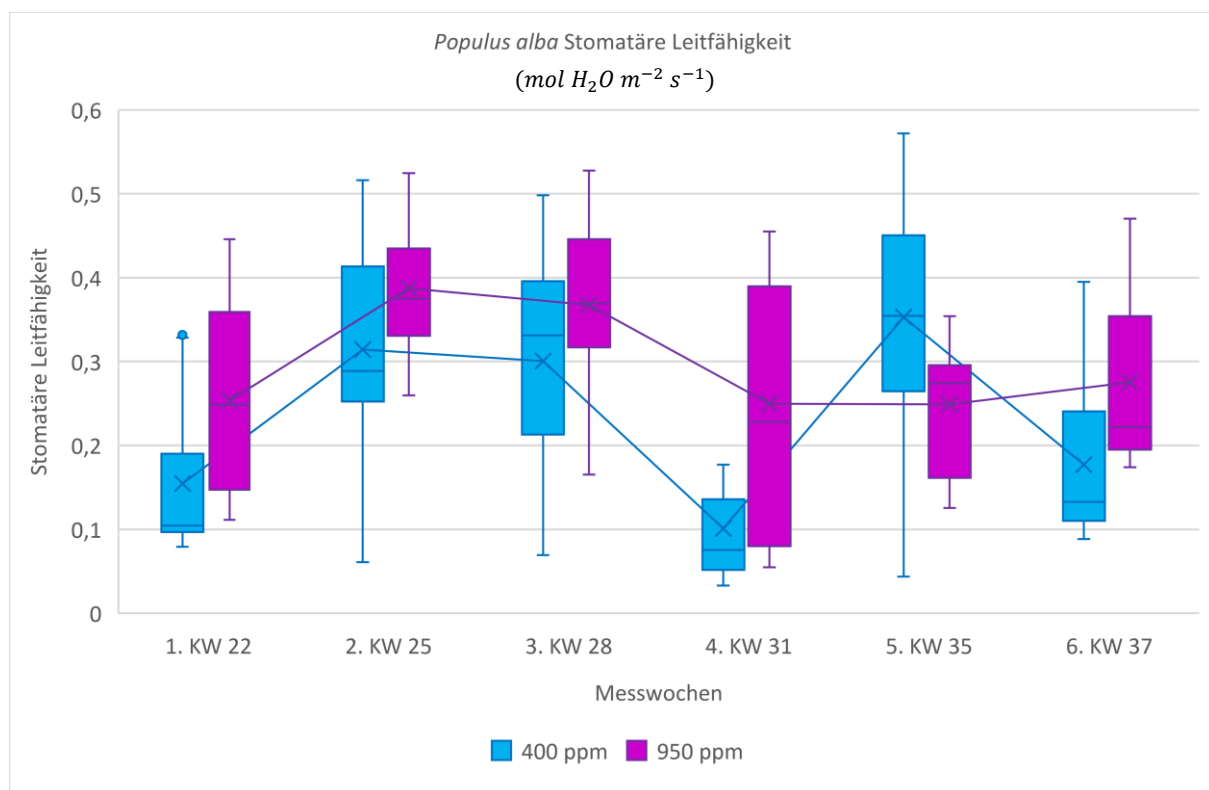


Abbildung 30: Stomatäre Leitfähigkeit von *Populus alba* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stomatäre Leitfähigkeit	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,51	stark
2. KW 25	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,002	0,30	mittel
3. KW 28	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,016	0,24	mittel
4. KW 31	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,50	mittel
5. KW 35	<i>P. alba</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,41	mittel
6. KW 37	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,46	mittel
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P. alba</i> 400 ppm &lt; <i>P. alba</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,25</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 22: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von *P. alba* (400 ppm) und *P. alba* (950 ppm)

#### 5.2.4 Einjährige Pflanzen – Stomatäre Leitfähigkeit Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen

Beim direkten Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canescens* und den Arten *Populus tremula* und *Populus alba* sind keine eindeutigen Unterschiede während der Wachstumsperiode beobachtet worden.

Beim Vergleich zwischen *Populus x canescens* und *Populus tremula* sind wechselhafte Verhältnisse bei der stomatären Leitfähigkeit beobachtet worden. Bis KW 31 haben sich beide Arten im Wechsel bei der stomatären Leitfähigkeit übertroffen. Zum Ende der Messperiode waren die Trends beider Arten gegenläufig. Wenn bei der Hybridpappel die stomatäre Leitfähigkeit immer weiter gesunken ist, war bei *Populus tremula* zunächst ein Aufwärtstrend und im Anschluss ein minimaler Rückgang der stomatären Leitfähigkeit zu beobachten (Abbildung 31).

Die Werte von *Populus tremula* waren im direkten Vergleich im Saisonschnitt um 19,06 % und damit signifikant höher als bei der Hybridpappel *Populus x canescens* (Tabelle 23).

Beim Vergleich zwischen *Populus x canescens* und *Populus alba* waren die Verhältnisse sehr ähnlich, wie beim vorherigen Vergleich. Hier waren die einzelnen Unterschiede während dem Messzeitraum teilweise deutlicher. Besonders auffällig sind bei *Populus alba* die hohen Spannweiten der Messergebnisse gewesen, die teilweise deutlich höher waren als bei den Arten *Populus x canescens* und *Populus tremula*. Auch hier waren die Unterschiede zwischen der Hybridpappel und *Populus alba* fast durchweg signifikant (Tabelle 24).

Im Saisonschnitt waren die Werte von *Populus alba* um 29,23 % höher als bei den Hybridpappeln. Die Messwerte beider Gruppen haben sich signifikant unterschieden.

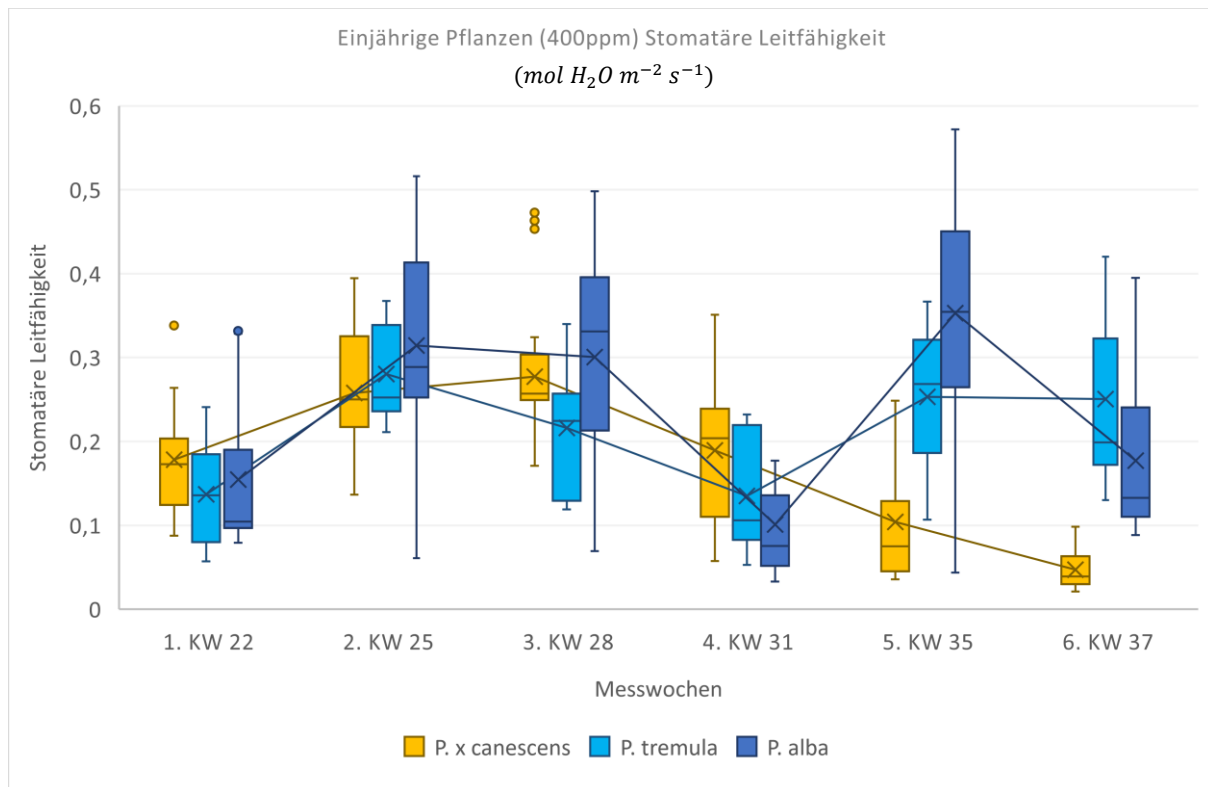


Abbildung 31: Vergleich der stomatären Leitfähigkeiten von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stomatäre Leitfähigkeit	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	ja	0,006	0,29	mittel
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 400 ppm	nein	0,356	-	-
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	ja	0,019	0,26	mittel
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	ja	0,003	0,33	mittel
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 400 ppm	ja	0,000	0,58	stark
6. KW 37	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 400 ppm	ja	0,000	1,00	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 400 ppm &lt; <i>P. tremula</i> 400 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,16</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 23: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von *P. x canescens* und *P. tremula* unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stomatäre Leitfähigkeit	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,036	0,24	mittel
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,009	0,29	mittel
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 400 ppm	nein	0,397	-	-
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,000	0,64	stark
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,000	0,83	stark
6. KW 37	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,000	0,68	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 400 ppm &lt; <i>P. alba</i> 400 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,18</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 24: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von *P. x canescens* und *P. alba* unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

### 5.2.5 Einjährige Pflanzen – Stomatäre Leitfähigkeit Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration

Im direkten Vergleich hatte *Populus x canescens* während der gesamten Vegetationsperiode zum Teil signifikant geringere stomatäre Leitfähigkeiten als die beiden Pappelarten *Populus tremula* und *Populus alba* (Tabelle 25, Tabelle 26). Die Ausnahme hier ist die erste Messwoche, wo nur teilweise signifikante Unterschiede zu beobachten waren. Nach einem vergleichbar starken Aufwärtstrend der stomatären Leitfähigkeit bei allen Arten waren bereits ab diesem Zeitpunkt die Werte der Hybridpappel zu den beiden Pappelarten signifikant geringer.

Während der Wachstumsperiode folgten alle Pappelarten ab KW 25 einem Abwärtstrend der stomatären Leitfähigkeit, bei der die Werte der Hybridpappel stets deutlich unter den stomatären Leitfähigkeiten der Pappelarten lag. Ab KW 35 waren leichte Anstiege bei allen Versuchspflanzen zu beobachten, bei der die Steigerung bei *Populus tremula* am stärksten war. Hier war der Unterschied der Messdaten zwischen der Hybridpappel und den Pappelarten stark, wobei in der vorherigen Messwoche die Unterschiede ähnlich waren.

Die Spannweiten der Messergebnisse der Arten haben sich je nach Messwoche zum Teil sehr unterschieden, wobei besonders bei *Populus alba* hohe Schwankungen zu beobachten waren (Tabelle 32).

Im Saisonschnitt waren unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration die Unterschiede signifikant. Dabei waren die Werte bei *Populus tremula* um 46,49 % und bei *Populus alba* um 64,44 % höher als bei der Hybridpappel *Populus x canescens*.



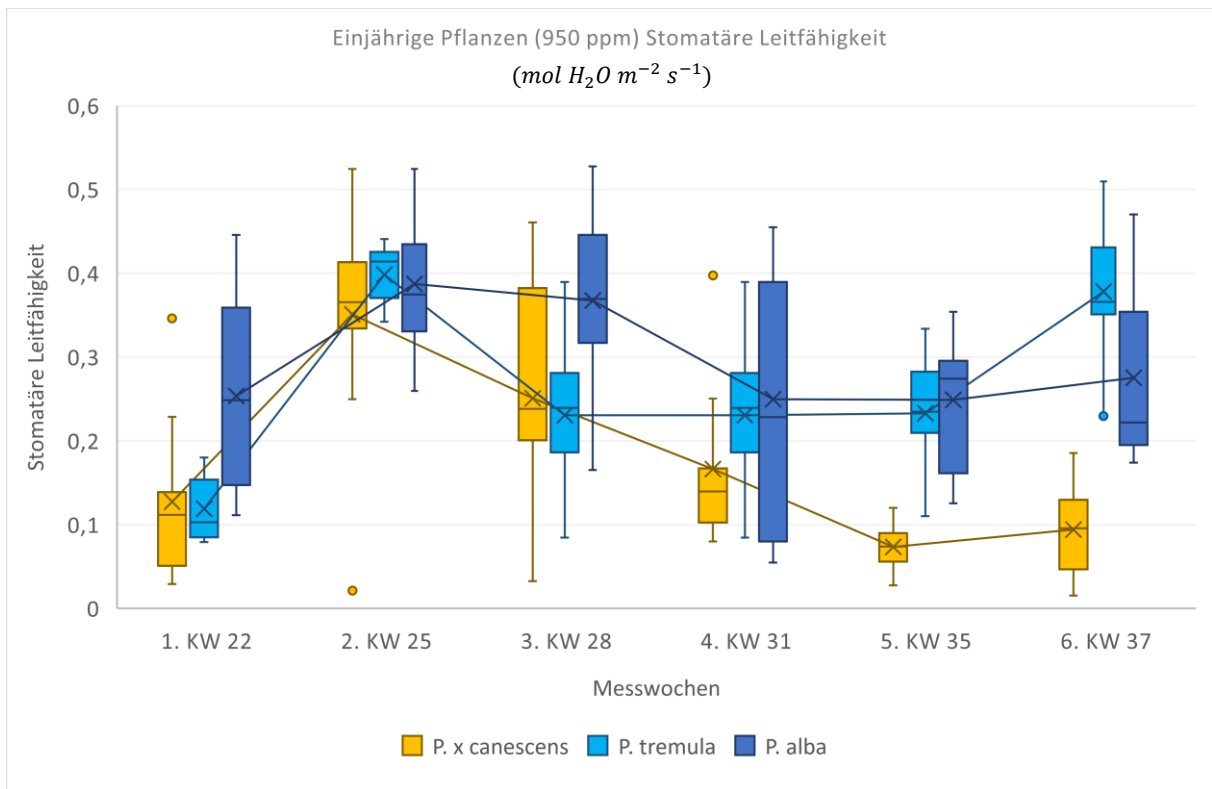


Abbildung 32: Vergleich der stomatären Leitfähigkeiten von einjährigen Pflanzen unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stomatäre Leitfähigkeit	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	1,000	-	-
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,050	-	-
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,427	-	-
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,136	-	-
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,79	stark
6. KW 37	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	1,00	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 950 ppm &lt; <i>P. tremula</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,52</b>	<b>stark</b>

Tabelle 25: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von *P. x canescens* und *P. tremula* unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stomatäre Leitfähigkeit	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,62	stark
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,050	-	-
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,001	0,36	mittel
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,59	stark
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,91	stark
6. KW 37	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,68	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 950 ppm &lt; <i>P. alba</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,44</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 26: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von *P. x canescens* und *P. alba* unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

### 5.2.6 Stecklinge - Stomatäre Leitfähigkeit *Populus x canadensis*

Bei der Hybridpappel *Populus x canadensis* waren unter Normalbedingungen und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration die stomatären Leitfähigkeiten der Gruppen während der gesamten Messzeit sehr wechselhaft und folgten keinem eindeutigen Trend.

Die stomatäre Leitfähigkeit der Kontrollgruppe ist am Anfang der Messperiode zunächst angestiegen und hatte bis KW 28 eine kurze konstante Phase. Im Anschluss folgten abwechselnd eine Reduzierung und ein erneuerter Anstieg der stomatären Leitfähigkeit. Zum Ende der Messperiode fielen die Werte erneut und waren im Vergleich zu den vorigen Messwochen auf einem niedrigen Stand.

Bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen war ein ähnlicher Verlauf zu beobachten. Bereits früh in der Messperiode sind die Werte der stomatären Leitfähigkeit der begasten Pflanzen gesunken, wobei die Reduzierung der Werte sich ab KW 25 verstärkt hat. Im Anschluss sind die Werte abwechselnd im Verlauf gestiegen und wieder gesunken. Zum Ende der Messperiode war nochmals ein Anstieg der stomatären Leitfähigkeit bei den begasten Pflanzen zu beobachten. Durch die starken Schwankungen beider Gruppen waren die Messergebnisse meist signifikant unterschiedlich, bei einer starken Effektstärke. Die Spannweiten der Messergebnisse waren bei beiden Gruppen ähnlich, wobei bei den begasten Pflanzen häufig Ausreißer festgestellt worden sind (Abbildung 33).

Im Saisonschnitt waren die Ergebnisse der Pflanzen, die einer erhöhten  $CO_2$  Konzentration ausgesetzt waren, um 26,97 % höher als bei den Kontrollpflanzen. Der Signifikanztest hat ergeben, dass ein signifikanter Effekt mit einer mittleren Effektstärke vorgelegen hat (Tabelle 27).

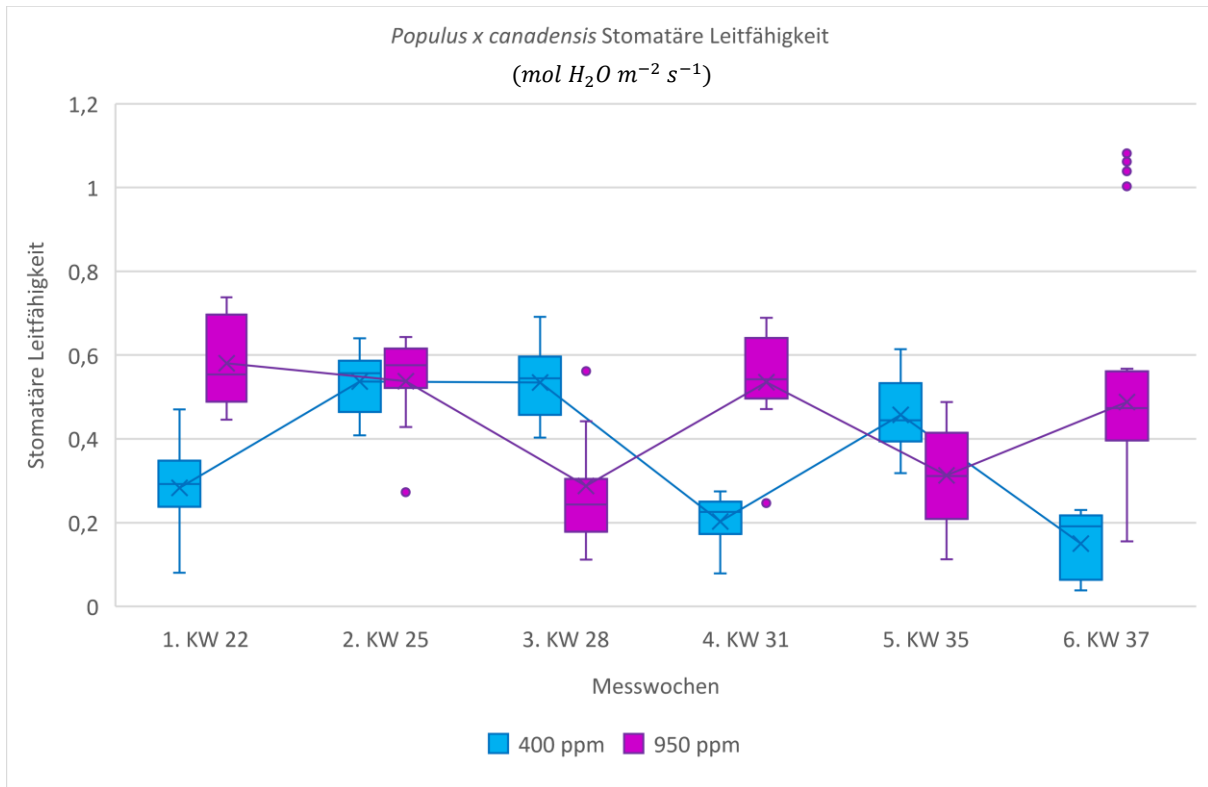


Abbildung 33: Stomatäre Leitfähigkeit von *Populus x canadensis* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $\text{CO}_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stomatäre Leitfähigkeit	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,000	0,84	stark
2. KW 25	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	nein	0,238	-	-
3. KW 28	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,000	0,67	stark
4. KW 31	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,000	0,82	stark
5. KW 35	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,000000	0,49	mittel
6. KW 37	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,000	0,70	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canadensis</i> 400 ppm &lt; <i>P.x canadensis</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,24</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 27: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von *P. x canadensis* (400 ppm) und *P. x canadensis* (950 ppm)

### 5.2.7 Stecklinge - Stomatäre Leitfähigkeit *Populus nigra*

Bei der Pappelart *Populus nigra* hatte eine erhöhte  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre keinen eindeutigen Einfluss auf die stomatäre Leitfähigkeit der Pflanzen. Zum Anfang der Messperiode stiegen die Werte der Kontrollgruppe an und waren signifikant höher als die der mit  $\text{CO}_2$  begasten Gruppe. Im Anschluss sind die Werte der stomatären Leitfähigkeit stark gesunken und hatten in KW den niedrigsten Wert

der Messperiode. Nach einem erneuerten starken Anstieg ist zum Ende der Messperiode die stomatäre Leitfähigkeit wieder gesunken.

Die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen folgten am Anfang der Messperiode einem ähnlichen Trend. Ab KW 25 sind auch hier die Werte gesunken, aber im Vergleich deutlich geringer, wodurch in KW 28 die stomatären Leitfähigkeiten der begasten Pflanzen höher waren. Es folgte ein erneueter Anstieg mit einer darauffolgenden kurzen konstanten Phase. Zum Ende der Versuchsperiode ist die stomatäre Leitfähigkeit nochmals angestiegen. Zum Messende war die stomatäre Leitfähigkeit der begasten Pflanzen deutlich höher als bei der Kontrollgruppe.

Die Spannweiten der Messergebnisse haben sich je nach Messwoche stark voneinander unterschieden. Besonders in KW 28 waren die Schwankungen hoch. Zum Ende der Messperiode waren die Spannweiten der Messergebnisse bei den begasten Pflanzen besonders niedrig (Abbildung 34).

Über den gesamten Messzeitraum gesehen waren die Ergebnisse von den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen um 10,63 % höher als bei den Pflanzen der Kontrollgruppe. Auch bei dieser Art haben sich die Messergebnisse signifikant mit einer mittleren Effektstärke unterschieden (Tabelle 28).

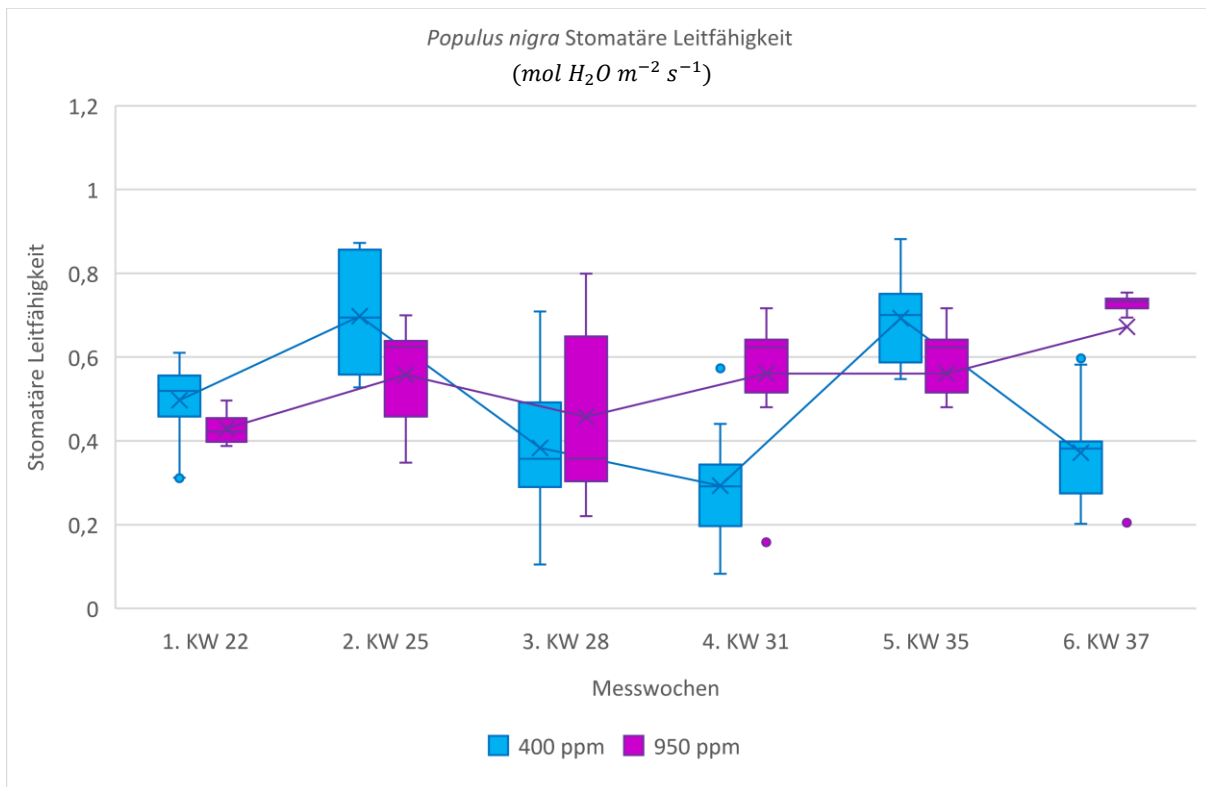


Abbildung 34: Stomatäre Leitfähigkeit von *Populus nigra* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $\text{CO}_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stomatäre Leitfähigkeit	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. nigra</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,55	stark
2. KW 25	<i>P. nigra</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,40	mittel
3. KW 28	<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,072	-	-
4. KW 31	<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,67	stark
5. KW 35	<i>P. nigra</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,35	mittel
6. KW 37	<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,70	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P. nigra</i> 400 ppm &lt; <i>P. nigra</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,16</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 28: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von *P. nigra* (400 ppm) und *P. nigra* (950 ppm)

### 5.2.8 Stecklinge - Stomatäre Leitfähigkeit *Populus deltoides*

Bei der Pappelart *Populus deltoides* hatte eine erhöhte  $\text{CO}_2$ -Konzentration erst ab KW 28 einen signifikanten Effekt auf die stomatäre Leitfähigkeit der Pflanzen (Tabelle 29). Zum Anfang der Messperiode ist die stomatäre Leitfähigkeit bei den Pflanzen der Kontrollgruppe zunächst angestiegen und ist im Anschluss kontinuierlich gesunken. Dabei waren ab KW 28 die Werte der stomatären Leitfähigkeit der Kontrollgruppe signifikant niedriger als bei den begasteten Pflanzen. Als in KW 31 die Werte auf dem

niedrigsten Stand waren, ist die stomatäre Leitfähigkeit im Anschluss wieder angestiegen, wobei dieser Trend bis zum Messende angehalten hat.

Bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen ist die stomatäre Leitfähigkeit am Anfang der Messperiode gesunken, war aber nicht signifikant geringer als bei der Kontrollgruppe. Nach einem kurzen Anstieg der Werte, ist die stomatäre Leitfähigkeit erneuert gesunken. Ab KW 31 ist nochmal ein leichter Anstieg beobachtet worden. Zum Ende der Messungen ist die stomatäre Leitfähigkeit der begasten Pflanzen wieder leicht gesunken. Zum großen Teil waren die Messergebnisse der begasten Pflanzen deutlich höher als bei der Kontrollgruppe. Zeitweise haben sich die Spannweiten der Messergebnisse beider Gruppen stark unterschieden oder überschritten (Abbildung 35).

Im Saisondurchschnitt waren die Ergebnisse der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen um 40,90 % höher als bei den Kontrollpflanzen, wobei eine Signifikanz mit einer mittleren Effektstärke vorgelegen hat.

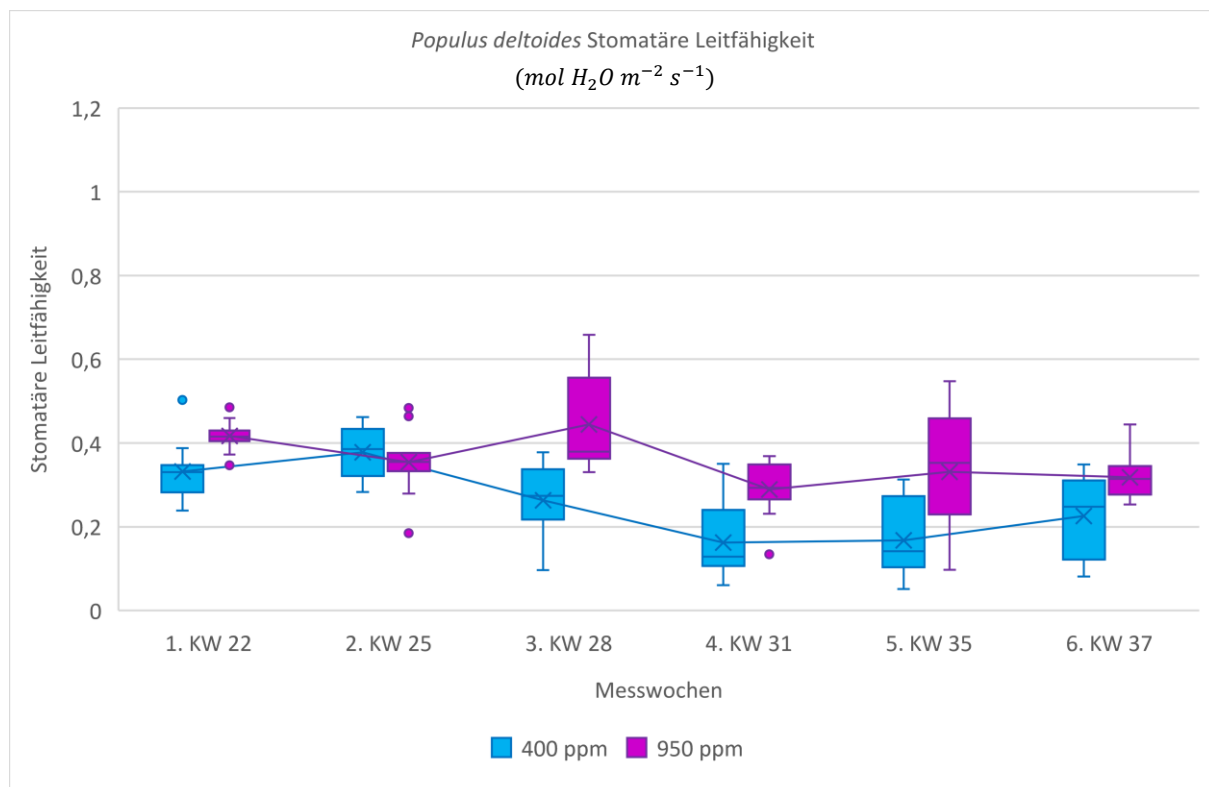


Abbildung 35: Stomatäre Leitfähigkeit von *Populus deltoides* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stomatäre Leitfähigkeit	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,65	stark
2. KW 25	<i>P. deltoides</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,439	-	-
3. KW 28	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,67	stark
4. KW 31	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,63	stark
5. KW 35	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,50	stark
6. KW 37	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,41	mittel
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P. deltoides</i> 400 ppm &lt; <i>P. deltoides</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,42</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 29: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von *P. deltoides* (400 ppm) und *P. deltoides* (950 ppm)

### 5.2.9 Stecklinge – Stomatäre Leitfähigkeit Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen

Beim direkten Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canadensis* und den Pappelarten *Populus nigra* und *Populus deltoides* sind unter Normalbedingungen keine eindeutigen Unterschiede bei den stomatären Leitfähigkeiten der Pflanzen festgestellt worden.

Beim Vergleich zwischen *Populus x canadensis* und *Populus nigra* waren meistens die stomatären Leitfähigkeiten der Pappelart *Populus nigra* signifikant höher (Tabelle 30). Der Jahresverlauf beider Arten war ähnlich, wobei sich zum Teil die Messwerte überschneiden haben. *Populus nigra* hatte während der Messperiode im Durchschnitt um 35,53 % höhere Werte als die Hybridpappeln. Dabei haben sich die Messwerte beider Arten signifikant voneinander unterschieden.

Beim Vergleich zwischen der Hybridpappel und *Populus deltoides* waren in der Regel die stomatären Leitfähigkeiten der Hybridpappel signifikant höher (Tabelle 31). Auch hier haben sich die Messwerte zum Teil deutlich überschneiden. Gegen Ende der Messperiode war jedoch durch einen starken Rückgang bei der Hybridpappel und einer leichten Zunahme bei *Populus deltoides* die stomatäre Leitfähigkeit bei *Populus deltoides* höher (Abbildung 36). Die stomatäre Leitfähigkeit von *Populus deltoides* war im Saisondurchschnitt dagegen um 29,45 % niedriger als bei *Populus x canadensis*. Die Unterschiede waren dabei signifikant.

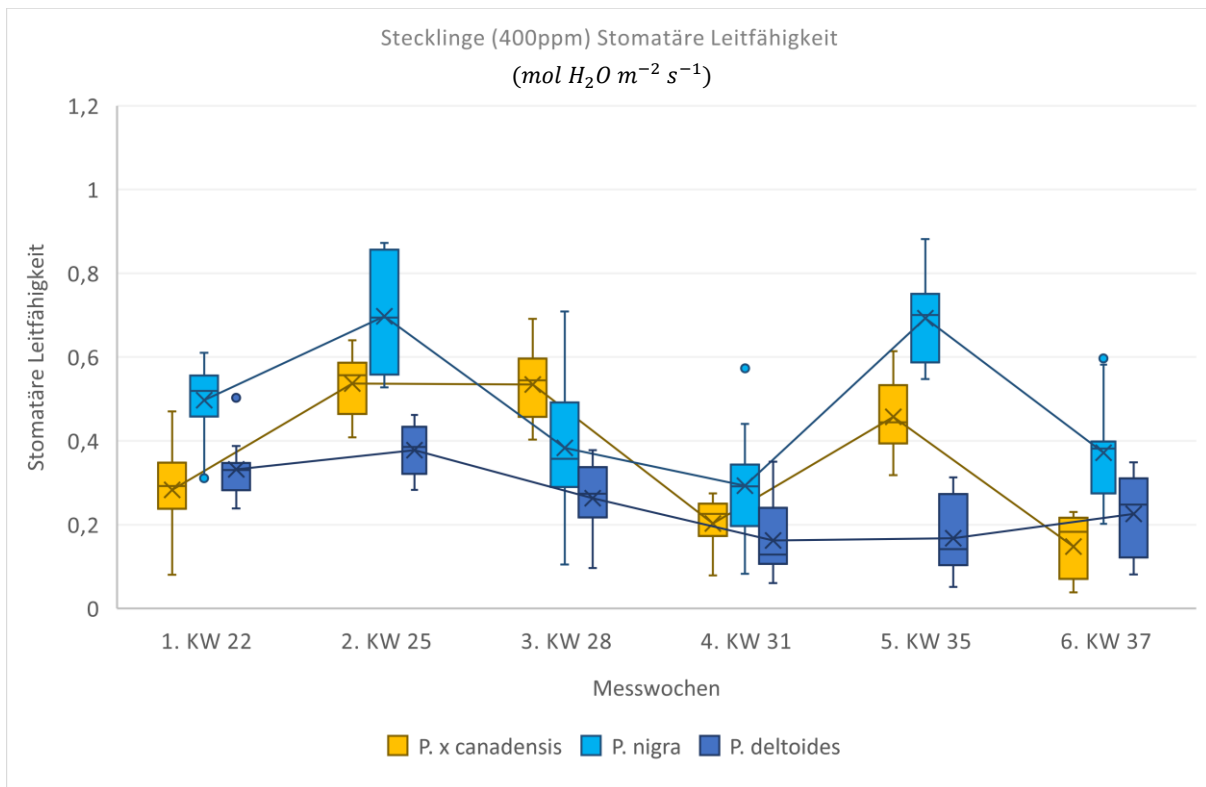


Abbildung 36: Vergleich der stomatären Leitfähigkeiten von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stomatäre Leitfähigkeit	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,000	0,81	stark
2. KW 25	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,001	0,34	mittel
3. KW 28	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,000	0,49	mittel
4. KW 31	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,003	0,32	mittel
5. KW 35	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,000	0,50	stark
6. KW 37	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,000	0,86	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canadensis</i> 400 ppm &lt; <i>P. nigra</i> 400 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,29</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 30: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von *P. x canadensis* und *P. nigra* unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stomatäre Leitfähigkeit	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 400 ppm	nein	0,238	-	-
2. KW 25	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	ja	0,000	0,65	stark
3. KW 28	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	ja	0,000	0,84	stark
4. KW 31	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	nein	0,073	-	-
5. KW 35	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	ja	0,000	0,61	stark
6. KW 37	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 400 ppm	ja	0,000	0,37	mittel
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canadensis</i> 400 ppm &gt; <i>P. deltoides</i> 400 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,28</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 31: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von *P. x canadensis* und *P. deltoides* unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)



### 5.2.10 Stecklinge – Stomatäre Leitfähigkeit Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter $CO_2$ -Konzentration

Im direkten Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canadensis* und den Pappelarten *Populus nigra* und *Populus deltoides* sind während der Wachstumsperiode unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration größtenteils signifikante Unterschiede beobachtet worden. Ähnlich wie unter Normalbedingungen hatte *Populus nigra* die höchste stomatäre Leitfähigkeit. Hier war die durchschnittliche stomatäre Leitfähigkeit während der Messperiode um 18,08 % höher als bei der Hybridpappel. Auch unter diesen Bedingungen haben die Messergebnisse beider Arten sich signifikant voneinander unterschieden (Tabelle 32). Eine im Vergleich eher niedrigere stomatäre Leitfähigkeit war bei *Populus deltoides* zu beobachten. Die Hybridpappel *Populus x canadensis* lag während den Messungen mit ihren Werten zwischen *Populus nigra* und *Populus deltoides*, wobei durch die sprunghaften Werte von *Populus x canadensis* je nach Messwoche die Hybridpappel oder die Elternart eine stärkere stomatäre Leitfähigkeit aufgewiesen haben. Im Saisondurchschnitt war die stomatäre Leitfähigkeit von *Populus deltoides* um 21,71 % und damit signifikant geringer als bei der Hybridpappel (Tabelle 33).

Zum Teil haben sich die Messwerte der Arten stark überschritten. Überwiegend waren die Unterschiede in den einzelnen Messwochen signifikant. Der Saisonverlauf der einzelnen Arten hat sich unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration leicht verändert (Abbildung 37).

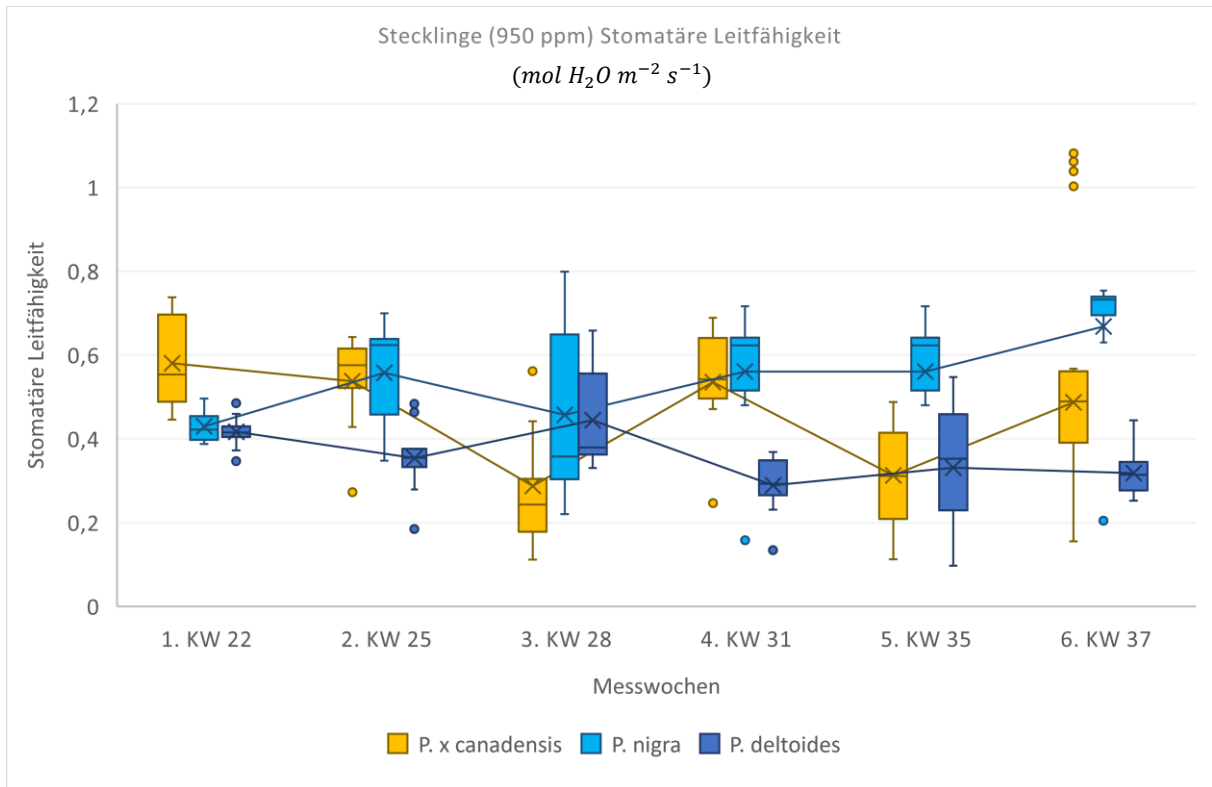


Abbildung 37: Vergleich der stomatären Leitfähigkeit von Stecklingen unter einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stomatäre Leitfähigkeit	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,76	stark
2. KW 25	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	1,000	-	-
3. KW 28	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,45	mittel
4. KW 31	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,996	-	-
5. KW 35	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,000	0,70	stark
6. KW 37	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,45	mittel
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canadensis</i> 950 ppm &lt; <i>P. nigra</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,23</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 32: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von *P. x canadensis* und *P. nigra* unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stomatäre Leitfähigkeit	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. deltooides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,85	stark
2. KW 25	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltooides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,62	stark
3. KW 28	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. deltooides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,57	stark
4. KW 31	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. deltooides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,66	stark
5. KW 35	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. deltooides</i> 950 ppm	nein	1,000	-	-
6. KW 37	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltooides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,37	mittel
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canadensis</i> 950 ppm &gt; <i>P. deltooides</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,31</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 33: Signifikanztest zwischen den stomatären Leitfähigkeiten von *P. x canadensis* und *P. deltooides* unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

## 5.3 Transpirationsrate

### 5.3.1 Einjährige Pflanzen - Transpirationsrate *Populus x canescens*

Die Transpirationsraten der Hybridpappel *Populus x canescens* haben sich während der Wachstumsperiode bei einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration und gegenüber Normalbedingungen in der Regel signifikant voneinander unterschieden (Tabelle 34). Bei der Kontrollgruppe war am Anfang der Vegetationsperiode ein leichter Abwärtstrend zu beobachten, wobei ab KW 25 die Transpirationsrate wieder anstieg. Ab KW 28 war wieder ein Abwärtstrend zu beobachten, der bis zum Ende der Messungen angehalten hat. Häufig hatte die Kontrollgruppe eine höhere Transpirationsrate, wobei die Effektstärke zwischen keinem Effekt und schwach variierte.

Bei den Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, war zum Anfang eine Steigerung der Transpirationsrate zu beobachten, die bis KW 25 angehalten hat. Zu diesem Zeitpunkt war die Transpirationsrate der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen signifikant höher. Ab KW 25 war ein Abwärtstrend zu beobachten, der sich ab KW 31 noch einmal verstärkt hat. Zum Ende der Messungen ist die Transpirationsrate wieder leicht angestiegen und lag signifikant über den Werten der Kontrollgruppe.

Durch die hohen Spannweiten haben sich die Messergebnisse beider Gruppen an allen Messwochen überschritten (Abbildung 38).

Im Saisonschnitt waren die Transpirationsraten der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen um 6,27 % geringer als bei den Kontrollpflanzen, jedoch lag keine statistische Signifikanz vor.

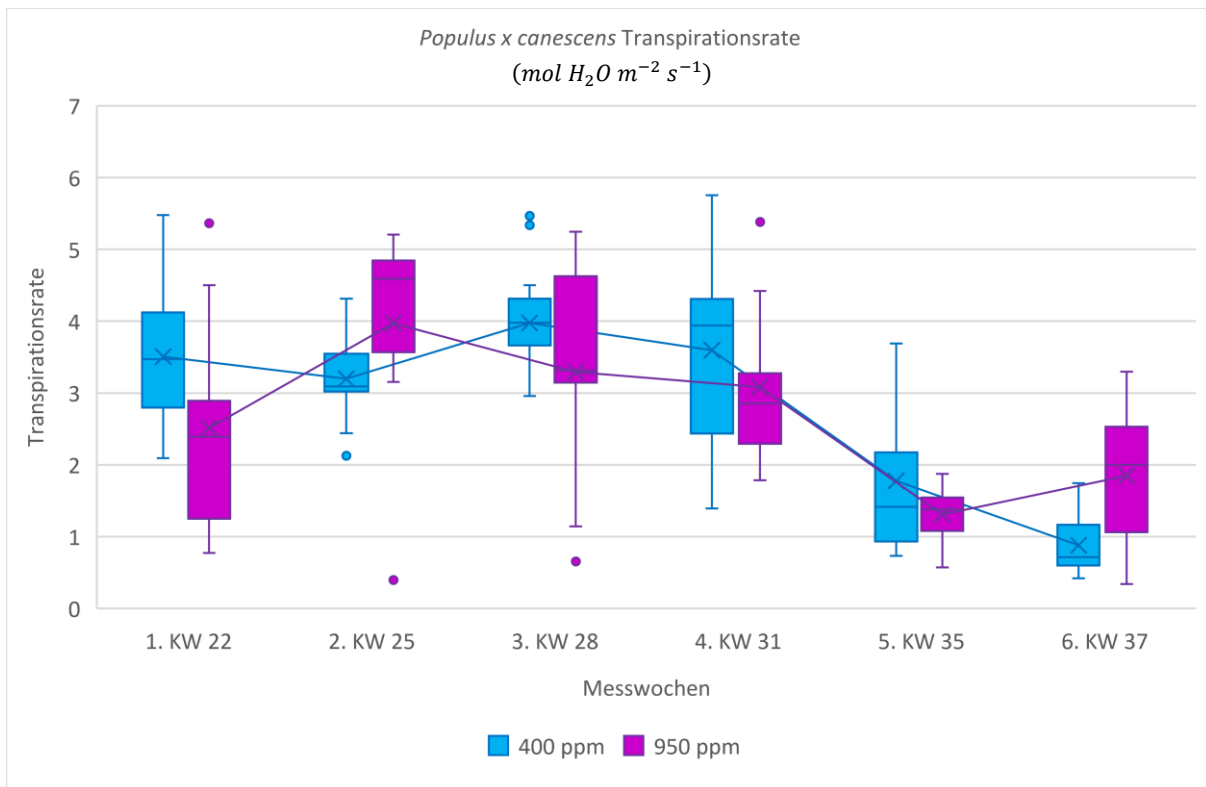


Abbildung 38: Transpirationsrate von *Populus x canescens* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Transpirationsrate	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,000	0,41	mittel
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,000	0,53	stark
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P.x canescens</i> 950 ppm	nein	0,122	-	-
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,028	0,21	mittel
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P.x canescens</i> 950 ppm	nein	0,211	-	-
6. KW 37	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,000	0,40	mittel
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 400 ppm &gt; <i>P.x canescens</i> 950 ppm</b>	<b>nein</b>	<b>0,073</b>	-	-

Tabelle 34: Signifikanztest zwischen der Transpirationsrate von *P. x canescens* (400 ppm) und *P. x canescens* (950 ppm)

### 5.3.2 Einjährige Pflanzen - Transpirationsrate *Populus tremula*

Die Transpirationsraten von *Populus tremula* haben sich unter erhöhtem CO<sub>2</sub> während der Wachstumsperiode überwiegend signifikant von den Werten der Kontrollgruppe unterschieden (Tabelle 35). Dabei war in der Regel die Transpirationsrate der Pappeln, die erhöhtem CO<sub>2</sub> ausgesetzt waren, höher als bei den Pflanzen der Kontrollgruppe. Bei der Kontrollgruppe war zu Anfang der Messperiode ein leichter Aufstiegs- und ab KW 25 ein Abwärtstrend zu beobachten, wobei ab KW 28 die Transpirationsrate

deutlich gesunken ist. Ab KW 31 ist die Transpirationsrate nochmals gestiegen und im Anschluss wieder leicht gesunken. Sie lag etwas über den Werten zu Beginn der Messungen.

Bei den Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, war zu Anfang der Messungen ein deutlicher Anstieg der Transpirationsrate zu beobachten. Ab KW 25 nahm die Transpirationsrate wieder ab. In der Mitte der Messperiode ist eine kurze konstante Phase beobachtet worden. Im Anschluss folgte eine leichte Reduzierung der Transpirationsrate. Zum Ende der Wachstumsperiode war nochmals ein deutlicher Anstieg zu beobachten, der die Werte der Kontrollgruppe deutlich übertraf. Im direkten Vergleich waren die Spannweiten der Messergebnisse bei der Kontrollgruppe häufig höher als bei den Messwerten der begasten Pflanzen (Abbildung 39).

Die Effektstärke zwischen den Gruppen variierte zwischen keinen und einem starken Effekt.

Im Saisonschnitt waren die Transpirationsraten der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen um 24,42 % höher als bei den Kontrollpflanzen. Es lag eine statistische Signifikanz mit einer mittleren Effektstärke vor.

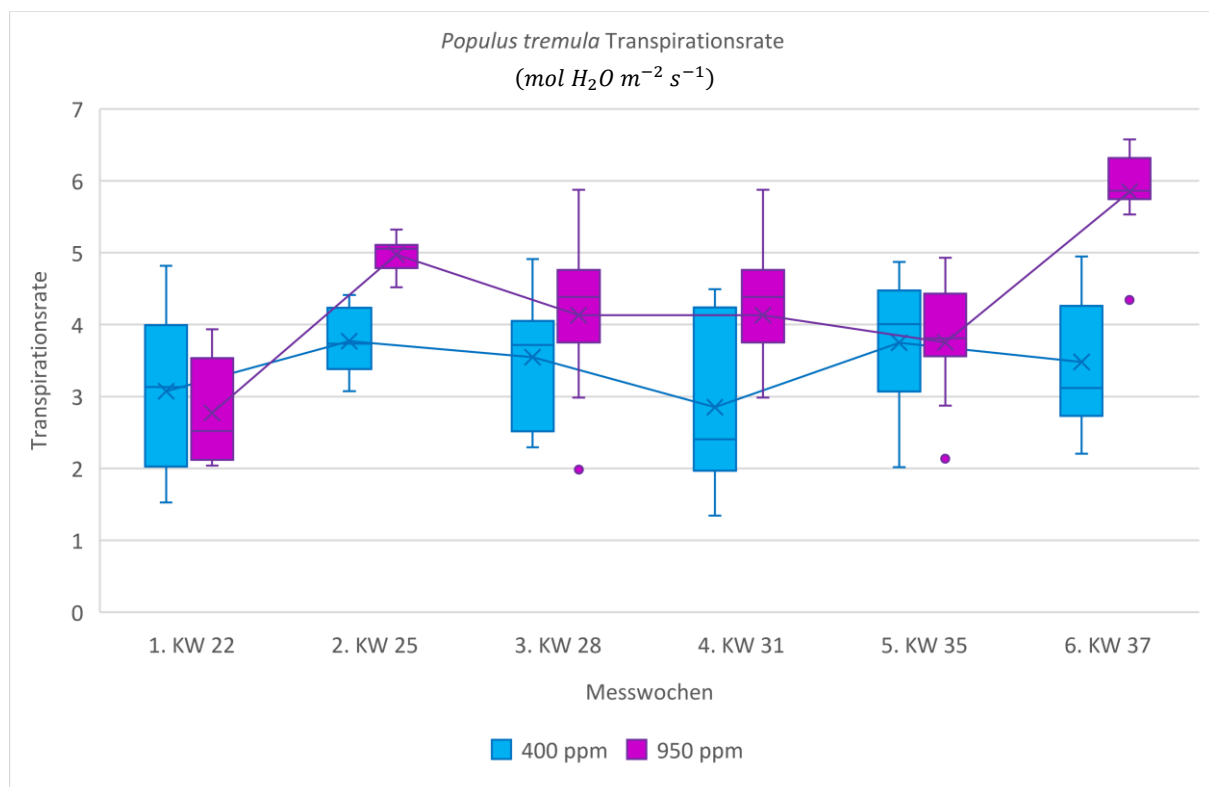


Abbildung 39: Transpirationsrate von *Populus tremula* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Transpirationsrate	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. tremula</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,417	-	-
2. KW 25	<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
3. KW 28	<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,005	0,27	mittel
4. KW 31	<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,51	stark
5. KW 35	<i>P. tremula</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,886	-	-
6. KW 37	<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,82	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P. tremula</i> 400 ppm &lt; <i>P. tremula</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,35</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 35: Signifikanztest zwischen der Transpirationsrate von *P. tremula* (400 ppm) und *P. tremula* (950 ppm)

### 5.3.3 Einjährige Pflanzen - Transpirationsrate *Populus alba*

Die Transpirationsraten der Pappeln, die erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  ausgesetzt waren und die Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen gewachsen sind, haben sich in der Vegetationsperiode bis auf KW 28 signifikant voneinander unterschieden (Tabelle 36).

Dabei hatte die Gruppe, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt worden ist, in der Regel höhere Transpirationsraten als die Kontrollgruppe, wobei in KW 28 und KW 35 die Transpirationsraten der Kontrollpflanzen wiederum höher waren.

Bei den Pflanzen der Kontrollgruppe war von Beginn an eine Zunahme der Transpirationsrate zu beobachten, die bis KW 28 angehalten hat. Im Anschluss sind die Werte der Kontrollgruppe gefallen. Nach einer erneut starken Zunahme in KW 35 ist zum Ende der Messperiode wieder die Transpirationsrate der Kontrollpflanzen gesunken und lag unter den Werten zu Beginn der Messungen.

Bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen war zu Anfang der Vegetationsperiode ein ähnlicher Anstieg der Transpiration zu beobachten, der bis KW 25 angehalten hat. Ab KW 25 sind die Transpirationsraten wieder gesunken. Ab KW 31 war wieder ein leichter Anstieg zu beobachten, der sich zum Ende der Messungen verstärkt hat.

Im direkten Vergleich hatten beide Gruppen ähnlich hohe Spannweiten der Messergebnisse, wobei bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen eine höhere Varianz zu beobachten war (Abbildung 40).

Die Effektstärke der Signifikanztests variierte zwischen keinem und einem starken Effekt.

Die Transpirationsraten der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen waren über den gesamten Messzeitraum gesehen durchschnittlich um 27,83 % höher als bei den Kontrollpflanzen. Auch hier lag eine statistische Signifikanz vor, mit einer mittleren Effektstärke.

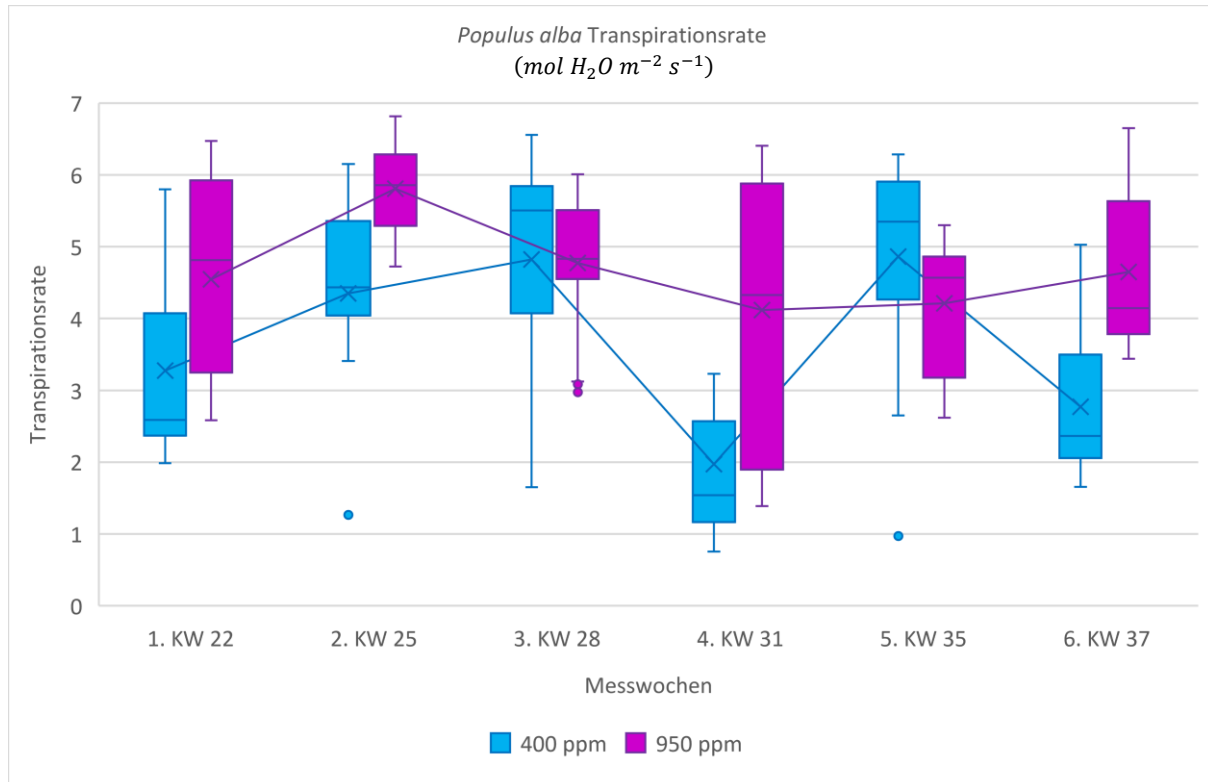


Abbildung 40: Transpirationsrate von *Populus alba* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Transpirationsrate	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,51	stark
2. KW 25	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,61	stark
3. KW 28	<i>P. alba</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,83	-	-
4. KW 31	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,54	stark
5. KW 35	<i>P. alba</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,39	mittel
6. KW 37	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,67	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P. alba</i> 400 ppm &lt; <i>P. alba</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,30</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 36: Signifikanztest zwischen der Transpirationsrate von *P. alba* (400 ppm) und *P. alba* (950 ppm)

#### 5.3.4 Einjährige Pflanzen - Transpirationsrate Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen

Beim direkten Vergleich zwischen *Populus x canescens* und den Pappelarten *Populus tremula* und *Populus alba* sind keine eindeutigen Unterschiede während der Messungen beobachtet worden.

Zum Anfang der Messperiode waren die Transpirationsraten der Hybridpappeln nicht signifikant höher als bei *Populus tremula*. In den darauffolgenden Messwochen waren die Trends beider Arten wechselhaft. Durch einen starken Rückgang der Transpirationsrate bei der Hybridpappel und einem Anstieg bei *Populus tremula* waren ab KW 35 die Transpirationsraten bei *Populus tremula* signifikant höher, wobei sich zum Ende der Messperiode die Werte immer weniger überschneiden haben. Im Gesamtdurchschnitt waren die Transpirationsraten von *Populus tremula* um 18,41 % höher als bei den Hybridpappeln. Dabei waren die Unterschiede signifikant, bei einer mittleren Effektstärke (Tabelle 37).

Beim Vergleich zwischen den Arten *Populus x canescens* und *Populus alba* waren die Unterschiede stärker. Am Anfang der Messungen waren die Transpirationsraten der Hybridpappeln zunächst höher, jedoch waren die Unterschiede nicht signifikant. Im Saisonverlauf zeichnete sich ein immer eindeutigerer Trend ab, bei dem *Populus alba* zum späten Zeitpunkt der Vegetationsperiode im direkten Vergleich besonders hohe Transpirationswerte aufgewiesen hat (Abbildung 41). Im Saisondurchschnitt waren die Transpirationsraten von *Populus alba* um 26,48 % höher als bei den Hybridpappeln. Es ist eine statistische Signifikanz zwischen den Werten festgestellt worden, bei einer mittleren Effektstärke (Tabelle 38).



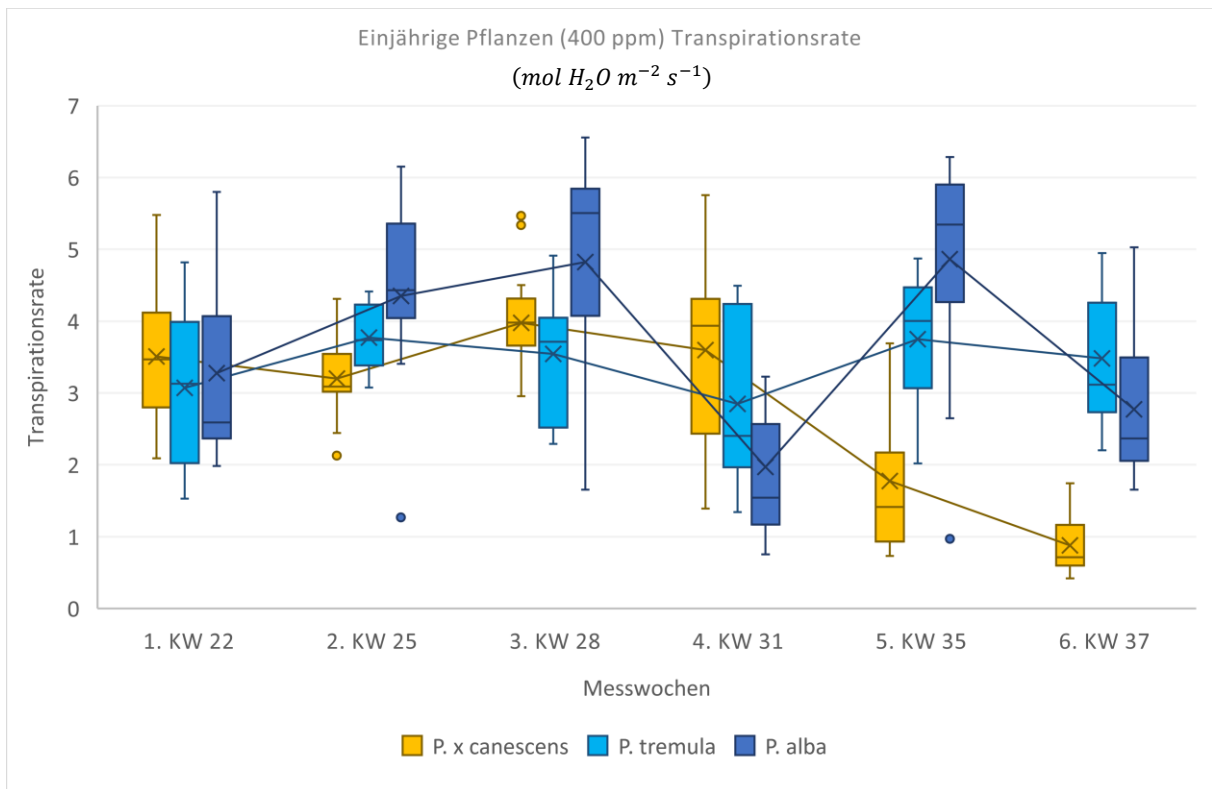


Abbildung 41: Vergleich der Transpirationsrate von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Transpirationsrate	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	nein	0,057	-	-
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 400 ppm	ja	0,001	0,36	mittel
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	nein	0,204	-	-
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	ja	0,024	0,27	mittel
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 400 ppm	ja	0,000	0,55	stark
6. KW 37	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 400 ppm	ja	0,000	0,98	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 400 ppm &lt; <i>P. tremula</i> 400 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,19</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 37: Signifikanztest zwischen den Transpirationsraten von *P. x canescens* und *P. tremula* unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Transpirationsrate	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	nein	0,210	-	-
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,000	0,68	stark
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,001	0,35	mittel
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,000	0,64	stark
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,000	0,89	stark
6. KW 37	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,000	0,70	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 400 ppm &lt; <i>P. alba</i> 400 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,23</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 38: Signifikanztest zwischen den Transpirationsraten von *P. x canescens* und *P. alba* unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

### 5.3.5 Einjährige Pflanzen - Transpirationsrate Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter $CO_2$ -Konzentration

Unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration haben sich die Transpirationsraten von den Pappelarten *Populus x canescens*, *Populus tremula* sowie *Populus alba* fast ausschließlich signifikant voneinander unterschieden. Dabei war zu jedem Messzeitpunkt die Transpirationsrate der Hybridpappeln niedriger als bei den beiden Pappelarten *Populus tremula* und *Populus alba*.

Beim direkten Vergleich zwischen *Populus x canescens* und *Populus tremula* waren zu Anfang der Messperiode die Werte ähnlich. Dadurch, dass die Transpirationsrate von *Populus tremula* stärker gestiegen ist als bei den Hybridpappeln, waren die Unterschiede stärker. Im Laufe der Messungen haben sich die Transpirationsraten beider Arten immer stärker unterschieden, wodurch ab KW 31 *Populus tremula* eindeutig höhere Transpirationsraten aufgewiesen hat als *Populus x canescens*. Im Saisondurchschnitt waren die Transpirationsraten von *Populus tremula* um 57,19 % höher als bei den Hybridpappeln. Dabei lag eine statistische Signifikanz vor, mit einer mittleren Effektstärke (Tabelle 39).

Die Unterschiede zwischen den Arten *Populus x canescens* und *Populus alba* waren noch größer. Schon zu Beginn der Messungen waren die Unterschiede sehr stark. Durch einen ähnlichen Saisonverlauf gekennzeichnet haben sich während der gesamten Messperiode die Transpirationsraten deutlich unterschieden, wobei die Hybridpappeln stets niedrigere Werte aufgewiesen haben als *Populus alba*. Durch eine sehr hohe Spannweite der Messergebnisse bei *Populus alba* in KW 31 waren zu diesem Zeitpunkt die Werte ähnlich, wobei noch immer ein signifikanter Unterschied vorgelegen hat (Tabelle 40).

Gegen Ende der Messperiode haben sich die Werte beider Arten kaum noch überschritten (Abbildung 42). Die Transpirationsraten von *Populus alba* waren um 72,51 % höher als bei den Hybridpappeln. Auch hier lag zwischen den Werten beider Arten eine statistische Signifikanz vor, bei einer starken Effektstärke.

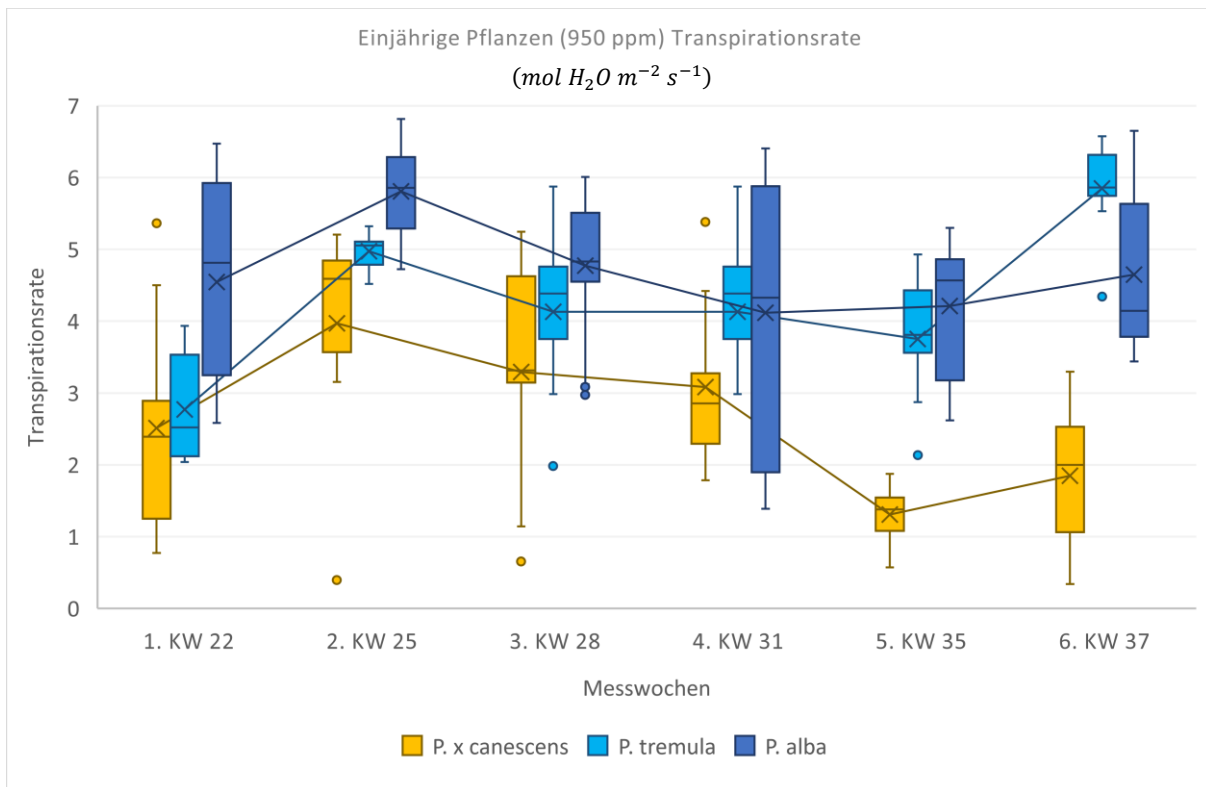


Abbildung 42: Vergleich der Transpirationsrate von einjährigen Pflanzen unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Transpirationsrate	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,765	-	-
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,38	mittel
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,40	mittel
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,001	0,34	mittel
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,75	stark
6. KW 37	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	1,00	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 950 ppm &lt; <i>P. tremula</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,44</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 39: Signifikanztest zwischen den Transpirationsraten von *P. x canescens* und *P. tremula* unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Transpirationsrate	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,67	stark
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,48	mittel
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,006	0,30	mittel
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,96	stark
6. KW 37	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,70	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 950 ppm &lt; <i>P. alba</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,59</b>	<b>stark</b>

Tabelle 40: Signifikanztest zwischen den Transpirationsraten von *P. x canescens* und *P. alba* unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

### 5.3.6 Stecklinge - Transpirationsrate *Populus x canadensis*

Die Transpirationsraten der Versuchs- und Kontrollgruppe der Hybridpappel *Populus x canadensis* haben sich signifikant voneinander unterschieden, wobei mehrheitlich die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen eine höhere Transpirationsrate während der Wachstumsperiode gehabt haben (Tabelle 41).

Bei der Kontrollgruppe war zu Anfang ein deutlicher Aufwärtstrend der Transpirationsrate zu beobachten, der bis KW 28 angehalten hat. Im Anschluss kam es bei der Kontrollgruppe zu starken Schwankungen der Transpirationsrate, wobei in KW 35 die Werte höher waren als bei den begasten Pflanzen. Zum Ende der Vegetationsperiode war ein starker Rückgang der Transpiration zu beobachten.

Die Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, hatten in den ersten Messwochen einen starken Abwärtstrend der Transpiration aufgewiesen, wobei sich in KW 28 die Werte gegenüber der Kontrollgruppe stark unterschieden haben und diese unterschritten worden sind. Es folgte eine Phase, die durch starke Anstiege und darauffolgende Absenkungen der Transpirationsrate gekennzeichnet war. Zum Ende der Vegetationsperiode war die Transpirationsrate der begasten Pflanzen mit einer starken Effektstärke höher als die der Kontrollgruppe. Die Spannweiten der Messergebnisse waren bei beiden Gruppen ähnlich und haben sich teilweise überschritten (Abbildung 43).

Im Gesamtdurchschnitt waren die Transpirationsraten der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen um 18,94 % höher als bei den Kontrollpflanzen. Dabei haben sich die Werte beider Gruppen mit einer mittleren Effektstärke signifikant voneinander unterschieden.

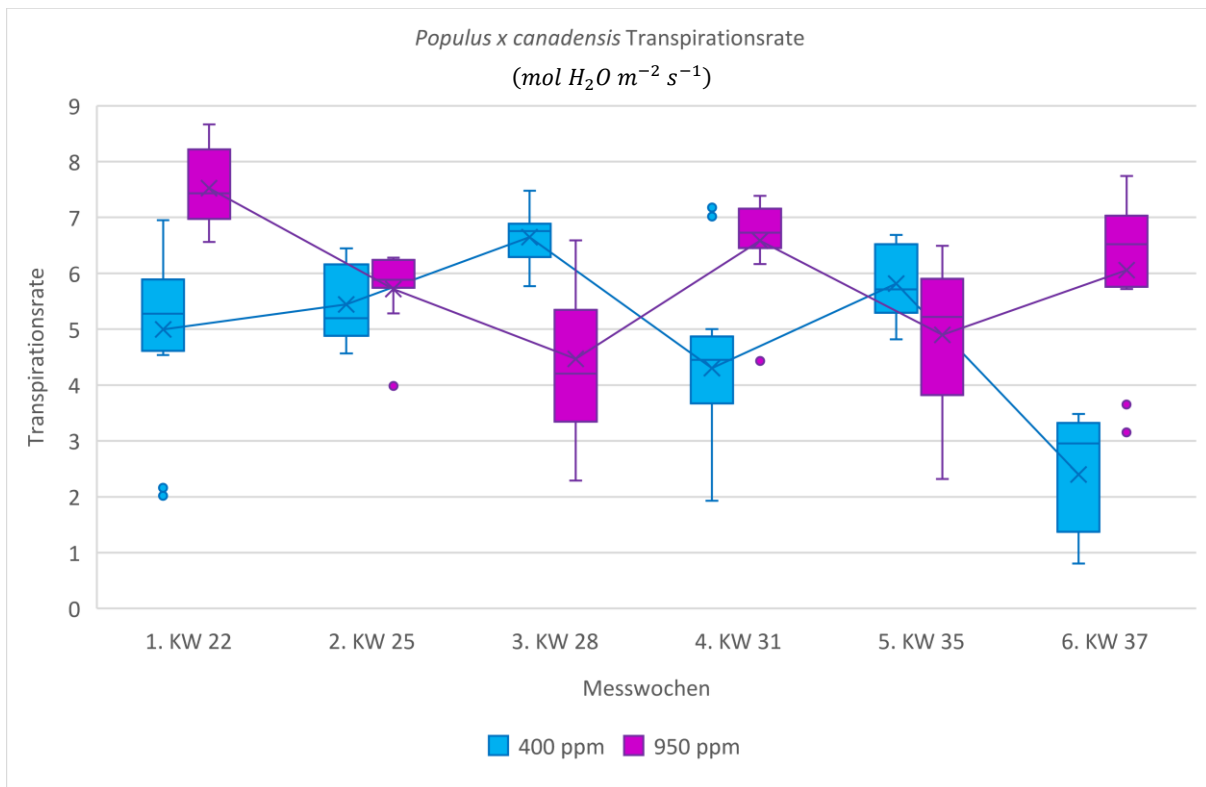


Abbildung 43: Transpirationsrate von *Populus x canadensis* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $\text{CO}_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Transpirationsrate	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,000	0,84	stark
2. KW 25	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,036	0,20	mittel
3. KW 28	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,000	0,78	stark
4. KW 31	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,000	0,66	stark
5. KW 35	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,000	0,35	mittel
6. KW 37	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,000	0,81	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canadensis</i> 400 ppm &lt; <i>P.x canadensis</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,28</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 41: Signifikanztest zwischen der Transpirationsrate von *P. x canadensis* (400 ppm) und *P. x canadensis* (950 ppm)

### 5.3.7 Stecklinge - Transpirationsrate *Populus nigra*

Die Transpirationsraten von *Populus nigra* haben sich bis auf KW 28 und KW 35 signifikant voneinander unterschieden, wobei beide Gruppen ähnlich oft eine höhere Transpirationsrate als die jeweils andere Gruppe aufgewiesen haben (Tabelle 42).

Bei der Kontrollgruppe war am Anfang der Vegetationsperiode ein leichter Anstieg der Transpirationsrate zu beobachten. Ab KW 25 folgte ein starker Rückgang der Transpirationsrate, der bis KW 31 angehalten hat. Nach einem darauffolgenden

starken Anstieg der Transpiration sind zum Ende der Vegetationsperiode die Transpirationsraten der Kontrollgruppe wieder stark gesunken und waren im Vergleich zu den vorherigen Messergebnissen auf einem niedrigen Niveau.

Bei den Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, ist von Messbeginn an bis KW 28 die Transpirationsrate stetig gesunken. Von KW 28 an stieg die Transpirationsrate wieder an und hat sich nach einer kurzen konstanten Phase zum Messende nochmal erhöht und erreichte so den höchsten Saisonwert. Zum Ende der Messserie waren die Transpirationsraten der begasten Pflanzen signifikant höher als bei den Kontrollpflanzen.

Die Spannweiten der beiden Gruppen haben sich während der saisonalen Messungen zum Teil erheblich unterschieden. In der Regel waren die Spannweiten der Messergebnisse der begasten Pflanzen deutlich niedriger.

Die Effektstärken der Signifikanztests variierten während der Messperiode von mittel bis stark (Abbildung 44).

Im Saisonschnitt waren die Transpirationsraten der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen um 10,36 % höher als bei den Pflanzen der Kontrollgruppe. Es lag eine statistische Signifikanz mit einer mittleren Effektstärke vor.

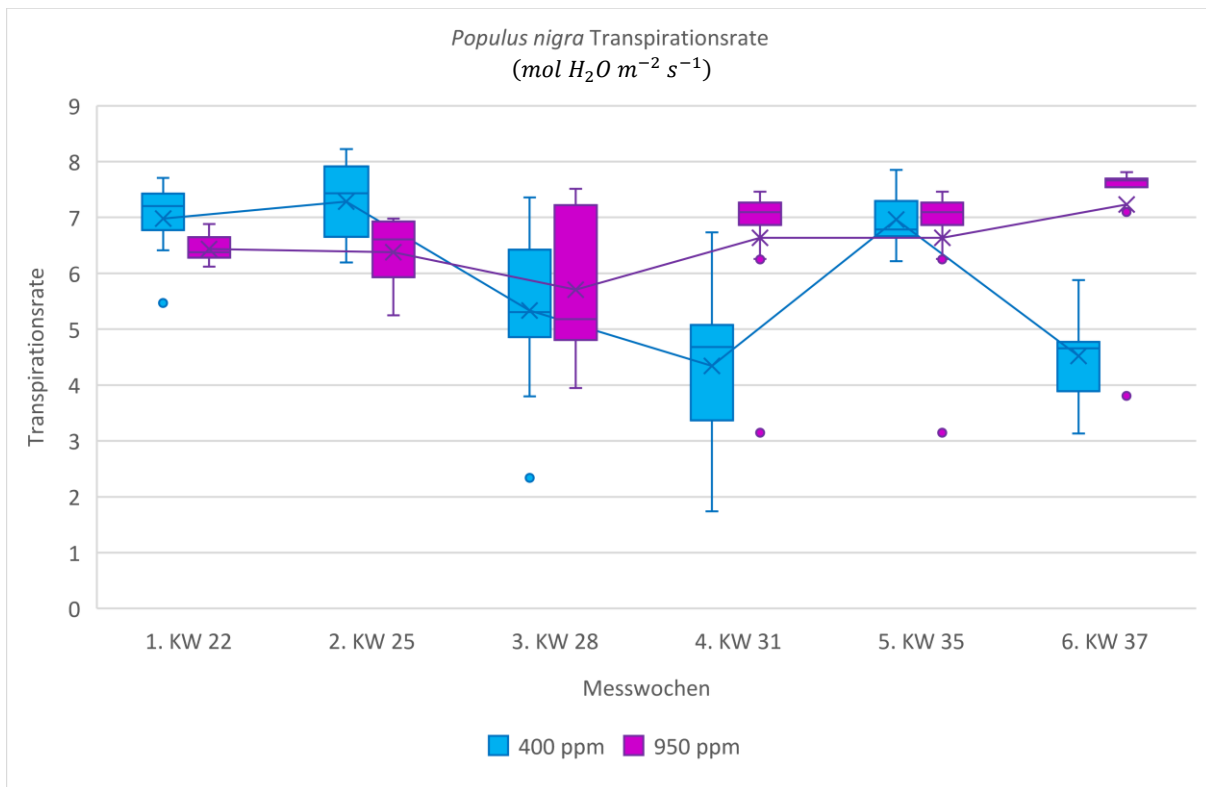


Abbildung 44: Transpiration von *Populus nigra* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Transpirationsrate	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. nigra</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,59	stark
2. KW 25	<i>P. nigra</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,49	mittel
3. KW 28	<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,335	-	-
4. KW 31	<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,69	stark
5. KW 35	<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,606	-	-
6. KW 37	<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,73	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P. nigra</i> 400 ppm &lt; <i>P. nigra</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,18</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 42: Signifikanztest zwischen der Transpirationsrate von *P. nigra* (400 ppm) und *P. nigra* (950 ppm)

### 5.3.8 Stecklinge - Transpirationsrate *Populus deltoides*

Die Transpirationsraten von *Populus deltoides* haben sich bis auf KW 25 signifikant voneinander unterschieden, wobei die Pflanzen, die erhöhtem CO<sub>2</sub> ausgesetzt waren, während der Wachstumsperiode größtenteils deutlich höhere Werte aufgewiesen haben als die Kontrollpflanzen (Tabelle 43).

Bei den Pflanzen der Kontrollgruppe ist die Transpirationsrate ab Beginn der Messungen kontinuierlich gesunken. Dieser Trend hat bis KW 35 angehalten. Zum

Ende der Messperiode ist bei den Kontrollpflanzen die Transpirationsrate nochmal angestiegen.

Die begasten Pflanzen hatten dagegen von Beginn an bis zur KW 31 wechselhafte Werte, die von Auf- und Abwärtstrends gekennzeichnet waren. Ab KW 31 folgte eine konstante Phase, bei der die Transpirationsrate ab KW 35 nochmal leicht gestiegen und zum Ende der Messungen wieder gesunken ist. Ab KW 28 waren die Transpirationsraten der begasten Pflanzen durchgehend signifikant höher als bei den Pflanzen der Kontrollgruppe, wobei meistens eine starke Effektstärke vorgelegen hat. Die Spannweiten beider Gruppen haben sich zum Teil ebenfalls deutlich unterschieden. Dabei variierte die Größe der Spannweiten je nach Messtag stark voneinander. Die Pflanzen der Kontrollgruppe hatten dabei in der Regel höhere Spannweiten der Messergebnisse. Dadurch haben sich häufig die Messwerte beider Gruppen überschritten (Abbildung 45).

Über den gesamten Messzeitraum gesehen waren die Transpirationsraten der Pflanzen, die einer erhöhten  $CO_2$  Konzentration ausgesetzt waren, um 34,27 % höher als bei den Kontrollpflanzen. Dabei lag ein signifikanter Effekt mit einer mittleren Effektstärke vor.

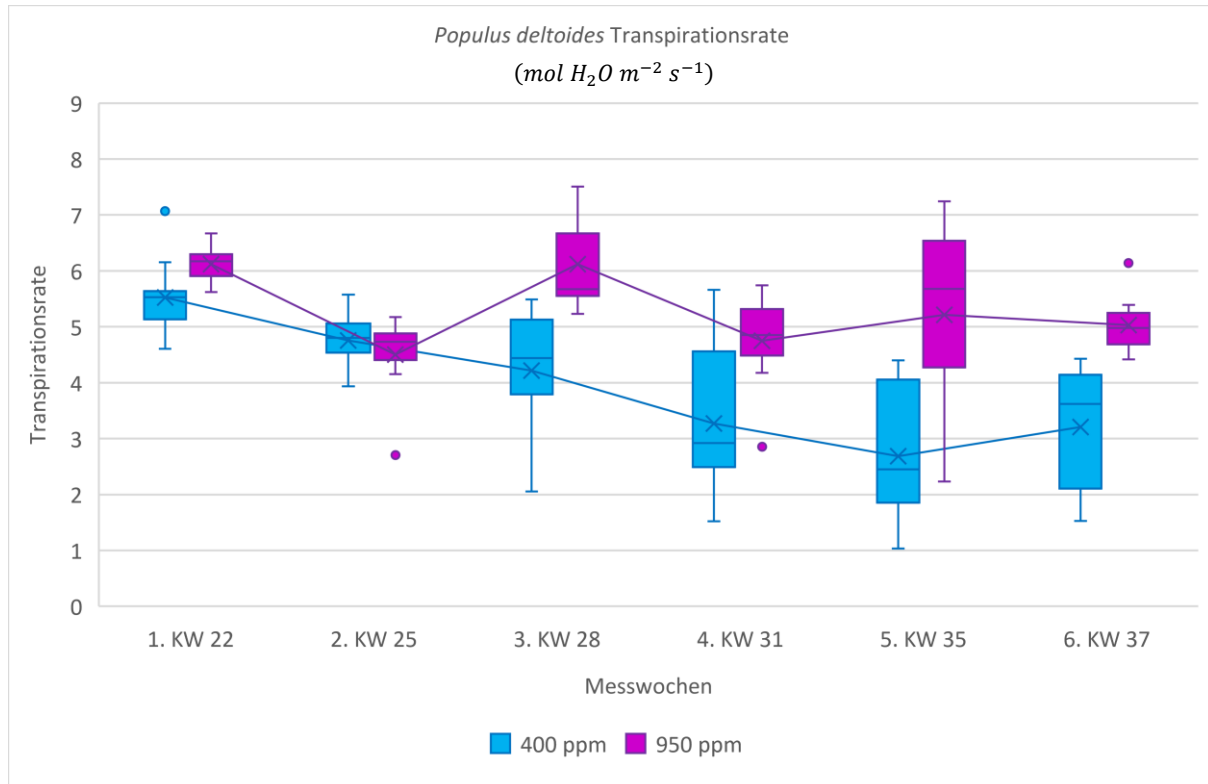


Abbildung 45: Transpiration von *Populus deltoides* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)



Signifikanztest					
Versuchstag	Transpirationsrate	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,59	stark
2. KW 25	<i>P. deltoides</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,320	-	-
3. KW 28	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,82	stark
4. KW 31	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,49	mittel
5. KW 35	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,65	stark
6. KW 37	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P. deltoides</i> 400 ppm &lt; <i>P. deltoides</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,48</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 43: Signifikanztest zwischen der Transpirationsrate von *P. deltoides* (400 ppm) und *P. deltoides* (950 ppm)

### 5.3.9 Stecklinge - Transpirationsrate Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen

Im direkten Vergleich lagen die Transpirationsraten unter Normalbedingungen bei der Hybridpappel *Populus x canadensis* während der Wachstumsperiode zwischen den beiden Pappelarten *Populus nigra* und *Populus deltoides*.

Im Vergleich mit den Ergebnissen von *Populus x canescens* und den Transpirationsraten von *Populus nigra* gab es bis auf KW 31 signifikante Unterschiede (Tabelle 44). Dabei waren die Transpirationsraten von *Populus nigra* oftmals höher, wobei die Effektstärke zwischen keinem und starkem Effekt variierte. Im Jahresdurchschnitt war die Transpirationsrate von *Populus nigra* um 19,23 % höher, wobei eine statistische Signifikanz zwischen den Werten beider Arten vorgelegen hat. Grundsätzlich war der Saisonverlauf der Transpirationsrate beider Arten sehr ähnlich und von Schwankungen gekennzeichnet. Die Spannweiten der Messungen waren auf einem ähnlichen Niveau.

Die Transpirationsraten von *Populus deltoides* waren dagegen im Vergleich zu den Werten von *Populus x canadensis* geringer, wobei die Transpirationsraten der Hybridpappel insgesamt häufiger höher waren als die von *Populus deltoides*. Dabei waren die Werte von *Populus deltoides* um 20,46 % geringer als bei den Hybridpappeln. Auch hier lag eine statistische Signifikanz zwischen den Werten beider Arten vor (Tabelle 45). Die Trends beider Arten haben sich während der Messperiode unterschieden. Im direkten Vergleich war der Trend bei *Populus tremula* überwiegend durch eine Reduzierung der Transpirationsrate gekennzeichnet. Der Verlauf der

Hybridpappeln war eher durch Schwankungen geprägt, wobei sich die Messwerte beider Arten dadurch häufiger überschritten haben (Abbildung 46).

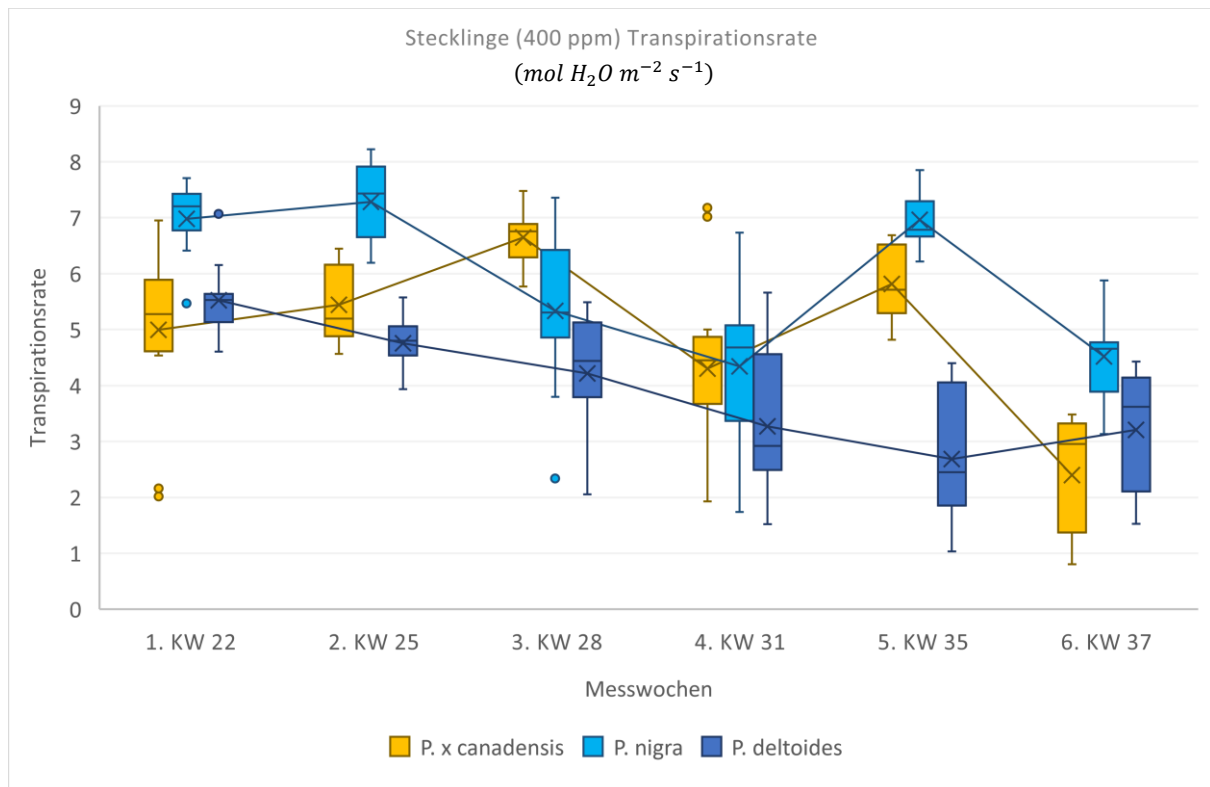


Abbildung 46: Vergleich der Transpirationsraten von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Transpirationsrate	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,000	0,78	stark
2. KW 25	<i>P. x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,000	0,67	stark
3. KW 28	<i>P. x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,000	0,48	mittel
4. KW 31	<i>P. x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	nein	0,320	-	-
5. KW 35	<i>P. x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,000	0,47	mittel
6. KW 37	<i>P. x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,000	0,85	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P. x canadensis</i> 400 ppm &lt; <i>P. nigra</i> 400 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,26</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 44: Signifikanztest zwischen den Transpirationsraten von *P. x canadensis* und *P. nigra* unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Transpirationsrate	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 400 ppm	nein	0,888	-	-
2. KW 25	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	ja	0,000	0,34	mittel
3. KW 28	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	ja	0,000	0,86	stark
4. KW 31	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	ja	0,002	1,00	mittel
5. KW 35	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	ja	0,000	0,63	stark
6. KW 37	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 400 ppm	ja	0,001	0,36	mittel
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canadensis</i> 400 ppm &gt; <i>P. deltoides</i> 400 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,31</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 45: Signifikanztest zwischen den Transpirationsraten von *P. x canadensis* und *P. deltoides* unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

### 5.3.10 Stecklinge - Transpirationsrate Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration

Unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration hatten die Pappelarten *Populus x canadensis*, *Populus nigra* und *Populus deltoides* veränderte Saisonverläufe bei der Transpirationsrate.

Ähnlich wie unter Normalbedingungen waren die Transpirationsraten bei *Populus nigra* im direkten Vergleich zu der Hybridpappel *Populus x canadensis* höher. Im Saisondurchschnitt hatte *Populus nigra* um 10,63 % höhere Transpirationsraten. Dabei haben sich die Werte beider Arten über die gesamte Messperiode gesehen signifikant voneinander unterschieden (Tabelle 46).

Beim Vergleich zwischen Hybridpappeln und *Populus deltoides* sind signifikante Unterschiede beobachtet worden (Tabelle 47). Auch hier waren die Transpirationsraten der Hybridpappeln in der Regel höher. Dadurch, dass bei beiden Arten stärkere Schwankungen je nach Messwoche erfasst worden sind, haben sich die Messwerte beider Arten häufig überschritten. Begünstigt war dieser Umstand durch besonders hohe Spannweiten (Abbildung 47).

Im Saisondurchschnitt waren die Transpirationsraten von *Populus deltoides* um 10,20 % geringer als bei den Hybridpappeln. Dabei lag zwischen den Werten beider Arten eine statistische Signifikanz vor.

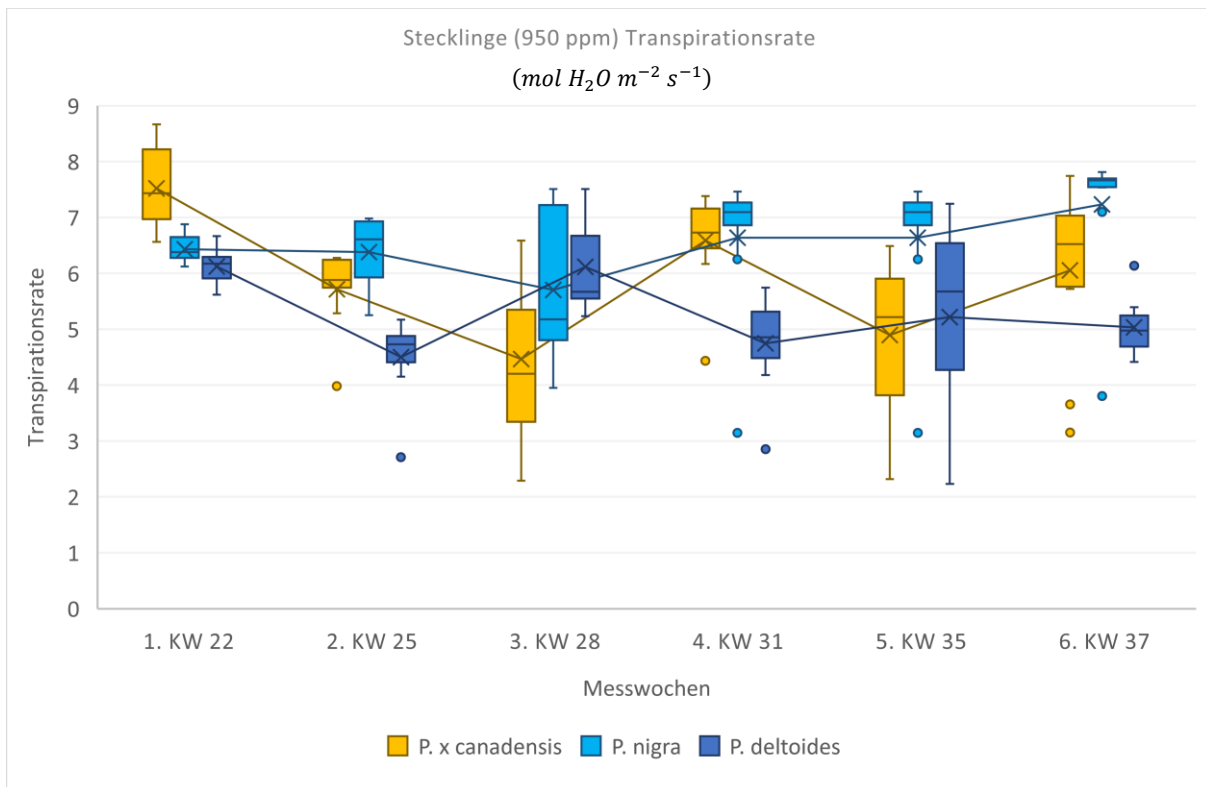


Abbildung 47: Vergleich der Transpirationsrate von Stecklingen unter erhöhter  $\text{CO}_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Transpirationsrate	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,65	stark
2. KW 25	<i>P. x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,002	0,33	mittel
3. KW 28	<i>P. x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,39	mittel
4. KW 31	<i>P. x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,476	-	-
5. KW 35	<i>P. x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,67	stark
6. KW 37	<i>P. x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,50	mittel
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P. x canadensis</i> 950 ppm &lt; <i>P. nigra</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,25</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 46: Signifikanztest zwischen den Transpirationsraten von *P. x canadensis* und *P. nigra* unter erhöhter  $\text{CO}_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Transpirationsrate	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	1,00	stark
2. KW 25	<i>P. x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,61	stark
3. KW 28	<i>P. x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,6	stark
4. KW 31	<i>P. x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,64	stark
5. KW 35	<i>P. x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,453	-	-
6. KW 37	<i>P. x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,001	0,35	mittel
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P. x canadensis</i> 950 ppm &gt; <i>P. deltoides</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,27</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 47: Signifikanztest zwischen den Transpirationsraten von *P. x canadensis* und *P. deltoides* unter erhöhter  $\text{CO}_2$ -Konzentration (950 ppm)

## 5.4 Interzellulare $CO_2$ -Konzentration

### 5.4.1 Einjährige Pflanzen - Interzellulare $CO_2$ -Konzentration *Populus x canescens*

Die interzellularen  $CO_2$ -Konzentrationen der Hybridpappel *Populus x canescens* aus der Versuchs- und Kontrollgruppe haben sich signifikant voneinander unterschieden (Tabelle 48). Die Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, wiesen eine deutlich höhere interzellulare  $CO_2$ -Konzentration auf als die Kontrollgruppe. Dabei war an allen Versuchstagen die Effektstärke stark.

Bei der Kontrollgruppe war die interzellulare  $CO_2$ -Konzentration während der Vegetationsperiode auf einem konstanten Niveau, wobei der Verlauf bis KW 28 durch einen leichten Anstieg gekennzeichnet war. Nach einem Rückgang in den folgenden Messwochen ist zum Ende der Messperiode die interzellulare  $CO_2$ -Konzentration wieder leicht angestiegen.

Bei der mit  $CO_2$  begasten Pflanzengruppe war an den ersten Messtagen ein starker Anstieg der Werte zu beobachten, der sich in der folgenden Messwoche wieder abgeschwächt hat. Ab KW 28 sind die interzellularen  $CO_2$ -Konzentrationen gesunken, wobei der Trend bis zum Ende der Messperiode angehalten hat. Ab KW 31 waren trotz der leichten Abnahme die Werte bis zum Ende der Messperiode auf einem ähnlichen Niveau. Die Spannweiten der Messergebnisse waren bei der begasten Pflanzengruppe ebenfalls deutlich höher. Die Messergebnisse beider Gruppen haben sich zu keinem Zeitpunkt der Messperiode überschritten (Abbildung 48).

Über den gesamten Messzeitraum gesehen waren die Ergebnisse der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen um 163,60 % höher als bei den Kontrollpflanzen. Dabei lag ein signifikanter Effekt vor, mit einer starken Effektstärke.

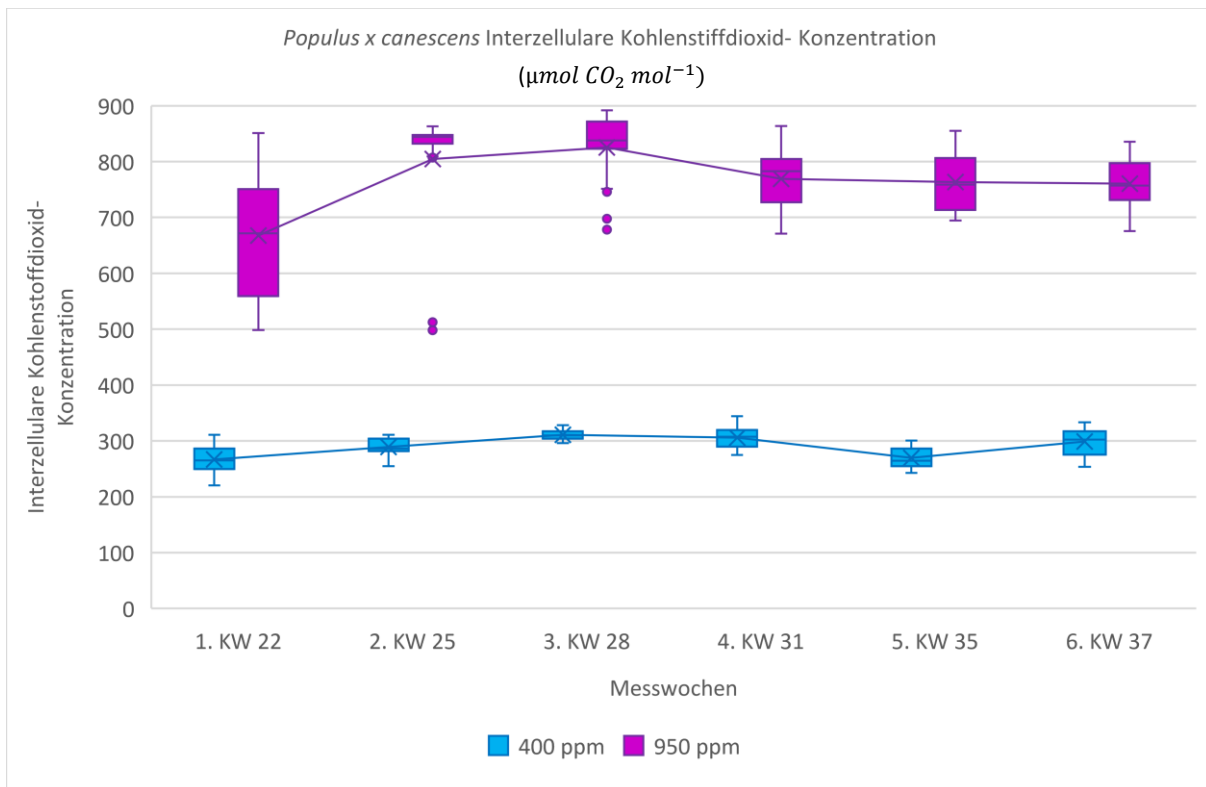


Abbildung 48: Interzelluläre  $CO_2$ - Konzentration von *Populus x canescens* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Interzelluläre $CO_2$ - Konzentration	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
6. KW 37	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 400 ppm &lt; <i>P.x canescens</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,87</b>	<b>stark</b>

Tabelle 48: Signifikanztest zwischen der Interzellulären  $CO_2$ - Konzentration von *P. x canescens* (400 ppm) und *P. x canescens* (950 ppm)

#### 5.4.2 Einjährige Pflanzen - Interzelluläre $CO_2$ - Konzentration *Populus tremula*

Die Pflanzen, die erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  ausgesetzt waren, haben im Vergleich zur Kontrollgruppe eine signifikant höhere interzelluläre  $CO_2$ - Konzentrationen aufgewiesen, bei einer durchgehend starken Effektstärke (Tabelle 49).

Bei der Kontrollgruppe war von Beginn an ein leichter Anstieg zu verzeichnen, der bis KW 31 angehalten hat. In der darauffolgenden Messwoche ist ein Rückgang der Werte beobachtet worden. Zum Ende der Messperiode ist die interzelluläre  $CO_2$ -Konzentration wieder angestiegen.

Bei den begasten Versuchspflanzen war zu Anfang der Vegetationsperiode ein deutlicher Anstieg der interzellulären  $CO_2$ -Konzentration zu beobachten. In den darauffolgenden Messwochen sind nach einem leichten Rückgang der interzellulären  $CO_2$ -Konzentration die Werte auf einem konstanten Niveau verblieben. Zum Ende der Messperiode sind die Werte nochmal leicht angestiegen.

Im direkten Vergleich waren die Spannweiten der Messergebnisse bei den begasten Pflanzen höher als bei der Kontrollgruppe. Zu keinem Zeitpunkt haben sich die Werte beider Gruppen überschritten.

Im Saisonverlauf waren die interzellulären  $CO_2$ -Konzentrationen der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen um 161,23 % höher als bei den Kontrollpflanzen (Abbildung 49). Es hat ein signifikanter Effekt vorgelegen, mit einer starken Effektstärke.

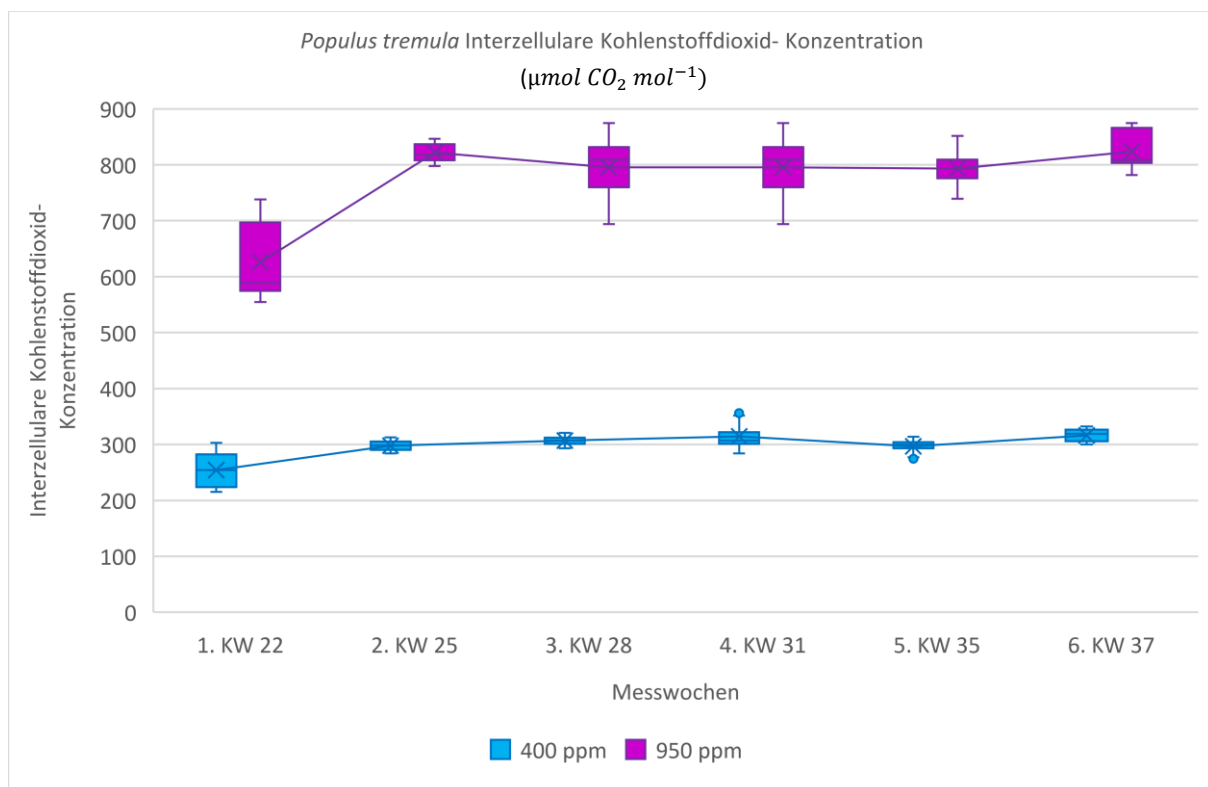


Abbildung 49: Interzelluläre  $CO_2$ -Konzentration von *Populus tremula* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Interzellulare CO <sub>2</sub> - Konzentration	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
2. KW 25	<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
3. KW 28	<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
4. KW 31	<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
5. KW 35	<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
6. KW 37	<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P. tremula</i> 400 ppm &lt; <i>P. tremula</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,87</b>	<b>stark</b>

Tabelle 49: Signifikanztest zwischen der Interzellularen CO<sub>2</sub>- Konzentration von *P. tremula* (400 ppm) und *P. tremula* (950 ppm)

### 5.4.3 Einjährige Pflanzen - Interzellulare CO<sub>2</sub>- Konzentration *Populus alba*

Die Pflanzen der Art *Populus alba* hatten unter erhöhtem atmosphärischem CO<sub>2</sub> signifikant höhere interzellulare CO<sub>2</sub>- Konzentrationen als die Pflanzen der Kontrollgruppe (Tabelle 50). Die Effektstärke war während den Messungen stark.

Bei den Pflanzen der Kontrollgruppe war am Anfang der Messperiode ein Anstieg der interzellularen CO<sub>2</sub>- Konzentration zu beobachten, der sich ab KW 25 noch einmal verstärkt hat. Ab KW 28 sind die Werte jedoch wieder gesunken. Nach einer kurzen konstanten Phase war zum Messende ein erneuerter leichter Rückgang der Werte beobachtet worden.

Die Gruppe der Pflanzen, die erhöhten CO<sub>2</sub>- Bedingungen ausgesetzt waren, hatte zu Beginn der Messungen einen starken Anstieg der interzellularen CO<sub>2</sub>- Konzentration. Im Anschluss hat sich die Zunahme deutlich abgeschwächt. Es folgte ab KW 28 ein deutlicher Rückgang. Ab KW 31 sind die Werte wieder erneuert gestiegen, wobei dieser Trend bis zum Messende angehalten hat.

Auch hier waren die Spannweiten der Messergebnisse bei den mit CO<sub>2</sub> begasten Pflanzen deutlich höher als bei der Kontrollgruppe. Zu keinem Zeitpunkt der Messungen haben sich die Messwerte beider Gruppen überschritten (Abbildung 50). Es lag zu jedem Zeitpunkt eine starke Effektstärke vor.

Die Ergebnisse der mit CO<sub>2</sub> begasten Pflanzen waren durchschnittlich über die gesamte Messperiode gesehen um 160,82 % höher als bei den Kontrollpflanzen. Es lag ein signifikanter Effekt vor, mit einer starken Effektstärke.



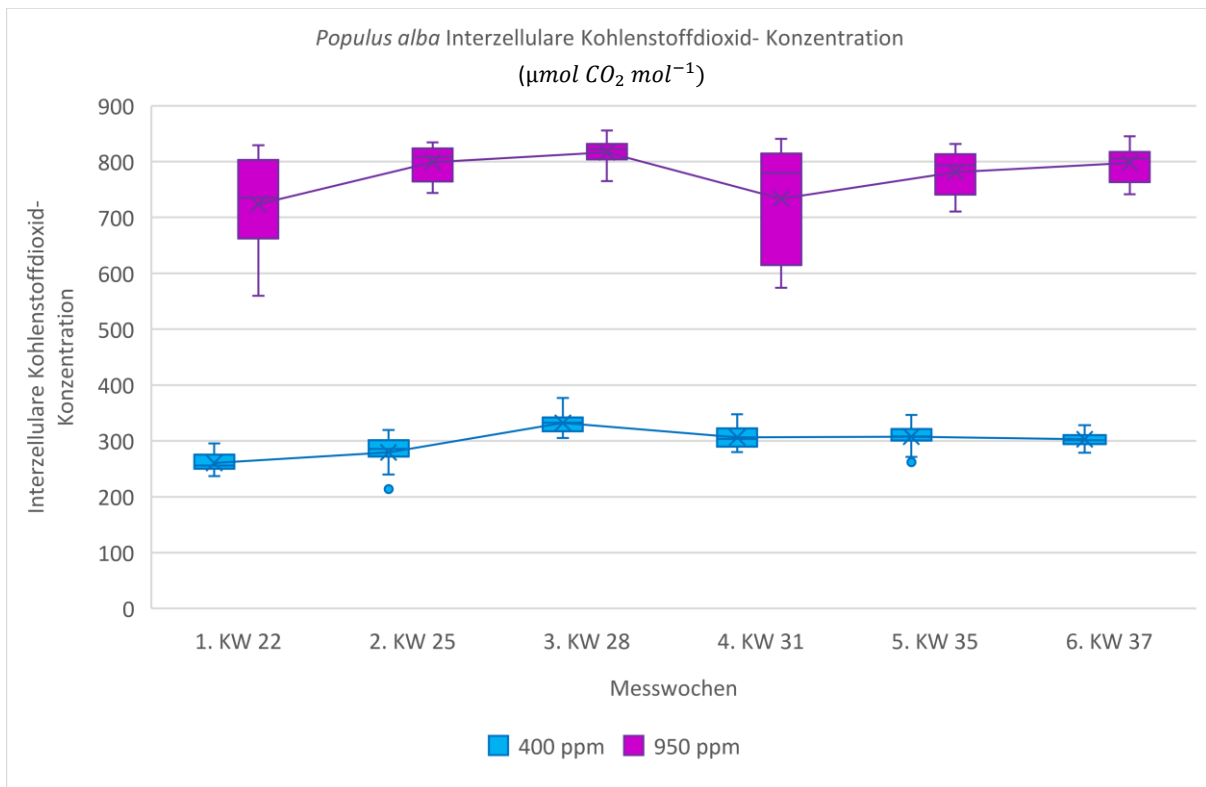


Abbildung 50: Interzelluläre  $\text{CO}_2$ - Konzentration von *Populus alba* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $\text{CO}_2$ - Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Interzelluläre $\text{CO}_2$ - Konzentration	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,57	stark
2. KW 25	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
3. KW 28	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
4. KW 31	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
5. KW 35	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
6. KW 37	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P. alba</i> 400 ppm &lt; <i>P. alba</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,87</b>	<b>stark</b>

Tabelle 50: Signifikanztest zwischen der Interzellulären  $\text{CO}_2$ - Konzentration von *P. alba* (400 ppm) und *P. alba* (950 ppm)

#### 5.4.4 Einjährige Pflanzen - Interzelluläre $\text{CO}_2$ - Konzentration Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen

Beim Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canescens* und den beiden Pappelarten *Populus tremula* und *Populus alba* waren während der Messperiode keine länger anhaltenden Unterschiede bei der interzellulären  $\text{CO}_2$ - Konzentration festgestellt worden. Eher waren die Unterschiede auf die Messtage beschränkt signifikant bzw. nicht signifikant.

Beim direkten Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canescens* und *Populus tremula* waren erst gegen Ende der Messperiode eindeutige Unterschiede erkennbar. Zum Anfang der Messungen war noch kein eindeutiger Trend zwischen den beiden Arten erkennbar. Zum Ende der Messperiode waren jedoch die interzellularen  $CO_2$ -Konzentrationen von *Populus tremula* signifikant höher. Im Saisondurchschnitt war die interzellulare  $CO_2$ -Konzentration von *Populus tremula* um 2,45 % höher als bei den Hybridpappeln. Es lag ein signifikanter Effekt vor (Tabelle 51).

Beim Vergleich zwischen der Hybridpappel und *Populus alba* war ebenfalls kein eindeutiger Trend zwischen den beiden Arten beobachtet worden. An den meisten Messwochen lag keine Signifikanz zwischen den Ergebnissen vor (Tabelle 52). Erst in KW 28 und zum Messende in KW 35 waren die interzellularen  $CO_2$ -Konzentrationen der Gruppe *Populus alba* deutlich höher als bei den Hybridpappeln (Abbildung 51). Im Durchschnitt waren die Werte von *Populus alba* um 2,53 % höher als bei den Hybridpappeln. Auch hier waren die Unterschiede zwischen den beiden Arten signifikant.

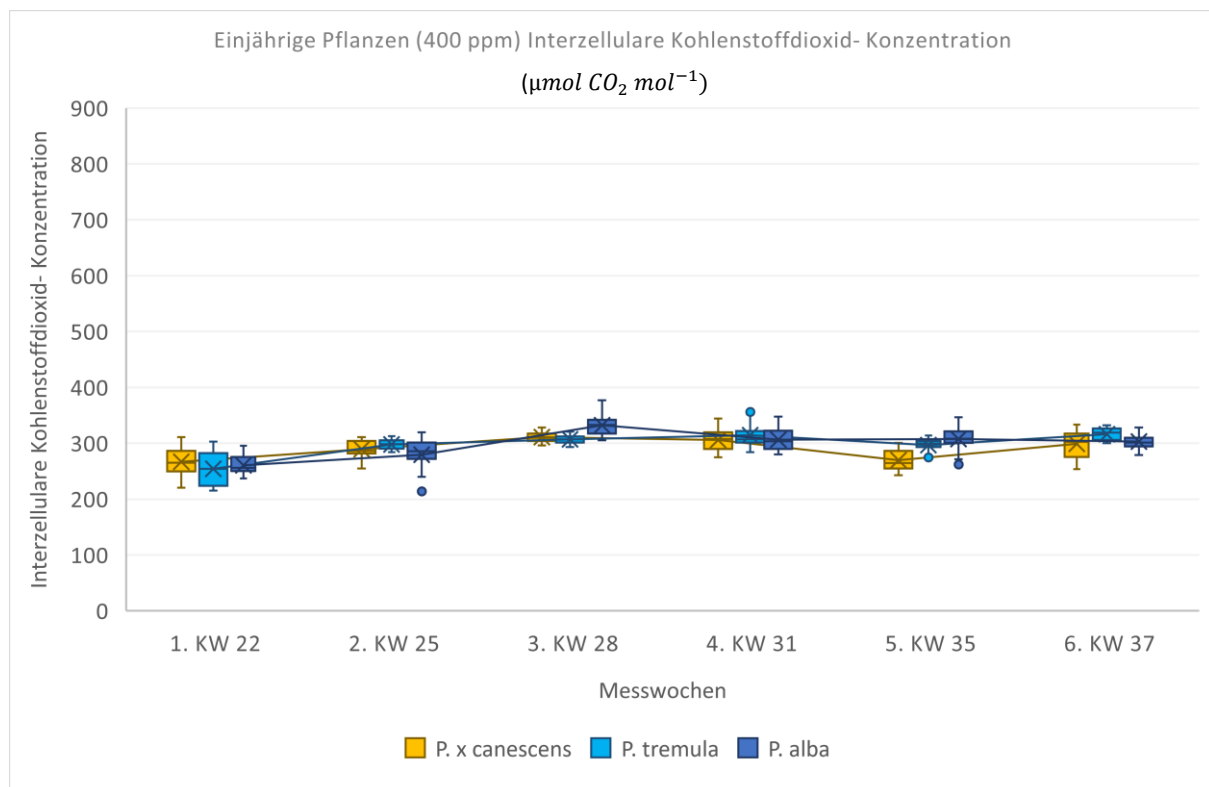


Abbildung 51: Vergleich der interzellulären  $CO_2$ -Konzentration von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Interzellulare CO <sub>2</sub> - Konzentration	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	nein	0,060	-	-
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 400 ppm	ja	0,023	0,26	mittel
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	nein	0,129	-	-
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 400 ppm	nein	0,193	-	-
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 400 ppm	ja	0,000	0,55	stark
6. KW 37	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 400 ppm	ja	0,000	0,45	mittel
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 400 ppm &lt; <i>P. tremula</i> 400 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,001</b>	<b>0,15</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 51: Signifikanztest zwischen den interzellularen CO<sub>2</sub>- Konzentrationen von *P. x canescens* und *P. tremula* unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Interzellulare CO <sub>2</sub> - Konzentration	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	nein	0,060	-	-
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 400 ppm	nein	1,000	-	-
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,000	0,58	stark
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 400 ppm	nein	0,193	-	-
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,000	0,84	stark
6. KW 37	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	nein	1,000	-	-
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 400 ppm &lt; <i>P. alba</i> 400 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,002</b>	<b>0,14</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 52: Signifikanztest zwischen den interzellularen CO<sub>2</sub>- Konzentrationen von *P. x canescens* und *P. alba* unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

#### 5.4.5 Einjährige Pflanzen - Interzellulare CO<sub>2</sub>- Konzentration Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO<sub>2</sub>- Konzentration

Die interzellularen CO<sub>2</sub>- Konzentrationen haben sich im direkten Vergleich in der Regel signifikant voneinander unterschieden, wobei im Wechsel entweder die Hybridpappel oder die Pappeln höhere Werte aufgewiesen haben.

Bis zu KW 28 waren die Werte der Hybridpappel im Vergleich zu *Populus tremula* höher, wobei sich nur an einer Messwoche die Werte signifikant voneinander unterschieden haben (Tabelle 53). Ab KW 35 bis zum Ende der Saison waren die Werte von *Populus tremula* signifikant höher, bei einer Effektstärke von mittel bis stark. Im Saisondurchschnitt waren die Werte der Gruppe *Populus tremula* um 1,53 % höher als bei den Hybridpappeln. Die Unterschiede waren nicht signifikant.

Im direkten Vergleich zwischen *Populus x canadensis* und *Populus alba* war zum Anfang der Messperiode die interzellulare CO<sub>2</sub>- Konzentration von *Populus alba* signifikant höher, wurde aber ab KW 25 von der Hybridpappel übertroffen (Tabelle 54). Zur KW 31 waren die Konzentrationen von *Populus alba* wieder signifikant höher. In

der darauffolgenden Messwoche gab es keine signifikanten Unterschiede. Gegen Messende waren die Werte von *Populus alba* signifikant höher, wobei die Effektstärke bei „mittel“ gelegen hat (Abbildung 52).

Im Durchschnitt waren die interzellularen  $CO_2$ - Konzentrationen der Gruppe *Populus alba* um 1,45 % höher als bei den Hybridpappeln. Die Unterschiede zwischen den beiden Arten waren nicht signifikant.

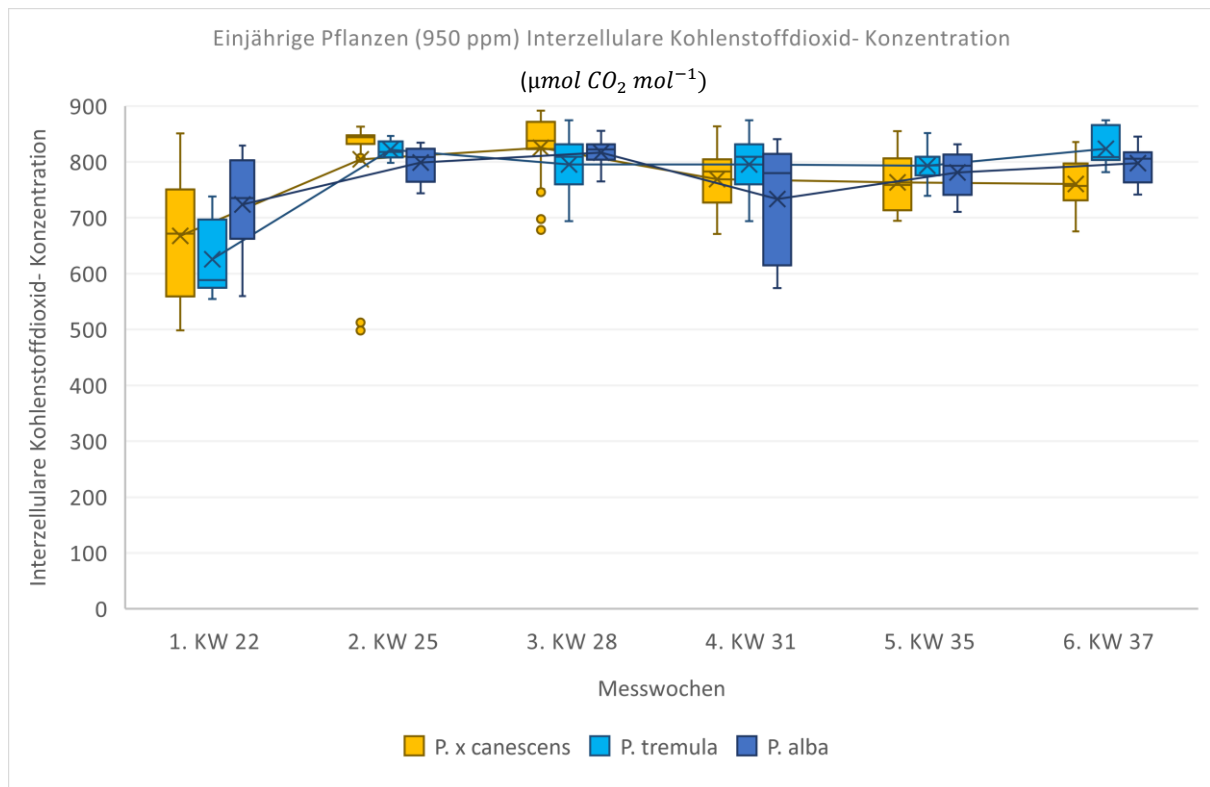


Abbildung 52: Vergleich der interzellularen  $CO_2$ - Konzentration von einjährigen Pflanzen unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration

Signifikanztest					
Versuchstag	Interzellulare $CO_2$ - Konzentration	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,172	-	-
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,36	mittel
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,747	-	-
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,060	-	-
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,005	0,32	mittel
6. KW 37	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,60	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 950 ppm &lt; <i>P. tremula</i> 950 ppm</b>	<b>nein</b>	<b>0,446</b>	-	-

Tabelle 53: Signifikanztest zwischen den interzellularen-  $CO_2$  Konzentrationen von *P. x canescens* und *P. tremula* unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Interzellulare CO <sub>2</sub> - Konzentration	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,015	0,27	mittel
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,64	stark
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,39	mittel
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	1,000	-	-
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	1,060	-	-
6. KW 37	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,001	0,36	mittel
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 950 ppm &gt; <i>P. alba</i> 950 ppm</b>	<b>nein</b>	<b>0,446</b>	<b>-</b>	<b>-</b>

Tabelle 54: Signifikanztest zwischen den interzellularen CO<sub>2</sub>- Konzentrationen von *P. x canescens* und *P. alba* unter erhöhter CO<sub>2</sub>- Konzentration (950 ppm)

#### 5.4.6 Stecklinge - Interzellulare CO<sub>2</sub>- Konzentration *Populus x canadensis*

Die Pflanzen, die erhöhtem atmosphärischen CO<sub>2</sub> ausgesetzt waren, hatten im Vergleich zu den Pflanzen der Kontrollgruppe eine deutlich höhere interzellulare CO<sub>2</sub>- Konzentration. Die Unterschiede waren über die gesamte Wachstumsperiode signifikant, wobei die Effektstärke durchgehend stark war (Tabelle 55).

Bei der Kontrollgruppe war am Anfang der Saison ein Anstieg der interzellularen CO<sub>2</sub>- Konzentration zu beobachten, der sich ab KW 25 abgeschwächt hat und bis KW 28 angehalten hat. Es folgte ab KW 28 eine Abnahme der Konzentration und im Anschluss eine konstante Phase. Zum Ende der Messperiode war ein Rückgang der interzellularen CO<sub>2</sub>- Konzentration zu beobachten.

Die Gruppe der Pflanzen, die erhöhtem CO<sub>2</sub> ausgesetzt war, haben bis KW 31 sehr konstante interzellulare CO<sub>2</sub>- Konzentrationen über die Messtage gehabt, wobei ein leichter Anstieg zu beobachten war. Um KW 31 ist die Konzentration gesunken und im Anschluss zum Ende der Messperiode wieder angestiegen. Die Spannweiten der Messergebnisse beider Gruppen waren sehr ähnlich. An keinem Messtag der Wachstumsperiode haben sich die Messwerte beider Gruppen überschritten (Abbildung 53).

Die Ergebnisse der mit CO<sub>2</sub> begasten Pflanzen waren im Saisonschnitt um 167,07 % höher als bei den Kontrollpflanzen. Dabei lag ein signifikanter Effekt vor, mit einer starken Effektstärke.

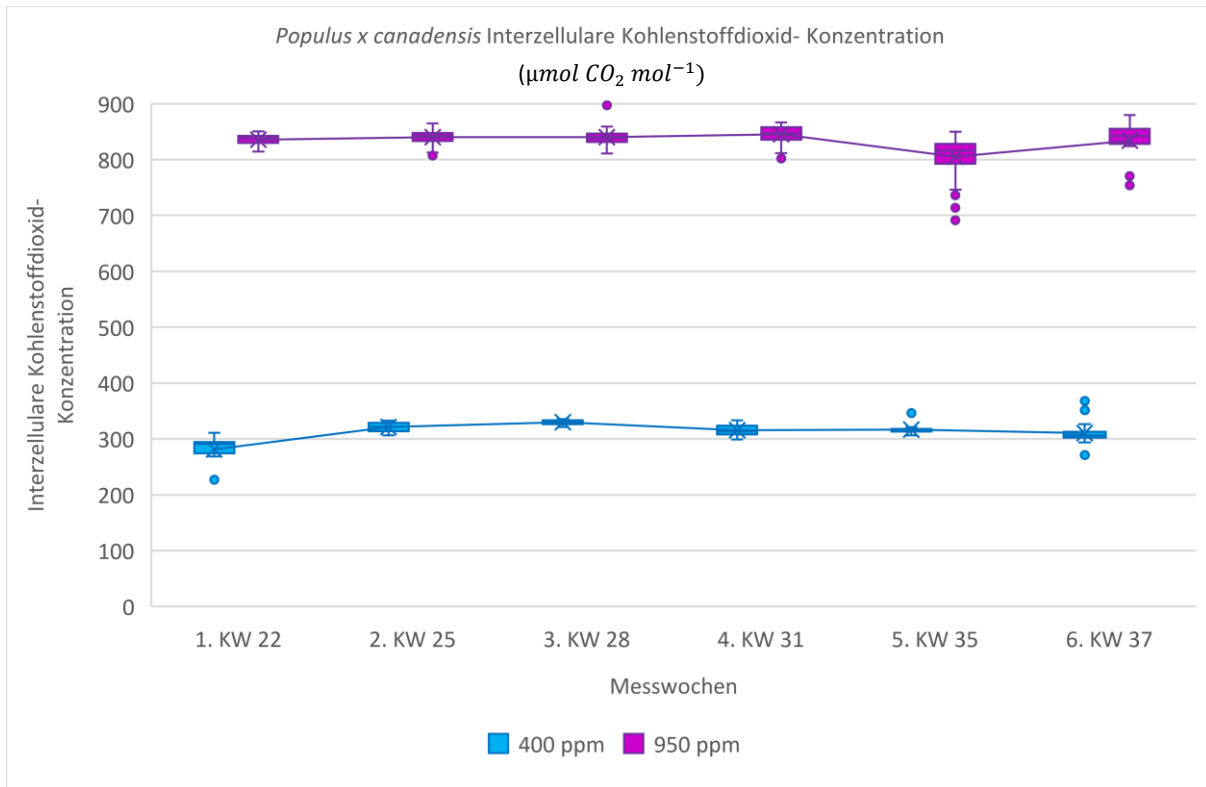


Abbildung 53: Interzelluläre  $\text{CO}_2$ - Konzentration von *Populus x canadensis* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $\text{CO}_2$ - Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Interzelluläre $\text{CO}_2$ Konzentration	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
2. KW 25	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
3. KW 28	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,056	0,86	stark
4. KW 31	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,549	0,86	stark
5. KW 35	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
6. KW 37	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,005	0,86	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canadensis</i> 400 ppm &lt; <i>P.x canadensis</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,87</b>	<b>stark</b>

Tabelle 55: Signifikanztest zwischen der Interzellulären  $\text{CO}_2$ - Konzentration von *P. x canadensis* (400 ppm) und *P. x canadensis* (950 ppm)

#### 5.4.7 Stecklinge - Interzelluläre $\text{CO}_2$ - Konzentration *Populus nigra*

Pflanzen, die einer erhöhten atmosphärischen  $\text{CO}_2$ - Konzentration ausgesetzt waren, hatten während der gesamten Wachstumsperiode deutlich höhere interzelluläre  $\text{CO}_2$ - Konzentrationen als die Kontrollgruppe. Die Werte beider Gruppen haben sich signifikant voneinander unterschieden, wobei die Effektstärke ausschließlich stark war (Tabelle 56).

Bei der Kontrollgruppe war nach einer kurzen konstanten Phase ein leichter Anstieg der interzellularen  $CO_2$ -Konzentrationen zu beobachten. Es folgte eine wechselhafte Phase, die durch leichte Schwankungen der Werte geprägt war. Zum Ende der Messperiode ist die interzelluläre  $CO_2$ -Konzentration wieder gesunken.

Bei der mit  $CO_2$  begasten Gruppe war seit Anfang der Vegetationsperiode ein Anstieg der interzellulären  $CO_2$ -Konzentration zu beobachten. Ab KW 31 folgte eine konstante Phase. Zum Ende der Messperiode ist die interzelluläre  $CO_2$ -Konzentration der begasten Pflanzen nochmal angestiegen.

Beide Gruppen hatten während der gesamten Messperiode ähnliche Spannweiten der Messergebnisse. An keinem Tag haben sich die Werte beider Gruppen überschritten (Abbildung 54).

Die Ergebnisse der Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, übertrafen die Werte der Kontrollpflanzen im Gesamtdurchschnitt um 159,35 %. Dabei haben sich die Werte beider Gruppen signifikant mit einer starken Effektstärke voneinander unterschieden.

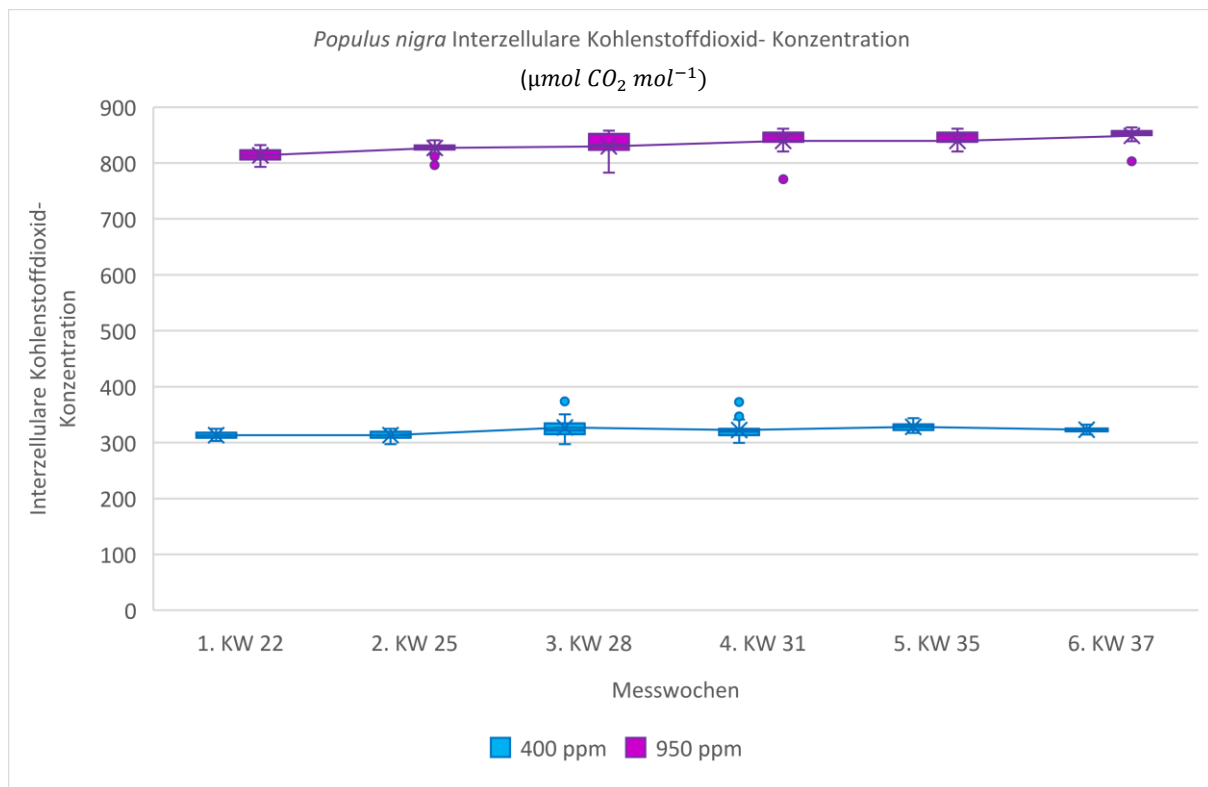


Abbildung 54: Interzelluläre  $CO_2$ -Konzentration von *Populus nigra* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Interzellulare CO <sub>2</sub> - Konzentration	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
2. KW 25	<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
3. KW 28	<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
4. KW 31	<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
5. KW 35	<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
6. KW 37	<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P. nigra</i> 400 ppm &lt; <i>P. nigra</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,87</b>	<b>stark</b>

Tabelle 56: Signifikanztest zwischen der Interzellularen CO<sub>2</sub>- Konzentration von *P. nigra* (400 ppm) und *P. nigra* (950 ppm)

#### 5.4.8 Stecklinge - Interzellulare CO<sub>2</sub>- Konzentration *Populus deltoides*

Die interzellulare CO<sub>2</sub>- Konzentrationen von den Pflanzen der Art *Populus deltoides*, die erhöhtem atmosphärischen CO<sub>2</sub> ausgesetzt waren, haben sich signifikant von den Werten der Kontrollgruppe unterschieden, wobei die Effektstärke ausschließlich während der gesamten Wachstumsperiode stark war (Tabelle 57).

Bei den Pflanzen, die Normalbedingungen ausgesetzt waren, war zum Anfang der Messperiode ein leichter Anstieg der Werte zu verzeichnen, der bis KW 28 angehalten hat. Nach einer anschließenden Abnahme der interzellularen CO<sub>2</sub>- Konzentration war nach einer kurzen konstanten Phase zum Messende wieder ein Anstieg der Werte zu beobachten.

Nach einer anfänglichen leichten Zunahme der Konzentration bei den mit CO<sub>2</sub> begasten Pflanzen, die bis KW 28 angehalten hat, war darauffolgend ein stärkerer Rückgang zu beobachten. Nach einer kurzen konstanten Phase gab es zum Ende der Messperiode wieder einen deutlichen Anstieg der interzellularen CO<sub>2</sub>- Konzentration. Die Spannweite der Messergebnisse war bei den mit CO<sub>2</sub> begasten Pflanzen deutlich höher als bei der Kontrollgruppe. An keinem Messtag haben sich die Werte beider Gruppen überschritten (Abbildung 55).

Die Ergebnisse der mit CO<sub>2</sub> begasten Pflanzen waren im Saisonschnitt um 165,58 % höher als bei den Pflanzen, die Normalbedingungen ausgesetzt waren. Es lag ein signifikanter Effekt mit einer starken Effektstärke vor.



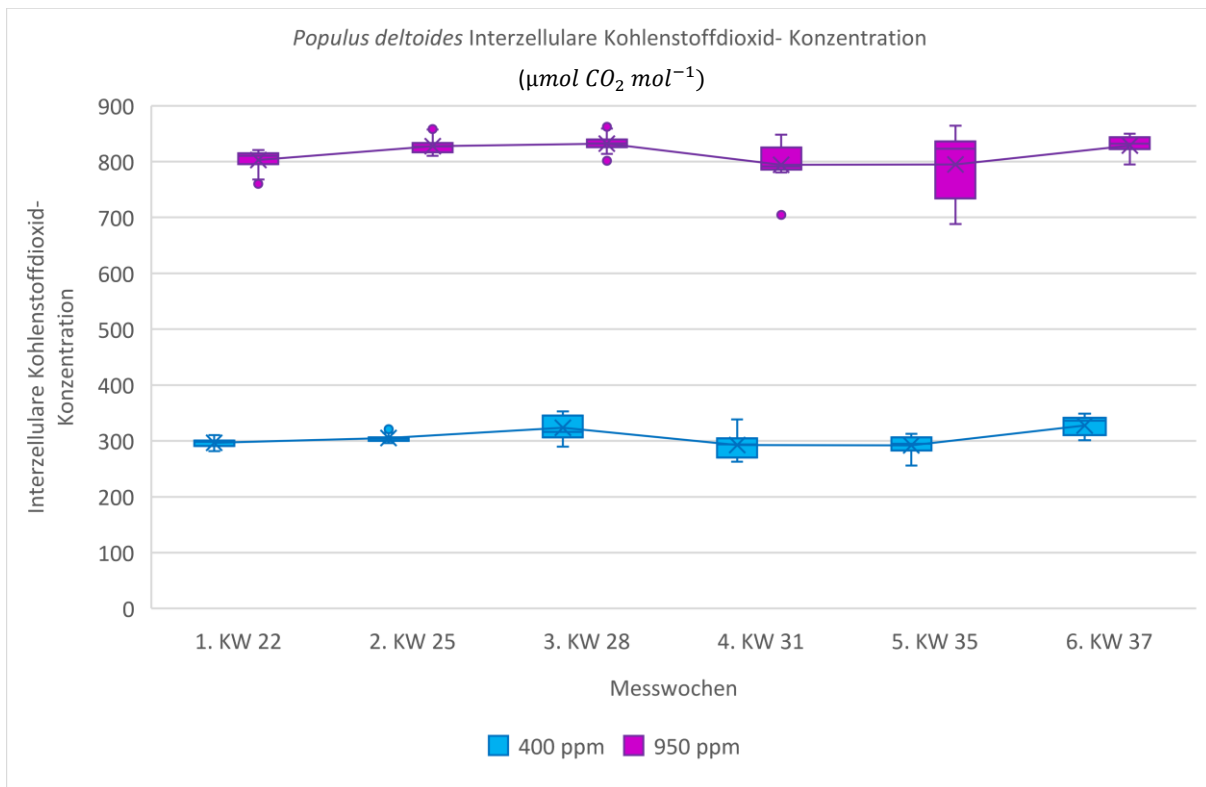


Abbildung 55: Interzelluläre  $\text{CO}_2$ - Konzentration von *Populus deltoides* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $\text{CO}_2$ - Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Interzelluläre $\text{CO}_2$ - Konzentration	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
2. KW 25	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
3. KW 28	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
4. KW 31	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
5. KW 35	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
6. KW 37	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P. deltoides</i> 400 ppm &lt; <i>P. deltoides</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,87</b>	<b>stark</b>

Tabelle 57: Signifikanztest zwischen der Interzellulären  $\text{CO}_2$ - Konzentration von *P. deltoides* (400 ppm) und *P. deltoides* (950 ppm)

#### 5.4.9 Stecklinge - Interzelluläre $\text{CO}_2$ - Konzentration Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen

Beim direkten Vergleich zwischen der Hybridpappel und den beiden Pappelarten *Populus nigra* und *Populus deltoides* sind keine eindeutigen Trends während der Messperiode beobachtet worden.

Beim direkten Vergleich zwischen *Populus x canadensis* und *Populus nigra* waren die Unterschiede zwischen den beiden Arten nur zu Anfang und gegen Ende der

Messperiode eindeutig. Hierbei waren die Ergebnisse von *Populus nigra* in der Regel signifikant höher (Tabelle 58). Da beide Gruppen einen ähnlichen Saisonverlauf bei der interzellularen  $CO_2$ -Konzentration hatten, waren besonders in der Mitte der Messperiode die Unterschiede nicht signifikant. Bei beiden Gruppen schwankte je nach Messtag die Spannweite der Ergebnisse. Größtenteils haben sich die Ergebnisse überschritten. Im Saisondurchschnitt waren die interzellularen  $CO_2$ -Konzentrationen von *Populus nigra* um 2,95 % höher als bei der Hybridpappel. Dabei haben sich die Ergebnisse beider Arten signifikant voneinander unterschieden.

Beim direkten Vergleich zwischen der Hybridpappel und *Populus deltoides* waren ebenfalls die Trends beider Arten zueinander nicht eindeutig. Zu Anfang und am Ende der Messperiode waren die Werte von *Populus deltoides* signifikant höher. Bei Betrachtung des gesamten Messzeitraums waren jedoch die interzellularen  $CO_2$ -Konzentrationen der Hybridpappeln signifikant höher (Tabelle 59). Beim direkten Vergleich beider Gruppen war auch der Verlauf der Hybridpappeln weniger geprägt von stärkeren Schwankungen der Messwerte (Abbildung 56). Während der gesamten Messperiode waren die interzellularen  $CO_2$ -Konzentrationen von *Populus deltoides* um 1,84 % geringer als bei den Hybridpappeln. Auch hier lag eine statistische Signifikanz zwischen den Werten beider Arten vor.

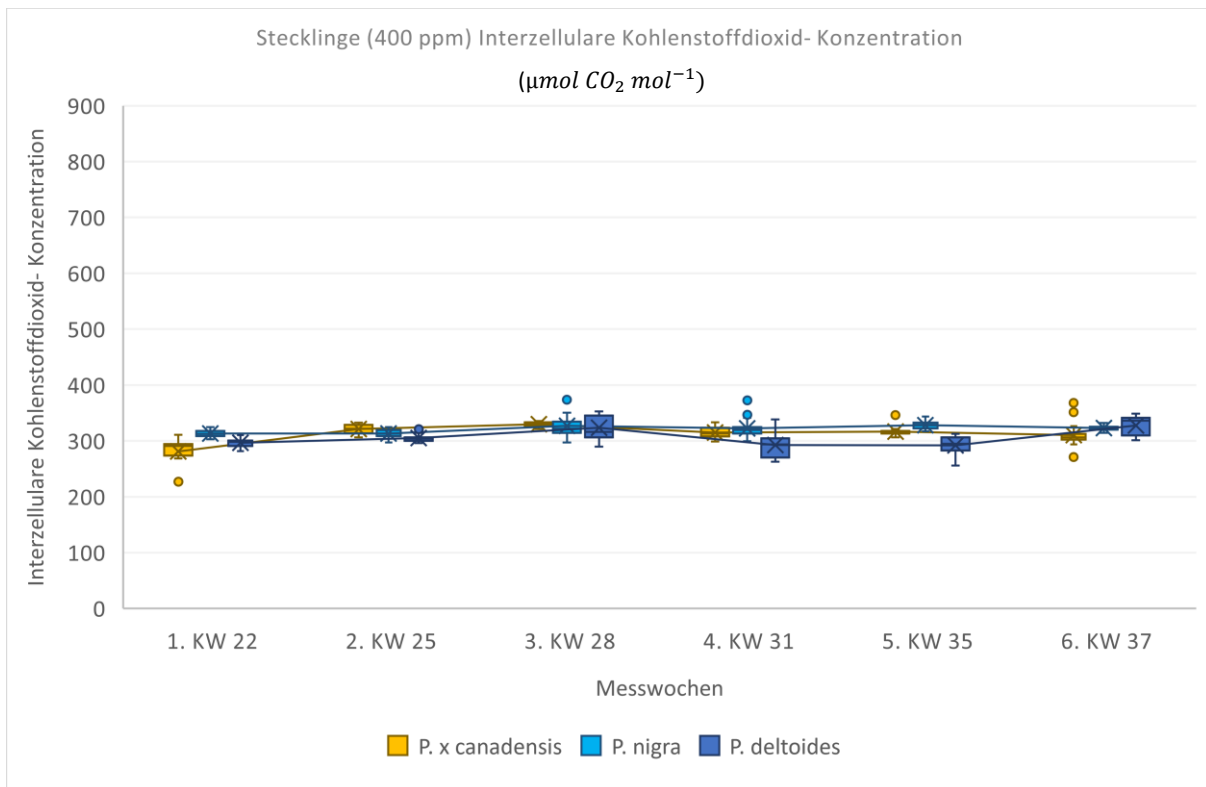


Abbildung 56: Vergleich der interzellulären  $\text{CO}_2$ - Konzentration von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Interzelluläre $\text{CO}_2$ - Konzentration	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,000	0,94	stark
2. KW 25	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,001	0,36	mittel
3. KW 28	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 400 ppm	nein	0,067	-	-
4. KW 31	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	nein	0,139	-	-
5. KW 35	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,000	0,52	stark
6. KW 37	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,000	0,54	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canadensis</i> 400 ppm &lt; <i>P. nigra</i> 400 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,21</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 58: Signifikanztest zwischen den interzellulären  $\text{CO}_2$ - Konzentrationen von *P. x canadensis* und *P. nigra* unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Interzelluläre $\text{CO}_2$ - Konzentration	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 400 ppm	ja	0,016	0,27	mittel
2. KW 25	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	ja	0,000	0,8	stark
3. KW 28	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	nein	0,067	-	-
4. KW 31	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	ja	0,000	0,53	stark
5. KW 35	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	ja	0,000	0,58	stark
6. KW 37	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 400 ppm	ja	0,000	0,53	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canadensis</i> 400 ppm &gt; <i>P. deltoides</i> 400 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,24</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 59: Signifikanztest zwischen den interzellulären  $\text{CO}_2$ - Konzentrationen von *P. x canadensis* und *P. deltoides* unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

#### 5.4.10 Stecklinge - Interzellulare $CO_2$ - Konzentration Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter $CO_2$ - Konzentration

Im direkten Vergleich hatte die Hybridpappel *Populus x canadensis* zum Teil höhere interzellulare  $CO_2$ - Konzentrationen als *Populus nigra* und *Populus deltoides*, jedoch konnte kein eindeutiger Trend zwischen den Arten beobachtet werden.

Besonders zu Anfang der Vegetationsperiode gab es zwischen den Hybridpappeln und *Populus nigra* signifikante Unterschiede. Da sich die Messwerte beider Arten immer weiter angenähert haben und die Werte bei *Populus x canadensis* zum Teil gesunken sind, waren zum Ende der Messperiode die interzellulare  $CO_2$ - Konzentrationen von *Populus nigra* signifikant höher. Im Saisondurchschnitt waren die Werte von *Populus nigra* um 0,021 % geringer, als bei *Populus x canadensis*. Es lag keine statistische Signifikanz zwischen den Werten beider Arten vor (Tabelle 60).

Die Unterschiede zwischen *Populus x canadensis* und *Populus deltoides* waren eindeutiger. In der Regel waren die Werte der Hybridpappel während der gesamten Messperiode signifikant höher (Tabelle 61). Besonders in der ersten Hälfte und zum Ende der Messungen war die interzellulare  $CO_2$ - Konzentration der Hybridpappeln im direkten Vergleich höher. Bei Betrachtung des gesamten Messzeitraums waren die interzellularen  $CO_2$ - Konzentrationen von *Populus deltoides* um 2,39 % geringer als bei den Hybridpappeln. Die Ergebnisse beider Gruppen haben sich signifikant voneinander unterschieden.

Alle Arten hatten unter erhöhtem atmosphärischem  $CO_2$  einen deutlich konstanteren Verlauf der interzellularen  $CO_2$ - Konzentration als unter Normalbedingungen (Abbildung 57).

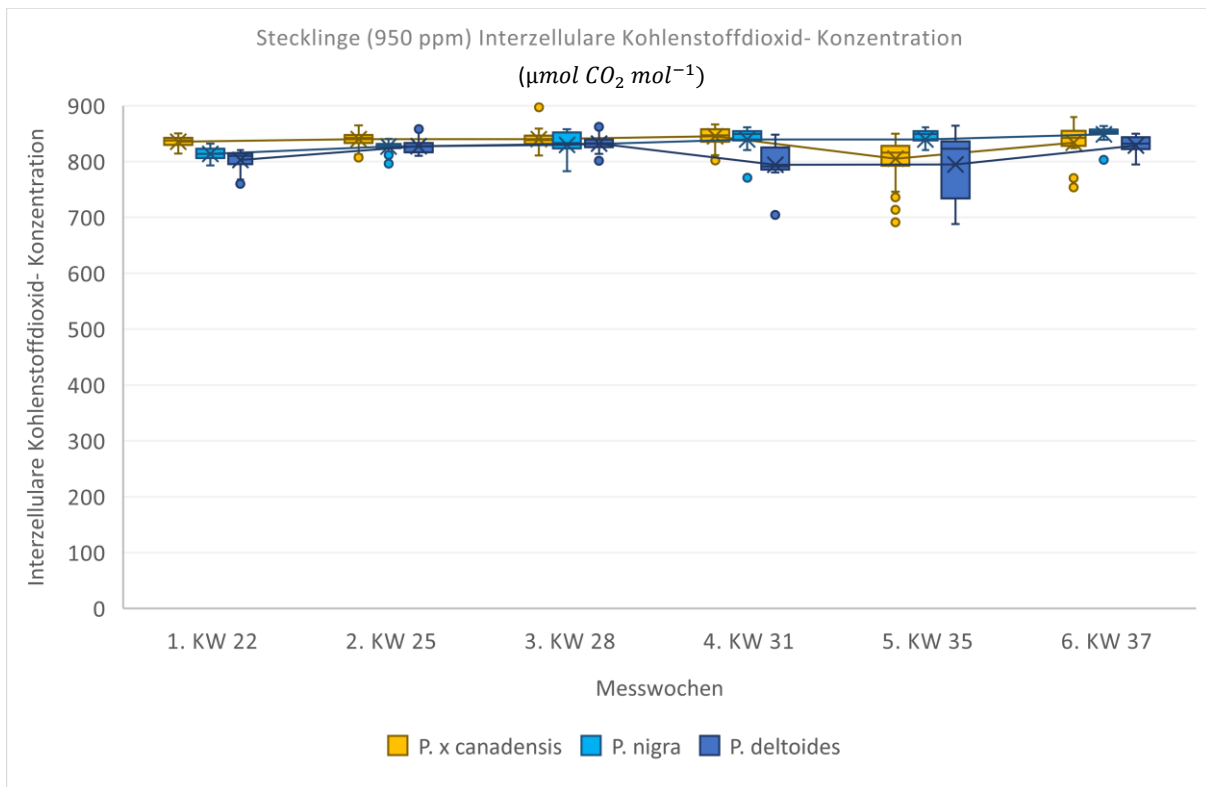


Abbildung 57: Vergleich der interzellularen  $CO_2$ - Konzentration von Stecklingen unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Interzellulare $CO_2$ - Konzentration	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,65	stark
2. KW 25	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,5	stark
3. KW 28	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,088	-	-
4. KW 31	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	1,000	-	-
5. KW 35	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,57	stark
6. KW 37	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,002	0,31	mittel
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canadensis</i> 950 ppm &gt; <i>P. nigra</i> 950 ppm</b>	<b>nein</b>	<b>1,000</b>	<b>-</b>	<b>-</b>

Tabelle 60: Signifikanztest zwischen den interzellularen  $CO_2$ - Konzentrationen von *P. x canadensis* und *P. nigra* unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Interzellulare $CO_2$ - Konzentration	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,87	stark
2. KW 25	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,53	stark
3. KW 28	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,57	stark
4. KW 31	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,64	stark
5. KW 35	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	1,000	-	-
6. KW 37	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,005	0,3	mittel
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canadensis</i> 950 ppm &gt; <i>P. deltoides</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,37</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 61: Signifikanztest zwischen den interzellularen  $CO_2$ - Konzentrationen von *P. x canadensis* und *P. deltoides* unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration (950 ppm)

## 5.5 Gewicht der oberirdischen Biomasse

### 5.5.1 Einjährige Pflanzen – Stammgewicht *Populus x canescens*

Die Trockengewichte der Pflanzen, die entweder den Umweltbedingungen oder erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  ausgesetzt waren, haben sich signifikant voneinander unterschieden, wobei eine mittlere Effektstärke beobachtet worden ist (Tabelle 62). Es zeigte sich, dass die Trockengewichte der Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt worden sind, höher waren. Die Gewichte der Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen gewachsen waren, variierten bei einer Spannweite von 22,58 g bis 150 g, wobei der Median bei 72,5 g gelegen hat. Der Interquartilsabstand betrug bei dieser Gruppe 47,74 g. Der Mittelwert dieser Gruppe hat 79,08 g betragen. Das Trockengewicht der Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, wies eine Spannweite von 75 g bis 215 g, bei einem Median von 110 g auf. Der Interquartilsabstand dieser Gruppe betrug 75 g. Bei beiden Gruppen konnten bezugnehmend auf die Messwerte keine Ausreißer ermittelt werden. Der Mittelwert dieser Gruppe lag bei 119,37 g (Abbildung 58).

Die Trockengewichte der begasten Pflanzen waren um 50,95 % höher als bei den Pflanzen der Kontrollgruppe.

### 5.5.2 Einjährige Pflanzen – Stammgewicht *Populus tremula*

Die Trockengewichte von *Populus tremula*, die entweder den Umweltbedingungen oder erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, haben sich nicht signifikant voneinander unterschieden (Tabelle 62). Der Median der Pflanzen, die unter erhöhtem  $CO_2$  gewachsen sind, betrug 25,90 g und war somit im direkten Vergleich zu der Gruppe der Pflanzen, die unter Umweltbedingungen gewachsen sind, etwas höher. Das Gewicht der Pflanzen variierte dabei von 4,14 g bis 37,86 g. Der Interquartilsabstand betrug 22,66 g und der Mittelwert dieser Gruppe 20,81 g.

Die Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen gewachsen sind, hatten eine etwas geringere Spannweite von 15,20 g bis 35,88 g. Dabei betrug der Interquartilsabstand dieser Gruppe 27,24 g, bei einem Median von 16,38 g. Es konnten keine Ausreißer ermittelt werden. Der Mittelwert dieser Gruppe lag bei 23,25 g (Abbildung 58).

Die begasten Pflanzen hatten im Durchschnitt um 11,76 % höhere Biomassen als die Kontrollpflanzen.

### 5.5.3 Einjährige Pflanzen – Stammgewicht *Populus alba*

Die Trockengewichte von *Populus alba* haben sich, je nachdem ob die Pflanzen unter Umgebungsbedingungen oder unter erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  gewachsen sind, signifikant voneinander unterschieden, wobei eine starke Effektstärke zu beobachten war. Die Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, hatten deutlich höhere Trockengewichte als die Kontrollpflanzen (Tabelle 62).

Die Trockengewichte der Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, hatten eine Spannweite von 10,06 g bis 45,00 g. Der Interquartilsabstand betrug 25,78 g, bei einem Median von 27,22 g und ein Mittelwert von 26,86 g. Bei Pflanzen, die Umgebungsbedingungen ausgesetzt waren, wurde eine Spannweite von 8,40 g bis 22,93 g ermittelt. Der Interquartilsabstand dieser Gruppe betrug 5,88 g bei einem Median von 11,48 g. Der Mittelwert lag hier bei 12,59 g. Es konnten keine Ausreißer festgestellt werden (Abbildung 58). Die Biomassen der begasten Pflanzen waren im Durchschnitt um 113,35 % höher als bei den Kontrollpflanzen.

### 5.5.4 Einjährige Pflanzen – Stammgewicht Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen

Im direkten Vergleich zwischen Hybridpappeln und den Elternarten hatte *Populus x canescens* unter beiden Versuchsbedingungen signifikant höhere Trockengewichte als *Populus tremula* und *Populus alba* (Tabelle 62), (Abbildung 58).

Beim Vergleich zwischen *Populus x canescens* und *Populus tremula* waren die Unterschiede unter Umgebungsbedingungen signifikant, wobei die Effektstärke stark war. Dabei waren die Trockengewichte von *Populus tremula* um 73,68 % geringer als bei den Hybridpappeln.

Noch etwas stärker waren die Unterschiede unter Normalbedingungen zwischen der Hybridpappel und *Populus alba*. Hier waren die Trockengewichte von *Populus alba* um 84,08 % geringer als bei den Hybridpappeln.

### 5.5.5 Einjährige Pflanzen – Gewicht Stamm Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter $CO_2$ -Konzentration

Ähnliche Unterschiede konnten bei den Pflanzen, die erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  ausgesetzt waren, beobachtet werden. Hierbei wurden zwar keine Überschneidungen der Messdaten beobachtet, jedoch waren die Unterschiede im Durchschnitt etwas geringer (Abbildung 58). Unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration waren die Trockengewichte von *Populus tremula* um 80,52 % und zu *Populus alba* um 77,50 % geringer als bei *Populus x canescens* (Tabelle 62). Es lag eine statistische Signifikanz vor.

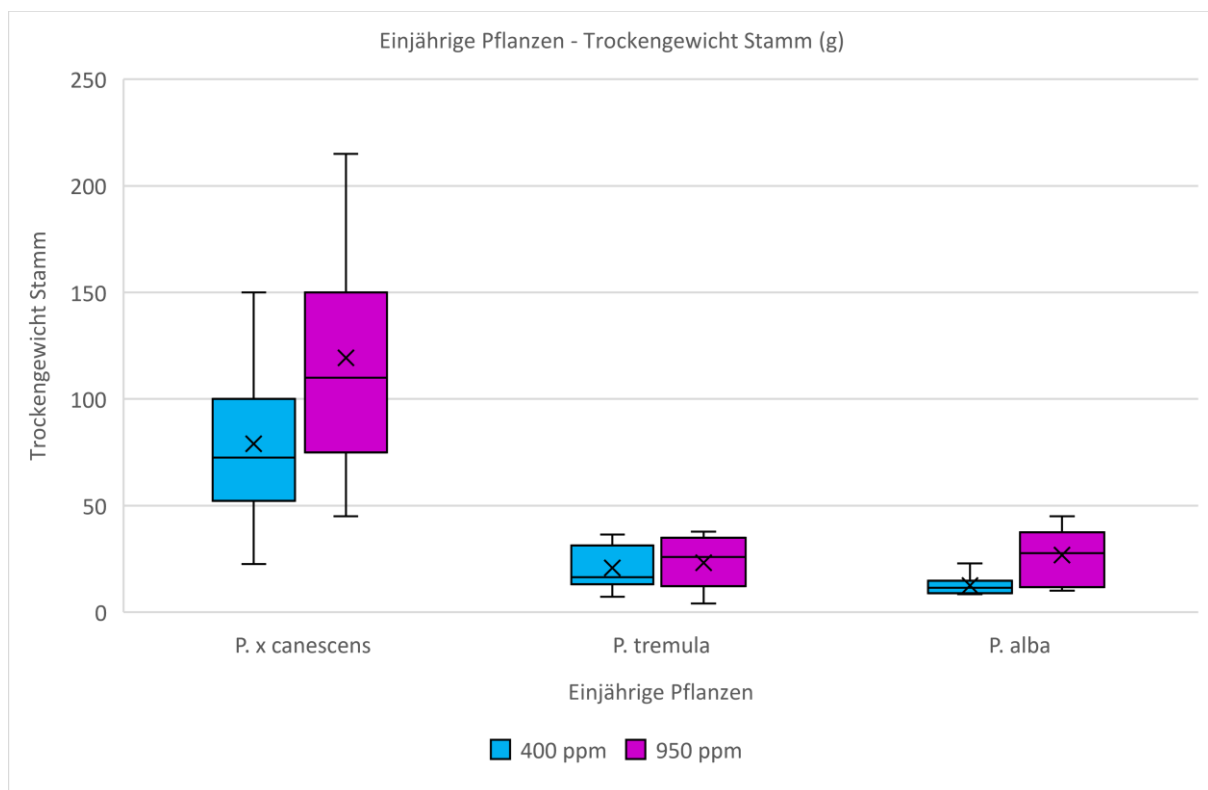


Abbildung 58: Trockengewicht (Stamm) von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren



Signifikanztest				
Stammgewicht	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,021	0,4	mittel
<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,699	-	-
<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,001	0,62	stark
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	ja	0,001	0,66	stark
<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,76	stark
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,000	0,84	stark
<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,77	stark

Tabelle 62: Signifikanztest zwischen den Gewichten der oberirdischen Biomasse (Stamm) von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

### 5.5.6 Stecklinge – Stammgewicht *Populus x canadensis*

Das Trockengewicht der Kontrollgruppe und der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen hat sich signifikant voneinander unterschieden, wobei die Pflanzen, die erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  ausgesetzt waren, deutlich höhere Werte aufgewiesen haben (Tabelle 63). Dabei wurde eine starke Effektstärke beobachtet. Die Gruppe der Pflanzen, die unter erhöhtem  $CO_2$  gewachsen sind, hatten bezugnehmend auf das Trockengewicht eine Spannweite von 4,86 g bis 60,00 g. Der Interquartilsabstand dieser Gruppe lag bei 26,46 g bei einem Median von 29,31 g. Der Mittelwert lag bei 30,18 g. Die Pflanzen der Kontrollgruppe hatten dagegen eine Spannweite von 1,79 g bis 22,90 g. Der Interquartilsabstand dieser Gruppe betrug 6,22 g bei einem Median von 5,43 g. Der Mittelwert lag hier bei 9,01 g (Abbildung 59).

Das Trockengewicht der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen war im Durchschnitt um 234,96 % höher als bei den Kontrollpflanzen.

### 5.5.7 Stecklinge - Stammgewicht *Populus nigra*

Das Trockengewicht der Pflanzen, die erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  ausgesetzt waren, hat sich nicht signifikant zu den Pflanzen der Kontrollgruppe unterschieden (Tabelle 63). Dabei war das Trockengewicht der Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, geringer als das der Kontrollgruppe. Die Spannweite des Trockengewichts der begasten Gruppe reichte von 1,66 g bis 19,04 g. Der Interquartilsabstand betrug bei dieser Gruppe 6,13 g bei einem Median von 4,76 g. Der Mittelwert lag bei 7,57 g. Bei der Kontrollgruppe reichte die Spannweite des

Trockengewichts von 1,30 g bis 21,39 g bei einem Interquartilsabstand von 9,41 g. Der Median dieser Gruppe lag bei 7,44 g und der Mittelwert bei 9,29 g (Abbildung 59). Die begasten Pflanzen hatten im Durchschnitt um 18,52 % niedrigere Trockengewichte als die Kontrollpflanzen.

#### 5.5.8 Stecklinge – Stammgewicht *Populus deltoides*

Das Trockengewicht der Pappelart *Populus deltoides*, die unter Umgebungsbedingungen oder bei erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  gewachsen sind, hat sich nicht signifikant voneinander unterschieden (Tabelle 63). Dabei haben die Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, etwas höhere Werte aufgewiesen. Die Spannweite des Trockengewichts dieser Gruppe variierte von 2,51 g bis 24,70 g bei einem Interquartilsabstand von 5,62 g und einem Median von 8,67 g. Der Mittelwert lag bei 10,16 g.

Die Pflanzen der Kontrollgruppe hatten dagegen eine Spannweite von 2,70 g bis 10,93 g bei einem Interquartilsabstand von 4,11 g. Der Median betrug dabei 4,40 g (Abbildung 59). Der Mittelwert hat 6,01 g betragen.

Das durchschnittliche Trockengewicht der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen war im Durchschnitt um 69,67 % höher als bei den Kontrollpflanzen.

#### 5.5.9 Stecklinge - Stammgewicht Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen

Im direkten Vergleich zwischen Hybridpappeln und den Arten *Populus nigra* und *Populus deltoides* gab es unter Umgebungsbedingungen keine signifikanten Unterschiede beim Trockengewicht (Tabelle 63). Dabei hatten die Hybridpappeln zwar den höchsten beobachteten Wert beim Trockengewicht, jedoch war der Median bei *Populus nigra* im direkten Vergleich am höchsten und von *Populus deltoides* am niedrigsten (Abbildung 59).

Im Durchschnitt war dabei das Trockengewicht von *Populus nigra* um 3,12 % höher als bei den Hybridpappeln. *Populus deltoides* hatte wiederum um 33,33 % niedrigere Trockengewichte als *Populus x canescens*.

### 5.5.10 Stecklinge – Stammgewicht Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter $CO_2$ -Konzentration

Bei den Pflanzengruppen, die erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  ausgesetzt waren, gab es dagegen signifikante Unterschiede (Tabelle 63).

Beim direkten Vergleich zwischen *Populus x canadensis* und *Populus nigra* waren die Unterschiede stark, wobei die Pflanzen der Art *Populus nigra* ein deutlich geringeres Trockengewicht aufgewiesen haben (um 74,90 % geringer) als *Populus x canadensis*. Ebenfalls gab es zwischen den Hybridpappeln und *Populus deltoides* Unterschiede, wobei auch hier *Populus deltoides* um 66,21 % geringere Trockengewichte hatte als die Hybridpappeln. Unabhängig davon, ob die Pflanzen unter Umgebungsbedingungen oder unter erhöhtem  $CO_2$  gewachsen waren, war die Streuung der einzelnen Gruppen zueinander vergleichbar, wobei *Populus x canadensis*, die erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  ausgesetzt war, eine Ausnahme darstellt und im Vergleich eine deutlich höhere Streuung der Werte aufgewiesen hat (Abbildung 59).

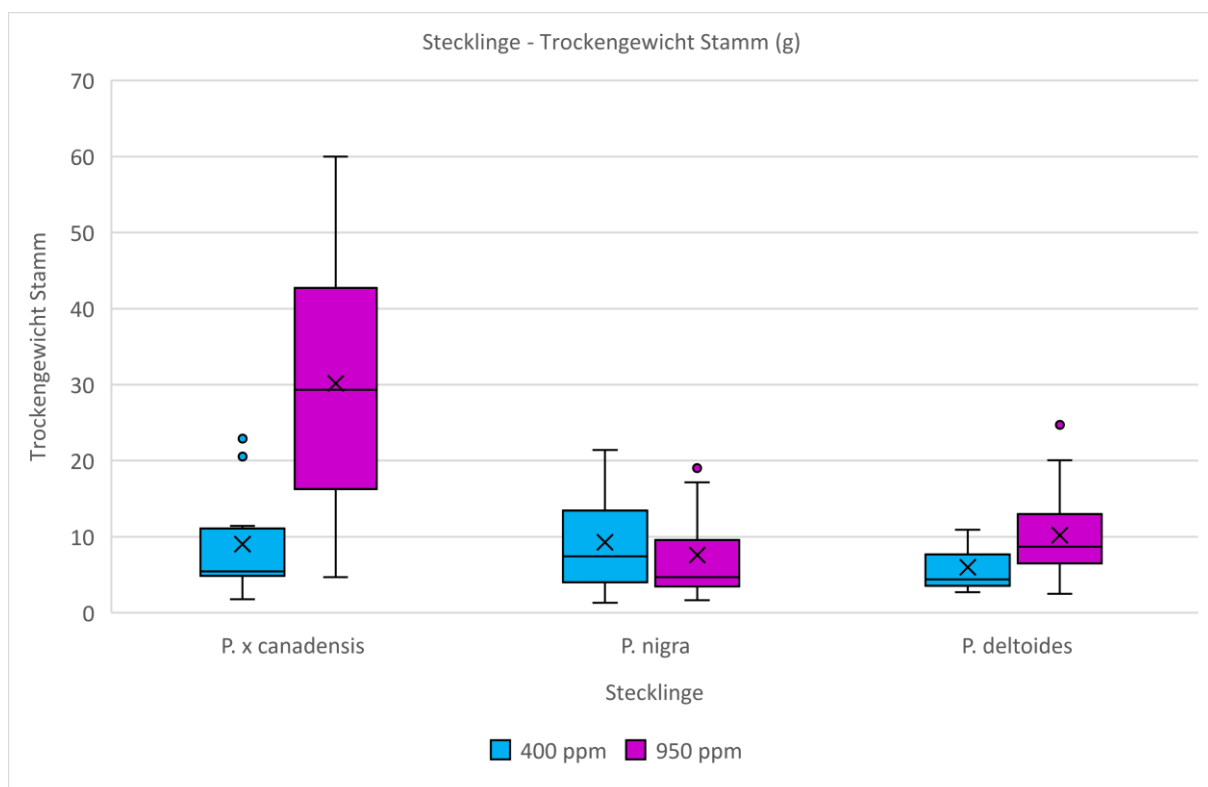


Abbildung 59: Trockengewicht (Stamm) von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
Stammgewicht	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,000	0,57	stark
<i>P. nigra</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,694	-	-
<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,258	-	-
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	nein	0,93	-	-
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,006	0,63	stark
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	nein	0,456	-	-
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,008	0,5	mittel

Tabelle 63: Signifikanztest zwischen den Gewichten der oberirdischen Biomasse (Stamm) von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

## 5.6 Gewicht der unterirdischen Biomasse

### 5.6.1 Einjährige Pflanzen - Wurzelgewicht *Populus x canescens*

Das Trockengewicht der Wurzeln von *Populus x canescens*, die unterschiedlichen Bedingungen ausgesetzt waren, hat sich nicht signifikant voneinander unterschieden (Tabelle 64). Dabei war das Wurzelgewicht der Gruppe, die Umgebungsbedingungen ausgesetzt war, etwas höher als die Werte der Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren. Die Spannweite der Kontrollgruppe reichte von 2,80 g bis 24,77 g, wobei zwei Beobachtungen gemacht worden sind, die oberhalb der Ausreißergrenze (32,54 g) liegen. Der Interquartilsabstand dieser Gruppe betrug 9,60 g bei einem Median von 13,34 g. Der Mittelwert lag bei 18,40 g. Bei der Gruppe der Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt war, reichte die Spannweite der Messungen von 0,50 g bis 24,44 g bei einem Interquartilsabstand von 10,24 g und einem Median von 10,78 g. Bei dieser Gruppe betrug der Mittelwert 12,08 g. Hier konnten keine Ausreißer beobachtet werden (Abbildung 60).

Beim Vergleich der Mittelwerte waren die Wurzel-Biomassen der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen um 34,34 % geringer als bei den Kontrollpflanzen.

### 5.6.2 Einjährige Pflanzen - Wurzelgewicht *Populus tremula*

Das Trockengewicht der Wurzeln beider Gruppen hat sich nicht signifikant voneinander unterschieden (Tabelle 64). Dabei war das Trockengewicht der Wurzeln

aus der Pflanzengruppe, die den Umgebungsbedingungen ausgesetzt war, tendenziell geringer als bei den Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren. Die Spannweite der Werte reichte bei der unbegasteten Pflanzengruppe von 5,16 g bis 33,06 g bei einem Interquartilsabstand von 10,68 g. Der Median dieser Gruppe lag bei 10,52 g und der Mittelwert bei 15,12 g. Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, hatten eine Spannweite von 3,40 g bis 23,09 g. Der Interquartilsabstand dieser Gruppe betrug 6,05 g bei einem Median von 11,42 g. Der Mittelwert dieser Gruppe lag hier bei 11,12 g (Abbildung 60).

Bezogen auf die Mittelwerte waren die Wurzelgewichte der begasteten Pflanzen mit 26,41 % niedriger als bei den Kontrollpflanzen.

### 5.6.3 Einjährige Pflanzen – Wurzelgewicht *Populus alba*

Die Trockengewichte der Wurzeln von *Populus alba* haben sich hinsichtlich der verschiedenen Untersuchungsbedingungen nicht signifikant voneinander unterschieden (Tabelle 64). Tendenziell waren die Werte der Pflanzen, die unter erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  gewachsen sind, im Vergleich höher als die der Gruppe, die Umgebungsbedingungen ausgesetzt war. Bei der mit  $CO_2$  begasteten Gruppe reichte die Spannweite der Messungen von 0,39 g bis 18,86 g bei einem Interquartilsabstand von 6,49 g. Der Median lag bei dieser Gruppe bei 3,66 g. Der Mittelwert lag bei 5,35 g. Ein Wert, der sich oberhalb der Ausreißergrenze befindet, wurde als Ausreißer klassifiziert. Bei der Kontrollgruppe reichte die Spannweite der Messungen dagegen von 0,20 g bis 8,32 g bei einem Interquartilsabstand von 1,87 g. Der Median dieser Gruppe lag bei 1,98 g und der Mittelwert bei 2,34 g. Auch bei dieser Gruppe wurde ein Wert als Ausreißer klassifiziert (Abbildung 60).

Die mit  $CO_2$  begasteten Pflanzen hatten eine um 128,88 % höhere Wurzelmasse als die Kontrollpflanzen.

### 5.6.4 Einjährige Pflanzen – Wurzelgewicht Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen

Unter Umgebungsbedingungen gab es zwischen *Populus x canescens* und den Elternteilen *Populus tremula* und *Populus alba* nur zum Teil signifikante Unterschiede

beim Trockengewicht der Wurzeln (Tabelle 64). Dabei war das Wurzelgewicht von *Populus tremula* um 17,85 % geringer als bei der Hybridpappel (Abbildung 60). Beim direkten Vergleich zwischen *Populus alba* und *Populus x canescens* gab es signifikante Unterschiede, wobei die Werte von *Populus alba* um 87,28 % geringer waren als bei der Hybridpappel.

### 5.6.5 Einjährige Pflanzen – Wurzelgewicht Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration

Unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration waren die Ergebnisse ähnlich, jedoch die Unterschiede geringer als unter Umgebungsbedingungen. Beim direkten Vergleich zwischen *Populus x canescens* und *Populus tremula* waren die Werte von *Populus tremula* um 7,92 % geringer als bei *Populus x canescens*, wobei keine Signifikanz vorgelegen hat (Abbildung 60). Beim Vergleich zwischen *Populus x canescens* und *Populus alba* waren die Unterschiede dagegen signifikant, wobei die Werte von *Populus alba* um 55,67 % geringer waren als bei den Hybridpappeln (Tabelle 64).

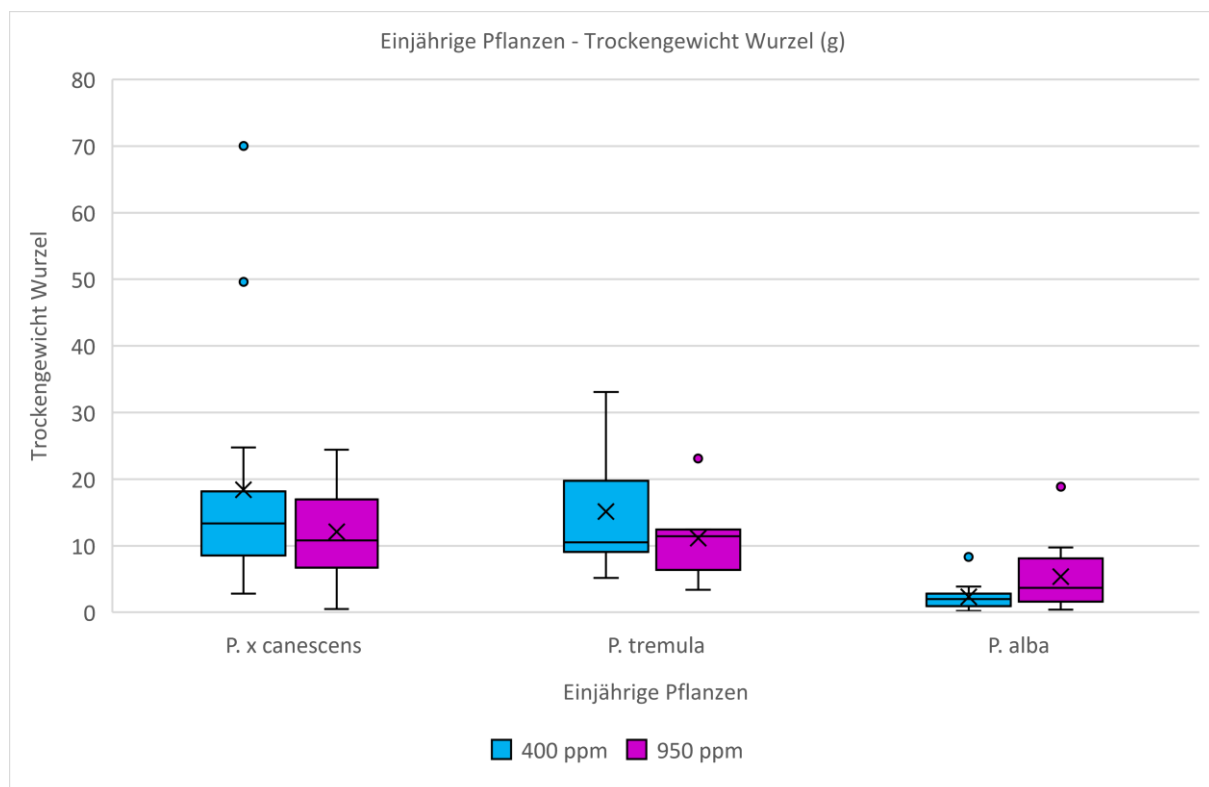


Abbildung 60: Trockengewicht (Wurzel) von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
Wurzelgewicht	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P. x canescens</i> 400 ppm > <i>P. x canescens</i> 950 ppm	nein	0,346	-	-
<i>P. tremula</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,818	-	-
<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,225	-	-
<i>P. x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	nein	0,802	-	-
<i>P. x canescens</i> 950 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,802	-	-
<i>P. x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,000	0,79	stark
<i>P. x canescens</i> 950 ppm > <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,026	0,42	mittel

Tabelle 64: Signifikanztest zwischen den Gewichten der unterirdischen Biomasse (Wurzeln) von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

### 5.6.6 Stecklinge - Wurzelgewicht *Populus x canadensis*

Das Trockengewicht der Wurzeln von *Populus x canadensis* hat sich zunehmend auf die Umgebungsbedingungen signifikant voneinander unterschieden (Tabelle 65). Dabei hatten die Pflanzen, die erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  ausgesetzt waren, deutlich höhere Werte als die Pflanzen der Kontrollgruppe. Bei den Unterschieden konnte eine starke Effektstärke beobachtet werden. Die Gruppe, die erhöhten  $CO_2$ -Bedingungen ausgesetzt war, hatte eine Spannweite von 0,56 g bis 20,29 g bei einem Interquartilsabstand von 9,31 g. Der Median der Messwerte dieser Gruppe lag bei 6,57 g und der Mittelwert lag bei 7,46 g. Die Spannweite der Kontrollgruppe reichte von 0,22 g bis 3,68 g, wobei der Messwert um 5,18 g als ein Ausreißer klassifiziert wurde. Der Interquartilsabstand dieser Gruppe betrug 1,56 g. Der Median der Messwerte lag bei den Messwerten dieser Gruppe bei 1,00 g und der Mittelwert bei 1,68 g (Abbildung 61).

Im Durchschnitt waren die Messergebnisse der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen um 343,84 % höher als bei den Kontrollpflanzen.

### 5.6.7 Stecklinge – Gewicht Wurzeln *Populus nigra*

Die Trockengewichte der Art *Populus nigra* haben sich zunehmend auf die Umgebungsbedingungen nicht signifikant voneinander unterschieden (Tabelle 65). Dabei war der Median der Kontrollgruppe bei 1,96 g und hat somit tendenziell höhere Wurzelgewichte aufgewiesen als die mit  $CO_2$  begaste Pflanzengruppe, wo der Median bei 1,65 g gelegen hat. Die Spannweite der Messdaten der Kontrollgruppe erstreckte

sich von 0,33 g bis 6,17 g bei einem Interquartilsabstand von 4,06 g. Die Spannweite der begasten Pflanzengruppe reichte dagegen von 0,75 g bis 8,96 g und hatte einen Ausreißer bei 9,74 g. Der Interquartilsabstand betrug 3,33 g. Der Mittelwert der Kontrollpflanzen hat bei 9,29 g gelegen und der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen bei 7,57 g (Abbildung 61).

Die Gewichte von den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen waren um 18,52 % geringer als bei den Kontrollpflanzen.

#### 5.6.8 Stecklinge – Gewicht Wurzeln *Populus deltoides*

Die Wurzelgewichte von *Populus deltoides* haben sich beziehend auf die Versuchsbedingungen signifikant voneinander unterschieden (Tabelle 65). Dabei hatte die Pflanzengruppe, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt war, höhere Wurzelgewichte als die Kontrollgruppe, wobei eine mittlere Effektstärke beobachtet wurde. Die Spannweite der Werte der begasten Pflanzengruppe reichte von 1,71 g bis 6,98 g, wobei zwei starke Ausreißer bei 9,79 g und 14,78 g erfasst wurden. Der Interquartilsabstand dieser Gruppe betrug 1,14 g bei einem Median von 3,81 g. Der Mittelwert lag bei 10,19 g. Die Spannweite der Kontrollgruppe reichte von 0,15 g bis 2,87 g bei einem Interquartilsabstand von 0,96 g. Der Median der Messwerte dieser Gruppe lag bei 0,67 g und war im direkten Vergleich zu dem Median der begasten Pflanzengruppe deutlich geringer. Der Mittelwert der Kontrollgruppe betrug 6,01 g (Abbildung 61).

Dabei waren die Gewichte der Wurzeln von den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen beziehend auf dem Mittelwert um 69,67 % höher als bei den Kontrollpflanzen.

#### 5.6.9 Stecklinge – Wurzelgewicht Hybridpappel vs. Pappeln unter Umgebungsbedingungen

Im direkten Vergleich zwischen Hybridpappeln und den Arten *Populus nigra* und *Populus deltoides* konnten keine signifikanten Unterschiede bezüglich des Trockengewichts der Wurzeln festgestellt werden (Tabelle 65). Tendenziell war das Wurzelgewicht der Elternarten unter Umgebungsbedingungen höher als das der Hybridpappeln. Dabei konnten bei *Populus deltoides* die höchsten Werte festgestellt



werden (Abbildung 61). Die Gewichte waren um 257,57 % höher als bei den Hybridpappeln. Die Werte von *Populus nigra* waren im Vergleich zu denen der Hybridpappeln um 453,15 % höher. Die Messergebnisse aller Gruppen haben sich dabei stark überschritten.

#### 5.6.10 Stecklinge – Wurzelgewicht Hybridpappeln vs. Pappeln unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration

Unter erhöhtem atmosphärischen CO<sub>2</sub> waren die Gewichte der Hybridpappeln höher, wobei das Trockengewicht der Elternarten auf einem sehr ähnlichen Niveau war. Im Vergleich hatten die Hybridpappeln unter erhöhten CO<sub>2</sub>-Bedingungen eine besonders hohe Streuung der Werte (Tabelle 65).

Dabei waren die Werte von *Populus nigra* beim direkten Vergleich mit den Mittelwerten von den Hybridpappeln um 1,51 % höher, jedoch ist keine Signifikanz festgestellt worden. Ebenfalls waren beim Vergleich mit *Populus deltoides* die Werte der Hybridpappeln signifikant geringer, wobei die Messergebnisse von *Populus deltoides* im Durchschnitt um 36,36 % höher waren (Abbildung 61).

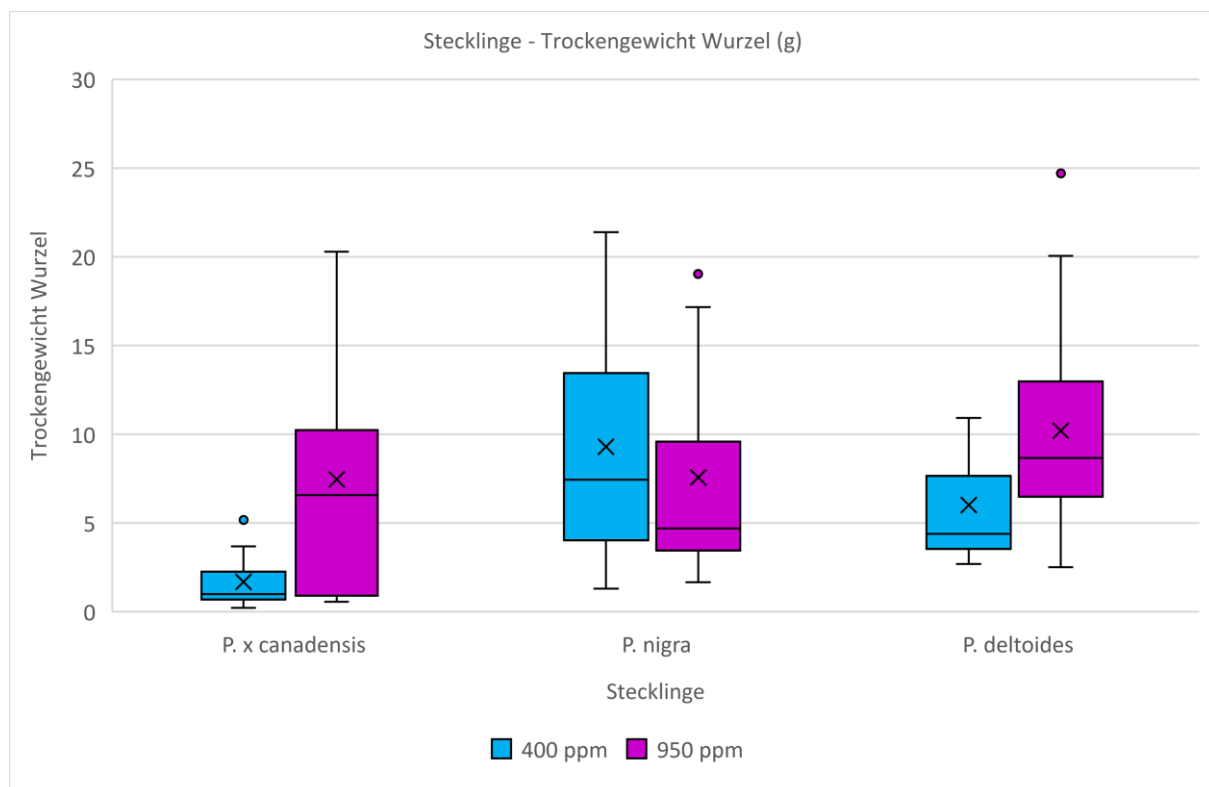


Abbildung 61: Trockengewicht (Wurzel) von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
Wurzelgewicht	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,006	0,58	stark
<i>P. nigra</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	keine	0,867	-	-
<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,04	0,46	mittel
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 400 ppm	nein	0,659	-	-
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,141	-	-
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	nein	0,417	-	-
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,178	-	-

Tabelle 65: Signifikanztest zwischen den Gewichten der unterirdischen Biomasse (Wurzeln) von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

## 5.7 Höhenzuwachs

### 5.7.1 Einjährige Pflanzen - Höhenzuwachs *Populus x canescens*

Während der Wachstumsperiode gab es zwischen den Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren und der Kontrollgruppe zum Teil signifikante Unterschiede bei den Höhen der Pflanzen (Tabelle 66). Dabei waren während der gesamten Wachstumsperiode die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen größer als die Pflanzen der Kontrollgruppe. Zu Beginn der Messungen (in KW 22 und KW 25) waren noch keine signifikanten Unterschiede beobachtet worden. Ab KW 28 haben sich die Höhen der Pflanzen signifikant voneinander unterschieden, wobei eine starke Effektstärke beobachtet worden ist. Dabei lag bei den Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, die Spannweite von 2,30 m bis 3,00 m Pflanzenhöhe bei einem Interquartilsabstand von 0,41 m und einem Median von 2,70 m. Der Mittelwert betrug zu dieser Zeit 2,66 m. Bei den Pflanzen der Kontrollgruppe lag die Spannweite bei 1,82 m bis 2,90 m, wobei die kleinste und die höchste Beobachtung als Ausreißer klassifiziert worden sind. Der Interquartilsabstand dieser Gruppe lag bei 0,19 m bei einem Median von 2,25 m. Bei dieser Gruppe lag der Mittelwert zu diesem Zeitpunkt bei 2,25 m. Auch bei den darauffolgenden Messungen in KW 31 und KW 35 konnten signifikante Unterschiede bei mittlerer Effektstärke beobachtet werden. Zum Ende der Wachstumsperiode haben sich die Größen der Pflanzen wieder angenähert, wodurch keine signifikanten Unterschiede beobachtet werden konnten. Dabei variierte die Pflanzenhöhe der begasten Gruppe zwischen 3,60 m und 5,04 m bei einem Interquartilsabstand von 0,39 m und einem Median von 4,32 m. Der Mittelwert lag bei

4,01 m. Die Pflanzenhöhe der Kontrollgruppe reichte von 2,60 m bis 4,86 m bei einem Interquartilsabstand von 0,75 m und einem Median von 4,26 m, wobei die niedrigste Beobachtung einen Ausreißer darstellt. Der Mittelwert dieser Gruppe lag bei 4,36 m (Abbildung 62). Zum Erntezeitpunkt waren die Pflanzenhöhen der begasten Pflanzen um 8,62 % höher als bei den Kontrollpflanzen. Dabei ist keine statistische Signifikanz zwischen den beiden Gruppen festgestellt worden.

Über den gesamten Messzeitraum gesehen war der Höhenzuwachs bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen um 10,63 % höher als bei den Kontrollpflanzen, wobei keine statistische Signifikanz festgestellt worden ist.

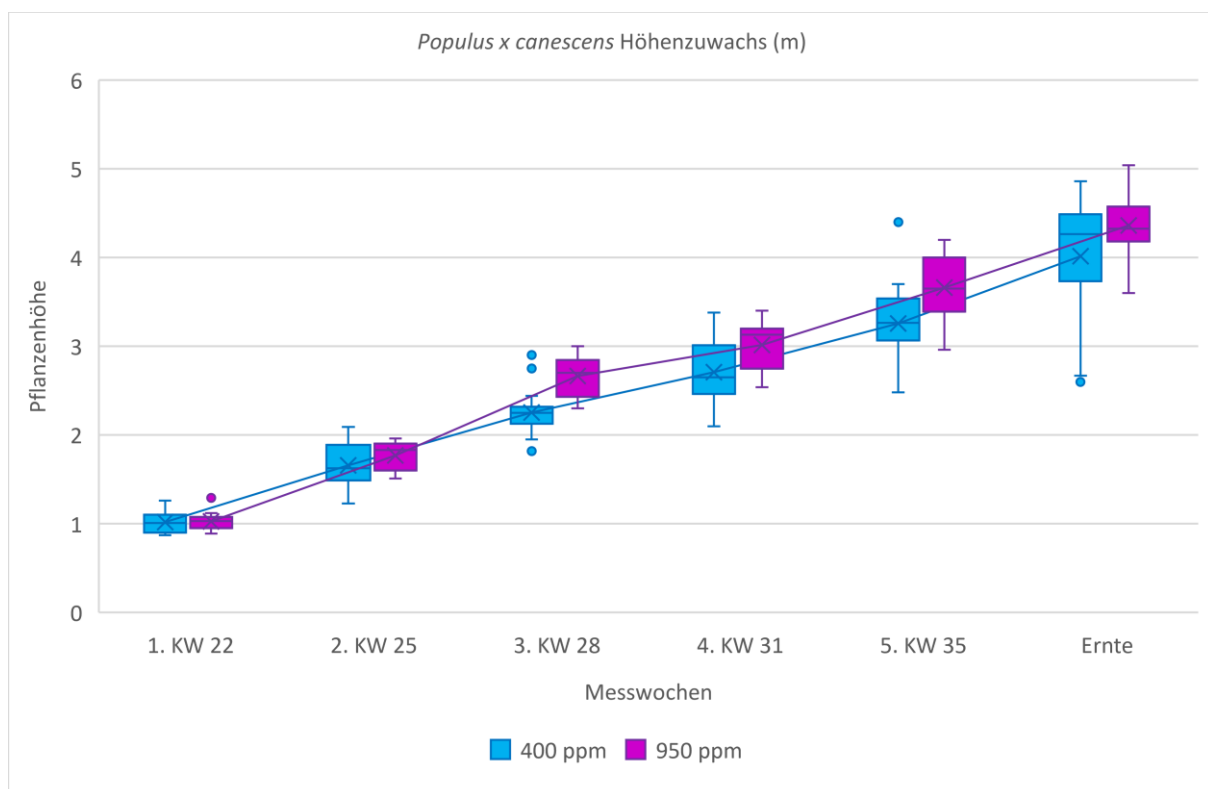


Abbildung 62: Höhenzuwachs von *Populus x canescens* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Höhenzuwachs	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	nein	0,624	-	-
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	nein	0,18	-	-
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,000	0,660	stark
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,046	0,35	mittel
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,019	0,41	mittel
6. KW 37	-	-	-	-	-
Ernte	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	nein	0,221	-	-
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 400 ppm &lt; <i>P.x canescens</i> 950 ppm</b>	<b>nein</b>	<b>0,09</b>	-	-

Tabelle 66: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von *P. x canescens* (400 ppm) und *P. x canescens* (950 ppm)

### 5.7.2 Einjährige Pflanzen - Höhenzuwachs *Populus tremula*

Bei Pflanzen der Art *Populus tremula*, die entweder erhöhtem  $CO_2$  oder Umgebungsbedingungen ausgesetzt waren, konnten keine signifikante Unterschiede bezüglich der Pflanzenhöhe ermittelt werden (Tabelle 67). Dabei waren zwar die Pflanzen der Kontrollgruppe im Verlauf der Wachstumsperiode tendenziell sogar höher als die Pflanzen der begasten Gruppe, jedoch konnten an keinem Versuchstag signifikante Unterschiede in den Wachstumshöhen beobachtet werden. Während der Wachstumsperiode wurde bei beiden Gruppen ein ähnlicher Verlauf der Höhenzunahme beobachtet, wobei bei allen Messtagen der Interquartilsabstand und die Spannweite der Beobachtungen bei der begasten Gruppe stets höher war als die der Kontrollgruppe. Von Beginn an bis zu KW 31 konnte eine zügige Höhenzunahme der Pflanzen beider Gruppen beobachtet werden. Ab KW 35 verlangsamte sich die Höhenzunahme der Pflanzen bei beiden Gruppen. Zum Ende der Wachstumsperiode waren die Dimensionen der Pflanzen beider Gruppen sehr ähnlich, wobei auch hier die Spannweite der Pflanzen der begasten Gruppe deutlich höher war als die der Kontrollgruppe (Abbildung 63).

Zum Erntezeitpunkt waren die Dimensionen der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen um 10,57 % niedriger als bei der Kontrollgruppe. Dabei erreichten die Kontrollpflanzen eine Höhe von 1,81 m bis 2,86 m. Der Interquartilsabstand der Gruppe war bei 0,36 m bei einem Median von 2,29 m. Der Mittelwert dieser Gruppe lag bei 2,32 m. Die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen erreichten eine Höhe von 1,22 m bis 2,80 m. Der Interquartilsabstand war bei 0,91 m, bei einem Median von 2,15 m. Der Mittelwert

dieser Gruppe lag bei 2,07 m. Bei diesem Vergleich konnte keine statistische Signifikanz zwischen den Ergebnissen beider Gruppen festgestellt werden.

Auch im Verlauf der gesamten Messzeit waren die Unterschiede nicht signifikant, wobei durchschnittlich die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen einen um 6,88 % niedrigeren Höhenzuwachs hatten als die Kontrollpflanzen.

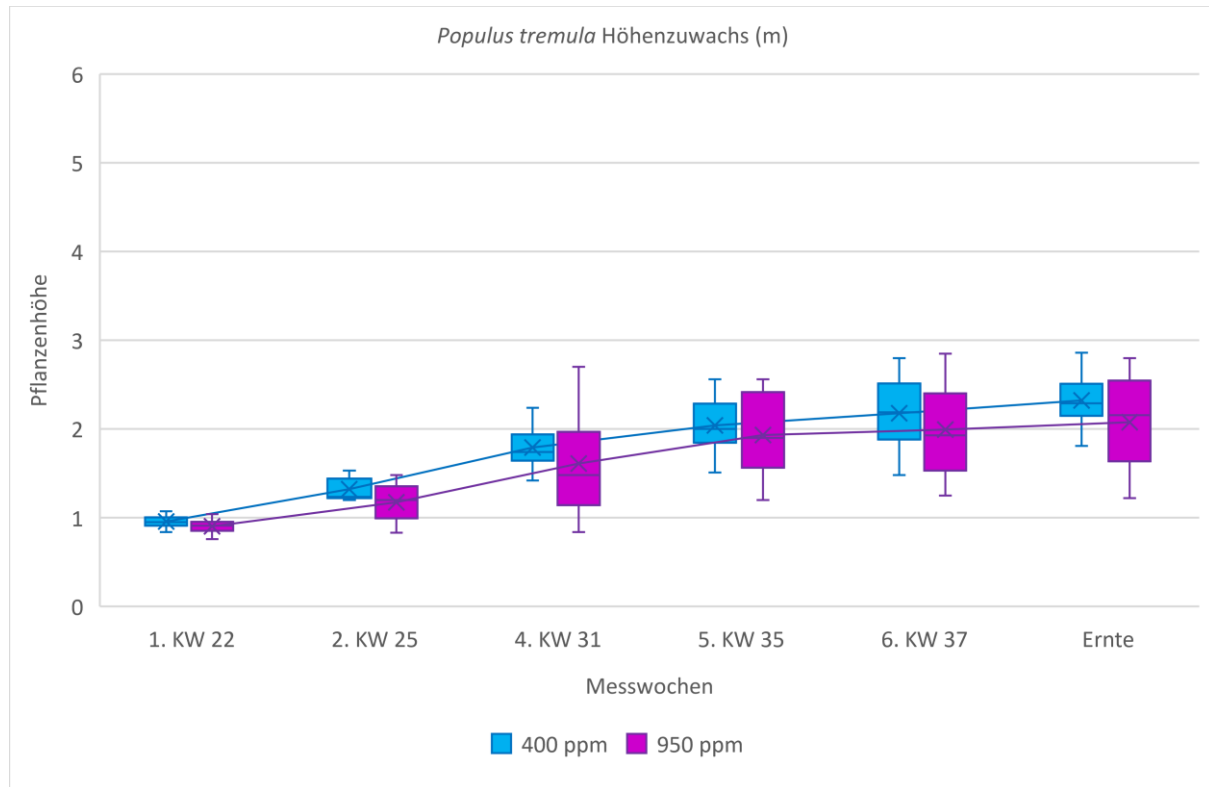


Abbildung 63: Höhenzuwachs von *Populus tremula* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Höhenzuwachs	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. tremula</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,271	-	-
2. KW 25	<i>P. tremula</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,224	-	-
3. KW 28	-	-	-	-	-
4. KW 31	<i>P. tremula</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,423	-	-
5. KW 35	<i>P. tremula</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,81	-	-
6. KW 37	<i>P. tremula</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,715	-	-
Ernte	<i>P. tremula</i> 400 ppm = <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,584	-	-
Saison gesamt	<i>P. tremula</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,332	-	-

Tabelle 67: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von *P. tremula* (400 ppm) und *P. tremula* (950 ppm)

### 5.7.3 Einjährige Pflanzen - Höhenzuwachs *Populus alba*

Während der Wachstumsperiode wurden zwischen der mit  $CO_2$  begasten Pflanzengruppe und der Kontrollgruppe in keiner Messwoche signifikante Unterschiede bei der Pflanzenhöhe beobachtet (Tabelle 68). Zu Beginn der Vegetationsphase waren die Pflanzen der Kontrollgruppe etwas höher als die Pflanzen der begasten Gruppe, jedoch waren ab KW 25 die Pflanzen der mit  $CO_2$  begasten Gruppe tendenziell größer. Zu Beginn der Wachstumsperiode waren die Spannweiten beider Gruppen ähnlich gering, sind jedoch im Laufe der Wachstumsperiode angestiegen, wobei die der begasten Gruppe zum Ende der Wachstumsperioden deutlich höher waren als die der Kontrollgruppe. Beide Pflanzengruppen wiesen zudem eine sehr ähnlich schnelle Zunahme der Pflanzenhöhe auf. Dabei wurde bei beiden Gruppen zu Beginn der Messungen eine eher langsame Zunahme der Pflanzenhöhe beobachtet, die sich jedoch ab KW 28 deutlich bei beiden Gruppen verstärkt hat und bis zum Ende der Vegetationsperiode angehalten hat, wobei die Pflanzen der Kontrollgruppe ihr Wachstum ab KW 37 wieder etwas verlangsamt hatten.

Zum Erntezeitpunkt erreichten die Kontrollpflanzen eine Höhe von 1,34 m – 2,85 m. Der Interquartilsabstand dieser Gruppe lag bei 0,74 m, mit einem Median von 2,35 m. Der Mittelwert dieser Gruppe lag bei 2,22 m. Die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen erreichten eine Höhe zwischen 1,37 m und 3,75 m. Der Interquartilsabstand war bei 0,93 m, bei einem Median von 2,75 m. Der Mittelwert dieser Gruppe lag bei 2,59 m (Abbildung 64). Zum Erntezeitpunkt waren die Dimensionen der begasten Pflanzen um 16,56 % höher als bei den Kontrollpflanzen. Auch bei diesem Vergleich konnte keine statistische Signifikanz zwischen den Ergebnissen beider Gruppen festgestellt werden. Bei Betrachtung des gesamten Messzeitraums waren die Höhenzunahmen bei den begasten Pflanzen um 13,23 % größer als bei den Kontrollpflanzen. Die Unterschiede waren nicht signifikant.

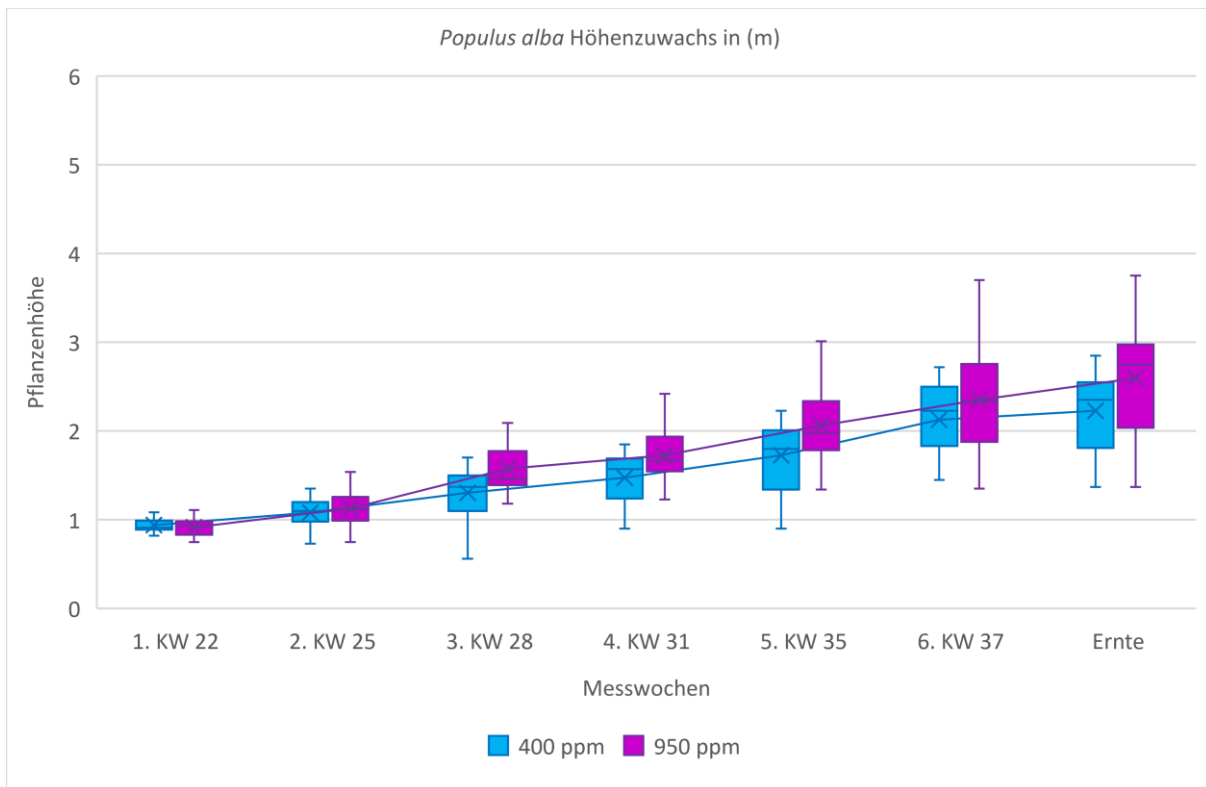


Abbildung 64: Höhenzuwachs von *Populus alba* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Höhenzuwachs	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. alba</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,644	-	-
2. KW 25	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,683	-	-
3. KW 28	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,077	-	-
4. KW 31	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,097	-	-
5. KW 35	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,154	-	-
6. KW 37	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,073	-	-
Ernte	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,092	-	-
Saison gesamt	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,098	-	-

Tabelle 68: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von *P. alba* (400 ppm) und *P. alba* (950 ppm)

#### 5.7.4 Einjährige Pflanzen – Höhenzuwachs Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen

Die Pflanzenhöhe der Hybridpappeln *Populus x canescens* hat sich fast über den gesamten Zeitraum der Wachstumsperiode signifikant von den Dimensionen von *Populus tremula* und *Populus alba* unterschieden. Zu Beginn der Messungen gab es in KW 22 noch keine signifikanten Unterschiede. Durch eine deutlich schnellere Zunahme der Pflanzenhöhe der Hybridpappeln gab es jedoch ab KW 25 signifikante

Unterschiede zwischen der Gruppe der Hybridpappeln und *Populus alba*. Im weiteren Verlauf haben die Dimensionen der Hybridpappeln deutlich schneller zugenommen als bei den Elternarten. So waren ab KW 35 die Unterschiede bereits so hoch, dass auch eine starke Effektstärke zwischen den Hybridpappeln und den beiden Arten *Populus tremula* und *Populus alba* beobachtet wurde.

Bis zum Ende der Vegetationsperiode haben die Hybridpappeln stetig an Höhe gewonnen, währenddessen sich bei den Elternarten die Zunahme der Pflanzenhöhe verlangsamt hat. Zum Ende der Vegetationsperiode hatten die Hybridpappeln bei einer durchschnittlichen Pflanzenhöhe von 4,01 m eine deutlich höhere Pflanzenhöhe erreicht als *Populus tremula* und *Populus alba*. Zu diesem Zeitpunkt haben sich die Pflanzenhöhen der Hybridpappeln statistisch stark von den Dimensionen der Elternarten *Populus tremula* und *Populus alba* unterschieden (Abbildung 65) (Tabelle 69, Tabelle 70).

Zum Erntezeitpunkt waren die durchschnittlichen Dimensionen von *Populus tremula* um 42,10 % geringer als bei den Hybridpappeln. Auch die Pflanzenhöhen von *Populus alba* waren um 44,56 % niedriger als bei *Populus x canescens*. Dabei lag bei beiden Vergleichen eine statistische Signifikanz vor.

Auch bei der ganzheitlichen Betrachtung der saisonalen Messungen war der Höhenzuwachs von *Populus tremula* um 31,19 % und gegenüber *Populus alba* um 37,48 % geringer als bei den Hybridpappeln. Bei beiden Vergleichen ist eine statistische Signifikanz ermittelt worden.



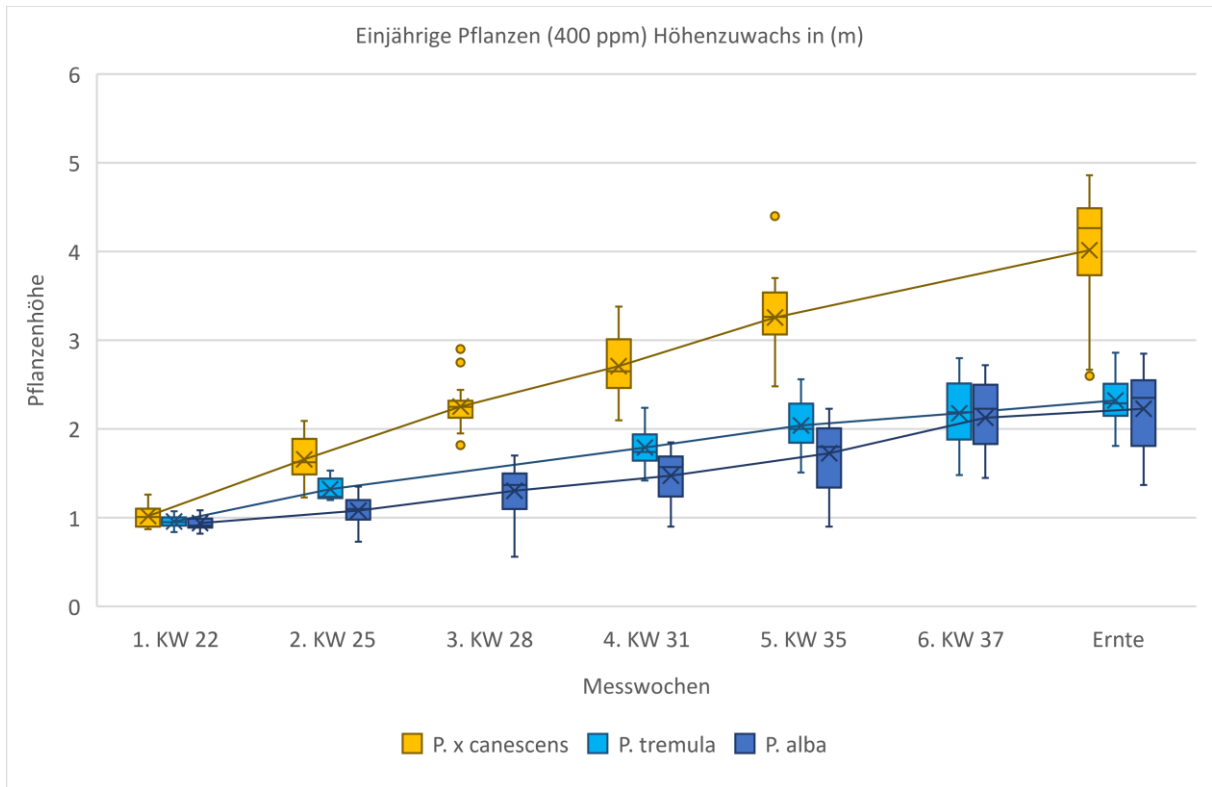


Abbildung 65: Vergleich der Höhenzunahme von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Höhenzuwachs	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	nein	0,231	-	-
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	nein	0,113	-	-
3. KW 28	-	-	-	-	-
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	ja	0,023	0,54	stark
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	ja	0,010	0,6	stark
6. KW 37	-	-	-	-	-
Ernte	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	ja	0,001	0,73	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 400 ppm &gt; <i>P. tremula</i> 400 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,001</b>	<b>0,31</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 69: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von *P. x canescens* und *P. tremula* unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Höhenzuwachs	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	nein	0,231	-	-
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,000	0,89	stark
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,000	0,85	stark
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,000	0,92	stark
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,000	0,90	stark
6. KW 37	-	-	-	-	-
Ernte	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,000	0,80	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 400 ppm &gt; <i>P. alba</i> 400 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,46</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 70: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von *P. x canescens* und *P. alba* unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

### 5.7.5 Einjährige Pflanzen – Höhenzuwachs Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration

Die Pflanzenhöhe der Hybridpappel *Populus x canescens* und den Arten *Populus tremula* und *Populus alba* hat sich im Laufe der Wachstumsperiode überwiegend voneinander unterschieden. In KW 22 wurden noch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Arten festgestellt, wobei schon ab diesem Zeitpunkt die Hybridpappeln größere Pflanzenhöhen aufgewiesen haben (Tabelle 71, Tabelle 72). Ab KW 25 waren bereits starke signifikante Unterschiede zwischen den Arten beobachtet worden, wobei die Hybridpappeln durch eine schnellere Zunahme der Höhe deutlich größer waren als *Populus tremula* und *Populus alba*. In den nachfolgenden Messwochen wurde ein anhaltender starker Anstieg der Pflanzenhöhe bei *Populus x canescens* beobachtet. Im direkten Vergleich war der Anstieg von *Populus tremula* und *Populus alba* während der Messperiode deutlich langsamer. Zum Erntezeitpunkt waren die Unterschiede zwischen *Populus x canescens* und den Arten *Populus tremula* und *Populus alba* besonders hoch (Abbildung 66). Die Unterschiede waren dabei statistisch signifikant. Dabei waren die Werte von *Populus tremula* um 52,33 % und von *Populus alba* um 40,47 % geringer als bei *Populus x canescens*.

Über den gesamten Messzeitraum gesehen war die Höhenzunahme bei den Hybridpappeln signifikant höher. Dabei waren die Höhenzunahmen von *Populus tremula* um 42,08 % und von *Populus alba* um 36,01 % geringer als bei den Hybridpappeln.

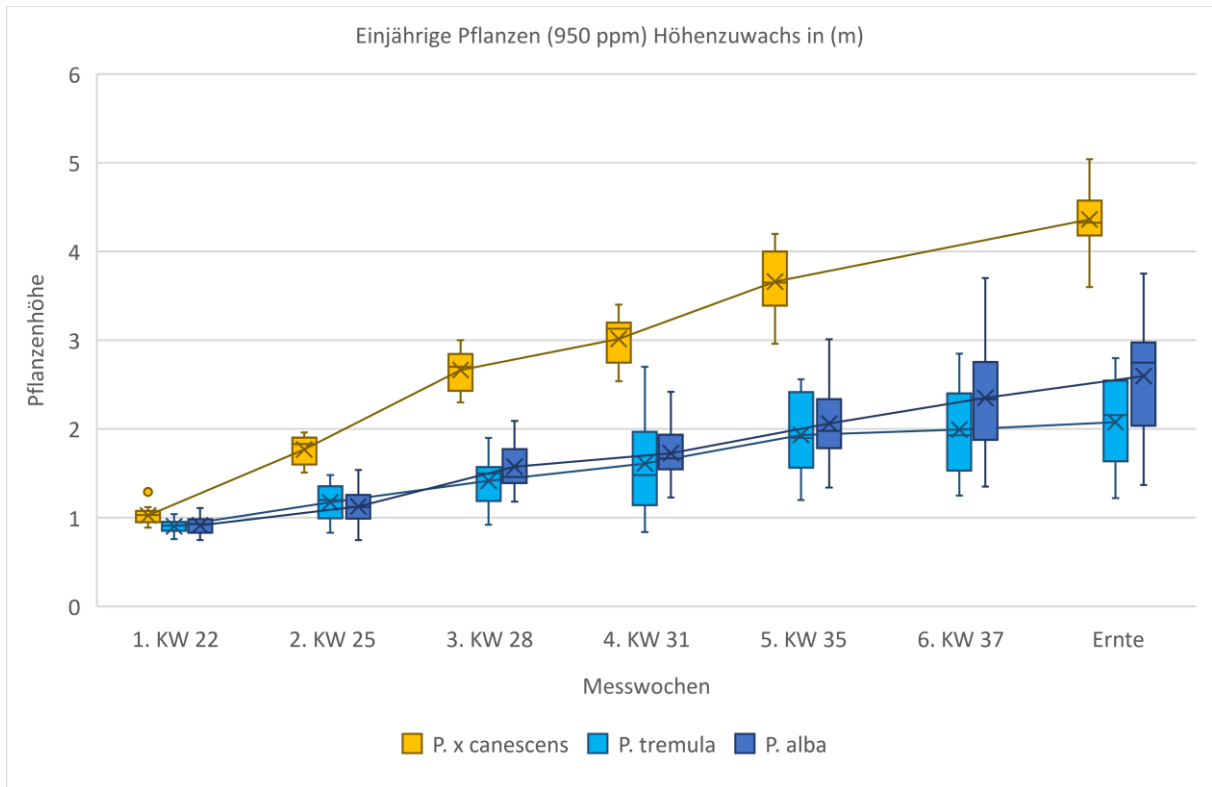


Abbildung 66: Vergleich der Höhenzunahme von einjährigen Pflanzen unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Höhenzuwachs	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,099	-	-
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,001	0,75	stark
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,001	0,77	stark
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,001	0,74	stark
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,001	0,75	stark
6. KW 37	-	-	-	-	-
Ernte	<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,90	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 950 ppm &gt; <i>P. tremula</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,47</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 71: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von *P. x canescens* und *P. tremula* unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Höhenzuwachs	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,073	-	-
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,85	stark
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,82	stark
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,80	stark
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,81	stark
6. KW 37	-	-	-	-	-
Ernte	<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,77	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 950 ppm &gt; <i>P. alba</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,42</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 72: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von *P. x canescens* und *P. alba* unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

### 5.7.6 Stecklinge - Höhenzuwachs *Populus x canadensis*

Während der Wachstumsperiode haben sich die Pflanzen der Art *Populus x canadensis*, die Umgebungsbedingungen oder erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, großenteils nicht voneinander in der Wachstumshöhe unterschieden. Zwar waren die Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, in allen Messwochen tendenziell größer, jedoch gab es nur in KW 25 und in KW 35 signifikante Unterschiede (Tabelle 73).

Nach einem schnellen Anstieg der Pflanzenhöhe bei beiden Gruppen war in KW 25 bei der Kontrollgruppe eine Spannweite von 0,49 m bis 1,13 m und ein Interquartilsabstand von 0,14 m erfasst worden, bei einem Median von 0,93 m. Der Mittelwert dieser Gruppe lag zu diesem Zeitpunkt bei 0,92 m. Bei der mit  $CO_2$  begasten Gruppe lag die Spannweite bei 0,47 m bis 1,46 m, bei einem Interquartilsabstand von 0,37 m und einem Median von 1,18 m. Der Mittelwert lag bei 1,11 m. Bei den Größenunterschieden zwischen den beiden Gruppen ist eine mittlere Effektstärke erfasst worden. In den zwei darauffolgenden Messwochen haben sich die Pflanzendimensionen wieder angeglichen, wodurch keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Gruppen beobachtet werden konnten. Dabei hat sich in diesen Messwochen der Höhenzuwachs bei beiden Gruppen leicht verlangsamt. In KW 37 haben sich die Pflanzenhöhen der begasten Gruppe nochmals signifikant von der Kontrollgruppe unterschieden. Zu diesem Zeitpunkt hatte die Kontrollgruppe eine Spannweite von 0,79 m bis 2,57 m und einen Interquartilsabstand von 0,36 m bei einem Median von 1,67 m. Der Mittelwert der Kontrollgruppe lag bei 1,60 m. Die Pflanzengruppe, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt war, hatte dagegen zu diesem Zeitpunkt eine Spannweite von 0,86 m bis 3,30 m bei einem Interquartilsabstand von 0,63 m und einem Median von 2,26 m. Der Mittelwert dieser Gruppe lag hier bei 2,03 m. Nach KW 35 ist ein leichter Anstieg der Pflanzenhöhe bei beiden Gruppen beobachtet worden, wobei in der darauffolgenden Messwoche keine signifikanten Unterschiede der Pflanzenhöhe zwischen den beiden Gruppen festgestellt werden konnten. Auch sind während der Ernte bei der endgültigen Pflanzenhöhe keine signifikanten Unterschiede festgestellt worden. Bei der Kontrollgruppe ist eine Spannweite von 0,77 m bis 2,56 m und ein Interquartilsabstand von 0,67 m erfasst worden, bei einem Median von 1,77 m und einem Mittelwert von 1,77 m. Bei der mit

$CO_2$  begasten Pflanzengruppe lag die Spannweite bei 0,86 m bis 3,49 m und der Interquartilsabstand bei 1,98 m. Der Median dieser Gruppe lag bei 2,58 m und der Mittelwert bei 2,29 m (Abbildung 67). Im Durchschnitt waren die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen zum Erntezeitpunkt um 29,19 % größer als die Pflanzen der Kontrollgruppe, wodurch sich die Ergebnisse signifikant voneinander unterschieden haben. Bei Betrachtung der gesamten Messperiode war der Höhenzuwachs der begasten Pflanzen signifikant stärker als bei den Kontrollpflanzen. Dabei waren die Pflanzenhöhen durchschnittlich um 22,95 % höher als bei den Kontrollpflanzen, bei einer mittleren Effektstärke.

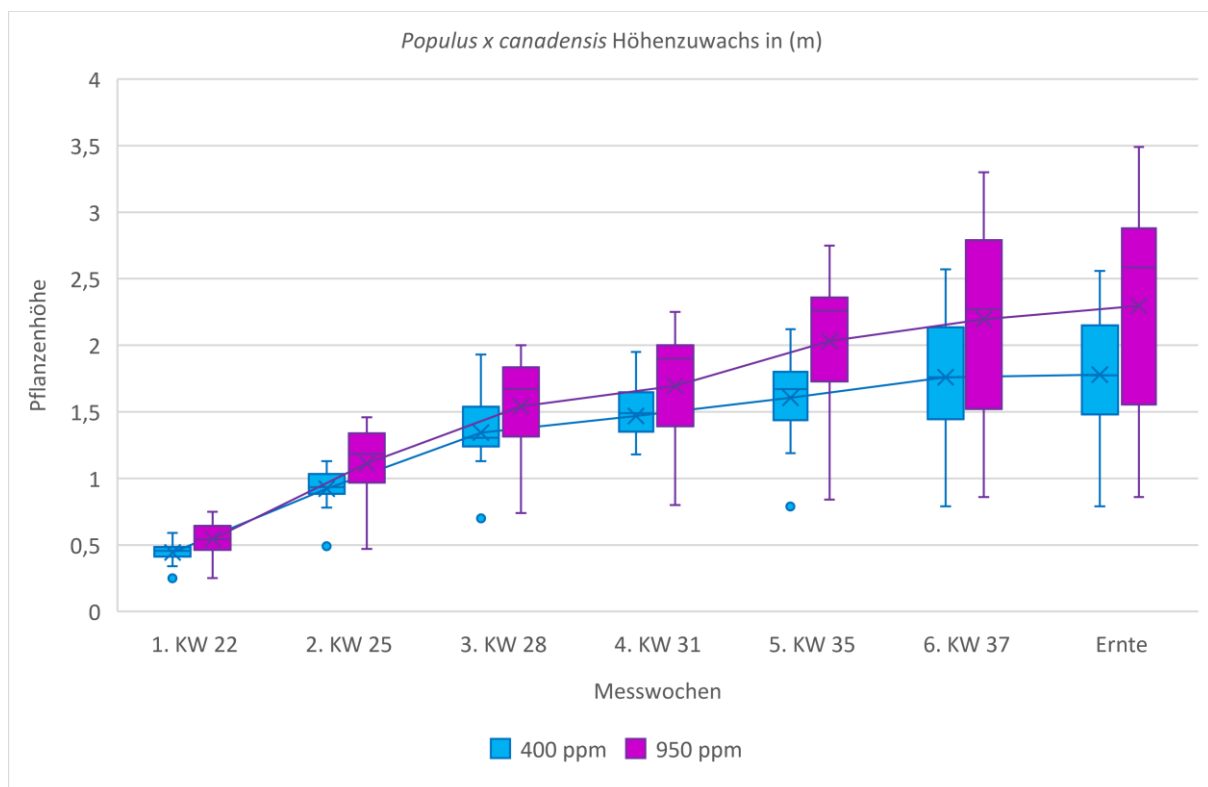


Abbildung 67: Höhenzuwachs von *Populus x canadensis* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Höhenzuwachs	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	nein	0,06	-	-
2. KW 25	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,045	0,41	mittel
3. KW 28	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	nein	0,890	-	-
4. KW 31	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	nein	0,128	-	-
5. KW 35	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,024	0,46	mittel
6. KW 37	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	nein	0,169	-	-
Ernte	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	nein	0,101	-	-
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canadensis</i> 400 ppm &lt; <i>P.x canadensis</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,017</b>	<b>0,18</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 73: Signifikanztest zwischen den Höhenwüchsen von *P. x canadensis* (400 ppm) und *P. x canadensis* (950 ppm)

### 5.7.7 Stecklinge - Höhenzuwachs *Populus nigra*

Eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration in der Atmosphäre hatte während der gesamten Versuchsperiode keine signifikanten Auswirkungen auf das Höhenwachstum der Pappelart *Populus nigra* (Tabelle 74). Der Höhenzuwachs der beiden Pflanzengruppen war während der Wachstumsperiode sehr ähnlich, wobei zum großen Teil die Pflanzen der Kontrollgruppe tendenziell höhere Pflanzenhöhen aufgewiesen hatten als die mit  $CO_2$  begaste Gruppe.

Zum Ende der Wachstumsperiode betrug die Spannweite der Kontrollgruppe zum Erntezeitpunkt 0,70 m bis 2,42 m und der Interquartilsabstand 0,94 m. Der Median lag bei 1,41 m und der Mittelwert bei 1,43 m. Die begaste Gruppe hatte zum gleichen Zeitpunkt eine Spannweite von 0,25 m bis 1,87 m bei einem Interquartilsabstand von 0,77 m. Der Median lag bei 1,22 m und der Mittelwert bei 1,15 m (Abbildung 68).

Zum Erntezeitpunkt waren die Höhenzuwächse der begasten Pflanzen um 19,58 % niedriger als bei den Kontrollpflanzen. Dabei lag keine statistische Signifikanz vor.

Bei der Betrachtung der ermittelten Daten über die gesamte Messperiode war der Höhenzuwachs der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen um 20,03 % niedriger als bei den Kontrollpflanzen. Dabei lag keine statistische Signifikanz vor.

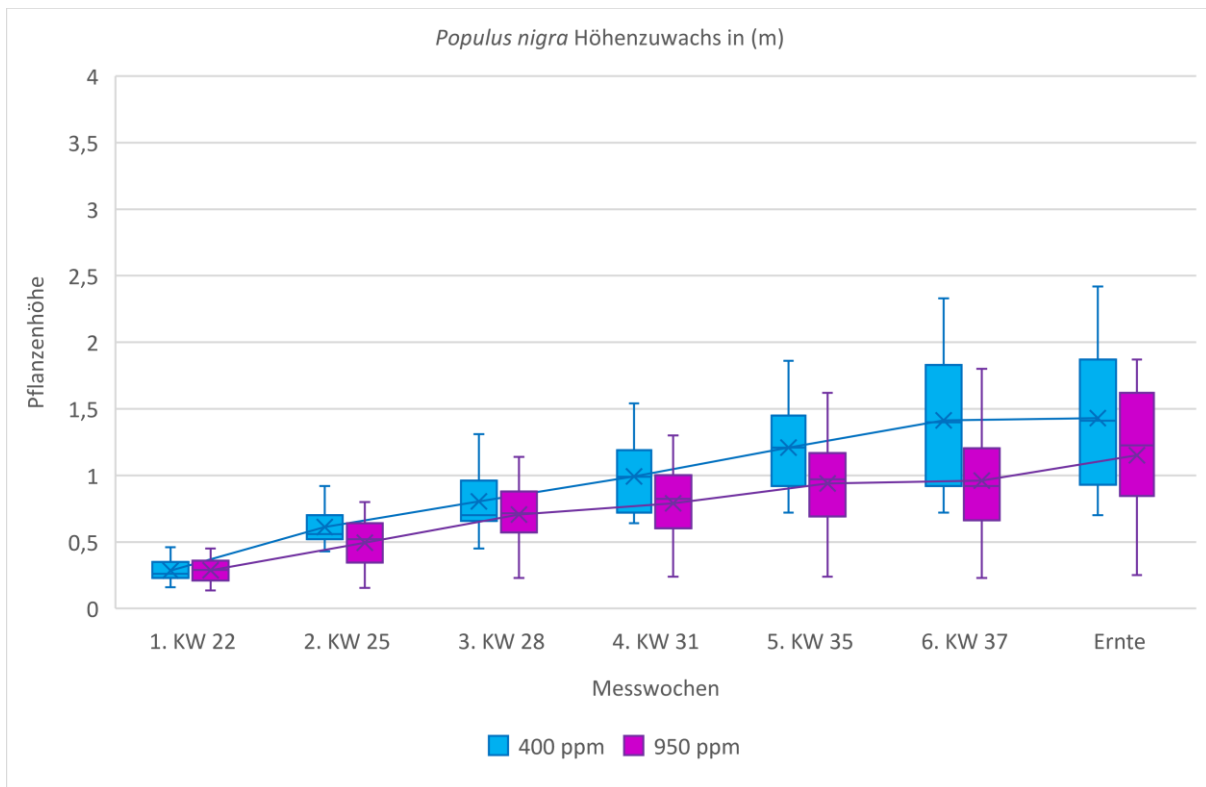


Abbildung 68: Höhenzuwachs von *Populus nigra* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Höhenzuwachs	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,918	-	-
2. KW 25	<i>P. nigra</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,217	-	-
3. KW 28	<i>P. nigra</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,605	-	-
4. KW 31	<i>P. nigra</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,315	-	-
5. KW 35	<i>P. nigra</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,243	-	-
6. KW 37	<i>P. nigra</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,497	-	-
Ernte	<i>P. nigra</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,113	-	-
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P. nigra</i> 400 ppm &gt; <i>P. nigra</i> 950 ppm</b>	<b>nein</b>	<b>0,037</b>	-	-

Tabelle 74: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von *P. nigra* (400 ppm) und *P. nigra* (950 ppm)

### 5.7.8 Stecklinge - Höhenzuwachs *Populus deltoides*

Im Laufe der Wachstumsperiode haben sich die Pflanzenhöhen beider Gruppen zum großen Teil nicht signifikant voneinander unterschieden (Tabelle 75). Während der Wachstumsperiode hatten beide Gruppen eine ähnlich schnelle Zunahme der Pflanzenhöhe, wobei die begasten Pflanzen etwas größer waren. Insbesondere in KW 28 waren die begasten Pflanzen signifikant größer als die Pflanzen der Kontrollgruppe. So lag zu diesem Zeitpunkt die Spannweite der begasten Gruppe zwischen 0,06 m

und 1,34 m und der Interquartilsabstand bei 0,26 m. Der Median dieser Gruppe lag bei 1,04 m und der Mittelwert bei 1,03 m. Die Spannweite der Kontrollgruppe lag dagegen zwischen 0,34 m und 1,02 m und der Interquartilsabstand bei 0,11 m, bei einem Median bei 0,85 m und einem Mittelwert bei 0,88 m.

Im weiteren Verlauf haben sich die Pflanzhöhen beider Gruppen wieder angenähert. Zum Ende der Wachstumsperiode haben sich die Pflanzendimensionen beider Gruppen jedoch nicht signifikant voneinander unterschieden. Dabei lag die Spannweite der Kontrollgruppe zwischen 1,36 m und 2,03 m bei einem Interquartilsabstand von 0,62 m und einem Median von 1,43 m. Der Mittelwert dieser Gruppe lag bei 1,64 m (Abbildung 69).

Die begaste Pflanzengruppe hatte zum Erntezeitpunkt eine Spannweite zwischen 1,03 m und 2,23 m bei einem Interquartilsabstand von 0,30 m und einem Median von 1,54 m. Der Mittelwert dieser Gruppe lag bei 1,60 m. Die Dimensionen der begasten Pflanzen waren dabei um 2,59 % niedriger als bei den Kontrollpflanzen.

Bei Betrachtung der gesamten Messperiode waren dagegen die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen durchschnittlich um 33,24 % höher als die Kontrollpflanzen. Es lag eine statistische Signifikanz vor.

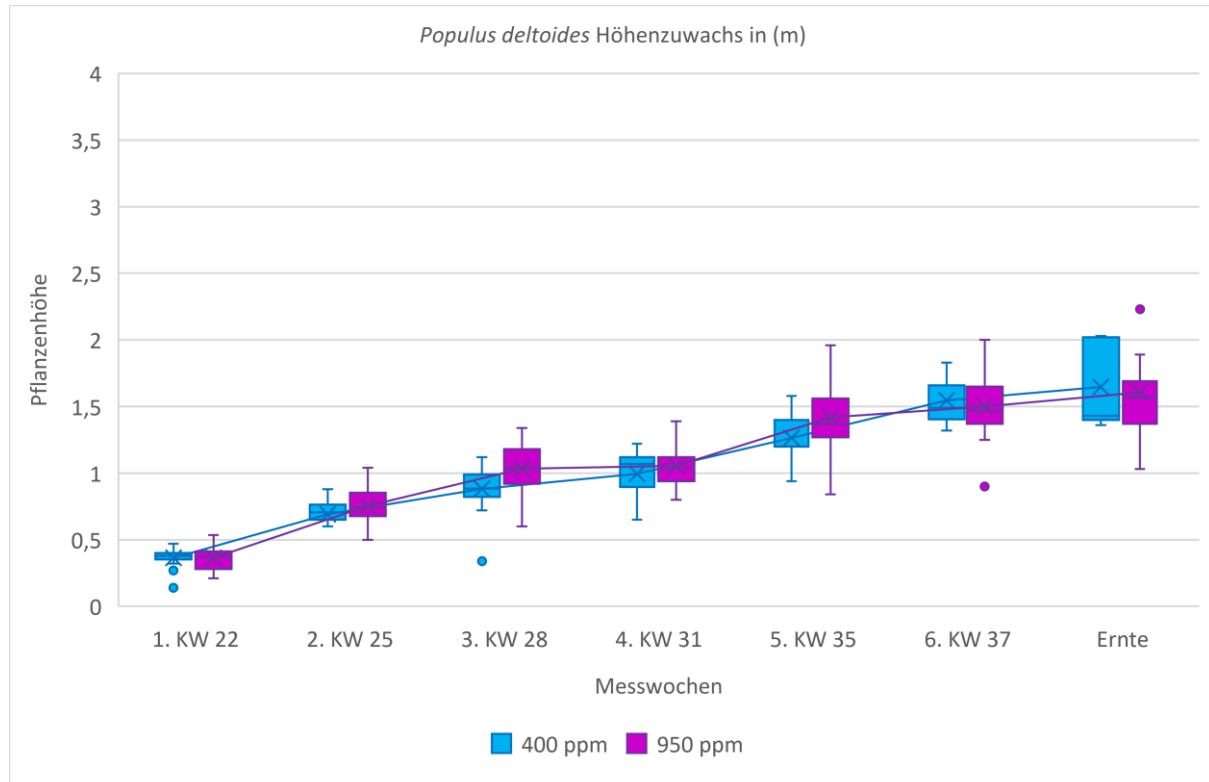


Abbildung 69: Höhenzuwachs von *Populus deltoides* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)



Signifikanztest					
Versuchstag	Höhenzuwachs	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. deltoides</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,807	-	-
2. KW 25	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,250	-	-
3. KW 28	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,002	0,50	mittel
4. KW 31	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,345	-	-
5. KW 35	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,791	-	-
6. KW 37	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,791	-	-
Ernte	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,004	0,51	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P. deltoides</i> 400 ppm &lt; <i>P. deltoides</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,28</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 75: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von *P. deltoides* (400 ppm) und *P. deltoides* (950 ppm)

### 5.7.9 Stecklinge – Höhenzuwachs Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen

Unter Umgebungsbedingungen haben sich die Hybridpappeln und die beiden Pappelarten *Populus nigra* und *Populus deltoides* zum Teil signifikant voneinander unterschieden.

Zwischen der Hybridpappel *Populus x canescens* und *Populus nigra* gab es besonders zu Anfang der Vegetationsperiode signifikante Unterschiede, bei der die Hybridpappeln in den ersten Messwochen deutlich höhere Dimensionen aufgewiesen haben als *Populus nigra*. Ab KW 35 haben sich die Dimensionen beider Arten wieder angenähert, wobei ab dem Zeitpunkt bis zur Ernte keine signifikanten Unterschiede zwischen diesen beiden Arten erfasst werden konnten (Tabelle 76).

Auch beim direkten Vergleich zwischen der Hybridpappel und *Populus deltoides* sind ähnliche Ergebnisse beobachtet worden. Hier waren die Unterschiede der Pflanzendimensionen zu Anfang der Vegetationsperiode besonders hoch, bei der durchgehend eine starke Effektstärke festgestellt werden konnte. Im Laufe der Vegetationsperiode haben sich die Pflanzendimensionen beider Arten wieder angenähert. So waren zwischen KW 31 bis zur Ernte keine signifikanten Unterschiede mehr beobachtet worden (Tabelle 77). Zur Ernte waren die Pflanzhöhen aller Arten auf einem ähnlichen Niveau, wobei die Hybridpappeln tendenziell die höchsten Dimensionen aufgewiesen haben (Abbildung 70). Dabei waren im Vergleich die Dimensionen von *Populus nigra* um 19,66 % und gegenüber *Populus deltoides* um 7,41 % geringer als bei den Hybridpappeln.

Über die gesamte Messzeit gesehen war die Pflanzenhöhe von *Populus nigra* um 29,24 % und der Art *Populus deltoides* um 38,82 % geringer als bei den Hybridpappeln, wobei eine statistische Signifikanz vorgelegen hat.

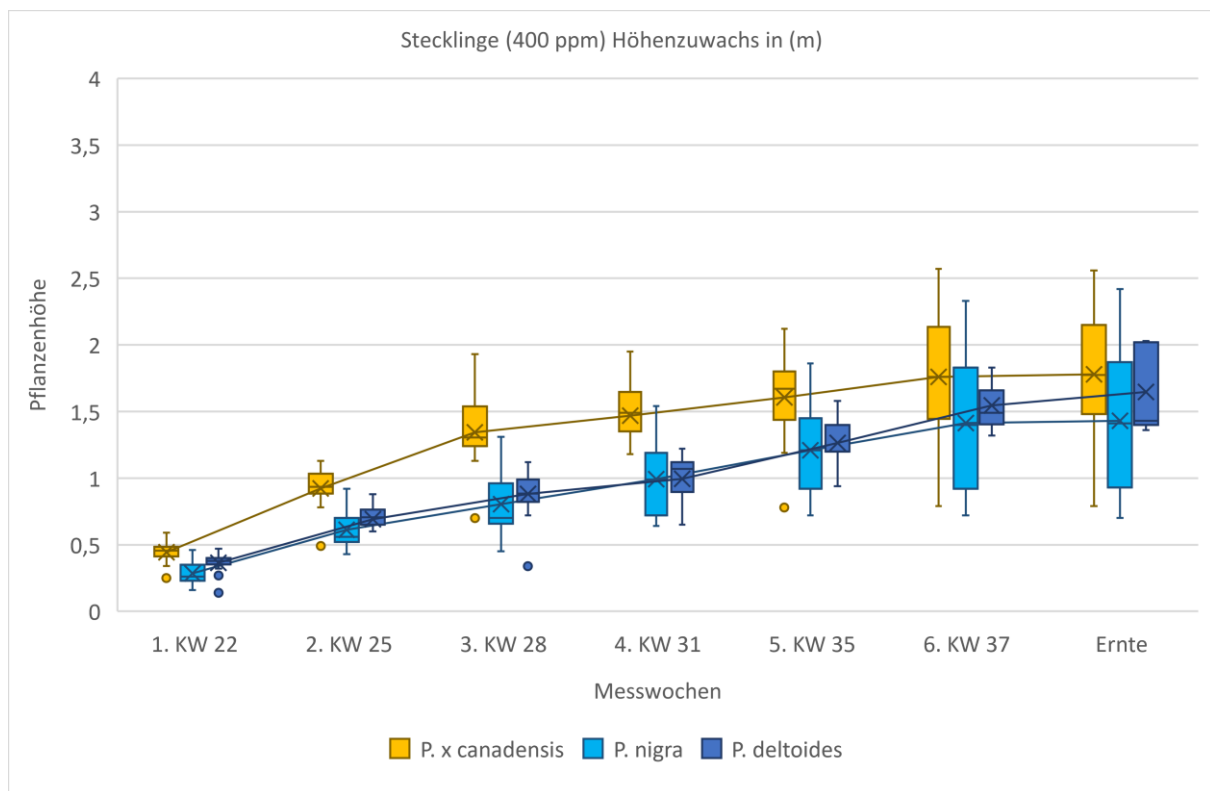


Abbildung 70: Vergleich des Höhenzuwachses von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Höhenzuwachs	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,001	0,75	stark
2. KW 25	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,000	0,85	stark
3. KW 28	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,000	0,83	stark
4. KW 31	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,009	0,64	stark
5. KW 35	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 400 ppm	nein	0,072	-	-
6. KW 37	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 400 ppm	nein	0,418	-	-
Ernte	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 400 ppm	nein	0,360	-	-
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canadensis</i> 400 ppm &gt; <i>P. nigra</i> 400 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,35</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 76: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von *P. x canadensis* und *P. nigra* unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Höhenzuwachs	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	nein	0,072	-	-
2. KW 25	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	ja	0,003	0,70	stark
3. KW 28	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	ja	0,001	0,76	stark
4. KW 31	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	ja	0,014	0,65	stark
5. KW 35	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	nein	0,243	-	-
6. KW 37	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	nein	0,418	-	-
Ernte	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	nein	0,360	-	-
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canadensis</i> 400 ppm &gt; <i>P. deltoides</i> 400 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,45</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 77: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von *P. x canadensis* und *P. deltoides* unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

### 5.7.10 Stecklinge – Höhenzuwachs Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration

Unter erhöhtem atmosphärischen CO<sub>2</sub> haben die Hybridpappeln zum Teil signifikant größere Pflanzenhöhen erreicht als die im Vergleich stehenden Arten *Populus nigra* und *Populus deltoides*. Dabei waren zu jedem Zeitpunkt der Vegetationsperiode die Hybridpappeln größer.

Am Anfang der Vegetationsperiode waren die Hybridpappeln signifikant größer als *Populus deltoides*, wobei nach der ersten Messwoche die Effektstärke sich von „stark“ auf „mittel“ änderte (Tabelle 79). Im Laufe der Zeit haben sich die Dimensionen immer weiter angeglichen, sodass bei KW 31 keine signifikanten Unterschiede mehr festgestellt werden konnten. Nachdem in KW 35 die Hybridpappeln nochmal zwischenzeitlich deutlich größer waren, haben sich zur Ernte die Dimensionen beider Gruppen wieder angenähert.

Von Beginn bis zum Ende der Vegetationsperiode waren die Unterschiede zwischen *Populus x canadensis* und *Populus nigra* sehr hoch, wobei eine statistische Signifikanz vorgelegen hat (Tabelle 78). Im direkten Vergleich wuchsen die Hybridpappeln besonders zu Beginn der Wachstumsperiode deutlich schneller als *Populus nigra*. Zur Ernte waren die Hybridpappeln im Durchschnitt bis zu 1,00 m höher als *Populus nigra*, wobei im direkten Vergleich die Spannweite der Hybridpappeln deutlich höher war als von *Populus nigra* (Abbildung 71).

Zum Erntezeitpunkt waren die Dimensionen von *Populus nigra* um 49,94 % und von *Populus deltoides* um 29,17 % niedriger als bei den Hybridpappeln.

Im Saisonverlauf waren die Dimensionen von *Populus nigra* um 53,98 % und von *Populus deltoides* um 33,70 % niedriger als bei den Hybridpappeln. Dabei ist eine statistische Signifikanz ermittelt worden.

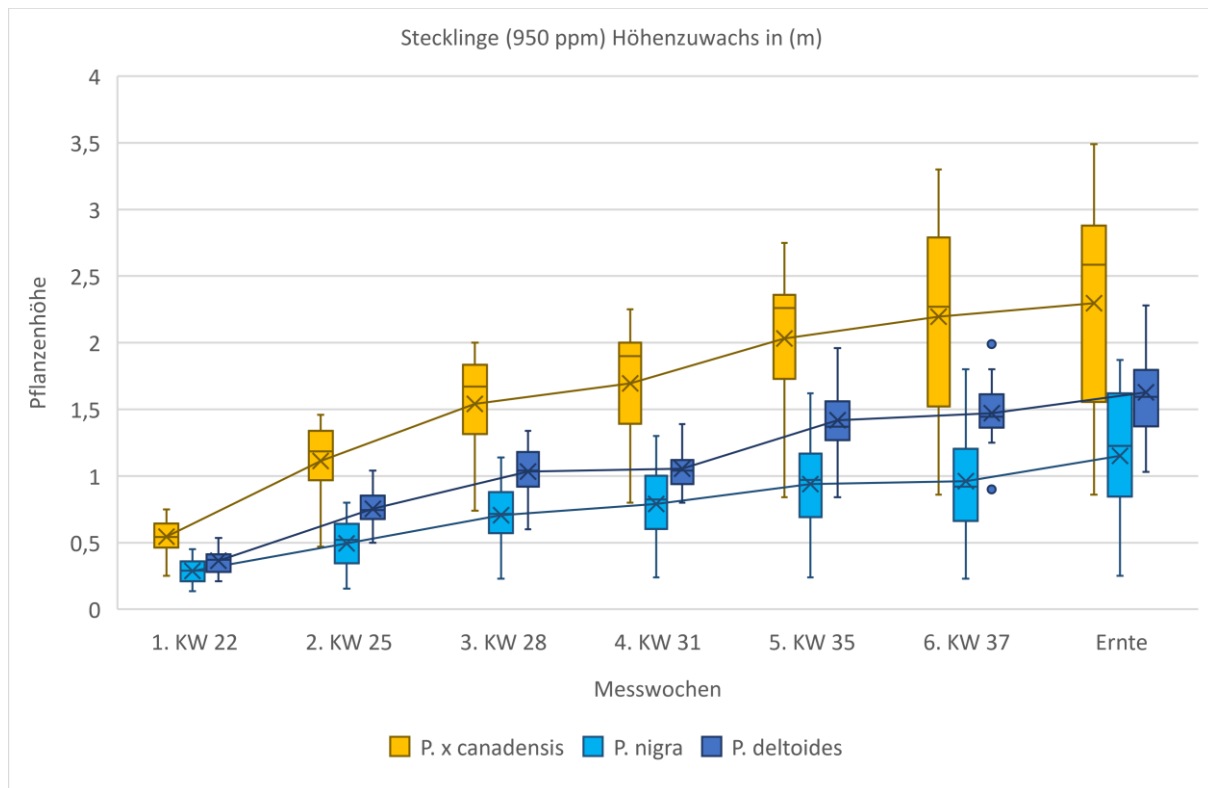


Abbildung 71: Vergleich des Höhenzuwachses von Stecklingen unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Höhenzuwachs	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,83	stark
2. KW 25	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,93	stark
3. KW 28	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,91	stark
4. KW 31	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,86	stark
5. KW 35	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,89	stark
6. KW 37	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,004	0,68	stark
Ernte	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,80	stark
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canadensis</i> 950 ppm &gt; <i>P. nigra</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,62</b>	<b>stark</b>

Tabelle 78: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von *P. x canadensis* und *P. nigra* unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Höhenzuwachs	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,008	0,52	stark
2. KW 25	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,026	0,46	mittel
3. KW 28	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,035	0,49	mittel
4. KW 31	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,159	-	-
5. KW 35	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,024	0,49	mittel
6. KW 37	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,102	-	-
Ernte	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,252	-	-
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canadensis</i> 950 ppm &gt; <i>P. deltoides</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,32</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 79: Signifikanztest zwischen den Höhenzuwächsen von *P. x canadensis* und *P. deltoides* unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

## 5.8 Stammdurchmesser – radialer Zuwachs

### 5.8.1 Einjährige Pflanzen - Stammdurchmesser *Populus x. canescens*

Im Laufe der Vegetationsperiode hatte eine erhöhte atmosphärische  $CO_2$ -Konzentration bei den Hybridpappeln *Populus x canescens* überwiegend einen signifikanten Einfluss auf das Dickenwachstum (Tabelle 80). Dabei variierten die Effektstärken zwischen „mittel“ und „stark“.

Zu Beginn der Vegetationsperiode konnten in der ersten Messwoche zunächst noch keine signifikanten Unterschiede beobachtet werden. Jedoch waren schon zu diesem Zeitpunkt die Stämme der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen tendenziell stärker als die Pflanzen der Kontrollgruppe, wobei die Kontrollgruppe eine höhere Streuung der Werte hatte. In KW 25 sind bereits starke signifikante Unterschiede zwischen den beiden Gruppen beobachtet worden. Zu diesem Zeitpunkt lag die Spannweite der Kontrollgruppe zwischen 6,31 mm und 11,06 mm und der Interquartilsabstand 2,22 mm. Der Median lag in dieser Messwoche bei 7,82 mm und der Mittelwert der Gruppe bei 8,02 mm. Die Spannweite der begasten Gruppe lag dagegen zwischen 7,74 mm und 11,04 mm bei einem Interquartilsabstand von 1,37 mm. Der Median betrug zu diesem Zeitpunkt 9,47 mm und der Mittelwert der erfassten Größen 9,40 mm. In den nachfolgenden Wochen war die Zunahme des Stammdurchmessers beider Gruppen auf einem ähnlich konstanten Niveau, wobei die signifikanten Unterschiede zwischen einer mittleren und starken Effektstärke variierten.

Zum Ende der Vegetationsperiode erreichten die Pflanzen der Kontrollgruppe einen durchschnittlichen Stammdurchmesser von 11,69 mm. Die Spannweite dieser Gruppe

lag zwischen 8,10 mm und 15,63 mm bei einem Interquartilsabstand von 2,41 mm und einem Median von 11,94 mm. Der Mittelwert dieser Gruppe betrug 11,69 mm. Die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen erreichten dagegen durchschnittlich eine Stammstärke von 13,61 mm, wobei die Spannweite dieser Gruppe zwischen 10,89 mm und 16,86 mm gelegen hat. Der Interquartilsabstand betrug zu diesem Zeitpunkt 2,79 mm und der Median lag bei 13,57 mm (Abbildung 72). Die Durchmesser der begasten Pflanzen waren dabei um 16,50 % höher als die der Kontrollpflanzen. Im Jahresdurchschnitt hatten die begasten Pflanzen um 13,63 % höhere radiale Zuwächse als die Kontrollpflanzen. Dabei war der Effekt signifikant, bei einer mittleren Effektstärke.

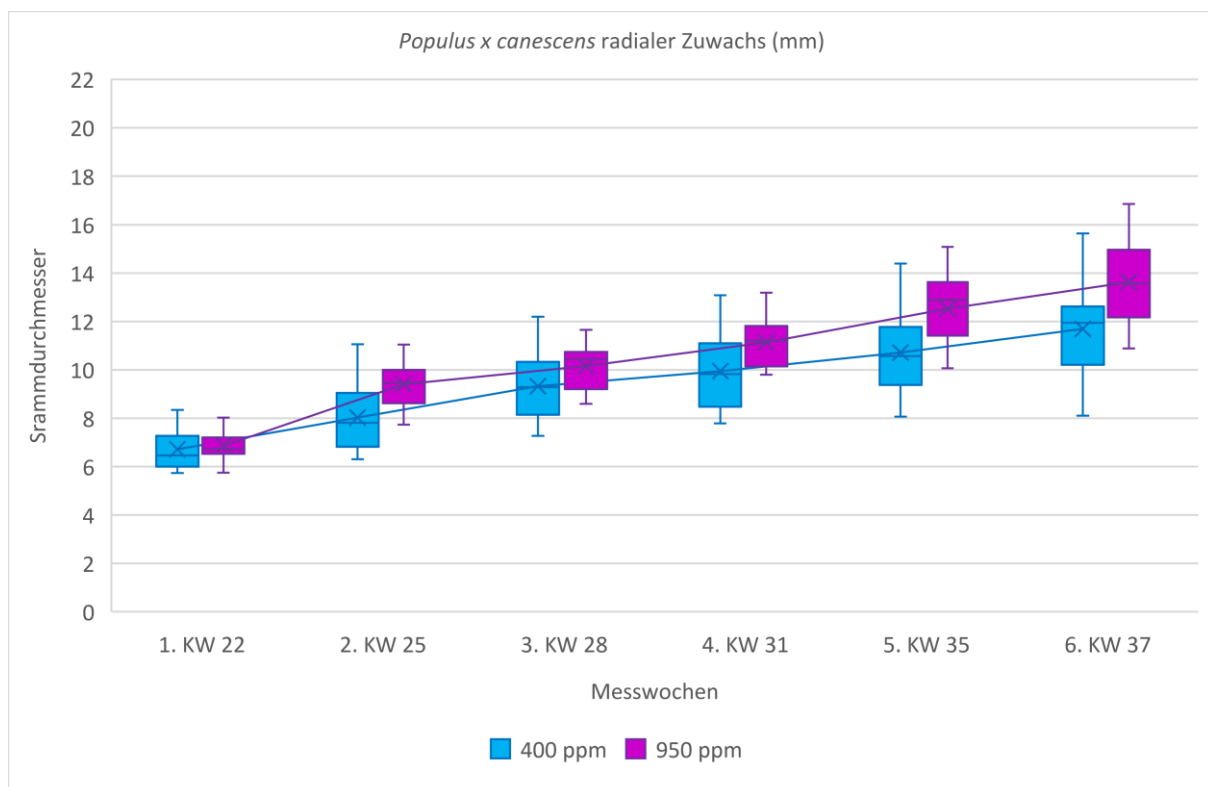


Abbildung 72: Radialer Zuwachs von *Populus x canescens* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stammdurchmesser	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	nein	0,300	-	-
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,004	0,51	stark
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,050	0,35	mittel
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,029	0,39	mittel
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,003	0,53	stark
6. KW 37	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,020	0,41	mittel
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 400 ppm &lt; <i>P.x canescens</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,001</b>	<b>0,25</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 80: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von *P. x canescens* (400 ppm) und *P. x canescens* (950 ppm)

### 5.8.2 Einjährige Pflanzen - Stammdurchmesser *Populus tremula*

Während der Wachstumsperiode hatte der erhöhte  $CO_2$ - Gehalt in der Atmosphäre keinen signifikanten Einfluss auf den radialen Zuwachs der Art *Populus tremula* (Tabelle 81). In allen Messwochen wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Versuchspflanzen beider Gruppen beobachtet. Beide Gruppen hatten während der Vegetationsperiode fast einen ähnlich schnellen radialen Zuwachs. Besonders bis KW 28 waren die Dimensionen der Pflanzen beider Gruppen sehr ähnlich. Ab KW 31 wurde eine etwas schnellere Zunahme der Stammdicke bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen beobachtet, die bis zum Ende der Vegetationsperiode angehalten hat. Bei der Kontrollgruppe sind die Stammdicken dieser Gruppe am KW 35 auf einem nahezu konstanten Niveau verblieben.

Zum Messende variierten die Stammdurchmesser der Kontrollpflanzen von 9,03 mm bis 11,27 mm. Der Interquartilsabstand war bei 0,75 mm bei einem Median von 10,04 mm. Der Mittelwert hat bei 9,99 mm gelegen. Bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen variierten die Stammdurchmesser zwischen 9,42 mm und 11,93 mm. Der Interquartilsabstand lag bei 1,61 mm bei einem Median von 10,84 mm. Der Mittelwert lag bei 10,77 mm (Abbildung 73).

Zu diesem Zeitpunkt waren im Durchschnitt die Durchmesser der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen um 7,87 % höher als bei den Kontrollpflanzen. Über die gesamte Messperiode gesehen haben sich die radialen Zuwächse beider Gruppen nicht signifikant voneinander unterschieden. Dabei waren die Durchmesser der begasten Pflanzen im Durchschnitt um 2,92 % stärker als bei den Kontrollpflanzen.

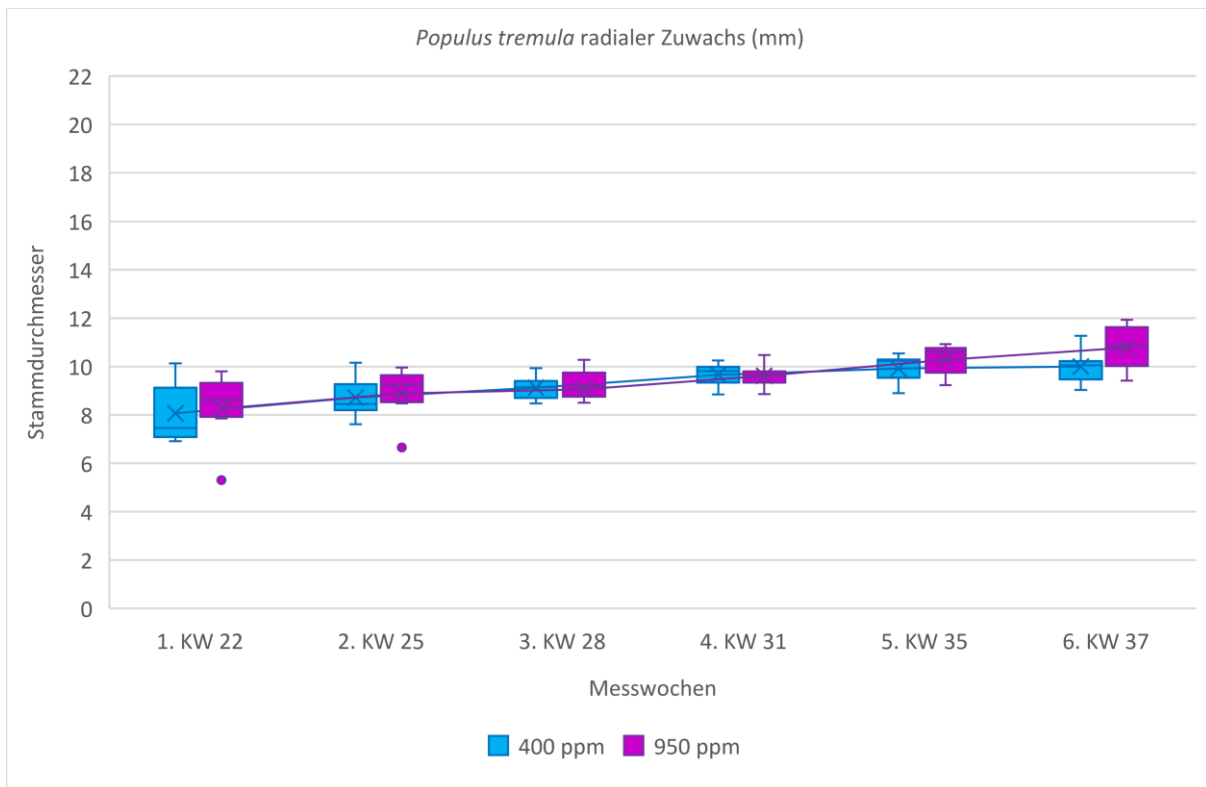


Abbildung 73: Radialer Zuwachs von *Populus tremula* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stammdurchmesser	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. tremula</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,573	-	-
2. KW 25	<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,628	-	-
3. KW 28	<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,945	-	-
4. KW 31	<i>P. tremula</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,818	-	-
5. KW 35	<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,132	-	-
6. KW 37	<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,313	-	-
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P. tremula</i> 400 ppm &lt; <i>P. tremula</i> 950 ppm</b>	<b>nein</b>	<b>0,337</b>	-	-

Tabelle 81: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von *P. tremula* (400 ppm) und *P. tremula* (950 ppm)

### 5.8.3 Einjährige Pflanzen - Stammdurchmesser *Populus alba*

Während der Wachstumsperiode hatte das erhöhte atmosphärische  $CO_2$  kaum Einfluss auf das Dickenwachstum von *Populus alba*. Insgesamt waren die Dimensionen der Pflanzen beider Gruppen sehr ähnlich, wobei die Gruppe der Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, deutlich höhere Spannweiten und Interquartilsabstände der Messungen aufgewiesen haben. Größtenteils waren jedoch die Stammstärken der begasteten Pflanzen nicht signifikant größer als die Pflanzen der



Kontrollgruppe (Tabelle 82). Zum Ende der Vegetationsperiode sind in KW 37 jedoch signifikante Unterschiede in den Stammstärken der Pflanzen beider Gruppen beobachtet worden. Zu diesem Zeitpunkt waren die Stämme der Kontrollgruppe durchschnittlich 10,96 mm stark. Die Spannweite der Gruppe lag zwischen 9,37 mm und 13,88 mm bei einem Interquartilsabstand von 2,38 mm und einem Median von 10,31 mm. Bei den begasten Pflanzen betrug der Durchschnittswert der Stammdurchmesser 13,9 mm bei einer Spannweite zwischen 8,4 mm und 20,02 mm und einem Interquartilsabstand von 4,98 mm. Der Median dieser Gruppe lag bei 15,05 mm (Abbildung 74).

Unmittelbar vor der Ernte waren die Stammdurchmesser der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen um 26,77 % höher als bei den Kontrollpflanzen. Insgesamt hatten die begasten Pflanzen einen signifikant höheren radialen Zuwachs als die Kontrollpflanzen. Dabei lag eine mittlere Effektstärke vor. Hier waren die begasten Pflanzen um 19,89 % größer als die Kontrollpflanzen.

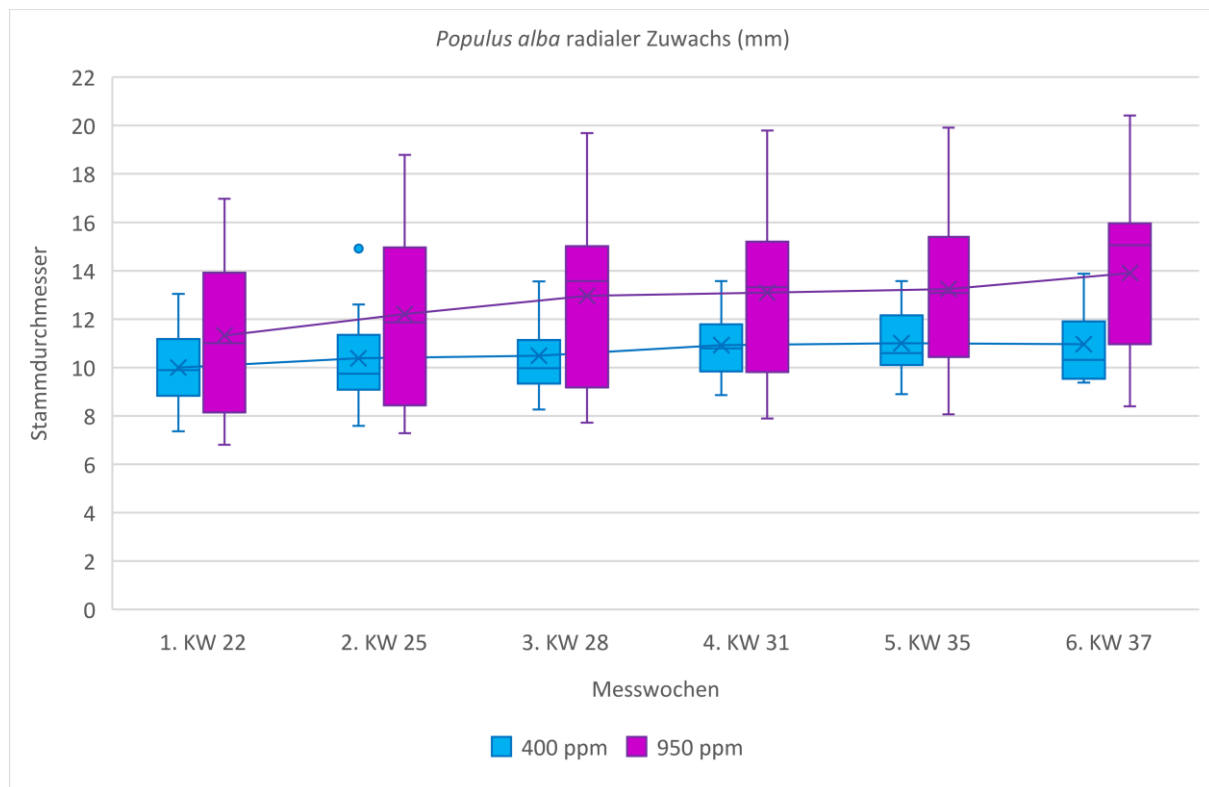


Abbildung 74: Radialer Zuwachs von *Populus alba* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stammdurchmesser	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,406	-	-
2. KW 25	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,376	-	-
3. KW 28	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,205	-	-
4. KW 31	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,242	-	-
5. KW 35	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,123	-	-
6. KW 37	<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,046	0,40	mittel
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P. alba</i> 400 ppm &lt; <i>P. alba</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,001</b>	<b>0,27</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 82: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von *P. alba* (400 ppm) und *P. alba* (950 ppm)

#### 5.8.4 Einjährige Pflanzen – Stammdurchmesser Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen

Die Hybridpappeln zeigten während der Vegetationsphase keine überlegene Zunahme des Stammdurchmessers gegenüber *Populus tremula* und *Populus alba*.

Im direkten Vergleich zwischen den Arten *Populus x canescens* und *Populus tremula* gab es während der gesamten Vegetationsperiode keine signifikanten Unterschiede bei den Stammdurchmessern (Tabelle 83). In den ersten beiden Messwochen waren die Stammdurchmesser von *Populus tremula* tendenziell größer als die der Hybridpappeln. Im Laufe der Vegetationsphase schwächte sich jedoch die Stammdurchmesser-Zunahme bei *Populus tremula* ab, wodurch zum Ende der Saison die Hybridpappeln stärkere Stammdurchmesser aufgewiesen haben als *Populus tremula*.

Beim Vergleich zwischen *Populus x canescens* und *Populus alba* gab es gerade zu Anfang der Vegetationsperiode signifikante Unterschiede, die bis einschließlich der zweiten Messwoche mit einer starken Effektstärke angehalten haben, wobei die Pflanzen der Art *Populus alba* deutlich höhere Stammdurchmesser aufgewiesen haben (Tabelle 84). Ab KW 28 haben sich die Dimensionen beider Pflanzengruppen stark angeglichen, wodurch bis zum Ende der Vegetationsperiode keine signifikanten Unterschiede erfasst werden konnten (Abbildung 75).

Zum Messende waren die durchschnittlichen Stammdicken von *Populus tremula* um 14,52 % und von *Populus alba* um 6,16 % geringer als bei den Hybridpappeln. Im Saisonverlauf hatte *Populus tremula* ein um 2,34 % geringeren Zuwachs als die Hybridpappel. Dagegen hatte *Populus alba* um 13,73 % höhere radiale Zuwächse als

*Populus x canescens*. Dabei waren bei beiden Vergleichen die Messergebnisse signifikant unterschiedlich.

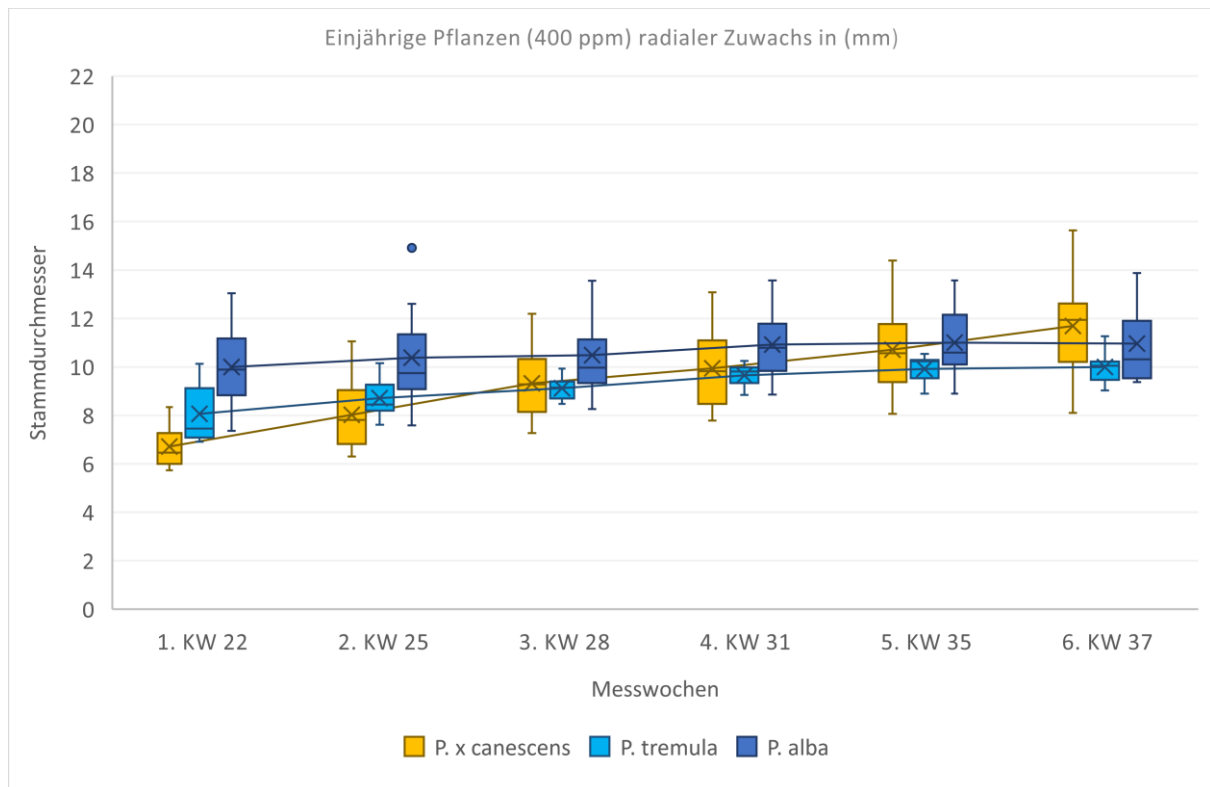


Abbildung 75: Vergleich der Stammdurchmesser von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stammdurchmesser	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 400 ppm	nein	0,148	-	-
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 400 ppm	nein	1,000	-	-
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	nein	0,088	-	-
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	nein	0,182	-	-
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	nein	0,501	-	-
6. KW 37	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	nein	0,118	-	-
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 400 ppm &gt; <i>P. tremula</i> 400 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,001</b>	<b>0,31</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 83: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von *P. x canescens* und *P. tremula* unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stammdurchmesser	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,000	0,85	stark
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,004	0,60	stark
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 400 ppm	nein	0,088	-	-
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	nein	0,182	-	-
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 400 ppm	nein	0,501	-	-
6. KW 37	<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	nein	0,118	-	-
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 400 ppm &gt; <i>P. alba</i> 400 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,32</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 84: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von *P. x canescens* und *P. alba* unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

### 5.8.5 Einjährige Pflanzen – Stammdurchmesser Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration

Während der Wachstumsperiode haben sich die Stammdurchmesser von *Populus x canescens* und der beiden Arten *Populus tremula* und *Populus alba* zum großen Teil nicht signifikant voneinander unterschieden. Die Hybridpappeln zeigten unter erhöhtem CO<sub>2</sub> keine höhere Wuchsleistung bezüglich der Stammbreite als *Populus tremula* und *Populus alba*.

Im direkten Vergleich zwischen *Populus x canescens* und *Populus tremula* waren besonders in der ersten Hälfte der Vegetationsperiode die Unterschiede sehr gering. Durch eine schnellere Zunahme des Stammdurchmessers bei *Populus x canescens* ergaben sich ab der zweiten Hälfte der Vegetationsperiode leichte Unterschiede, wobei in der Messwoche KW 31 signifikante Unterschiede der Stammdimensionen zu beobachten waren, bei einer mittleren Effektstärke (Tabelle 85). Nachdem sich die Dimensionen in KW 35 wieder angenähert hatten, wurde zum Ende der Messperiode in KW 37 ein signifikanter Unterschied der Stammdimensionen zwischen *Populus x canescens* und *Populus tremula* mit einer mittleren Effektstärke festgestellt, wobei die Dimensionen der Hybridpappeln größer waren.

Im direkten Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canescens* und *Populus alba* sind nur in der ersten Messwoche signifikante Unterschiede festgestellt worden, bei der *Populus alba* deutlich stärkere Durchmesser aufgewiesen hatte als die Hybridpappel (Tabelle 86). Dabei wurde eine starke Effektstärke zu diesem Zeitpunkt beobachtet. In den darauffolgenden Messwochen erfolgte auch hier die Zunahme der Stammdicke bei den Hybridpappeln deutlich schneller, wodurch schon ab KW 25 keine

signifikanten Unterschiede mehr festgestellt werden konnten. Zum Ende der Vegetationsperiode waren die Dimensionen der beiden Gruppen auf einem sehr ähnlichen Niveau, wobei *Populus alba* zu diesem Zeitpunkt eine deutlich höhere Spannweite an Messergebnissen hatte (Abbildung 76).

Die Durchmesser von *Populus tremula* waren gegenüber den Dimensionen von *Populus x canescens* um 20,86 % geringer. Im direkten Vergleich zwischen *Populus alba* und *Populus x canescens* waren wiederum die Durchmesser von *Populus alba* um 2,10 % größer als bei den Hybridpappel. Über die gesamte Messperiode gesehen waren die Durchmesser von *Populus tremula* um 11,55 % geringer als bei *Populus x canescens*. Die Dimensionen von *Populus alba* waren dagegen um 19,68 % größer als bei den Hybridpappel. Bei beiden Vergleichen lag eine statistische Signifikanz vor.

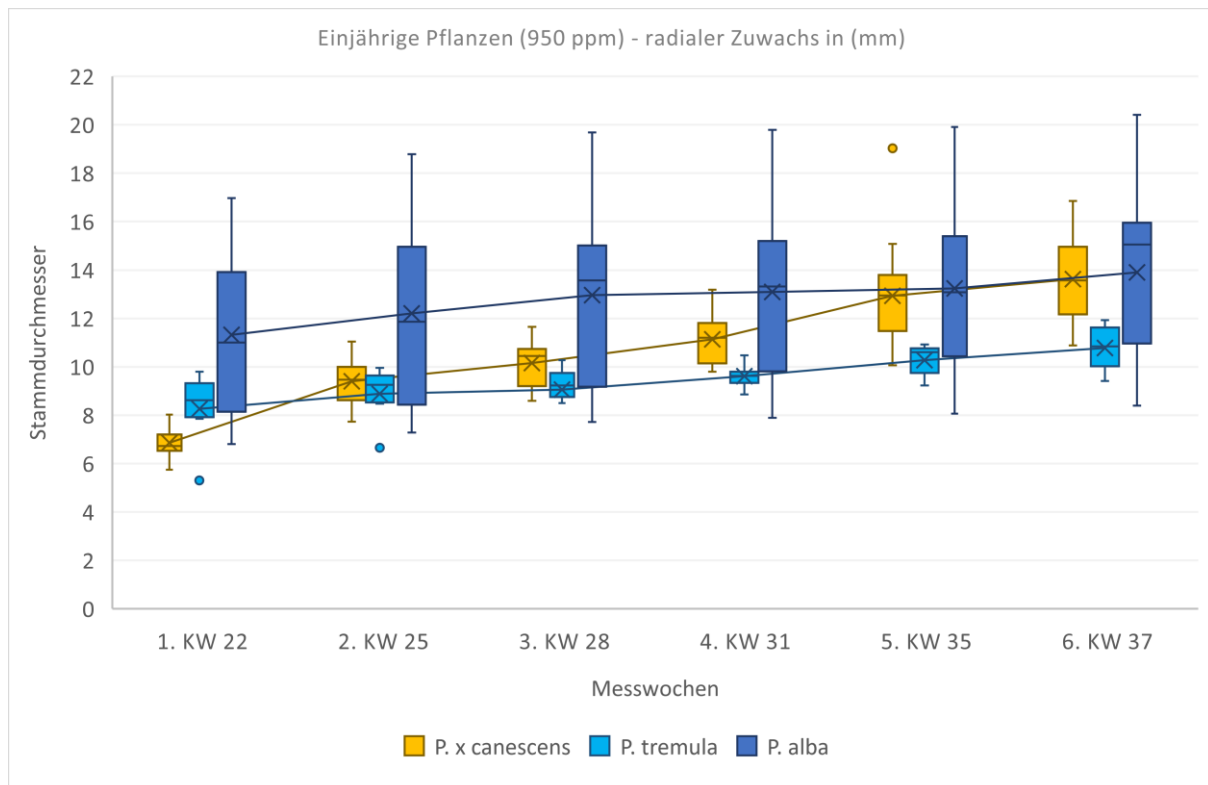


Abbildung 76: Vergleich der Stammdurchmesser von einjährigen Pflanzen unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stammdurchmesser	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,157	-	-
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,117	-	-
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,376	-	-
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,050	0,49	mittel
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,054	-	-
6. KW 37	<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,048	0,49	mittel
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 950 ppm &gt; <i>P. tremula</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,001</b>	<b>0,31</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 85: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von *P. x canescens* und *P. tremula* unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stammdurchmesser	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,79	stark
2. KW 25	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,117	-	-
3. KW 28	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,587	-	-
4. KW 31	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	1,000	-	-
5. KW 35	<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,054	-	-
6. KW 37	<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	1,000	-	-
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canescens</i> 950 ppm &lt; <i>P. alba</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,43</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 86: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von *P. x canescens* und *P. alba* unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration (950 ppm)

### 5.8.6 Stecklinge - Stammdurchmesser *Populus x canadensis*

Bei der Gruppe *Populus x canadensis* hatte eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration während der Wachstumsperiode einen Einfluss auf die Zunahme des Stammdurchmessers. Dabei hatten die mit CO<sub>2</sub> begasten Pflanzen bei allen Messwochen größere Stammdurchmesser als die Pflanzen der Kontrollgruppe, wobei die Unterschiede überwiegend signifikant waren (Tabelle 87).

In den ersten beiden Messwochen haben sich die Dimensionen der Pflanzen beider Gruppen signifikant voneinander unterschieden. In KW 25 ist eine starke Effektstärke ermittelt worden. Nach einer schnellen Zunahme des Stammdurchmessers bei beiden Gruppen verlangsamte sich der Zuwachs ab KW 28. Bis KW 35 waren die Unterschiede zwischen den Gruppen abwechselnd signifikant und nicht signifikant. Zum Ende der Vegetationsperiode unterschieden sich die beiden Gruppen signifikant voneinander mit einer starken Effektstärke. Dabei hatten die Pflanzen der Kontrollgruppe einen durchschnittlichen Stammdurchmesser von 6,19 mm, bei einer

Spannweite zwischen 3,37 mm und 8,19 mm und einem Interquartilsabstand von 1,05 mm. Der Median dieser Gruppe lag bei 5,97 mm.

Die begasten Pflanzen erreichten dagegen durchschnittlich einen Stammdurchmesser von 8,98 mm bei einer Spannweite zwischen 4,18 mm und 12,53 mm und einem Interquartilsabstand von 5,16 mm. Es wurde ein Median von 9,95 mm ermittelt (Abbildung 77).

Zum Messende waren die Durchmesser der begasten Pflanzen um 45,20 % höher als die der Kontrollpflanzen. Bei der zusammenfassenden Betrachtung der Ergebnisse waren die radialen Zuwächse der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen um 30,42 % höher als bei den Kontrollpflanzen. Dabei lag eine statistische Signifikanz vor, mit einer mittleren Effektstärke.

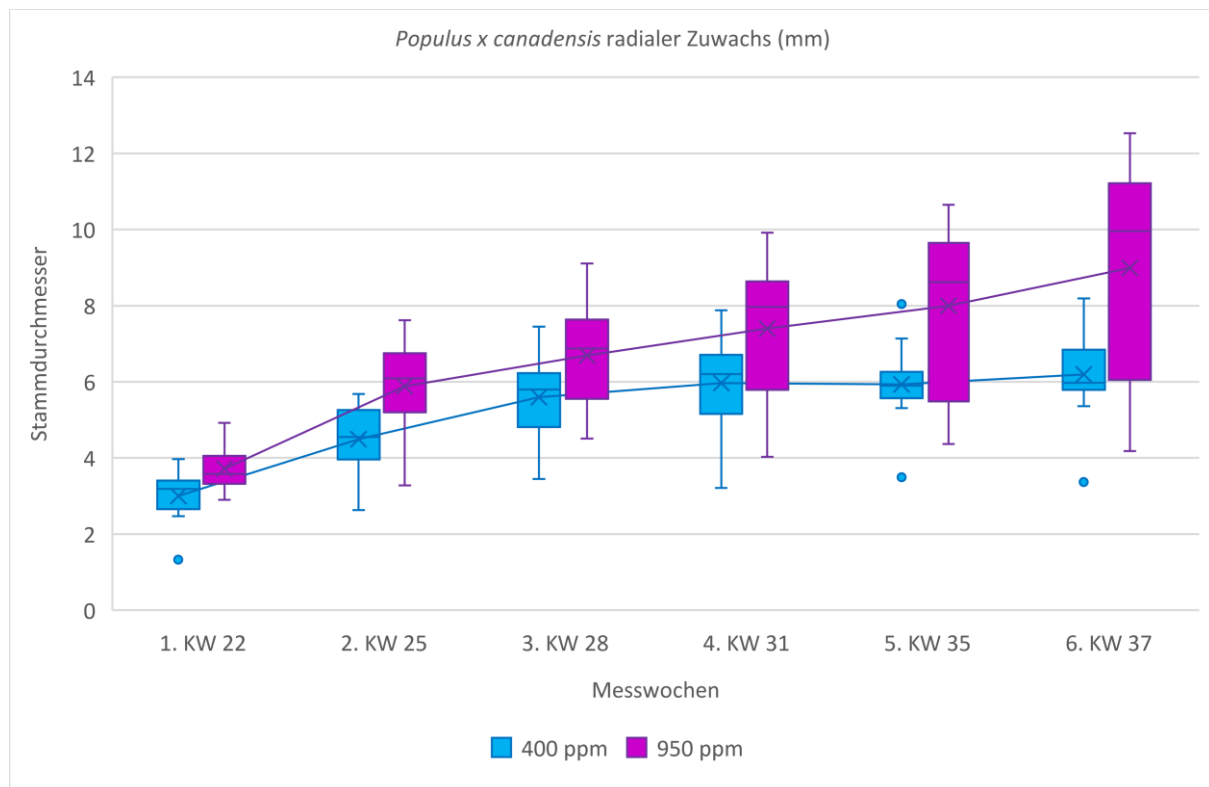


Abbildung 77: Radialer Zuwachs von *Populus x canadensis* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stammdurchmesser	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,020	0,47	mittel
2. KW 25	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,007	0,54	stark
3. KW 28	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	nein	0,083	-	-
4. KW 31	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,045	0,41	mittel
5. KW 35	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	nein	0,089	-	-
6. KW 37	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,012	0,50	mittel
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canadensis</i> 400 ppm &lt; <i>P.x canadensis</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,30</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 87: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von *P. x canadensis* (400 ppm) und *P. x canadensis* (950 ppm)

### 5.8.7 Stecklinge - Stammdurchmesser *Populus nigra*

Bei der Art *Populus nigra* hatte eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre keinen Einfluss auf das radiale Stammwachstum der Pflanzen. Während der Wachstumsperiode waren die Stammdimensionen beider Gruppen auf einem sehr ähnlichen Niveau, wodurch keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden konnten (Tabelle 88). Im Laufe der gesamten Wachstumsperiode hatte die Gruppe der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen eine höhere Spannweite als die Pflanzen der Kontrollgruppe. Die Zunahme des Stammdurchmessers verlief über die Wachstumsperiode bei beiden Gruppen fast gleich schnell.

Zum Ende der Vegetationsperiode erreichten die Pflanzen der Kontrollgruppe einen durchschnittlichen Stammdurchmesser von 5,82 mm, bei einer Spannweite zwischen 3,56 mm und 7,85 mm und einem Interquartilsabstand von 2,34 mm. Der Median dieser Gruppe lag zu diesem Zeitpunkt bei 5,26 mm.

Die begaste Pflanzengruppe erreichte im direkten Vergleich einen leicht höheren durchschnittlichen Stammdurchmesser von 6,14 mm und eine höhere Spannweite der ermittelten Werte zwischen 2,35 mm und 9,95 mm. Der Interquartilsabstand dieser Gruppe lag bei 3,18 mm bei einem Median von 6,36 mm (Abbildung 78).

Zum Ende der Messperiode waren die Durchmesser der begasten Pflanzen im Durchschnitt um 5,51 % größer als bei den Kontrollpflanzen. Über die gesamte Messzeit gesehen waren die radialen Zuwächse der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen um 2,44 % höher als bei den Kontrollpflanzen. Dabei lag keine statistische Signifikanz vor.



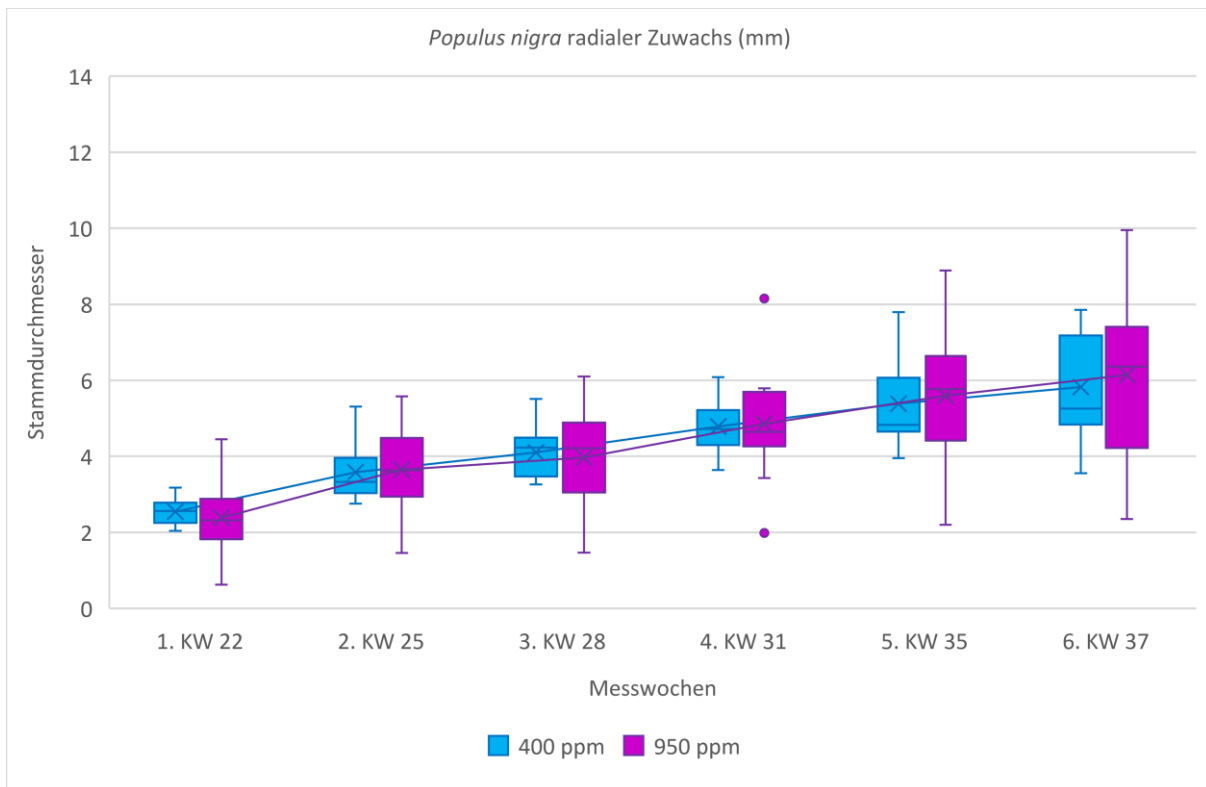


Abbildung 78: Radialer Zuwachs von *Populus nigra* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stammdurchmesser	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. nigra</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,438	-	-
2. KW 25	<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,797	-	-
3. KW 28	<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,949	-	-
4. KW 31	<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,968	-	-
5. KW 35	<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,905	-	-
6. KW 37	<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,780	-	-
Saison gesamt	<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,980	-	-

Tabelle 88: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von *P. nigra* (400 ppm) und *P. nigra* (950 ppm)

### 5.8.8 Stecklinge - Stammdurchmesser *Populus deltoides*

Während der gesamten Wachstumsperiode hatte eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration keinen Einfluss auf das Dickenwachstum der Art *Populus deltoides*. Bei allen Messwochen konnten keine signifikanten Unterschiede beim radialen Zuwachs zwischen den beiden Gruppen festgestellt werden (Tabelle 89). Während der gesamten Vegetationsperiode hatten die Pflanzen, die einer erhöhten

atmosphärischen  $CO_2$ - Konzentration ausgesetzt waren, etwas höhere Stammdurchmesser als die Pflanzen der Kontrollgruppe.

Die Zunahme des Stammdurchmessers erfolgte bei beiden Gruppen fast gleich schnell, wobei beide Gruppen sehr ähnliche Spannweiten der Messergebnisse aufgewiesen haben. Ab KW 31 hat sich die Zunahme des Stammdurchmessers bei den Pflanzen der Kontrollgruppe stark verlangsamt und verblieb bis zum Ende der Messperiode auf einem fast konstanten Niveau. Bei den begasten Pflanzen erhöhte sich die Geschwindigkeit bei der Stammdurchmesser- Zunahme, verlangsamt sich aber ab KW 35 wieder.

Zum Ende der Messperiode erreichten die Pflanzen der Kontrollgruppe einen durchschnittlichen Stammdurchmesser von 5,04 mm, bei einer Spannweite der Messergebnisse zwischen 4,16 mm und 6,70 mm. Der Interquartilsabstand dieser Gruppe betrug 1,27 mm bei einem Median von 4,28 mm. Die Pflanzen der begasten Gruppe hatten einen höheren durchschnittlichen Stammdurchmesser von 6,93 mm, bei einer Spannweite zwischen 4,27 mm und 8,84 mm. Der Interquartilsabstand betrug 0,76 mm, bei einem Median von 6,23 mm. 5 Beobachtungen sind als Ausreißer klassifiziert worden (Abbildung 79).

Zum Messende waren die Durchmesser der begasten Pflanzen im Durchschnitt um 26,72 % größer als bei den Kontrollpflanzen. Der Jahresdurchschnitt der radialen Zuwächse war bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen um 18,32 % höher als bei den Kontrollpflanzen. Es lag ein signifikanter Effekt vor, mit einer mittleren Effektstärke.

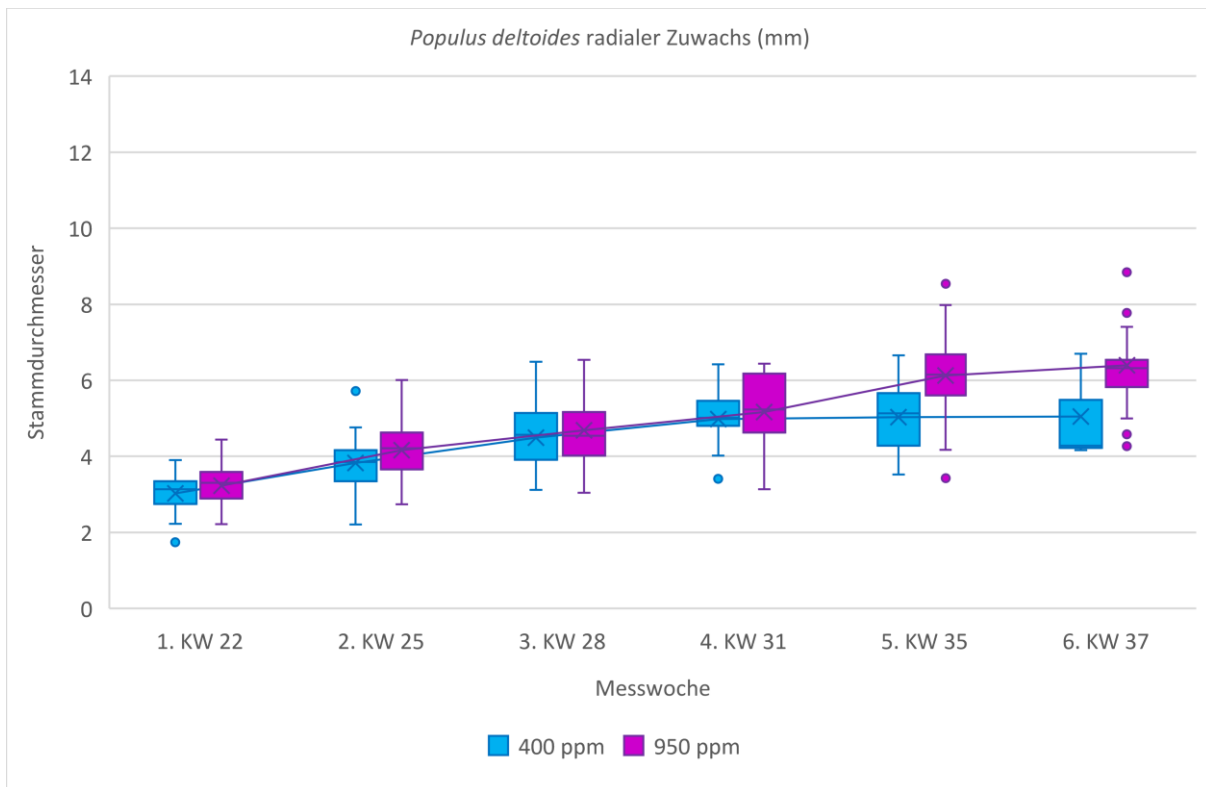


Abbildung 79: Radialer Zuwachs von *Populus deltoides* während der Vegetationsperiode unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stammdurchmesser	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,265	-	-
2. KW 25	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,253	-	-
3. KW 28	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,708	-	-
4. KW 31	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,597	-	-
5. KW 35	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,065	-	-
6. KW 37	<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,153	-	-
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P. deltoides</i> 400 ppm &lt; <i>P. deltoides</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,001</b>	<b>0,25</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 89: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von *P. deltoides* (400 ppm) und *P. deltoides* (950 ppm)

### 5.8.9 Stecklinge – Stammdurchmesser Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen

Beim Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canadensis* und *Populus nigra* und *Populus deltoides* sind während der Wachstumsperiode nur vereinzelt signifikante Unterschiede bei den Stammdurchmessern festgestellt worden, die den Umgebungsbedingungen ausgesetzt waren. Am häufigsten gab es signifikante Unterschiede zwischen den Arten *Populus x canadensis* und *Populus nigra* (Tabelle

90). Da die Hybridpappeln ab KW 22 ein schnelleres Wachstum aufgewiesen haben als *Populus nigra*, wurden ab KW 25 bis KW 31 signifikante Unterschiede zwischen den beiden Pflanzengruppen beobachtet, wobei eine starke Effektstärke ermittelt worden ist. Dabei hatten die Hybridpappeln jedoch eine wesentlich höhere Spannweite der ermittelten Messwerte als *Populus nigra*. Da das Wachstum der Hybridpappeln ab KW 31 nachgelassen hat und das von *Populus nigra* aber noch länger angehalten hat, haben sich die Dimensionen der Pflanzengruppen ab KW 35 wieder angenähert und waren zum Ende der Wachstumsperiode nicht mehr signifikant unterschiedlich. Dabei waren die Dimensionen der Hybridpappeln im Durchschnitt etwas höher als bei *Populus nigra*.

Die Stammdurchmesser der Arten *Populus x canadensis* und *Populus deltoides* haben sich während der Wachstumsperiode kaum voneinander unterschieden. Dabei hatten beide Arten eine ähnlich schnelle Zunahme des Stammdurchmessers, wobei das Wachstum bei den Hybridpappeln etwas schneller war. Dadurch gab es zwischenzeitlich in der Messwoche KW 28 signifikante Unterschiede bei einer mittleren Effektstärke (Tabelle 91). Ab KW 31 hat sich das Wachstum beider Pflanzengruppen nahezu parallel zueinander verlangsamt, wodurch zum Ende der Wachstumsperiode keine signifikanten Unterschiede bei den Stammdurchmessern festgestellt werden konnten (Abbildung 80).

Dabei waren die Stammdurchmesser von *Populus nigra* um 5,97 % und von *Populus deltoides* um 18,47 % niedriger als bei den Hybridpappeln.

Über die gesamte Messzeit gesehen waren die radialen Zuwächse von *Populus nigra* um 17,72 % niedriger als bei *Populus x canadensis*. Auch die Zuwächse von *Populus deltoides* waren um 20,58 % geringer als bei den Hybridpappeln. Bei beiden Vergleichen lag eine statistische Signifikanz zwischen den Messwerten vor.

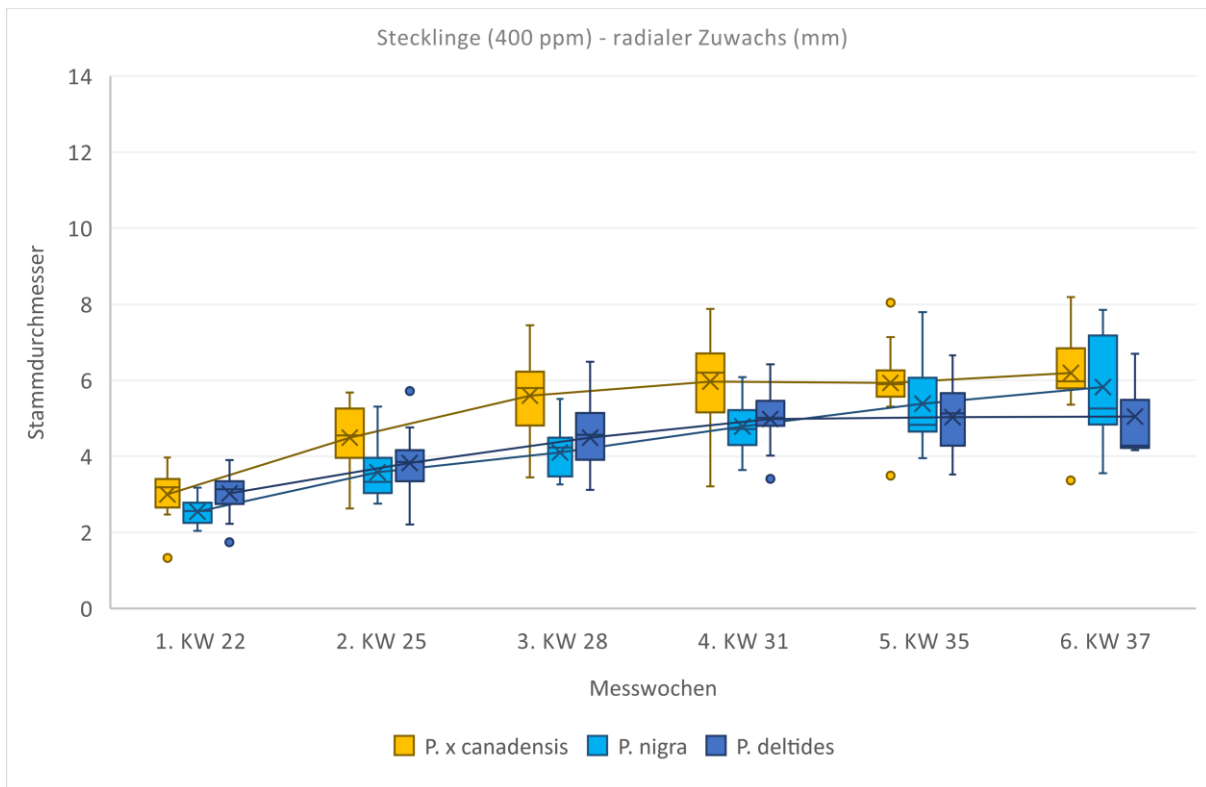


Abbildung 80: Vergleich der Stammdurchmesser von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stammdurchmesser	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 400 ppm	nein	0,070	-	-
2. KW 25	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,025	0,54	stark
3. KW 28	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,004	0,66	stark
4. KW 31	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,009	0,57	stark
5. KW 35	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 400 ppm	nein	0,221	-	-
6. KW 37	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 400 ppm	nein	0,420	-	-
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canadensis</i> 400 ppm &gt; <i>P. nigra</i> 400 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,33</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 90: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von *P. x canadensis* und *P. nigra* unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stammdurchmesser	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	nein	1,000	-	-
2. KW 25	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	nein	0,143	-	-
3. KW 28	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	ja	0,032	0,45	mittel
4. KW 31	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	nein	0,092	-	-
5. KW 35	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	nein	0,221	-	-
6. KW 37	<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	nein	0,420	-	-
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canadensis</i> 400 ppm &gt; <i>P. deltoides</i> 400 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,36</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 91: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von *P. x canadensis* und *P. deltoides* unter Umgebungsbedingungen (400 ppm)

#### 5.8.10 Stecklinge – Stammdurchmesser Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter $CO_2$ -Konzentration

Unter erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  haben sich die Stammdurchmesser der Hybridpappeln und die der Arten *Populus nigra* und *Populus deltoides* zum Teil signifikant voneinander unterschieden. Im direkten Vergleich haben die Hybridpappeln ein teilweise schnelleres Wachstum unter erhöhtem  $CO_2$  aufgewiesen als *Populus nigra* und *Populus deltoides*.

Im direkten Vergleich zwischen *Populus x canadensis* und *Populus nigra* haben sich besonders zu Beginn der Vegetationsperiode die Stammdurchmesser stark unterschieden. Von KW 22 bis KW 31 waren die Dimensionen der Hybridpappeln deutlich größer als bei *Populus nigra*. Im zweiten Teil der Vegetationsperiode haben sich die Dimensionen beider Gruppen angenähert, wobei die Pflanzen der Art *Populus nigra* nun immer zahlreichere starke Stämme aufgewiesen haben. Zum Ende der Vegetationsperiode haben sich die Dimensionen beider Arten nicht mehr signifikant voneinander unterschieden (Tabelle 92).

Im direkten Vergleich zwischen *Populus x canescens* und *Populus deltoides* gab es besonders im mittleren Teil der Vegetationsperiode signifikante Unterschiede (Tabelle 93). So waren zwischen KW 25 und KW 31 die Dimensionen der Hybridpappeln deutlich größer als die der Art *Populus deltoides*. Jedoch war auch die Spannweite bei den Hybridpappeln in allen drei Messwochen deutlich höher. In den nachfolgenden Messwochen haben sich die Dimensionen beider Arten wieder angenähert, obwohl im Vergleich das Wachstum der Hybridpappeln etwas zugenommen hat. Zum Ende der Vegetationsperiode gab es zwischen den beiden Arten keine signifikanten Unterschiede bei den Stammdimensionen, wobei die Hybridpappel *Populus x canadensis* etwas stärkere Stämme hatte als *Populus deltoides* (Abbildung 81).

Zum Messende waren die Stammdurchmesser von *Populus nigra* um 31,67 % und von *Populus deltoides* um 28,84 % geringer als bei den Hybridpappeln.

Auch unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration waren die radialen Zuwächse während der gesamten Messperiode gesehen signifikant höher als bei den Arten *Populus nigra* und *Populus deltoides*. Bei *Populus nigra* waren die radialen Zuwächse um 35,37 % und bei *Populus deltoides* um 27,95 % geringer als bei *Populus x canadensis*. Bei beiden

Vergleichen lag eine statistische Signifikanz zwischen den Messwerten der jeweiligen Arten vor.

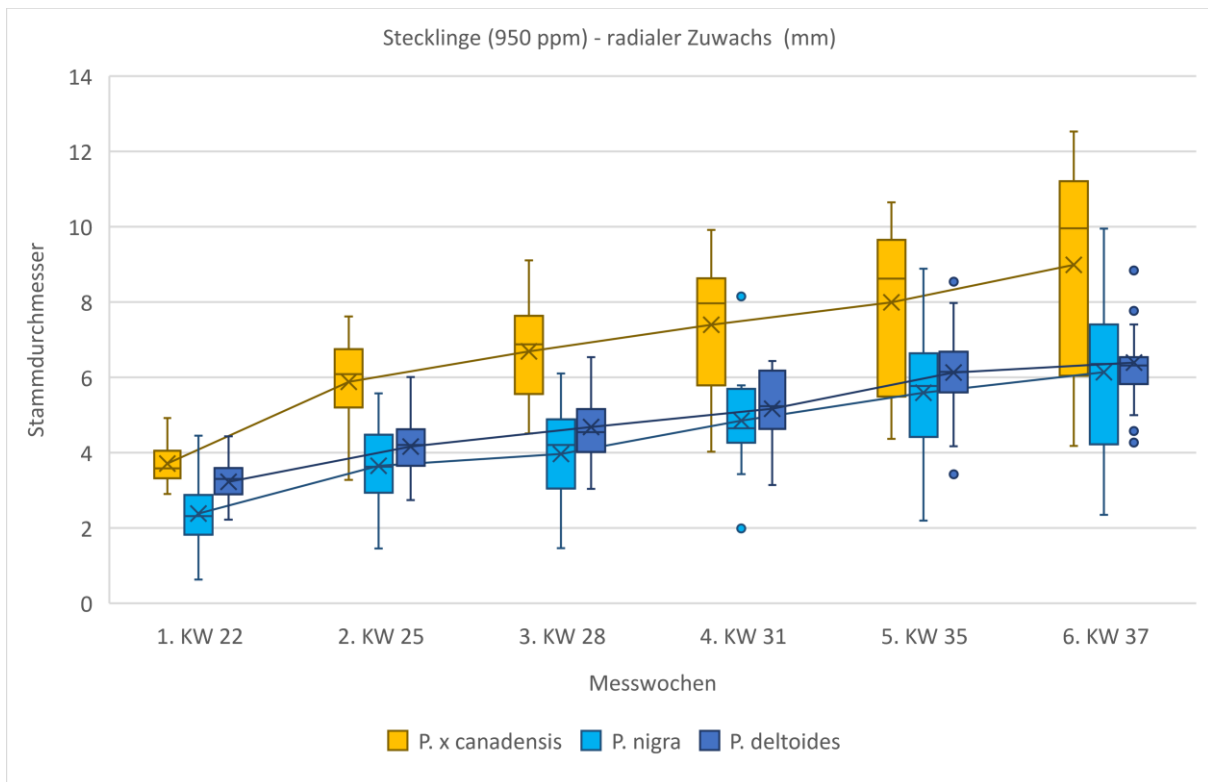


Abbildung 81: Vergleich der Stammdurchmesser von Stecklingen unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stammdurchmesser	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,001	0,74	stark
2. KW 25	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,001	0,76	stark
3. KW 28	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,001	0,76	stark
4. KW 31	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,011	0,62	stark
5. KW 35	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,056	-	-
6. KW 37	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,089	-	-
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canadensis</i> 950 ppm &gt; <i>P. nigra</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,66</b>	<b>stark</b>

Tabelle 92: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von *P. x canadensis* und *P. nigra* unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

Signifikanztest					
Versuchstag	Stammdurchmesser	Signifikanz	Angepasste Signifikanz	r	Effektstärke
1. KW 22	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,265	-	-
2. KW 25	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,004	0,56	stark
3. KW 28	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,003	0,58	stark
4. KW 31	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,023	0,50	mittel
5. KW 35	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,191	-	-
6. KW 37	<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,076	-	-
<b>Saison gesamt</b>	<b><i>P.x canadensis</i> 950 ppm &gt; <i>P. deltoides</i> 950 ppm</b>	<b>ja</b>	<b>0,000</b>	<b>0,33</b>	<b>mittel</b>

Tabelle 93: Signifikanztest zwischen den Stammdurchmessern von *P. x canadensis* und *P. deltoides* unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

## 5.9 Blattfläche

### 5.9.1 Einjährige Pflanzen - Blattfläche *Populus x canescens*

Eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Blattflächengröße der Pflanzen *Populus x canescens* (Tabelle 94).

Die Pflanzen der Kontrollgruppe hatten eine durchschnittliche Blattfläche von  $56,16 \text{ cm}^2$ . Die Spannweite der erfassten Messwerte lag zwischen  $14,16 \text{ cm}^2$  und  $140,86 \text{ cm}^2$ , bei einem Interquartilsabstand von  $32,53 \text{ cm}^2$  und einem Median von  $50,81 \text{ cm}^2$ .

Die Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, hatten etwas größere Blattflächen, die sich jedoch nicht signifikant von denen der Kontrollgruppe unterschieden haben. Die durchschnittliche Blattfläche dieser Gruppe lag bei  $68,19 \text{ cm}^2$ . Die Spannweite war ebenfalls höher als die der Kontrollgruppe und lag zwischen  $15,88 \text{ cm}^2$  und  $143,83 \text{ cm}^2$ , bei einem Interquartilsabstand von  $47,27 \text{ cm}^2$ . Der Median lag bei  $70,54 \text{ cm}^2$  (Abbildung 82).

Die durchschnittliche Blattfläche war bei den begasteten Pflanzen um 21,43 % größer als bei den Kontrollpflanzen.

### 5.9.2 Einjährige Pflanzen - Blattfläche *Populus tremula*

Bei der Art *Populus tremula* hatte eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre keine signifikanten Auswirkungen auf die Blattentwicklung (Tabelle 94).



Die Blätter der Kontrollgruppe und die der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen haben sich nicht signifikant voneinander unterschieden. Die Messungen haben ergeben, dass die Blätter der begasten Pflanzen aber tendenziell größer waren als die Blätter der Kontrollgruppe. Durchschnittlich betrug die Blattfläche der Pflanzen der Kontrollgruppe  $37,81 \text{ cm}^2$  bei einer Spannweite zwischen  $15,07 \text{ cm}^2$  und  $76,05 \text{ cm}^2$  bei einem Interquartilsabstand von  $30,94 \text{ cm}^2$ . Der Median lag bei  $42,19 \text{ cm}^2$ . Die Blattflächen der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen waren mit einer durchschnittlichen Fläche von  $42,09 \text{ cm}^2$  etwas größer ausgeprägt. Die Spannweite der Messungen lag zwischen  $23,22 \text{ cm}^2$  und  $72,81 \text{ cm}^2$  und der Interquartilsabstand  $17,3 \text{ cm}^2$  bei einem Median von  $36,54 \text{ cm}^2$  (Abbildung 82).

Dabei waren die Blattflächen der begasten Pflanzen um 11,32 % größer als bei den Kontrollpflanzen.

### 5.9.3 Einjährige Pflanzen - Blattfläche *Populus alba*

Eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration hatte einen signifikanten Effekt auf die Blattentwicklung der Art *Populus alba* (Tabelle 94). Die Messungen haben ergeben, dass die Blattdimensionen beider Gruppen sich signifikant mit einer mittleren Effektstärke unterschieden haben.

Dabei hatten die Pflanzen der Kontrollgruppe eine durchschnittliche Blattfläche von  $43,05 \text{ cm}^2$  und eine Spannweite zwischen  $14,57 \text{ cm}^2$  und  $90,24 \text{ cm}^2$ . Der Interquartilsabstand lag bei  $17,47 \text{ cm}^2$  bei einem Median von  $41,65 \text{ cm}^2$ .

Die begasten Pflanzen hatten dagegen eine durchschnittliche Blattfläche von  $59,09 \text{ cm}^2$  und eine Spannweite zwischen  $21,34 \text{ cm}^2$  und  $98,49 \text{ cm}^2$ . Der Interquartilsabstand lag bei  $30,32 \text{ cm}^2$  und der Median bei  $58,1 \text{ cm}^2$  (Abbildung 82).

Durchschnittlich waren die Blattflächen der begasten Pflanzen um 37,23 % größer als bei den Kontrollpflanzen.

#### 5.9.4 Einjährige Pflanzen – Blattfläche Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen

Bei der Gruppe der einjährigen Pflanzen waren die Blattflächen der Hybridpappeln unter Umgebungsbedingungen zum Teil signifikant größer als bei den Arten *Populus tremula* und *Populus alba* (Tabelle 94).

Unter Normalbedingungen waren die Blattflächen von *Populus tremula* um 32,66 % kleiner als bei den Hybridpappeln. Die Unterschiede waren dabei signifikant. Im direkten Vergleich hatten die Hybridpappeln deutlich höhere Spannweiten.

Dagegen waren die Unterschiede zwischen den Hybridpappeln und der Art *Populus alba* niedriger. Auch hier waren die Blattflächen der Hybridpappeln größer, jedoch konnte keine statistische Signifikanz festgestellt werden (Abbildung 82). Dabei waren die Blattflächen der von *Populus alba* um 23,32 % kleiner als bei *Populus x canescens*. Die Spannweite war bei *Populus alba* deutlich kleiner als bei den Hybridpappeln.

#### 5.9.5 Einjährige Pflanzen – Blattfläche Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration

Unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration waren die Unterschiede ähnlich. Im direkten Vergleich zwischen der Hybridpappel und *Populus tremula* waren die Unterschiede größer als unter Normalbedingungen und ebenfalls signifikant. Die Blätter von *Populus tremula* waren um 38,27 % kleiner als bei den Hybridpappeln. Im direkten Vergleich zwischen der Hybridpappel und *Populus alba* waren die Unterschiede unter erhöhtem CO<sub>2</sub> geringer (Abbildung 82). Auch bei diesem Vergleich hatte *Populus alba* um 13,34 % kleinere Blattflächen als *Populus x canescens*. Unter erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentration hatte die Hybridpappel eine höhere Spannweite als *Populus tremula* und *Populus alba*.

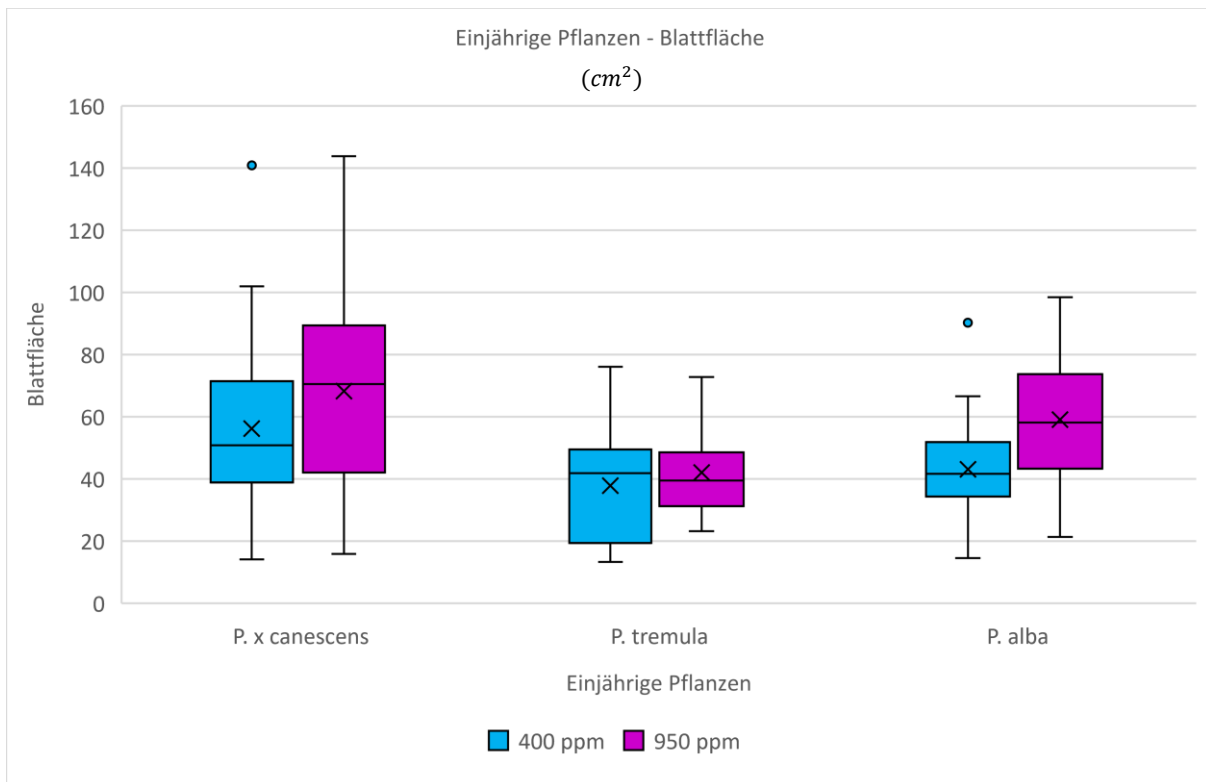


Abbildung 82: Blattfläche von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
Blattfläche	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	nein	0,128	-	-
<i>P. tremula</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,256	-	-
<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,003	0,38	mittel
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	ja	0,028	0,33	mittel
<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,001	0,48	mittel
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	nein	0,309	-	-
<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	1,000	-	-

Tabelle 94: Signifikanztest zwischen den Blattflächen von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

### 5.9.6 Stecklinge - Blattfläche *Populus x canadensis*

Die Messungen haben ergeben, dass eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration keinen signifikanten Einfluss auf die Blattentwicklung von *Populus x canadensis*-Stecklingen hatte (Tabelle 95). Beide Pflanzengruppen erreichten während der Wachstumsperiode sehr ähnliche Blattdimensionen, die sich nicht signifikant voneinander unterscheiden haben. Dabei waren die Blattflächen der Kontrollgruppe etwas größer als bei den begasten Pflanzen.

Die durchschnittliche Blattfläche der Kontrollgruppe betrug  $105,05 \text{ cm}^2$ , bei einer Spannweite zwischen  $77,06 \text{ cm}^2$  und  $149,62 \text{ cm}^2$  und einem Interquartilsabstand von  $9,24 \text{ cm}^2$ . Der Median dieser Gruppe lag bei  $104,89 \text{ cm}^2$ .

Die durchschnittliche Blattfläche der begasten Pflanzengruppe war mit  $96,37 \text{ cm}^2$  etwas geringer. Die Gruppe hatte jedoch eine höhere Spannweite, die von  $44,12 \text{ cm}^2$  bis  $129,78 \text{ cm}^2$  reichte, bei einem Interquartilsabstand von  $18,36 \text{ cm}^2$  und einem Median von  $98,51 \text{ cm}^2$  (Abbildung 83).

Die Blattflächen der mit  $\text{CO}_2$  begasten Pflanzen waren um  $8,26 \%$  kleiner als bei den Kontrollpflanzen.

#### 5.9.7 Stecklinge – Blattfläche *Populus nigra*

Bei der Pappelart *Populus nigra* hatte eine erhöhte  $\text{CO}_2$ -Konzentration keinen Einfluss auf die Blattdimensionen. Die Versuche haben ergeben, dass die Blattflächen beider Gruppen sehr ähnlich waren, wodurch keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden konnten (Tabelle 95).

Die Pflanzen der Kontrollgruppe hatten im Durchschnitt eine Fläche von  $59,63 \text{ cm}^2$  und eine Spannweite der Ergebnisse zwischen  $33,89 \text{ cm}^2$  und  $89,97 \text{ cm}^2$ . Der Interquartilsabstand der Gruppe betrug  $28,32 \text{ cm}^2$  bei einem Median von  $53,92 \text{ cm}^2$ .

Die Gruppe der begasten Pflanzen hatte eine fast identische durchschnittliche Blattfläche von  $59,47 \text{ cm}^2$  bei einer Spannweite der Messergebnisse zwischen  $26,65 \text{ cm}^2$  und  $105,24 \text{ cm}^2$ . Der Interquartilsabstand lag bei  $10,39 \text{ cm}^2$  und der Median bei  $56,96 \text{ cm}^2$ . Somit waren die Blattflächen der begasten Pflanzen tendenziell kleiner als die der Kontrollgruppe (Abbildung 83).

Im direkten Vergleich waren die Blattflächen der mit  $\text{CO}_2$  begasten Pflanzen um  $0,25 \%$  kleiner als bei den Kontrollpflanzen. Es lag keine statistische Signifikanz vor.

#### 5.9.8 Stecklinge – Blattfläche *Populus deltoides*

Die Messergebnisse der Blattflächenvermessung haben ergeben, dass eine erhöhte  $\text{CO}_2$ -Konzentration bei *Populus deltoides* die Blattdimensionen beeinflussen kann. So zeigte sich, dass unter erhöhtem  $\text{CO}_2$  die Blattflächen von *Populus deltoides* signifikant kleiner waren als bei den Kontrollpflanzen (Tabelle 95).

Bei den begasten Pflanzen wurde eine durchschnittliche Blattfläche von  $55,04 \text{ cm}^2$  ermittelt, wobei die Spannweite der Messergebnisse zwischen  $18,98 \text{ cm}^2$  und  $31,81 \text{ cm}^2$  gelegen hat. Der Interquartilsabstand lag bei  $50,38 \text{ cm}^2$  bei einem Median von  $42,32 \text{ cm}^2$ .

Die Pflanzen der Kontrollgruppe hatten dagegen eine durchschnittliche Blattfläche von  $71,15 \text{ cm}^2$  bei einer Spannweite der Messergebnisse zwischen  $32,98 \text{ cm}^2$  und  $119,26 \text{ cm}^2$ . Der Interquartilsabstand lag bei  $26,79 \text{ cm}^2$  bei einem Median von  $42,32 \text{ cm}^2$ . Somit waren die Blatt- Dimensionen der begasten Pflanzen mit einer mittleren Effektstärke signifikant kleiner als die der Pflanzen der Kontrollgruppe (Abbildung 83). Dabei waren im Durchschnitt die Blattflächen bei den mit  $\text{CO}_2$  begasten Pflanzen um 22,63 % kleiner als bei den Kontrollpflanzen.

#### *5.9.9 Stecklinge – Blattfläche Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen*

Bei der Gruppe der Stecklinge waren die Blattflächen der Hybridpappeln unter Normalbedingungen und unter erhöhter  $\text{CO}_2$ - Konzentration signifikant größer als bei *Populus nigra* und *Populus deltoides* (Tabelle 95), (Abbildung 83).

Dabei waren die Blattflächen von *Populus nigra* unter Umgebungsbedingungen um 43,23 % kleiner als bei den Hybridpappeln, wobei eine statistische Signifikanz zwischen den Messwerten festgestellt worden ist. Zwischen den Arten *Populus deltoides* und *Populus x canadensis* waren die Unterschiede etwas geringer, aber noch immer signifikant. Hier waren die Blätter von *Populus deltoides* um 32,27 % kleiner als bei den Hybridpappeln.

#### *5.9.10 Stecklinge – Blattfläche Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter $\text{CO}_2$ - Konzentration*

Unter erhöhter  $\text{CO}_2$ - Konzentration waren die Ergebnisse ähnlich, wobei die Unterschiede unter diesen Bedingungen nochmal stärker waren (Tabelle 95), (Abbildung 83).

Die Blattflächen von *Populus nigra* waren um 38,28 % kleiner als bei *Populus x canadensis*. Die Blattflächen von *Populus deltoides* waren um 42,87 % ebenfalls kleiner als bei den Hybridpappeln.

In beiden Vergleichen lag eine statistische Signifikanz vor.

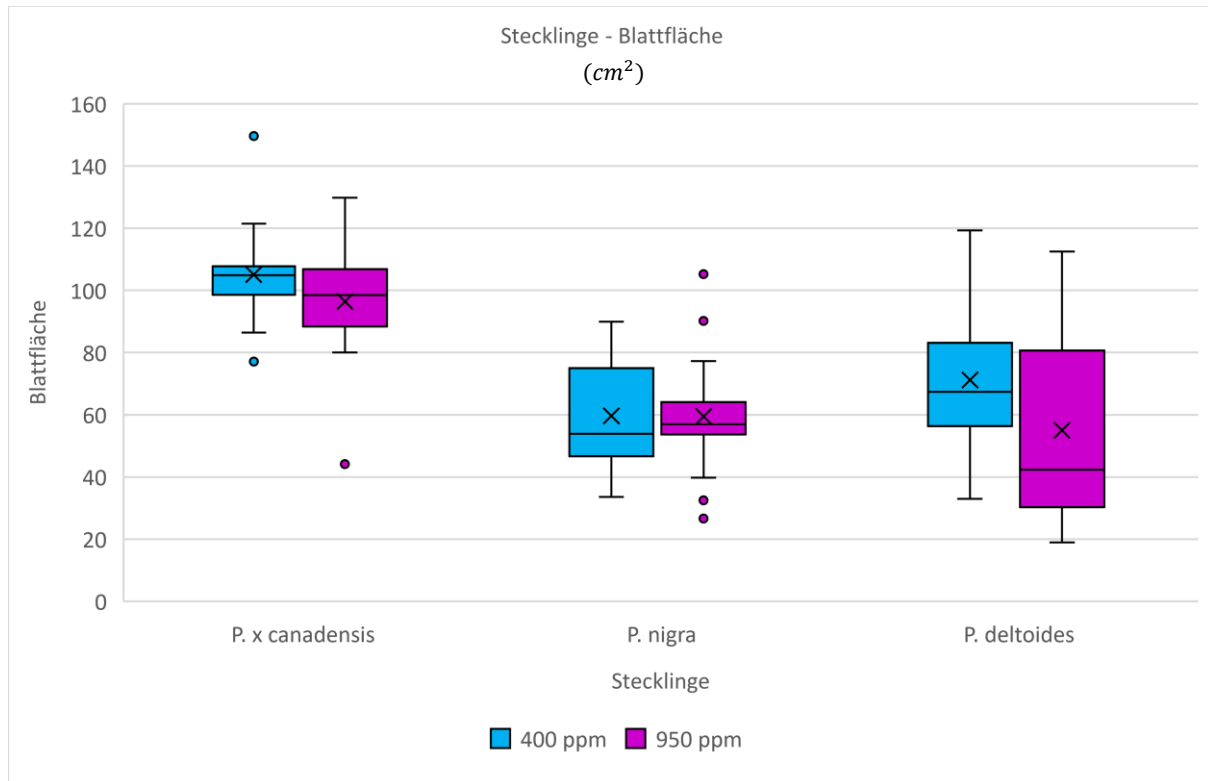


Abbildung 83: Blattfläche von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$  Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
Blattfläche	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	nein	0,098	-	-
<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,565	-	-
<i>P. deltoides</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,041	0,30	mittel
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,000	0,86	stark
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,63	stark
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	ja	0,000	0,61	stark
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,71	stark

Tabelle 95: Signifikanztest zwischen den Blattflächen von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration (950 ppm)

## 5.10 Stomata – Durchmesser

### 5.10.1 Einjährige Pflanzen – Stomata- Durchmesser *Populus x canescens*

Bei der Hybridpappel *Populus x canescens* hatte eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration einen signifikanten Einfluss auf die Spaltöffnungsgröße der Stomata (Tabelle 96).

Die Spaltöffnungen der Kontrollpflanzen hatten durchschnittlich eine Größe von  $10,95 \mu m$  bei einer Spannweite zwischen  $5,86 \mu m$  und  $20,80 \mu m$ . Der Interquartilsabstand lag bei  $2,58 \mu m$  bei einem Median von  $10,8 \mu m$  (Abbildung 84).

Die Spaltöffnungen der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen waren im Durchschnitt um  $14,86 \%$  größer als bei den Kontrollpflanzen. Die Spaltöffnungsgröße betrug durchschnittlich  $12,57 \mu m$  und war somit signifikant größer. Hier lag die Spannweite der Messergebnisse zwischen  $5,68 \mu m$  und  $19,46 \mu m$ . Der Interquartilsabstand war  $3,2 \mu m$  bei einem Median von  $12,36 \mu m$ .

Der Signifikanztest hat ergeben, dass eine mittlere Effektstärke vorgelegen hat.

### 5.10.2 Einjährige Pflanzen – Stomata- Durchmesser *Populus tremula*

Auch bei der Pappelart *Populus tremula* hatte eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration einen signifikanten Einfluss auf die Spaltöffnungsgröße der Stomata (Tabelle 96).

Dabei hatten die Pflanzen der Kontrollgruppe durchschnittlich eine Spaltöffnungsgröße von  $10,49 \mu m$  bei einer Spannweite der Messergebnisse zwischen  $5,34 \mu m$  und  $18,76 \mu m$ . Der Interquartilsabstand betrug  $2,49 \mu m$  bei einem Median von  $10,28 \mu m$  (Abbildung 84).

Die Spaltöffnungen der begasten Pflanzen waren im direkten Vergleich um  $8,40 \%$  größer. Hier erreichten die Pflanzen, die einer erhöhten  $CO_2$ - Konzentration ausgesetzt waren, eine durchschnittliche Spaltöffnungsgröße von  $11,37 \mu m$  und waren damit signifikant größer als bei den Kontrollpflanzen. Die Spannweite lag zwischen  $1,14 \mu m$  und  $20,38 \mu m$  bei einem Median von  $11,10 \mu m$ . Der Interquartilsabstand betrug  $2,74 \mu m$ .

### 5.10.3 Einjährige Pflanzen – Stomata- Durchmesser *Populus alba*

Ebenfalls ist ein signifikanter Effekt durch eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration auf die Spaltöffnungsgröße bei der Art *Populus alba* beobachtet worden (Tabelle 96).

Bei den Pflanzen der Kontrollgruppe ist eine durchschnittliche Spaltöffnungsgröße von  $12,34 \mu m$  erfasst worden. Dabei lag die Spannweite der Messergebnisse zwischen  $5,34 \mu m$  und  $28,34 \mu m$  bei einem Interquartilsabstand von  $2,72 \mu m$ . Der Median der Kontrollgruppe lag dabei bei  $12,19 \mu m$ .

Die begasten Pflanzen der Pappelart *Populus alba* haben dagegen eine durchschnittliche Spaltöffnungsgröße von  $16,06 \mu m$  gehabt. Dabei lag die Spannweite der Messergebnisse zwischen  $9,54 \mu m$  und  $24,15 \mu m$  bei einem Interquartilsabstand von  $4,33 \mu m$  und einem Median von  $15,8 \mu m$  (Abbildung 84).

Die Pflanzen, die einer erhöhten  $CO_2$ - Konzentration ausgesetzt waren, haben um  $30,06 \%$  größere Spaltöffnungen aufgewiesen als die Pflanzen der Kontrollgruppe. Dabei ist beim Signifikanztest eine starke Effektstärke ermittelt worden.

### 5.10.4 Einjährige Pflanzen – Stomata- Durchmesser Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen

Beim direkten Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canescens* und den beiden Arten *Populus tremula* und *Populus deltoides* sind unter Umgebungsbedingungen zum Teil signifikante Unterschiede beobachtet worden (Tabelle 96).

Dabei hatten die Hybridpappeln im direkten Vergleich zu *Populus tremula* signifikant größere Spaltöffnungen. Die Spaltöffnungen von *Populus tremula* waren im Durchschnitt um  $4,19 \%$  kleiner als bei *Populus x canescens*. Die Werte haben sich signifikant mit einer mittleren Effektstärke unterschieden (Abbildung 84).

Beim direkten Vergleich zwischen der Hybridpappel und *Populus alba*, waren dagegen die Spaltöffnungen von *Populus alba* signifikant größer als bei den Hybridpappeln. Die Spaltöffnungen waren um  $12,75 \%$  größer als bei den Hybridpappeln. Es ist eine mittlere Effektstärke ermittelt worden.



### 5.10.5 Einjährige Pflanzen – Stomata Durchmesser Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter $CO_2$ -Konzentration

Unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration waren die Ergebnisse ähnlich, wobei die Unterschiede zwischen der Hybridpappel *Populus x canescens* und *Populus tremula* sowie *Populus alba* deutlicher waren.

Unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration waren die Spaltöffnungen von *Populus tremula* um 9,58 % kleiner als bei *Populus x canescens*. Auch hier waren die Unterschiede signifikant und mit einer mittleren Effektstärke bemessen (Tabelle 96), (Abbildung 84). Beim direkten Vergleich zwischen der Hybridpappel und *Populus alba* waren wiederum die Spaltöffnungen von *Populus alba* größer. Dabei waren die Spaltöffnungen um 27,66 % größer als bei den Hybridpappeln. Wie auch unter Umgebungsbedingungen lag die Effektstärke des Signifikanztests auf einem mittleren Niveau.

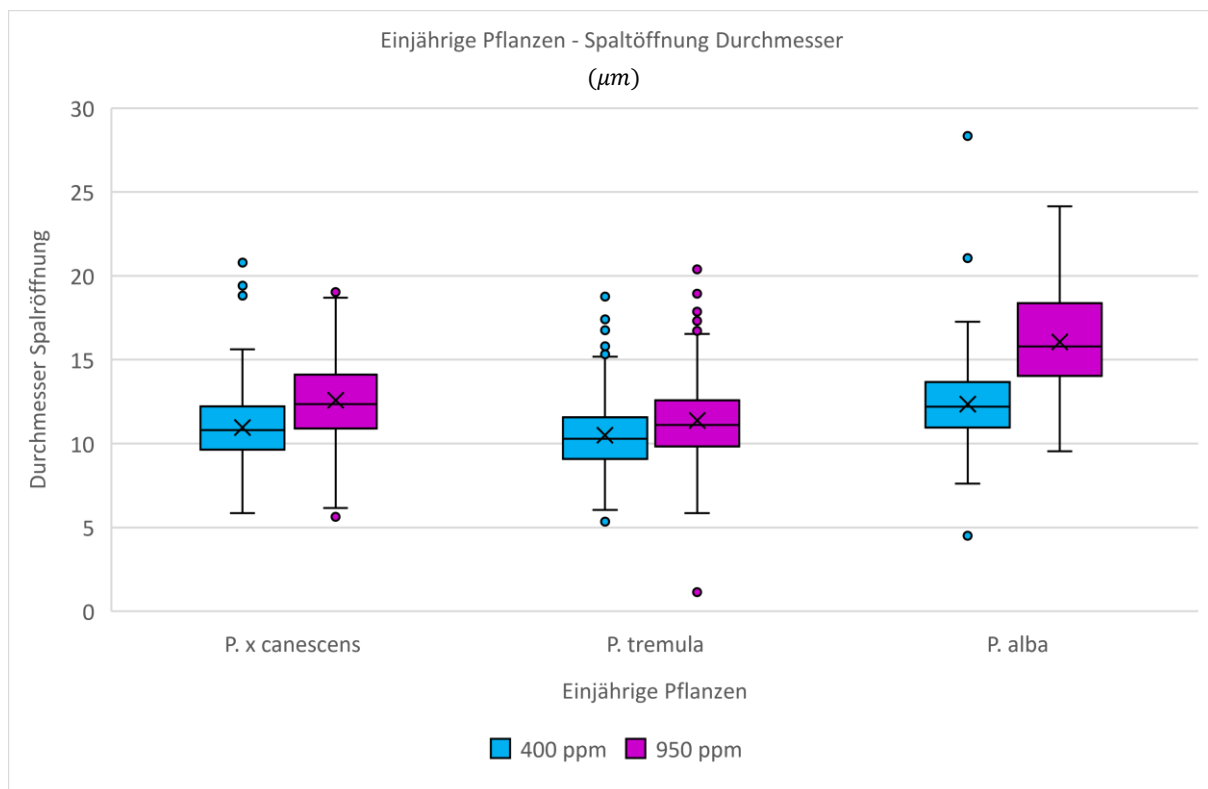


Abbildung 84: Durchmesser der Spaltöffnungen von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
Spaltöffnung	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,000	0,34	mittel
<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,20	mittel
<i>P. alba</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,60	stark
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	ja	0,014	0,11	mittel
<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,23	mittel
<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,000	0,31	mittel
<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,48	mittel

Tabelle 96: Signifikanztest zwischen der Größe der Spaltöffnungen von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

### 5.10.6 Stecklinge – Stomata- Durchmesser *Populus x canadensis*

Bei der Hybridpappel *Populus x canadensis* hatte das erhöhte  $CO_2$  keinen signifikanten Einfluss auf die Spaltöffnungsgröße der Stomata (Tabelle 97).

Die Pflanzen der Kontrollgruppe hatten eine durchschnittliche Spaltöffnungsgröße von 16,35  $\mu m$  bei einer Spannweite zwischen 9,79  $\mu m$  und 33,83  $\mu m$ . Der Interquartilsabstand lag bei 4,02  $\mu m$  bei einem Median von 15,98  $\mu m$  (Abbildung 85). Die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen hatten im direkten Vergleich um 4,75 % größere Spaltöffnungen als die Kontrollpflanzen. Dabei lagen die Durchmesser im Durchschnitt bei 17,13  $\mu m$ . Die Spannweite lag zwischen 8,80  $\mu m$  und 47,6  $\mu m$  und der Interquartilsabstand bei 4,31  $\mu m$ , wobei der Median bei 16,38  $\mu m$  gelegen hat. Eine statistische Signifikanz zwischen den Ergebnissen beider Gruppen hat nicht vorgelegen.

### 5.10.7 Stecklinge – Stomata Durchmesser *Populus nigra*

Bei der Pappelart *Populus nigra* wurde der Durchmesser der Spaltöffnungen durch erhöhtes  $CO_2$  in der Atmosphäre signifikant beeinflusst (Tabelle 97).

Dabei hatten die Spaltöffnungen der Kontrollgruppe einen durchschnittlichen Durchmesser von 15,63  $\mu m$  und eine Spannweite der Messergebnisse zwischen 9,91  $\mu m$  und 22,89  $\mu m$ . Der Interquartilsabstand betrug 3,43  $\mu m$  bei einem Median von 15,63  $\mu m$ . Die begasten Pflanzen hatten um 26,32 % größere Spaltöffnungen. Der durchschnittliche Durchmesser der Spaltöffnungen lag bei den begasten Pflanzen bei 19,74  $\mu m$  bei einer Spannweite der Messergebnisse zwischen 11,75  $\mu m$  und

38,71  $\mu\text{m}$ . Der Interquartilsabstand lag bei 4,22  $\mu\text{m}$  und der Median betrug 19,49  $\mu\text{m}$  (Abbildung 85). Der Signifikanztest hat ergeben, dass zwischen den beiden Gruppen eine starke Effektstärke vorgelegen hat.

#### 5.10.8 *Stecklinge – Stomata- Durchmesser Populus deltoides*

Bei der Pappelart *Populus deltoides* hatte eine erhöhte  $\text{CO}_2$ - Konzentration in der Atmosphäre einen signifikanten Einfluss auf die Spaltöffnungsgröße. (Tabelle 97).

Die Kontrollpflanzen dieser Gruppe hatten eine durchschnittliche Spaltöffnungsgröße von 15,76  $\mu\text{m}$  und eine Spannweite der Messergebnisse zwischen 9,67  $\mu\text{m}$  und 20,35  $\mu\text{m}$ . Der Interquartilsabstand betrug 1,47  $\mu\text{m}$  bei einem Median von 15,95  $\mu\text{m}$ . Die Pflanzen, die erhöhtem  $\text{CO}_2$  ausgesetzt waren, hatten signifikant größere Spaltöffnungen als die Pflanzen der Kontrollgruppe. Dabei waren die Öffnungen um 8,98 % größer als bei den Kontrollpflanzen. Hier lag die durchschnittliche Spaltöffnungsgröße bei 17,18  $\mu\text{m}$  bei einer Spannweite der Messergebnisse zwischen 9,34  $\mu\text{m}$  und 28,03  $\mu\text{m}$ . Der Interquartilsabstand lag bei 3,95  $\mu\text{m}$  bei einem Median von 17,03  $\mu\text{m}$ . Der Signifikanztest hat ergeben, dass eine mittlere Effektstärke zwischen beiden Gruppen vorgelegen hat (Abbildung 85).

#### 5.10.9 *Stecklinge – Stomata- Durchmesser Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen*

Beim direkten Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canadensis* und den Arten *Populus nigra* sowie *Populus deltoides* sind unter Umgebungsbedingungen zum Teil signifikante Unterschiede bei den Durchmessern der Spaltöffnungen erfasst worden (Tabelle 97).

Die Spaltöffnungen der Hybridpappeln war im direkten Vergleich größer als bei *Populus nigra* und *Populus deltoides* (Abbildung 85). Dabei hatten *Populus x canadensis* und *Populus deltoides* ähnliche Durchmesser, wodurch keine statistische Signifikanz festgestellt werden konnte. Dabei waren die Spaltöffnungen der *Populus deltoides* um 3,59 % kleiner als bei den Hybridpappeln.

Der Größenunterschied zwischen den Spaltöffnungen der Hybridpappeln und der Pappelart *Populus nigra* war dagegen signifikant. Hier waren die Spaltöffnungen von *Populus nigra* um 4,44 % kleiner, wobei die Effektstärke schwach war.

#### 5.10.10 Stecklinge – Stomata- Durchmesser Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter $CO_2$ - Konzentration

Unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration in der Atmosphäre sind bei allen Arten die Durchmesser der Spaltöffnungen angestiegen. Besonders stark war die Zunahme bei *Populus nigra* und *Populus deltoides* wodurch diese im Durchschnitt größere Spaltöffnungen hatten als die Hybridpappeln. Allerdings waren die Dimensionen bei *Populus x canadensis* und *Populus deltoides* auf einem sehr ähnlichen Niveau, wodurch keine Signifikanz zwischen den Messergebnissen festgestellt werden konnte (Tabelle 97). Hier haben sich die durchschnittlichen Durchmesser der Spaltöffnungen nur um 0,29 % unterschieden (Abbildung 85). Beim Vergleich zwischen den Arten *Populus x canadensis* und *Populus nigra* waren die Unterschiede deutlicher, wobei unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration *Populus nigra* die größeren Spaltöffnungen hatte. Diese übertrafen die Spaltöffnungen der Hybridpappeln um 15,24 %, wobei eine mittlere Effektstärke vorgelegen hat.

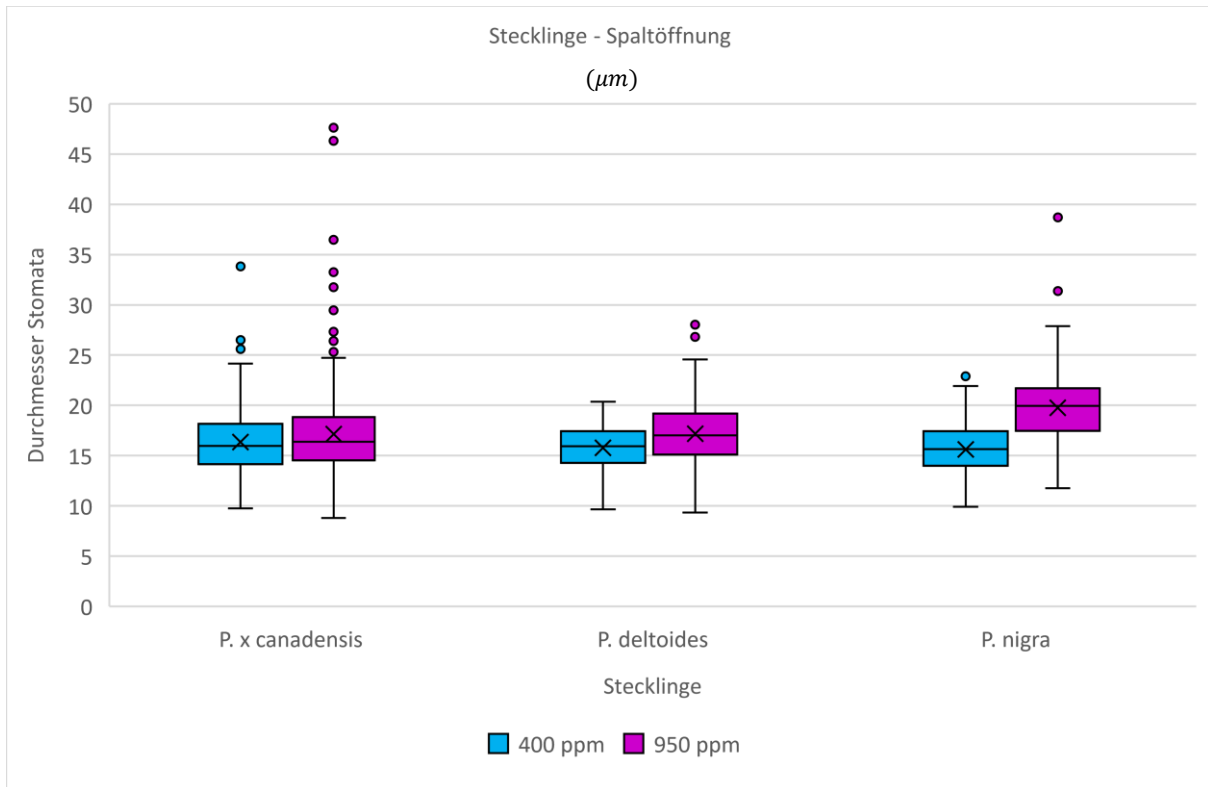


Abbildung 85: Durchmesser der Spaltöffnungen von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
Spaltöffnung	Signifikanz	Asymptotische signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	nein	0,171	-	-
<i>P. deltoides</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,22	mittel
<i>P. nigra</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,59	stark
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	nein	0,442	-	-
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,276	-	-
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,000	0,10	mittel
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,43	mittel

Tabelle 97: Signifikanztest zwischen der Größe der Spaltöffnungen von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

## 5.11 Holzanatomische Eigenschaften - Gefäßfläche

### 5.11.1 Einjährige Pflanzen – Gefäßfläche *Populus x canescens*

Bei den Pflanzen der Art *Populus x canescens* hatte eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre keinen Einfluss auf die Ausbildung der Gefäßgröße im Holz. Da die Messwerte beider Gruppen sehr ähnlich waren, wurde keine Signifikanz zwischen den Ergebnissen beider Gruppen festgestellt (Tabelle 98). Tendenziell waren die

Gefäßflächen von der Kontrollgruppe etwas größer als die der Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren.

Dabei hatten die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen eine durchschnittliche Gefäßgröße von  $1162,39 \mu m^2$  und eine Spannweite der Messergebnisse zwischen  $119,91 \mu m^2$  und  $1976,95 \mu m^2$ . Der Interquartilsabstand betrug  $778,79 \mu m^2$  bei einem Median von  $1138,24 \mu m^2$ .

Die Pflanzen, die Umgebungsbedingungen ausgesetzt waren, hatten eine durchschnittliche Gefäßfläche von  $1204,46 \mu m^2$  bei einer Spannweite der Messergebnisse zwischen  $139,78 \mu m^2$  und  $3268,29 \mu m^2$ . Der Interquartilsabstand dieser Gruppe lag bei  $891,95 \mu m^2$  bei einem Median von  $1191,49 \mu m^2$ . Im Durchschnitt waren die Gefäße bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen um 3,49 % kleiner als bei den Kontrollpflanzen (Abbildung 86).

#### 5.11.2 Einjährige Pflanzen – Gefäßfläche *Populus tremula*

Bei der Pappelart *Populus tremula* haben die Messergebnisse gezeigt, dass eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre die Holzanatomie beeinflussen kann. Die Messergebnisse haben ergeben, dass Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, signifikant größere Gefäßflächen aufgewiesen haben als Pflanzen der Kontrollgruppe (Tabelle 98).

So hatten die Pflanzen der Kontrollgruppe eine durchschnittliche Gefäßfläche von  $747,71 \mu m^2$  und eine Spannweite der Messergebnisse zwischen  $106,50 \mu m^2$  und  $2229,39 \mu m^2$ . Der Interquartilsabstand betrug  $592,41 \mu m^2$  bei einem Median von  $705,57 \mu m^2$ .

Die begasten Pflanzen hatten dagegen eine durchschnittliche Gefäßfläche von  $837,16 \mu m^2$  und eine Spannweite zwischen  $146,44 \mu m^2$  und  $2749,09 \mu m^2$ . Der Interquartilsabstand betrug  $559,13 \mu m^2$  bei einem Median von  $798,76 \mu m^2$  (Abbildung 86). Durchschnittlich waren die Gefäße der begasten Pflanzen um 11,96 % größer als bei den Kontrollpflanzen.

### 5.11.3 Einjährige Pflanzen – Gefäßgröße *Populus alba*

Eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre hatte auch einen signifikanten Einfluss auf die Holzanatomie der Art *Populus alba*. Dabei waren die Gefäße der begasten Pflanzen signifikant größer als bei der Kontrollgruppe. Dabei ist eine schwache Effektstärke festgestellt worden (Tabelle 98).

Die Pflanzen der Kontrollgruppe hatten eine durchschnittliche Gefäßgröße von  $1172,61 \mu m^2$  bei einer Spannweite zwischen  $146,44 \mu m^2$  und  $3561,17 \mu m^2$ . Der Interquartilsabstand dieser Gruppe lag bei  $915,25 \mu m^2$  bei einem Median von  $1118,27 \mu m^2$ .

Die Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, hatten eine durchschnittliche Gefäßfläche von  $1263,99 \mu m^2$  bei einer Spannweite der Ergebnisse zwischen  $146,44 \mu m^2$  und  $3870,46 \mu m^2$ . Der Interquartilsabstand betrug  $805,42 \mu m^2$  bei einem Median von  $1204,80 \mu m^2$  (Abbildung 86).

Beide Gruppen hatten ähnlich viele Messwerte, die als Ausreißer qualifiziert worden sind. Die begasten Pflanzen hatten im Durchschnitt um 7,79 % größere Gefäßflächen als die Kontrollpflanzen.

### 5.11.4 Einjährige Pflanzen – Gefäßfläche Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen

Beim direkten Vergleich der Holzanatomie zwischen der Hybridpappel *Populus x canescens* und den beiden Pappelarten *Populus tremula* und *Populus alba* gab es zum Teil signifikante Unterschiede.

Beim Vergleich der Gefäßflächen der Arten *Populus x canescens* und *Populus tremula* sind signifikante Größenunterschiede zwischen beiden Arten beobachtet worden (Abbildung 86). So waren die Gefäßgrößen von *Populus tremula* bei diesem Vergleich um 37,92 % kleiner, wobei eine mittlere Effektstärke beobachtet worden ist (Tabelle 98).

Beim Vergleich zwischen den Arten *Populus x canescens* und *Populus alba* sind dagegen keine signifikanten Unterschiede bei den Gefäßgrößen ermittelt worden. Auch hier hatte *Populus alba* im direkten Vergleich kleinere Gefäßflächen, wobei der Unterschied bei 2,64 % gelegen hat.

### 5.11.5 Einjährige Pflanzen – Gefäßfläche Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter $CO_2$ -Konzentration

Unter erhöhtem atmosphärischem  $CO_2$  haben sich die Hybridpappeln und die beiden Pappelarten *Populus alba* und *Populus deltoides* signifikant voneinander unterschieden (Tabelle 98), (Abbildung 86).

Ähnlich wie unter Umgebungsbedingungen haben sich bei den Arten *Populus x canescens* und *Populus tremula* die Gefäßgrößen signifikant voneinander unterschieden, wobei die Gefäßflächen von *Populus tremula* mit einer mittleren Effektstärke um 27,97 % größer waren als bei den Hybridpappeln.

Beim Vergleich zwischen *Populus x canescens* und *Populus alba* sind ebenfalls signifikante Unterschiede bei den Gefäßgrößen beobachtet worden. Unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration hat *Populus alba* um 8,71 % größere Gefäßflächen gebildet als die Hybridpappel *Populus x canescens*. Bei den Unterschieden ist zwischen den beiden Arten eine schwache Effektstärke beobachtet worden.

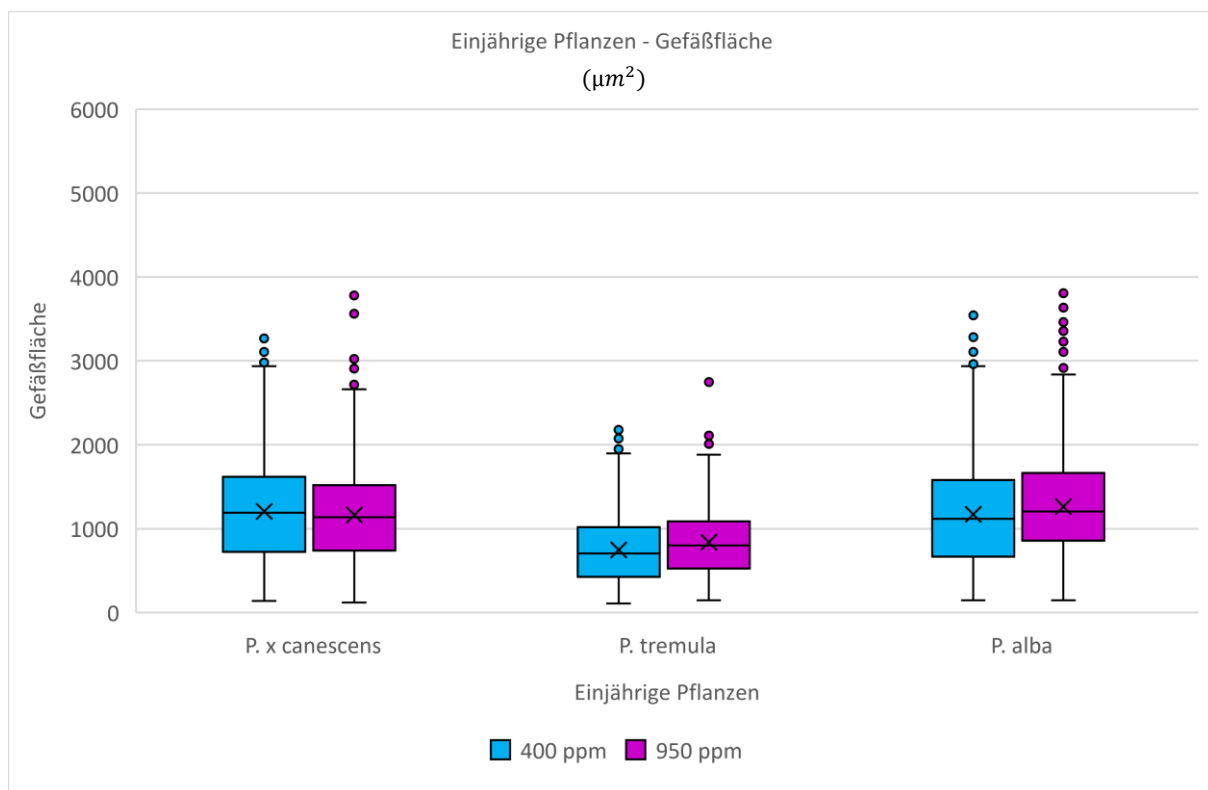


Abbildung 86: Gefäßfläche von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren



Signifikanztest				
Gefäßfläche	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P.x canescens</i> 950 ppm	nein	0,066	-	-
<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,13	mittel
<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,09	schwach
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	ja	0,000	0,40	mittel
<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,31	mittel
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	nein	0,078	-	-
<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,08	schwach

Tabelle 98: Signifikanztest zwischen der Größe der Gefäßfläche von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

### 5.11.6 Stecklinge – Gefäßgröße *Populus x canadensis*

Die Vermessung der Gefäßgrößen bei *Populus x canadensis* hat gezeigt, dass erhöhtes  $CO_2$  einen Einfluss auf die Holzanatomie der Pflanzen haben kann. So sind bei den begasten Pflanzen signifikant größere Gefäßflächen gemessen worden als bei den Pflanzen der Kontrollgruppe (Tabelle 99).

Die durchschnittliche Gefäßgröße der Kontrollpflanzen lag bei  $1354,60 \mu m^2$  und die Spannweite der Messungen reichte zwischen  $133,12 \mu m^2$  und  $5904,22 \mu m^2$ . Der Interquartilsabstand dieser Gruppe lag bei  $1018,42 \mu m^2$ , bei einem Median von  $1291,34 \mu m^2$  (Abbildung 87).

Die durchschnittliche Gefäßgröße der begasten Gruppe lag bei  $1566,10 \mu m^2$  bei einer Spannweite zwischen  $186,37 \mu m^2$  und  $4473,10 \mu m^2$ . Der Interquartilsabstand lag bei  $1045,05 \mu m^2$  bei einem Median von  $1517,65 \mu m^2$ . Zwischen beiden Arten ist eine mittlere Effektstärke der Signifikanz ermittelt worden. Die begasten Pflanzen hatten um 15,61 % größere Gefäße als die Pflanzen der Kontrollgruppe.

### 5.11.7 Stecklinge – Gefäßgröße *Populus nigra*

Eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre hatte einen Einfluss auf die Holzanatomie von *Populus nigra*. Die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzten Pflanzen hatten signifikant weitlumigere Gefäße als die Pflanzen der Kontrollgruppe (Tabelle 99).

Die Pflanzengruppe, die Umgebungsbedingungen ausgesetzt war, hatte eine durchschnittliche Gefäßgröße von  $1080,50 \mu m^2$  und eine Spannweite zwischen  $139,78$

$\mu\text{m}^2$  und  $2962,09 \mu\text{m}^2$ . Der Interquartilsabstand betrug  $668,96 \mu\text{m}^2$  bei einem Median von  $1025,08 \mu\text{m}^2$

Die begasten Pflanzen hatte dagegen eine durchschnittliche Gefäßgröße von  $1671,62 \mu\text{m}^2$  bei einer Spannweite zwischen  $252,94 \mu\text{m}^2$  und  $2809,00 \mu\text{m}^2$ . Der Interquartilsabstand lag bei  $1141,57 \mu\text{m}^2$  bei einem Median von  $1577,56 \mu\text{m}^2$  (Abbildung 87). Zwischen den beiden Arten wurde bezugnehmend auf die Signifikanz eine mittlere Effektstärke ermittelt. Die begasten Pflanzen hatten im Durchschnitt um  $54,69 \%$  höhere Gefäßflächen als die Kontrollpflanzen.

#### 5.11.8 Stecklinge – Gefäßgröße *Populus deltoides*

Bei der Art *Populus deltoides* hatte eine erhöhte  $\text{CO}_2$ -Konzentration einen signifikanten Einfluss auf die Holzanatomie der Pflanzen. Die Messungen haben ergeben, dass die Gefäße der mit  $\text{CO}_2$  begasten Pflanzen mit einer schwachen Effektstärke signifikant größer waren als bei den Pflanzen der Kontrollgruppe (Tabelle 99).

So hatten die Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen gewachsen sind, eine durchschnittliche Gefäßgröße von  $1028,32 \mu\text{m}^2$  und eine Spannweite der erfassten Einzelergebnisse zwischen  $119,81 \mu\text{m}^2$  und  $1397,84 \mu\text{m}^2$ . Der Interquartilsabstand lag bei  $509,21 \mu\text{m}^2$  bei einem Median von  $918,58 \mu\text{m}^2$ .

Die mit  $\text{CO}_2$  begasten Pflanzen hatten eine durchschnittliche Gefäßfläche von  $1266,95 \mu\text{m}^2$  und einer Spannweite zwischen  $146,44 \mu\text{m}^2$  und  $1950,32 \mu\text{m}^2$ . Der Interquartilsabstand lag bei  $712,23 \mu\text{m}^2$  bei einem Median von  $1158,21 \mu\text{m}^2$ . Die Gefäßgrößen der begasten Pflanzen waren um  $23,20 \%$  größer als bei den Kontrollpflanzen (Abbildung 87).

#### 5.11.9 Stecklinge – Gefäßfläche Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen

Die Pflanzen der Art *Populus x canadensis* hatten im direkten Vergleich zu den Pappelarten *Populus nigra* und *Populus alba* signifikant höhere Gefäßflächen im Holz. Der Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canadensis* und *Populus nigra* hat gezeigt, dass *Populus nigra* um  $20,22 \%$  kleinere Gefäßflächen hatte als *Populus x canadensis*. Dabei wurde eine mittlere Effektstärke ermittelt (Tabelle 99).

Beim Vergleich zwischen *Populus x canadensis* und *Populus deltoides* wurden noch höhere Größenunterschiede festgestellt (Abbildung 87). Dabei hatte *Populus deltoides* um 24,08 % kleinere Gefäßflächen als die Hybridpappeln. Auch hier ist eine mittlere Effektstärke ermittelt worden.

#### 5.11.10 Stecklinge – Gefäßfläche Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter $CO_2$ -Konzentration

Die Hybridpappeln *Populus x canadensis* haben unter erhöhten  $CO_2$ -Bedingungen nur zum Teil größere Gefäßflächen gebildet als *Populus deltoides* und *Populus nigra* (Abbildung 87).

Wie auch unter Umgebungsbedingungen waren im direkten Vergleich die Dimensionen bei den Hybridpappeln signifikant größer als bei *Populus deltoides* (Tabelle 99). Ebenfalls ist auch hier eine mittlere Effektstärke beobachtet worden. So waren die Gefäßlumen von *Populus deltoides* um 19,10 % kleiner.

Beim Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canadensis* und *Populus nigra* waren ebenfalls signifikante Unterschiede bezüglich der Gefäßgröße unter erhöhtem  $CO_2$  beobachtet worden. Anders als unter Umgebungsbedingungen hatten jedoch die Pappeln der Art *Populus nigra* signifikant größere Gefäße als *Populus x canadensis*. Dabei hatte *Populus nigra* um 6,73 % größere Gefäßflächen als die Hybridpappeln. Es lag eine schwache Effektstärke vor.

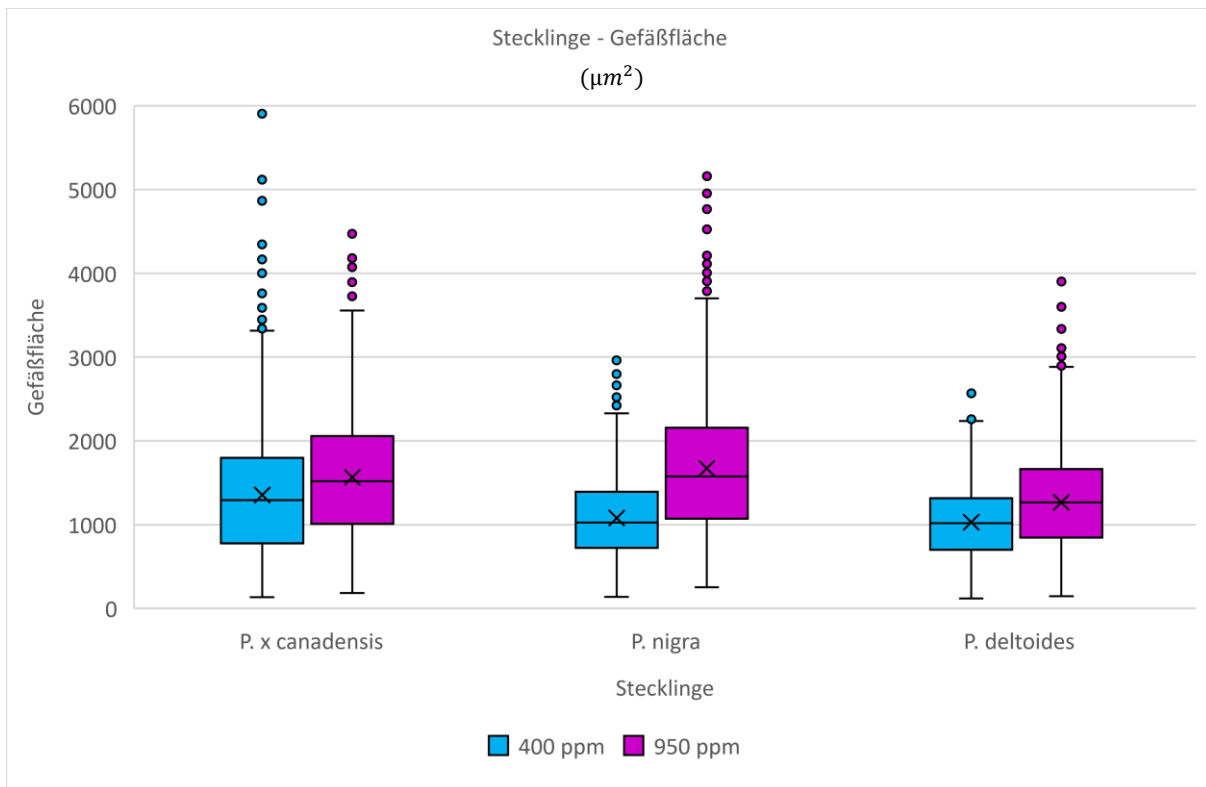


Abbildung 87: Durchmesser der Spaltöffnungen von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
Gefäßfläche	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,000	0,15	mittel
<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,20	mittel
<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,39	mittel
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	ja	0,000	0,21	mittel
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,19	mittel
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,000	0,17	mittel
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,012	0,05	schwach

Tabelle 99: Signifikanztest zwischen der Größe der Gefäßfläche von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

## 5.12 Holzanatomische Eigenschaften – Jahrringbreite

### 5.12.1 Einjährige Pflanzen – Jahrringbreite *Populus x canescens*

Bei der Hybridpappel *Populus x canescens* bewirkte eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre eine Steigerung des Jahrringzuwachses. So haben die Jahrringbreiten beider Gruppen sich signifikant voneinander unterschieden (Tabelle 100).

Die Hybridpappeln, die Umgebungsbedingungen ausgesetzt waren, erreichten eine durchschnittliche Jahrringbreite von 2472,50  $\mu\text{m}$ . Die Spannweite der erfassten Messungen lag zwischen 745,54  $\mu\text{m}$  und 3934,97  $\mu\text{m}$ . Der Interquartilsabstand lag bei 2062,25  $\mu\text{m}$  bei einem Median von 2021,38  $\mu\text{m}$ . Die begaste Pflanzengruppe erreichte hingegen unter erhöhter  $\text{CO}_2$ -Konzentration eine durchschnittliche Jahrringbreite von 3670,11  $\mu\text{m}$  bei einer Spannweite der Messergebnisse zwischen 2607,81  $\mu\text{m}$  und 4604,53  $\mu\text{m}$ . Der Interquartilsabstand lag bei 411,45  $\mu\text{m}$  bei einem Median von 3649,86  $\mu\text{m}$  (Abbildung 88). Unter erhöhter  $\text{CO}_2$ -Konzentration hatten die Pflanzen der Art *Populus x canescens* um 48,43 % größere Jahrringbreiten als die Pflanzen unter Umgebungsbedingungen.

### 5.12.2 Einjährige Pflanzen – Jahrringzuwachs *Populus tremula*

Eine erhöhte  $\text{CO}_2$ -Konzentration in der Atmosphäre bewirkte bei *Populus tremula* eine Reduzierung der Jahrringbreite. Dabei hatten die Kontrollpflanzen signifikant größere Jahrringe gebildet als die mit  $\text{CO}_2$  begasten Pflanzen (Tabelle 100).

Die Kontrollpflanzen hatten einen durchschnittlichen Jahrringzuwachs von 1604,00  $\mu\text{m}$  und eine Spannweite zwischen 493,48  $\mu\text{m}$  und 2563,09  $\mu\text{m}$ . Der Interquartilsabstand dieser Gruppe betrug 1064,94  $\mu\text{m}$  bei einem Median von 1752,09  $\mu\text{m}$ .

Die begasten Pflanzen hatten dagegen einen durchschnittlichen Jahrringzuwachs von 1236,13  $\mu\text{m}$ . Die Spannweite der Messergebnisse lag zwischen 598,11  $\mu\text{m}$  und 1994,47  $\mu\text{m}$ . Der Interquartilsabstand lag bei 559,29  $\mu\text{m}$ . Der Median dieser Gruppe hat 1158,75  $\mu\text{m}$  betragen (Abbildung 88).

Die mit  $\text{CO}_2$  begasten Pflanzen hatten einen im Durchschnitt um 22,93 % geringeren Jahrringzuwachs als die Pflanzen der Kontrollgruppe.

### 5.12.3 Einjährige Pflanzen – Jahrringbreite *Populus alba*

Bei den Pflanzen der Art *Populus alba* hat eine erhöhte  $\text{CO}_2$ -Konzentration zu einer signifikant stärkeren Jahrringbildung bei den Pflanzen geführt (Tabelle 100).

Die Pflanzen, die Umgebungsbedingungen ausgesetzt waren, haben eine durchschnittliche Jahrringbreite von 600,72  $\mu\text{m}$  erreicht. Dabei hatten die ermittelten

Messergebnisse eine Spannweite zwischen 202,26  $\mu\text{m}$  und 1188,72  $\mu\text{m}$  bei einem Interquartilsabstand von 259,60  $\mu\text{m}$  und einem Median von 595,86  $\mu\text{m}$ .

Die begasten Pflanzen erreichten dagegen eine durchschnittliche Jahrringbreite von 1512,29  $\mu\text{m}$ , bei einer Spannweite zwischen 69,48  $\mu\text{m}$  und 2588,30  $\mu\text{m}$ . Der Interquartilsabstand lag bei 1894,47  $\mu\text{m}$  bei einem Median von 1990,39  $\mu\text{m}$  (Abbildung 88). Gegenüber den Pflanzen der Kontrollgruppe hatten die mit  $\text{CO}_2$  begasten Pflanzen um 151,74 % größere Jahrringbreiten bei einer mittleren Effektstärke.

#### 5.12.4 *Einjährige Pflanzen – Jahrringbreite Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen*

Im direkten Vergleich haben die Hybridpappeln der Art *Populus x canescens* einen signifikant höheren Jahrringzuwachs erreicht als *Populus tremula* und *Populus alba*. *Populus tremula* hatte um 35,12 % geringere Jahrringzuwächse als die Hybridpappeln. Dabei hatten in diesem Vergleich die Hybridpappeln eine deutlich höhere Spannweite der Messwerte. Der Signifikanztest hat ergeben, dass sich die Jahrringzuwächse mit einer mittleren Effektstärke unterschieden haben. Beim Vergleich zwischen den Arten *Populus x canescens* und *Populus alba* sind noch höhere Unterschiede bei der Jahrringzunahme beobachtet worden (Abbildung 88). Dabei war die Jahrringzunahme bei *Populus alba* um 75,70 % geringer als bei *Populus x canescens*. Bei diesem Vergleich ist eine starke Effektstärke zwischen den Messwerten beider Arten ermittelt worden (Tabelle 100).

#### 5.12.5 *Einjährige Pflanzen – Jahrringbreite Hybridpappeln vs. Pappel unter erhöhter $\text{CO}_2$ -Konzentration*

Unter erhöhtem atmosphärischen  $\text{CO}_2$  sind ebenfalls signifikante Unterschiede bei den Jahrringzuwächsen zwischen *Populus x canescens* und *Populus tremula* sowie *Populus alba* ermittelt worden (Tabelle 100). Im direkten Vergleich haben die Pflanzen der Art *Populus tremula* durchschnittlich 66,31 % niedrigere Jahrringzuwächse erzielt als *Populus x canescens*. Dabei ist eine starke Effektstärke ermittelt worden. Beim Vergleich zwischen der *Populus x canescens* und *Populus alba* gab es ebenfalls deutliche Unterschiede bei den erreichten Jahrringstärken (Abbildung 88). Dabei hatte

*Populus alba* durchschnittlich ein um 58,79 % geringeren Jahrringzuwachs erreicht als die Hybridpappeln. Auch hier ist eine starke Effektstärke zwischen den Messwerten beider Arten festgestellt worden.

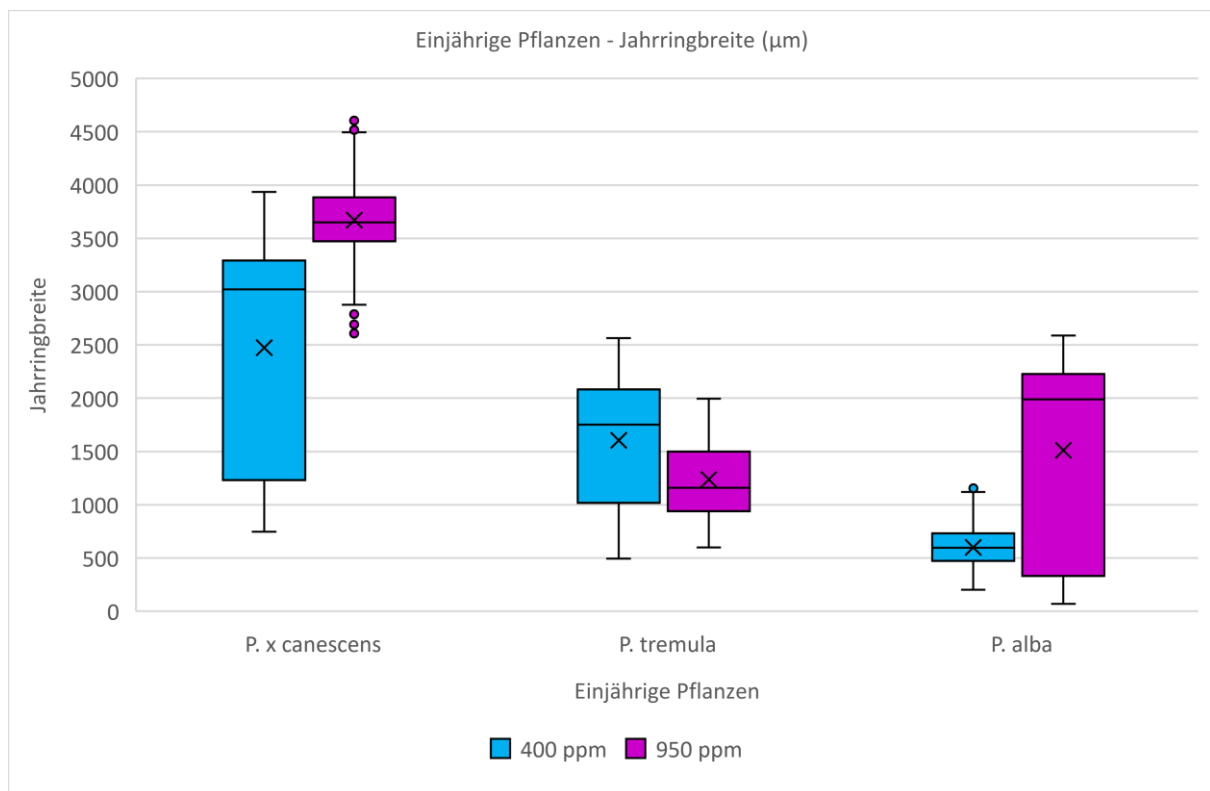


Abbildung 88: Jahrringbreite von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
Jahrringbreite	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,000	0,61	stark
<i>P. tremula</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,32	mittel
<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,33	mittel
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	ja	0,000	0,31	mittel
<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,000	0,91	stark
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	ja	0,000	0,91	stark
<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,74	stark

Tabelle 100: Signifikanztest zwischen den Jahrringbreiten von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

### 5.12.6 Stecklinge – Jahrringbreite *Populus x canadensis*

Bei der Hybridpappel *Populus x canadensis* haben Pflanzen, die erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  ausgesetzt waren, signifikant größere Jahrringbreiten in der Wachstumsperiode erreicht als die Kontrollpflanzen (Tabelle 101).

Die Pflanzengruppe, die Umgebungsbedingungen ausgesetzt war, hatte einen durchschnittlichen Jahrringzuwachs von  $2664,37 \mu m$ , bei einer Spannweite der Messungen zwischen  $1330,63 \mu m$  und  $4327,84 \mu m$ . Der Interquartilsabstand lag bei  $1891,21 \mu m$  bei einem Median von  $2329,48 \mu m$ .

Die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen erreichten dagegen einen durchschnittlichen Jahrringzuwachs von  $3574,45 \mu m$ , bei einer Spannweite der Messungen zwischen  $2663,30 \mu m$  und  $4420,48 \mu m$ . Der Interquartilsabstand dieser Gruppe lag bei  $795,58 \mu m$  bei einem Median von  $3544,11 \mu m$  (Abbildung 89). Somit hatten die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen innerhalb der Wachstumsperiode eine um  $34,15 \%$  höhere Jahrringbreite. Dabei wurde beim Signifikanztest eine mittlere Effektstärke ermittelt.

### 5.12.7 Stecklinge – Jahrringbreite *Populus nigra*

Die Pflanzen der Art *Populus nigra* haben unter erhöhten  $CO_2$ - Bedingungen eine verstärkte Jahrringzunahme aufgewiesen als die Pflanzen der Kontrollgruppe, die Umgebungsbedingungen ausgesetzt war.

Dabei erreichten die Pflanzen der Kontrollgruppe eine Jahrringbreite von durchschnittlich  $2405,17 \mu m$  und hatten eine Spannweite zwischen  $1805,81 \mu m$  und  $3216,83 \mu m$ . Der Interquartilsabstand hat  $414,51 \mu m$  betragen, bei einem Median von  $2346,75 \mu m$ .

Die begasten Pflanzen hatten dagegen eine um  $30,57 \%$  stärkere Jahrringbreite erreicht, wobei ein durchschnittlicher Zuwachs von  $3140,50 \mu m$  ermittelt worden ist. Der Interquartilsabstand war  $1513,85 \mu m$  bei einem Median von  $3592,78 \mu m$ . Die Spannweite lag zwischen  $1576,09 \mu m$  und  $4237,24 \mu m$  (Abbildung 89).

Die statistische Analyse hat beim Signifikanztest eine mittlere Effektstärke ermittelt (Tabelle 101).



### 5.12.8 Stecklinge – Jahrringbreite *Populus deltoides*

Die Pflanzen der Art *Populus deltoides* haben unter erhöhtem  $CO_2$  deutlich stärkere Jahrringe gebildet als die Pflanzen der Kontrollgruppe.

Die Kontrollpflanzen haben eine durchschnittliche Jahrringbreite von 1137,08  $\mu m$  erreicht, bei einer Spannweite der Messwerte zwischen 439,86  $\mu m$  und 1840,87  $\mu m$ .

Der Interquartilsabstand lag bei 309,19  $\mu m$  bei einem Median von 1092,06  $\mu m$ .

Die mit  $CO_2$  begaste Pflanzengruppe hatte dagegen im Vergleich um einen 81,48 % stärkeren Jahrringzuwachs während der Messperiode. Dabei erreichten die Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, eine durchschnittliche Jahrringbreite von 2063,68  $\mu m$ , bei einer Spannweite der Messungen zwischen 1252,91  $\mu m$  und 3006,43  $\mu m$ . Der Interquartilsabstand lag bei 1055,54  $\mu m$  bei einem Median von 1876,49  $\mu m$  (Abbildung 89).

Bei der Signifikanzanalyse ist eine starke Effektstärke ermittelt worden (Tabelle 101).

### 5.12.9 Stecklinge – Jahrringbreite Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen

Unter Umgebungsbedingungen hatten die Hybridpappeln *Populus x canadensis* nur gegenüber der Art *Populus deltoides* signifikant höhere Jahrringzuwächse (Tabelle 101). Im direkten Vergleich zwischen den Arten *Populus x canadensis* und *Populus nigra* wurden keine signifikanten Unterschiede beim Jahrringzuwachs festgestellt. Dabei waren die Jahrringe beider Pappelarten sehr ähnlich, wobei *Populus nigra* etwas niedrigere Jahrringzuwächse zu verzeichnen hatte als die Hybridpappeln (Abbildung 89). Die Jahrringzuwächse von *Populus nigra* war im Durchschnitt um 9,72 % niedriger als bei den Hybridpappeln.

Deutlich stärkere Unterschiede gab es zwischen den Arten *Populus x canadensis* und *Populus deltoides*. Hier hatte *Populus deltoides* um 57,32 % niedrigere Jahrringzuwächse erreicht als *Populus x canadensis*. Es ist eine starke Effektstärke zwischen den Messwerten beider Gruppen ermittelt worden.

### 5.12.10 Stecklinge – Jahrringbreite Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter $CO_2$ -Konzentration

Unter erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  gab es zwischen *Populus x canadensis* und den Pappelarten *Populus nigra* und *Populus deltoides* signifikant unterschiedliche Jahrringzuwächse (Tabelle 101).

Im direkten Vergleich zwischen *Populus x canadensis* und *Populus nigra*, hatte *Populus nigra* geringere Jahrringzuwächse, wobei sich hier die Messwerte beider Gruppen ähnelten (Abbildung 89). Hierbei ist eine mittlere Effektstärke ermittelt worden. Durchschnittlich waren die Jahrringzuwächse um 12,14 % niedriger als bei *Populus x canadensis*.

Stärkere Unterschiede sind zwischen *Populus x canadensis* und *Populus tremula* beobachtet worden. Hier gab es signifikante Unterschiede bei den Jahrringbreiten mit einer starken Effektstärke. Dabei hatte *Populus tremula* um 42,26 % geringere Jahrringzuwächse erreicht als die Hybridpappeln.

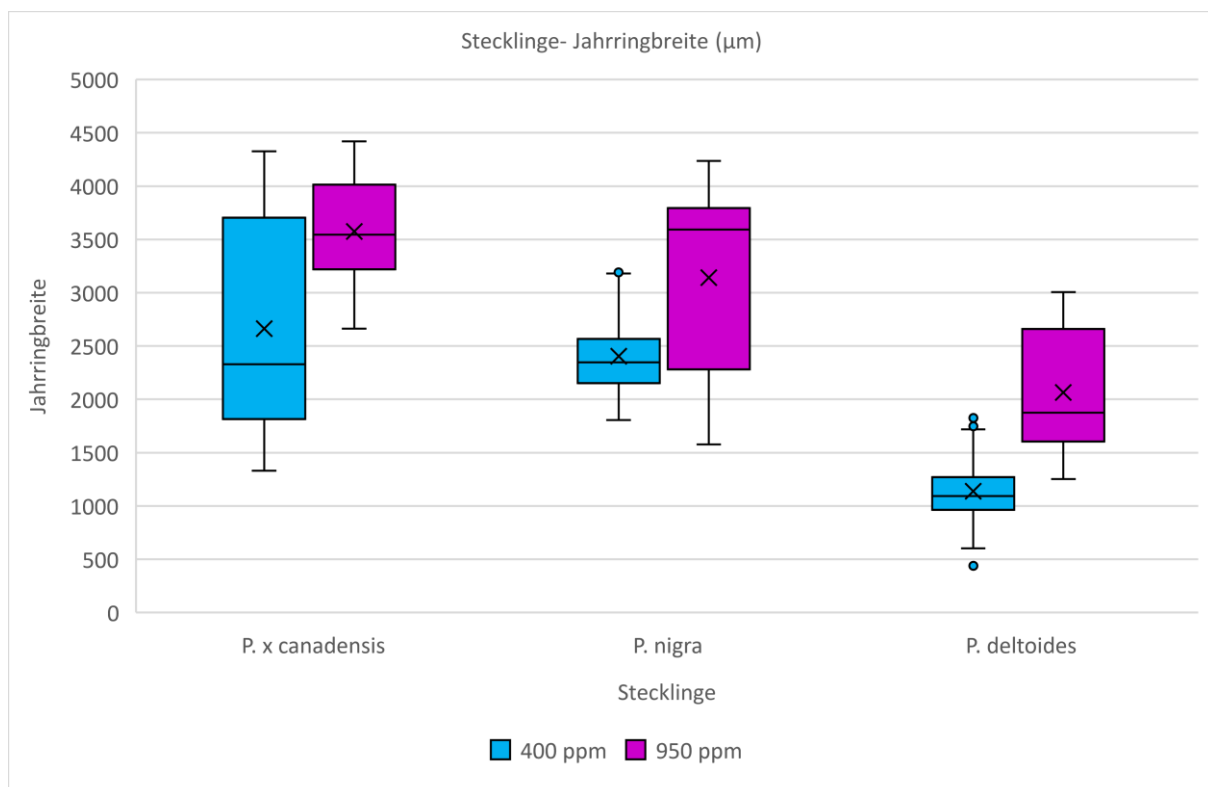


Abbildung 89: Jahrringbreite von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
Jahrringbreite	Signifikanz	Asymptotische Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,000	0,44	mittel
<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,75	stark
<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,37	mittel
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	ja	0,000	0,80	stark
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,77	stark
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	nein	1,000	-	-
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,21	mittel

Tabelle 101: Signifikanztest zwischen den Jahrringbreite von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

## 5.13 Holzanatomische Eigenschaften - Gefäßdichte

### 5.13.1 Einjährige Pflanzen – Gefäßdichte *Populus x canescens*

Unter erhöhter atmosphärischer  $CO_2$ -Konzentration hatten die Pflanzen der Art *Populus x canescens* signifikant geringere Gefäßdichten als die Pflanzen der Kontrollgruppe, die Umgebungsbedingungen ausgesetzt waren (Tabelle 102). Dabei war die Gefäßdichte bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen um durchschnittlich 25,10 % geringer als bei den Kontrollpflanzen.

Die Gruppe der Kontrollpflanzen hatte eine durchschnittliche Gefäßdichte von  $201,94 \text{ n/mm}^2$ , wobei die Spannweite der Messungen zwischen  $162,07 \text{ n/mm}^2$  und  $238,33 \text{ n/mm}^2$  gelegen hat. Der Interquartilsabstand lag bei  $32,42 \text{ n/mm}^2$  bei einem Median von  $199,17 \text{ n/mm}^2$ .

Die durchschnittliche Gefäßdichte der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen war im direkten Vergleich deutlich geringer und lag bei  $151,24 \text{ n/mm}^2$ . Bei den Messwerten ist eine Spannweite zwischen  $129,58 \text{ n/mm}^2$  und  $172,65 \text{ n/mm}^2$  ermittelt worden. Der Interquartilsabstand lag bei  $14,35 \text{ n/mm}^2$  bei einem Median von  $156,11 \text{ n/mm}^2$  (Abbildung 90).

Zwischen den beiden Gruppen ist beim Signifikanztest eine starke Effektstärke ermittelt worden.

### 5.13.2 Einjährige Pflanzen – Gefäßdichte *Populus tremula*

Bei *Populus tremula* haben sich die Gefäßdichten der Pflanzen je nach Umgebungsbedingungen signifikant voneinander unterschieden. Bei *Populus tremula* bewirkte eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration eine Verminderung der Gefäßdichte im Holz (Tabelle 102).

Dabei hatten die Kontrollpflanzen eine durchschnittliche Gefäßdichte von  $239,08 \text{ n/mm}^2$  und eine Spannweite der Messergebnisse zwischen  $150,03 \text{ n/mm}^2$  und  $342,46 \text{ n/mm}^2$ . Der Interquartilsabstand hat  $74,36 \text{ n/mm}^2$  betragen, bei einem Median von  $224,63 \text{ n/mm}^2$ .

Im direkten Vergleich hatten die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen eine durchschnittliche Gefäßdichte von  $191,60 \text{ n/mm}^2$  und eine Spannweite der Messergebnisse zwischen  $147,61 \text{ n/mm}^2$  und  $259,18 \text{ n/mm}^2$ . Der Interquartilsabstand dieser Gruppe lag bei  $38,05 \text{ n/mm}^2$  bei einem Median von  $191,60 \text{ n/mm}^2$  (Abbildung 90). Somit hatten die Pflanzen, die erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  ausgesetzt waren, um 19,18 % geringere Gefäßdichten im Holz als die Kontrollpflanzen unter Umgebungsbedingungen. Es wurde in diesem Vergleich beim Signifikanztest eine mittlere Effektstärke ermittelt.

### 5.13.3 Einjährige Pflanzen – Gefäßdichte *Populus alba*

Die Gefäßdichten der Kontrollpflanzen und der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen von der Art *Populus alba* haben sich signifikant voneinander unterschieden, wobei die Kontrollpflanzen im direkten Vergleich deutlich höhere Gefäßdichten aufgewiesen haben. Dabei ist beim Signifikanztest eine starke Effektstärke ermittelt worden (Tabelle 102).

Die Gruppe der Kontrollpflanzen hatte eine durchschnittliche Gefäßdichte von  $233,64 \text{ n/mm}^2$ , bei einer Spannweite der Messergebnisse zwischen  $172,18 \text{ n/mm}^2$  und  $335,60 \text{ n/mm}^2$ . Der Interquartilsabstand lag bei  $54,14 \text{ n/mm}^2$  bei einem Median von  $207,84 \text{ n/mm}^2$ .

Die Gefäßdichten der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen war dagegen um 29,28 % geringer als die der Kontrollpflanzen. Bei dieser Gruppe betrug die durchschnittliche Gefäßdichte  $165,23 \text{ n/mm}^2$ , bei einer Spannweite der Messergebnisse zwischen

133,47  $n/mm^2$  und 220,62  $n/mm^2$ . Der Interquartilsabstand lag bei 26,661  $n/mm^2$  und der Median bei 163,27  $n/mm^2$  (Abbildung 90).

#### 5.13.4 Einjährige Pflanzen – Gefäßdichte Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen

Beim direkten Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canescens* und den beiden Pappelarten *Populus tremula* und *Populus alba* gab es unter Umgebungsbedingungen keine signifikanten Unterschiede bei den Gefäßdichten im Holz (Tabelle 102). Dabei hatten jedoch die beiden Pappelarten *Populus tremula* mit 18,39 % und *Populus alba* mit 15,69 % tendenziell höhere Gefäßdichten als *Populus x canescens*.

Im direkten Vergleich hatte die Hybridpappel eine deutlich geringere Spannweite bei den ermittelten Werten als die beiden Pappelarten *Populus tremula* und *Populus alba* (Abbildung 90).

#### 5.13.5 Einjährige Pflanzen – Gefäßdichte Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter $CO_2$ -Konzentration

Der Vergleich zwischen *Populus x canescens* und *Populus alba* sowie *Populus deltoides* bezüglich der Gefäßdichte hat ergeben, dass es unter erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  zu signifikanten Unterschieden bei der Bildung der Gefäßzahl pro Fläche kommen kann (Tabelle 102), (Abbildung 90).

So haben sich die Gefäßdichten von *Populus x canescens* und *Populus tremula* signifikant voneinander unterschieden. Dabei hatten die Pflanzen der Art *Populus tremula* unter erhöhten  $CO_2$ - Bedingungen mit einem Unterschied von 27,74 % deutlich höhere Gefäßdichten im Holz als die Hybridpappel. Dabei ist zwischen diesen beiden Arten beim Signifikanztest eine starke Effektstärke ermittelt worden.

Deutlich geringere Unterschiede gab es beim Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canescens* und der Art *Populus alba*. Hier hatte *Populus alba* unter erhöhten  $CO_2$ - Bedingungen um 9,24 % höhere Gefäßdichten als die Hybridpappel *Populus x canescens*. Bei diesem Vergleich waren die Unterschiede nicht signifikant.

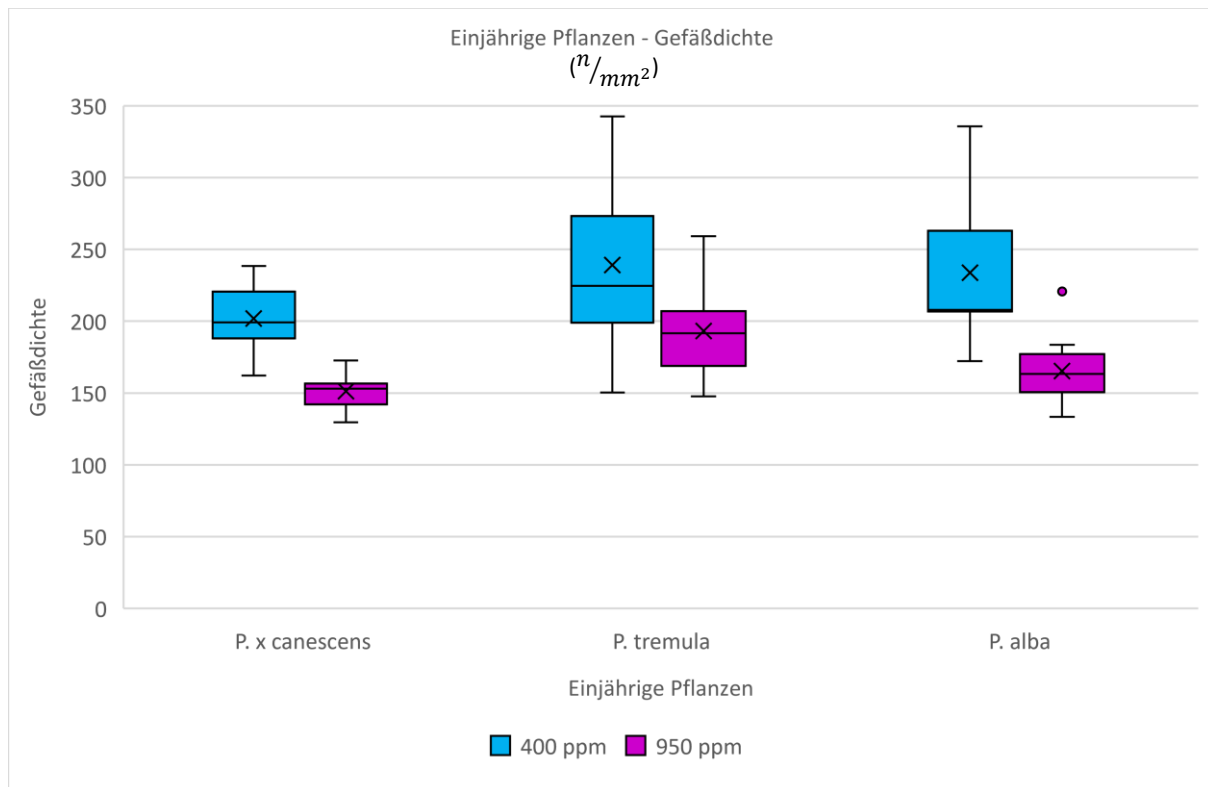


Abbildung 90: Gefäßdichte von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
Gefäßdichte	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,000	0,80	stark
<i>P. tremula</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,039	0,42	mittel
<i>P. alba</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	0,72	stark
<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 400 ppm	nein	0,168	-	-
<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,002	0,70	stark
<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 400 ppm	nein	0,168	-	-
<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,472	-	-

Tabelle 102: Signifikanztest zwischen den Gefäßdichten von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

### 5.13.6 Stecklinge – Gefäßdichte *Populus x canadensis*

Die Untersuchungen haben ergeben, dass die Gefäßdichte bei *Populus x canadensis* stark von einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration beeinflusst wird. So hatten die Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, deutlich niedrigere Gefäßdichten im Holz als die Kontrollpflanzen, die unter Umgebungsbedingungen gewachsen sind.

So hatten die Kontrollpflanzen eine durchschnittliche Gefäßdichte von  $177,89 \text{ n/mm}^2$  und eine Spannweite der Messwerte zwischen  $128,34 \text{ n/mm}^2$  und  $213,92 \text{ n/mm}^2$ . Der Interquartilsabstand lag bei  $31,63 \text{ n/mm}^2$  bei einem Median von  $187,04 \text{ n/mm}^2$ . Die Pflanzengruppe, die erhöhten  $\text{CO}_2$ - Bedingungen ausgesetzt war, hatte im direkten Vergleich zur Kontrollgruppe eine um 22,41 % niedrigere Gefäßdichte im Holz. Dabei hatten die Pflanzen dieser Gruppe eine durchschnittliche Gefäßdichte von  $138,01 \text{ n/mm}^2$  und eine Spannweite der Messergebnisse zwischen  $115,04 \text{ n/mm}^2$  und  $180,02 \text{ n/mm}^2$ . Der Interquartilsabstand lag bei  $30,52 \text{ n/mm}^2$  und der Median bei  $128,87 \text{ n/mm}^2$  (Abbildung 91). Beim Signifikanztest ist eine starke Effektstärke ermittelt worden (Tabelle 103).

#### 5.13.7 Stecklinge – Gefäßdichte *Populus nigra*

Bei der Art *Populus nigra* hatte eine erhöhte  $\text{CO}_2$ - Konzentration einen signifikanten Einfluss auf die Gefäßdichte im Holz (Tabelle 103). Dabei hatten auch bei dieser Art die Pflanzen, die erhöhtem  $\text{CO}_2$  ausgesetzt waren, deutlich reduzierte Gefäßdichten als die Kontrollpflanzen.

Die Kontrollpflanzen hatten im Durchschnitt eine Gefäßdichte von  $234,38 \text{ n/mm}^2$  und eine Spannweite der Messergebnisse zwischen  $178,62 \text{ n/mm}^2$  und  $283,38 \text{ n/mm}^2$ . Der Interquartilsabstand lag bei  $77,05 \text{ n/mm}^2$  bei einem Median von  $245,27 \text{ n/mm}^2$ . Die Pflanzen, die erhöhtem  $\text{CO}_2$  ausgesetzt waren, hatten im direkten Vergleich eine um 35,27 % geringere Gefäßdichte als die Kontrollpflanzen.

Die begasten Pflanzen hatten dabei eine durchschnittliche Gefäßdichte von  $151,69 \text{ n/mm}^2$  und eine Spannweite der Messungen zwischen  $118,12 \text{ n/mm}^2$  und  $206,11 \text{ n/mm}^2$ . Der Interquartilsabstand lag bei  $30,53 \text{ n/mm}^2$ . Der Median hat  $141,47 \text{ n/mm}^2$  betragen. Beim Signifikanztest ist eine starke Effektstärke ermittelt worden.

#### 5.13.8 Stecklinge – Gefäßdichte *Populus deltoides*

Bei der Pappelart *Populus deltoides* hatte eine erhöhte  $\text{CO}_2$ - Konzentration einen signifikanten Einfluss auf die Gefäßdichte im Holz gehabt (Tabelle 103). Dabei hatten

die Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, deutlich niedrigere Gefäßdichten als die Pflanzen der Kontrollgruppe.

Unter Umgebungsbedingungen hatten die Pflanzen eine durchschnittliche Gefäßdichte von  $242,04 \text{ n/mm}^2$  und eine Spannweite der Ergebnisse zwischen  $196,12 \text{ n/mm}^2$  und  $304,62 \text{ n/mm}^2$ . Der Interquartilsabstand dieser Gruppe lag bei  $22,55 \text{ n/mm}^2$  bei einem Median von  $239,02 \text{ n/mm}^2$ . Mit einem Unterschied von 16,90 % hatten die begasten Pflanzen deutlich geringere Gefäßdichten, die bei dieser Gruppe durchschnittlich bei  $201,12 \text{ n/mm}^2$  gelegen haben. Die Spannweite lag zwischen  $173,67 \text{ n/mm}^2$  und  $225,17 \text{ n/mm}^2$  bei einem Median von  $202,04 \text{ n/mm}^2$ . Der Interquartilsabstand hat bei  $37,91 \text{ n/mm}^2$  gelegen (Abbildung 91).

Der Signifikanztest hat ergeben, dass die Unterschiede mit einer starken Effektstärke verbunden waren.

#### 5.13.9 Stecklinge – Gefäßdichte Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen

Unter Umgebungsbedingungen haben sich die Gefäßdichten von *Populus x canadensis* und *Populus deltoides* sowie *Populus nigra* signifikant voneinander unterschieden (Tabelle 103),(Abbildung 91).

Beim direkten Vergleich zwischen *Populus x canadensis* und *Populus nigra* waren die Unterschiede bei der Gefäßdichte im Holz signifikant, wobei eine starke Effektstärke ermittelt worden ist. Dabei hatten die Pflanzen der Art *Populus nigra* um 31,75 % höhere Gefäßdichten im Holz als die Hybridpappeln *Populus x canadensis*.

Ähnliche Unterschiede gab es im Vergleich zwischen den Hybridpappeln *Populus x canadensis* und *Populus deltoides*. Hier waren die Unterschiede noch höher, wobei *Populus deltoides* um 36,06 % höhere Gefäßdichten aufgewiesen hat als die Hybridpappel. Auch bei diesem Vergleich ist beim Signifikanztest eine starke Effektstärke ermittelt worden.



### 5.13.10 Stecklinge – Gefäßdichte Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter $CO_2$ -Konzentration

Unter erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  waren die Unterschiede bei der Gefäßdichte zwischen *Populus x canadensis* und *Populus nigra* sowie *Populus deltoides* nur zum Teil signifikant unterschiedlich (Tabelle 103).

Beim direkten Vergleich zwischen *Populus x canadensis* und *Populus nigra* gab es unter erhöhtem  $CO_2$  keine signifikanten Unterschiede bei den Gefäßdichten. Die Pappelart *Populus nigra* hatte um 9,90 % höhere Gefäßdichten im Holz gegenüber den Pflanzen der Art *Populus x canadensis*, deren Unterschiede hier nicht signifikant waren. Zwischen den Gruppen *Populus x canadensis* und *Populus deltoides* gab es auch unter erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  signifikante Unterschiede (Abbildung 91). Hier hatte *Populus deltoides* um 45,72 % höhere Gefäßdichten als die Hybridpappel *Populus x canadensis*. Bei diesem Vergleich ist eine starke Effektstärke ermittelt worden.

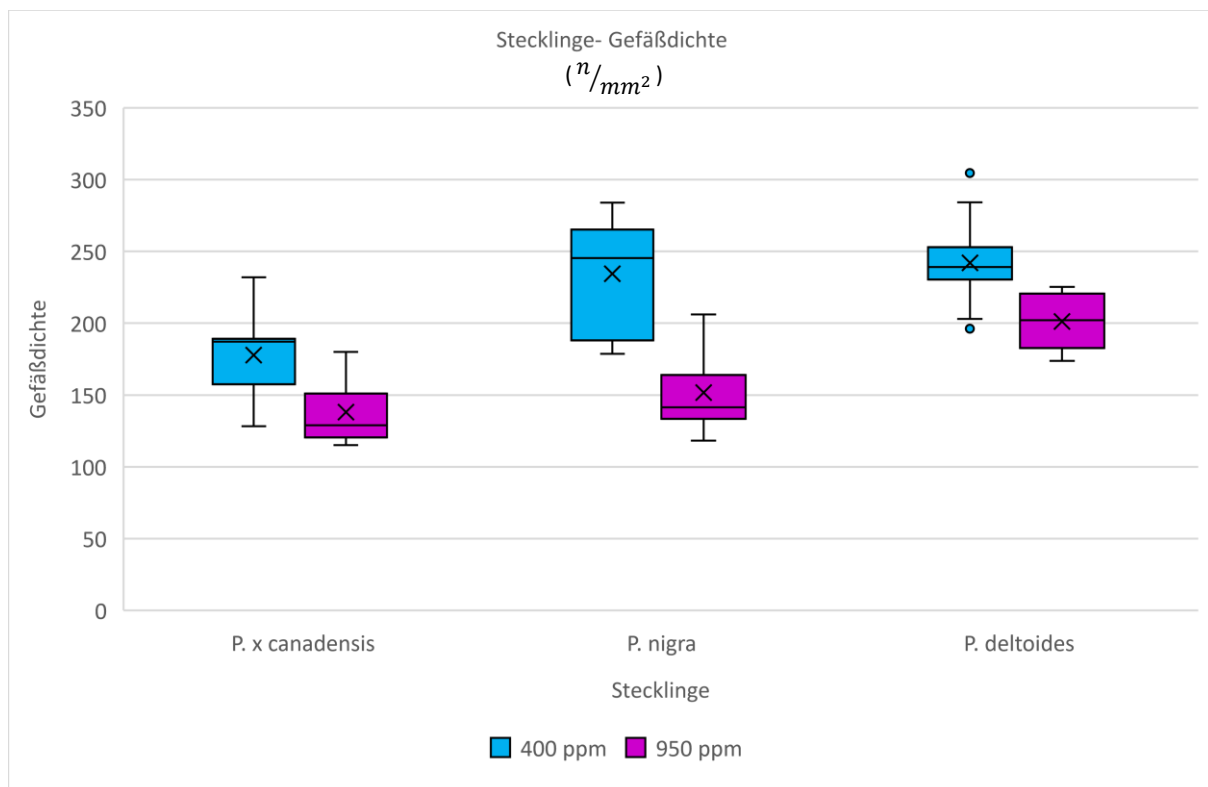


Abbildung 91: Gefäßdichte von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
Gefäßdichte	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,001	0,64	stark
<i>P. deltoides</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,64	stark
<i>P. nigra</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,000	0,77	stark
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	ja	0,000	0,63	stark
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,712	-	-
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 400 ppm	ja	0,000	0,74	stark
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,000	0,90	stark

Tabelle 103: Signifikanztest zwischen den Gefäßdichten von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

## 5.14 Elementaranalyse – C- Konzentration Stamm

### 5.14.1 Einjährige Pflanzen – C- Konzentration im Stamm

Bei den einjährigen Pflanzen hatte eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration zum Teil signifikante Auswirkungen auf die Kohlenstoffkonzentration im Stamm (Tabelle 104), (Abbildung 92).

Bei der Hybridpappel *Populus x canescens* hatten die Pflanzen, die Umgebungsbedingungen ausgesetzt waren, eine durchschnittliche C- Konzentration von 46,32 %. Die begasten Pflanzen der Art *Populus x canescens* hatten dagegen eine um 0,26 %P (Prozentpunkte) höhere C- Konzentration im Holz, die im Durchschnitt bei 46,58 % gelegen hat. Beim Signifikanztest ist dabei eine starke Effektstärke ermittelt worden.

Bei den Pflanzen der Art *Populus tremula* sind keine signifikanten Unterschiede bei der C- Konzentration im Stamm festgestellt worden (Tabelle 104). Die Kontrollpflanzen hatten im Durchschnitt eine C- Konzentration von 46,09 %, die um 0,38 %P höher war als bei den Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren. Hier betrug die durchschnittliche C- Konzentration 45,71 %.

Bei der Pflanzenart *Populus alba* konnten jedoch signifikante Unterschiede bei der C- Konzentration im Stamm der Pflanzen festgestellt werden (Tabelle 104). Die Pflanzen, die Umgebungsbedingungen ausgesetzt waren, hatten eine durchschnittliche C- Konzentration von 46,03 %. Die begasten Pflanzen der Art *Populus alba* hatten dagegen eine um 0,42 %P höhere C- Konzentration von 46,45 %. Der Signifikanztest

hat ergeben, dass bei diesem paarweisen Vergleich eine starke Effektstärke vorgelegen hat.

Beim Vergleich zwischen den Hybridpappeln und den Elternarten sind ebenfalls zum Teil signifikante Unterschiede beobachtet worden (Tabelle 104).

Unter Umgebungsbedingungen haben sich die C- Konzentrationen zwischen der Hybridpappel *Populus x canescens* und den Elternarten *Populus tremula* und *Populus alba* nicht signifikant voneinander unterschieden. Dabei war die C- Konzentration bei den Hybridpappeln um 0,23 %P, bzw. 0,29 %P höher. Unter erhöhtem atmosphärischem  $CO_2$  wurden zwischen der Hybridpappel *Populus x canescens* und *Populus tremula* hohe Unterschiede bei den C- Konzentrationen in den Stämmen beobachtet. Dabei waren die C- Konzentration bei den Hybridpappeln im direkten Vergleich um 0,87 %P höher als bei den Pflanzen der Art *Populus tremula*. Der Signifikanztest hat ergeben, dass bei diesem Vergleich eine starke Effektstärke vorgelegen hat. Dagegen gab es zwischen der Hybridpappel *Populus x canescens* und der Art *Populus alba* unter erhöhtem  $CO_2$  keine signifikanten Unterschiede, wobei auch hier die C-Konzentrationen bei den Hybridpappeln um 0,13 %P höher war.

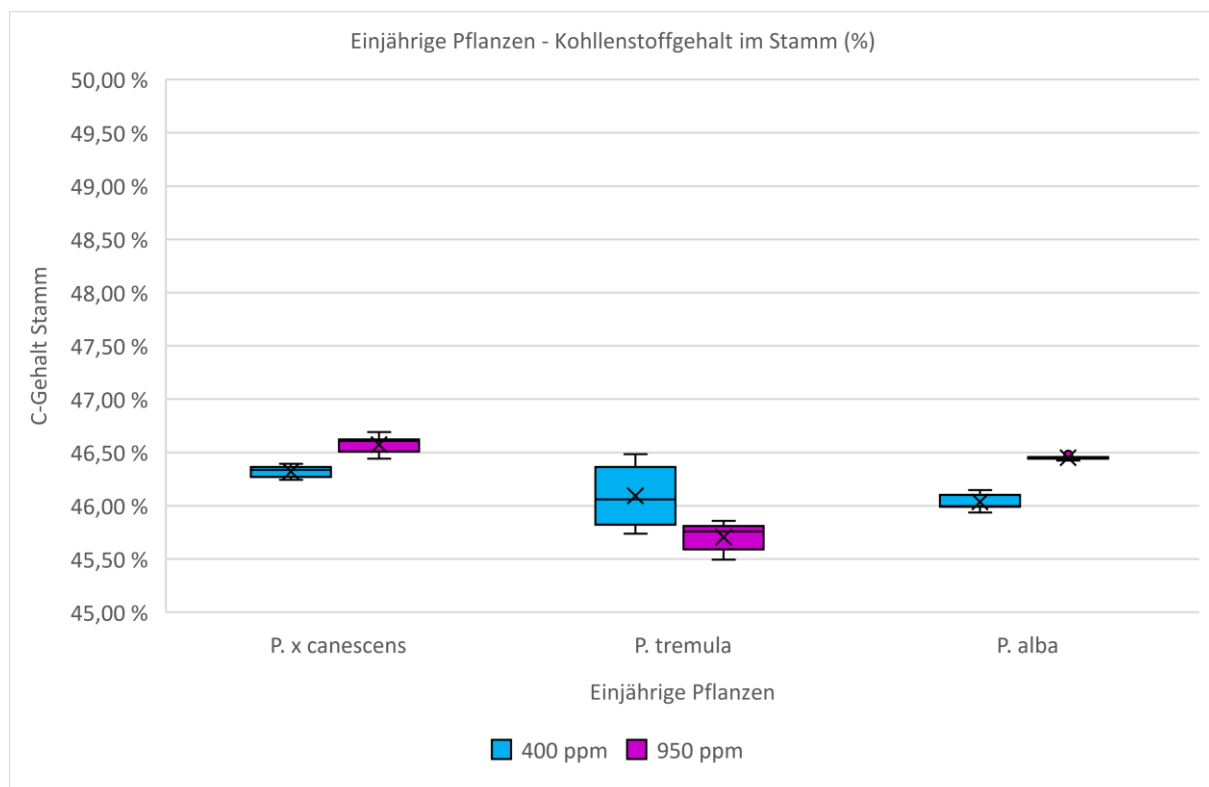


Abbildung 92: Kohlenstoffgehalt im Stamm von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
C- Gehalt Stamm	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,002	0,83	stark
<i>P. tremula</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,132	-	-
<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,002	0,83	stark
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	nein	0,055	-	-
<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,001	1,00	stark
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	nein	0,055	-	-
<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,479	-	-

Tabelle 104: Signifikanztest zwischen den Kohlenstoffgehalten in den Stämmen von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration (950 ppm)

### 5.14.2 Stecklinge – C- Konzentration im Stamm

Eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration hatte bei den Pappel- Stecklingen nur zum Teil signifikante Auswirkungen auf die C - Konzentration im Holz (Tabelle 105),(Abbildung 93).

Bei den Stecklingen der Art *Populus x canadensis* haben sich die C- Konzentrationen der Kontrollgruppe und der begasten Gruppe nur geringfügig und somit nicht signifikant voneinander unterschieden. Dabei hatten die Pflanzen, die Umgebungsbedingungen ausgesetzt waren, eine durchschnittliche C- Konzentration von 48,75 % im Holz. Die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen hatten im direkten Vergleich dagegen eine C- Konzentration von 49,02 % die um 0,27 %P höher war als bei den Pflanzen der Kontrollgruppe.

Bei der Pappelart *Populus nigra* sind dagegen signifikante Unterschiede bei der C- Konzentration im Holz zwischen den mit  $CO_2$  begasten und unbegasten Pflanzen beobachtet worden. Die Pflanzen der Kontrollgruppe hatten im Stamm eine durchschnittliche C- Konzentration von 48,34 % die um 0,61 %P geringer war als bei den begasten Pflanzen, die durchschnittlich eine C- Konzentration von 48,95 % hatten. Beim Signifikanztest ist zwischen den Ergebnissen beider Gruppen eine starke Effektstärke ermittelt worden (Tabelle 105).

Bei der Art *Populus deltoides* hatte das erhöhte atmosphärische  $CO_2$  keinen signifikanten Einfluss auf die C- Konzentration im Stamm der Pflanzen. Die Kontrollgruppe hatte hierbei eine durchschnittliche C- Konzentration von 47,51 %. Die C- Konzentration war bei den begasten Pflanzen geringfügig höher und lag bei 47,94 % (+0,43 %P).

Beim direkten Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canadensis* und den beiden Elternarten *Populus nigra* und *Populus deltoides* wurden ebenfalls zum Teil signifikante Unterschiede zwischen den Arten bei beiden Umgebungen beobachtet (Tabelle 105). Dabei war unter Umgebungsbedingungen bei den Hybridpappeln die C-Konzentration höher als bei den Pflanzen der Arten *Populus nigra* und *Populus deltoides*. Im direkten Vergleich zwischen den Arten *Populus x canadensis* und *Populus nigra* konnten jedoch keine signifikanten Unterschiede beobachtet werden. Dabei war bei diesem Vergleich die C-Konzentration um 0,41 %P höher als bei *Populus nigra*. Beim Vergleich zwischen den Arten *Populus x canadensis* und *Populus deltoides* wurden signifikante Unterschiede bei der C-Konzentration im Stamm ermittelt. So waren die C-Konzentrationen bei den Hybridpappeln um 1,24 %P höher als bei den Pflanzen der Art *Populus deltoides*. Dabei ist eine starke Effektstärke beobachtet worden.

Unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre sind ähnliche Unterschiede bei den C-Konzentrationen zwischen der Hybridpappel und den Pappelarten beobachtet worden. Auch unter diesen Bedingungen gab es zwischen den Arten *Populus x canadensis* und *Populus nigra* keine signifikanten Unterschiede bei den C-Konzentrationen im Stamm, wobei die C-Konzentration bei den Hybridpappeln um 0,07 %P höher war. Beim Vergleich zwischen den Arten *Populus x canadensis* und *Populus deltoides* wurden auch unter erhöhtem  $CO_2$  signifikante Unterschiede beobachtet, wobei eine starke Effektstärke ermittelt worden ist. Hier waren die C-Konzentrationen im Stamm bei den Hybridpappeln *Populus x canadensis* um 1,08 %P höher als bei *Populus deltoides*.

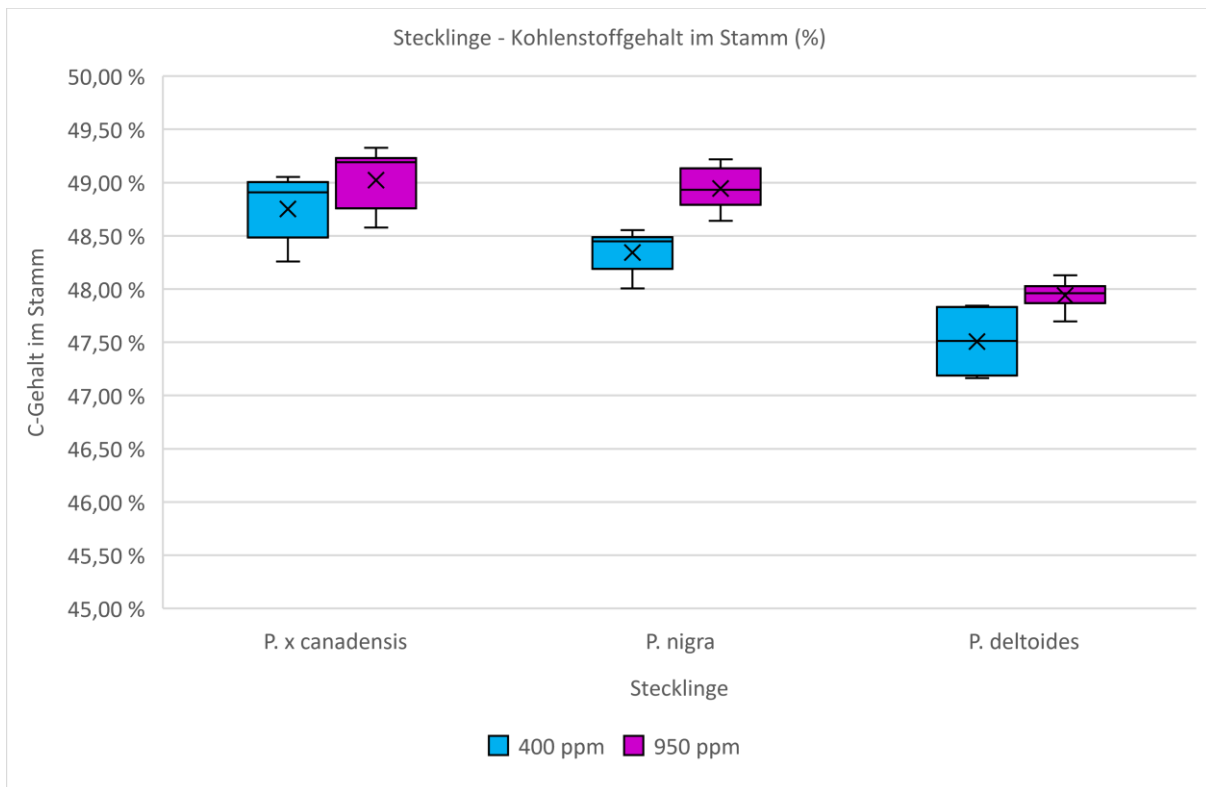


Abbildung 93: Kohlenstoffgehalt im Stamm von Stecklingen, die Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
C- Gehalt Stamm	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	nein	0,132	-	-
<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,067	-	-
<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,002	0,83	stark
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	ja	0,005	0,99	stark
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,006	0,88	stark
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 400 ppm	nein	0,676	-	-
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	1,000	-	-

Tabelle 105: Signifikanztest zwischen den Kohlenstoffgehalten in den Stämmen von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

## 5.15 Elementaranalyse – N- Konzentration Stamm

### 5.15.1 Einjährige Pflanzen – N- Konzentration im Stamm

Bei der Gruppe der einjährigen Pflanzen hatte eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre keine signifikanten Auswirkungen auf die N- Konzentration im Stamm der Pflanzen (Tabelle 106), (Abbildung 94).

Bei der Hybridpappel *Populus x canescens* bewirkte eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration tendenziell eine höhere N-Konzentration im Stamm der Pflanzen, jedoch war bei diesem paarweisen Vergleich der Unterschied nicht signifikant. Hier hatten die begasten Pflanzen eine um 0,07 %P höhere N-Konzentration im Stamm, wobei die Spannweite der Messwerte deutlich höher war als bei der Pflanzengruppe, die Umgebungsbedingungen ausgesetzt war. Die durchschnittliche N-Konzentration bei den Pflanzen der Kontrollgruppe lag hier bei 0,37 % und bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen bei 0,44 %.

Auch bei den Pflanzen der Pappelart *Populus tremula* konnten keine signifikanten Unterschiede bei der N-Konzentration im Stamm zwischen den Pflanzen der Kontrollgruppe und den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen festgestellt werden. Die Pflanzen der Kontrollgruppe hatten im Durchschnitt eine N-Konzentration von 0,37 %. Die begasten Pflanzen hatten dagegen eine um 0,06 %P geringere N-Konzentration von 0,31 %. Auch hier war die Spannweite der Messergebnisse bei den begasten Pflanzen höher als bei der Kontrollgruppe.

Ähnliche Ergebnisse sind auch bei der Pappelart *Populus alba* beobachtet worden. Hier hatten die Pflanzen, die Umgebungsbedingungen ausgesetzt waren, eine durchschnittliche N-Konzentration von 0,40 % im Stamm. Die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen hatten dagegen eine um 0,07 %P geringere N-Konzentration von 0,33 %. Auch hier konnte eine statistische Signifikanz zwischen den Messergebnissen beider Gruppen ermittelt werden.

Auch bei den Vergleichen zwischen der Hybridpappel *Populus x canescens* und den Elternarten *Populus tremula* und *Populus alba* sind bei den unterschiedlichen N-Konzentrationen im Stamm keine Signifikanz zwischen den Ergebnissen beobachtet worden (Tabelle 106).

So lagen die N-Konzentrationen der Hybridpappel *Populus x canescens* und der Pappel *Populus tremula* unter Umgebungsbedingungen sehr nah beieinander, wobei die N-Konzentration im Stamm der Hybridpappel geringfügig höher war (0,005 %P). Unter erhöhten atmosphärischem  $CO_2$  waren die Unterschiede höher, bei dem die Hybridpappeln um 0,12 %P höhere N-Konzentrationen im Stamm hatten. Auch hier ist keine statistische Signifikanz zwischen den Messergebnissen beider Arten festgestellt worden.

Beim Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canescens* und der Pappelart *Populus alba* sind unter Umgebungsbedingungen ebenfalls keine signifikanten

Unterschiede festgestellt worden (Tabelle 106). Dabei waren die N- Konzentrationen bei *Populus alba* um 0,03 %P höher als bei *Populus x canescens*. Unter erhöhtem atmosphärischem  $CO_2$  waren jedoch die N- Konzentrationen der Hybridpappeln um 0,11 %P höher als bei den Pflanzen der Art *Populus alba*. Auch hier sind zwischen den Messergebnissen beider Arten kein signifikanter Unterschied ermittelt worden.

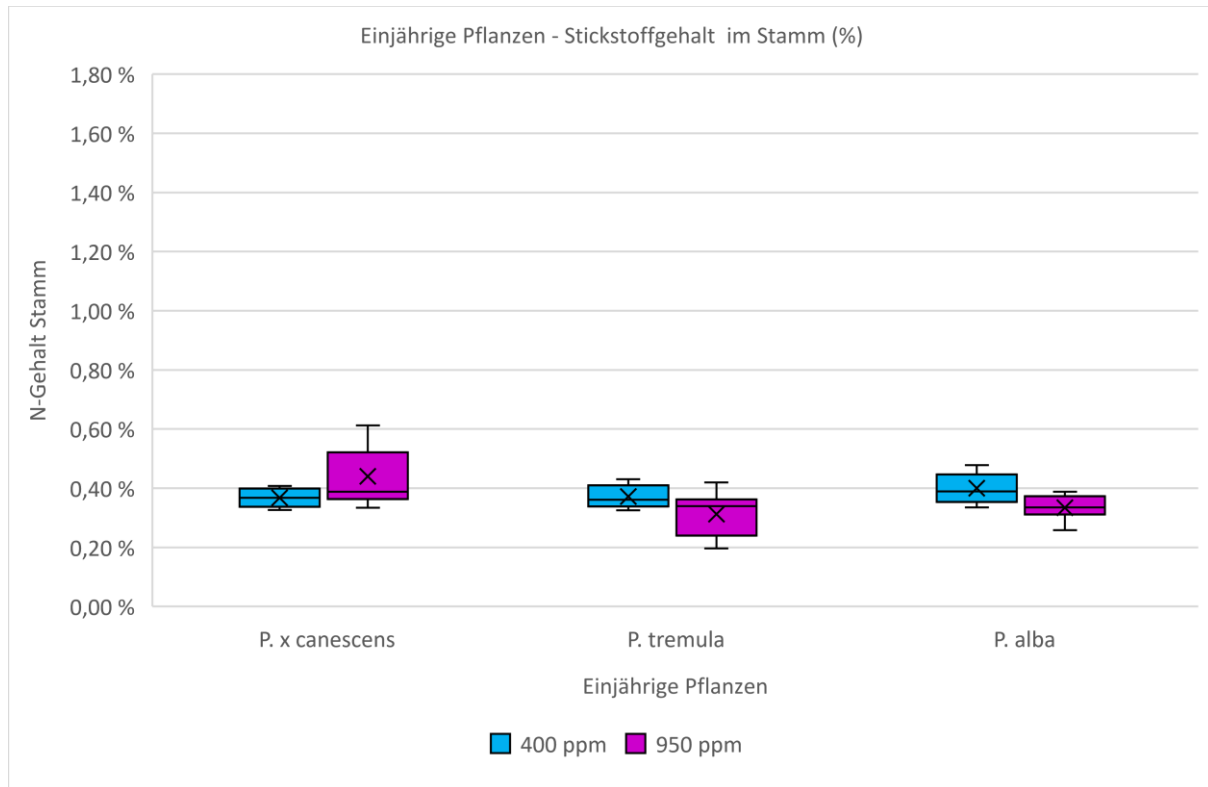


Abbildung 94: Stickstoffgehalt im Stamm von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
N- Gehalt Stamm	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	nein	0,394	-	-
<i>P. tremula</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,310	-	-
<i>P. alba</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,132	-	-
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	nein	0,641	-	-
<i>P.x canescens</i> 950 ppm = <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,118	-	-
<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 400 ppm	nein	0,641	-	-
<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,118	-	-

Tabelle 106: Signifikanztest zwischen den Stickstoffgehalten in den Stämmen von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration (950 ppm)



### 5.15.2 Stecklinge – N- Konzentration im Stamm

Bei der Gruppe der Stecklinge hat eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration zum Teil signifikante Auswirkungen auf die N- Konzentration im Holz gehabt (Tabelle 107), (Abbildung 95).

Bei der Hybridpappel *Populus x canescens* sind zwischen der Kontrollgruppe und der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen starke Unterschiede bei der N- Konzentration im Stamm beobachtet worden. Dabei hatten die Kontrollpflanzen eine durchschnittliche N- Konzentration von 0,75 %. Deutlich niedriger war die

N- Konzentration bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen. Hier war im direkten Vergleich die N- Konzentration um 0,32 %P geringer und lag durchschnittlich bei 0,43 %. Die Varianz der Messergebnisse war bei der Kontrollgruppe ebenfalls deutlich höher.

Schwache Unterschiede sind bei der Pappelart *Populus nigra* beobachtet worden. Hier hatten die Pflanzen die Umgebungsbedingungen ausgesetzt waren eine etwas höhere N- Konzentration im Stamm als die begasten Pflanzen. Dabei hatten die Pflanzen der Kontrollgruppe eine durchschnittliche N- Konzentration von 0,87 % im Stamm. Um 0,02 %P geringer war die N- Konzentration bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen, wo die N- Konzentration durchschnittlich bei 0,85 % gelegen hat.

Bei der Art *Populus deltoides* sind im direkten Vergleich zwischen den unbegasten und den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen keine signifikanten Unterschiede bei den Messergebnissen beobachtet worden. So hatten die Pflanzen der Kontrollgruppe eine durchschnittliche N- Konzentration von 1,61 % im Stamm. Die begasten Pflanzen hatten eine deutlich niedrigere N- Konzentration, die bei 0,84 % gelegen hat und um 0,76 %P geringer war als die durchschnittlichen Messwerte der unbegasten Pflanzengruppe.

Auch beim Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canadensis* und den Arten *Populus nigra* und *Populus deltoides* sind zum Teil signifikante Unterschiede bei der N- Konzentration im Stamm festgestellt worden (Tabelle 107).

Beim Vergleich zwischen *Populus x canadensis* und *Populus deltoides* sind unter Umgebungsbedingungen signifikante Unterschiede bei der N- Konzentration festgestellt worden. So hatten die Pflanzen der Art *Populus deltoides* deutlich höhere N- Konzentrationen im Stamm als *Populus x canadensis*. Der Unterschied lag bei 0,86 %P. Unter erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  waren die Unterschiede zwischen den

beiden Arten etwas geringer, aber auch hier hat der Signifikanztest ergeben, dass eine starke Effektstärke vorgelegen hat. Unter erhöhten  $CO_2$ - Bedingungen war die N-Konzentration im Stamm bei *Populus deltoides* um 0,42 %P höher als bei der Hybridpappel *Populus x canadensis*.

Beim Vergleich zwischen *Populus x canadensis* und *Populus nigra* sind unter Umgebungsbedingungen keine signifikanten Unterschiede bei der N- Konzentration im Stamm der Pflanzen beobachtet worden. Die N- Konzentration bei der Art *Populus nigra* war im direkten Vergleich zu der Hybridpappel *Populus x canadensis* um 0,12 %P höher. Unter erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  waren die Unterschiede stärker. Die begasten Pflanzen der Art *Populus nigra* hatte hier um 0,42 %P höhere N-Konzentration in den Stämmen als die Hybridpappel *Populus x canadensis*. Dabei waren die Unterschiede signifikant höher und sind mit einer starken Effektstärke bemessen worden.

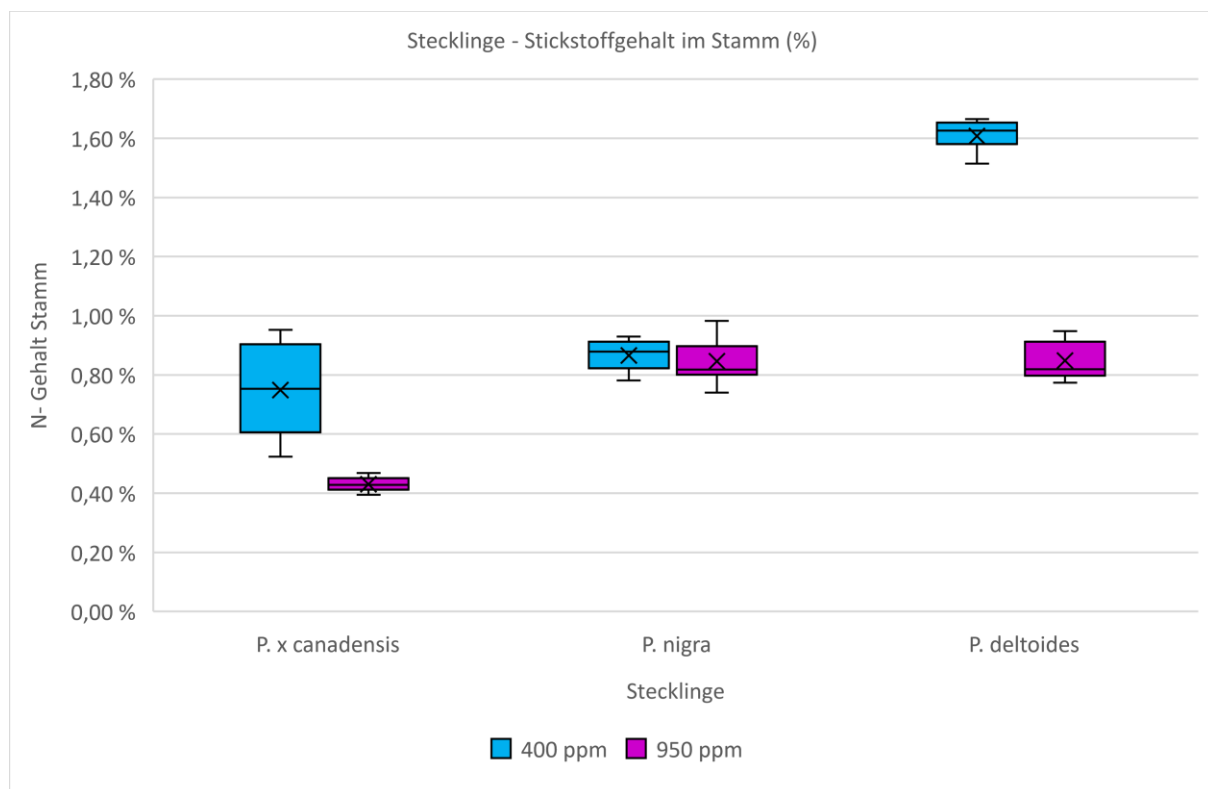


Abbildung 95: Stickstoffgehalt im Stamm von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
N- Gehalt Stamm	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,002	0,83	stark
<i>P. deltoides</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,01	0,81	stark
<i>P. nigra</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,818	-	-
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 400 ppm	ja	0,010	1,00	stark
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,009	0,85	stark
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	nein	1,000	-	-
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,012	0,82	stark

Tabelle 107: Signifikanztest zwischen den Stickstoffgehalten in den Stämmen von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration (950 ppm)

## 5.16 Elementaranalyse – C- Konzentration Blatt

### 5.16.1 Einjährige Pflanzen – C- Konzentration im Blatt

Bei der Gruppe der einjährigen Pflanzen hatte eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration in der Atmosphäre zum Teil einen signifikanten Einfluss auf die C- Konzentration in den Blättern der Pflanzen (Tabelle 108), (Abbildung 96).

Bei der Hybridpappel *Populus x canescens* hatten die Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, deutlich höhere C- Konzentrationen in den Blättern als die Pflanzen der Kontrollgruppe. Dabei hatten die Kontrollpflanzen eine durchschnittliche C- Konzentration von 41,57 % im Blatt. Um 2,24 %P höher war die C- Konzentration bei den Blättern der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen, die hier bei 43,81 % gelegen hat. Im direkten Vergleich hatten die Messergebnisse der begasten Pflanzen eine deutlich höhere Spannweite.

Ähnliche Effekte auf das erhöhte  $CO_2$  sind auch bei *Populus tremula* beobachtet worden. Auch hier war die C- Konzentration in den Blättern der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen deutlich höher als bei der Kontrollgruppe. So hatten die Pflanzen, die Umgebungsbedingungen ausgesetzt waren, eine durchschnittliche C- Konzentration von 41,47 % in den Blättern. Um 1,62 % höher lag die Konzentration bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen, die durchschnittlich eine C- Konzentration von 43,09 % in den Blättern hatten.

Bei der Art *Populus alba* waren die Unterschiede bei der C- Konzentration in den Blättern nicht signifikant. So hatten die Pflanzen der Kontrollgruppe eine

durchschnittliche C- Konzentration von 42,42 %, und war mit 0,96 %P geringer als bei den Blättern der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen (43,38 %).

Zwischen der Hybridpappel *Populus x canescens* und den beiden Pappelarten *Populus tremula* und *Populus alba* sind bei beiden Versuchsbedingungen keine signifikanten Unterschiede bei den C- Konzentrationen in den Blättern der Pflanzen beobachtet worden (Tabelle 108).

Beim direkten Vergleich zwischen *Populus x canescens* und *Populus tremula* waren die C- Konzentrationen unter Umgebungsbedingungen bei den Hybridpappeln etwas höher (+0,10 %P), wobei unter erhöhten  $CO_2$ - Bedingungen die Unterschiede größer waren (+0,72%P).

Zwischen *Populus x canescens* und *Populus alba* waren die C- Konzentrationen bei *Populus alba* unter Umgebungsbedingungen um 0,85 %P höher. Dagegen war unter erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  die C- Konzentration bei den Hybridpappeln höher als bei *Populus alba*, wobei auch hier die Unterschiede (+0,43 %P) nicht statistisch signifikant waren.

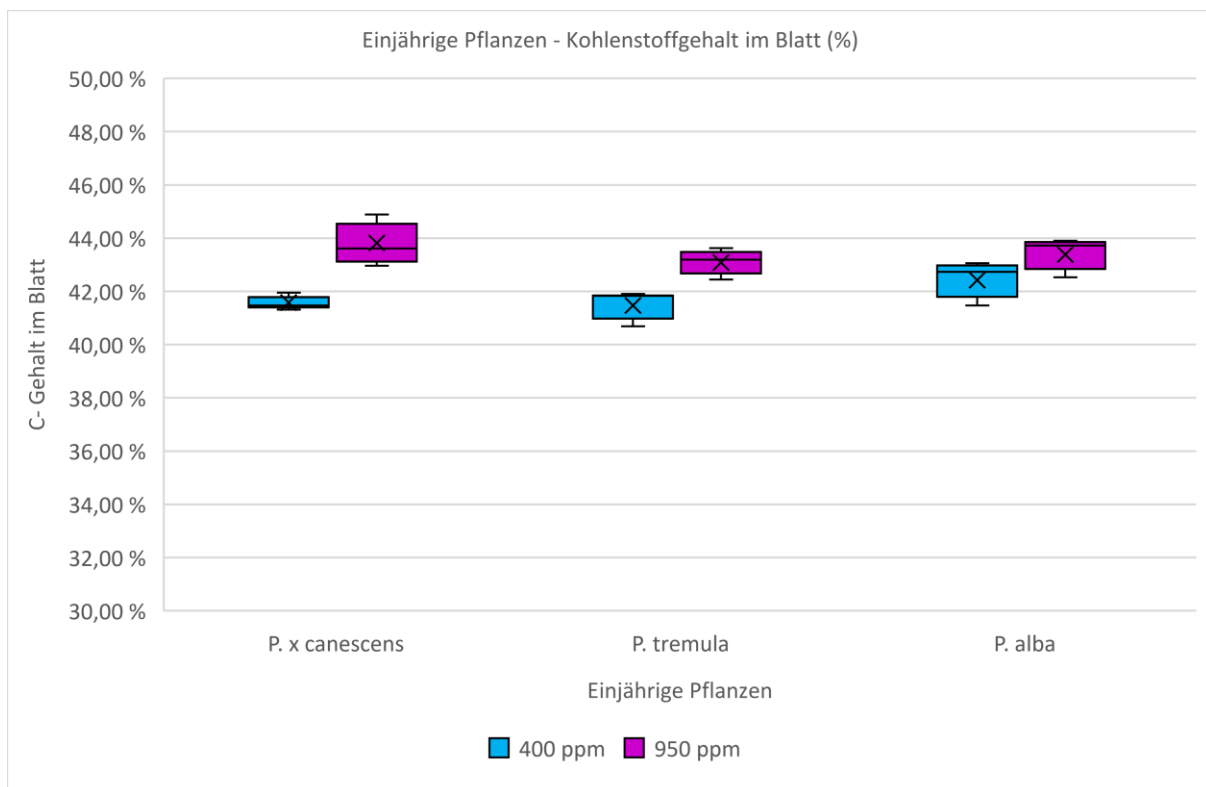


Abbildung 96: Kohlenstoffgehalt im Blatt von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
C- Gehalt Blatt	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,002	0,83	stark
<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,002	0,83	stark
<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,132	-	-
<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 400 ppm	nein	0,098	-	-
<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,240	-	-
<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 400 ppm	nein	0,098	-	-
<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,240	-	-

Tabelle 108: Signifikanztest zwischen den Kohlenstoffgehalten in den Blättern von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

### 5.16.2 Stecklinge – C- Konzentration im Blatt

Bei der Gruppe der Stecklinge hatte eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration einen signifikanten Einfluss auf die C-Konzentration in den Blättern der Pflanzen (Tabelle 109), (Abbildung 97).

Unter Umgebungsbedingungen hatten die Stecklinge der Art *Populus x canadensis* eine durchschnittliche C-Konzentration von 39,24 %. Deutlich höher waren die C-Konzentrationen bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen, die durchschnittlich eine C-Konzentration von 42,17 % in den Blättern hatten und somit um 2,93 %P höher war.

Die C-Konzentrationen in den Blättern der Art *Populus nigra* haben sich abhängig von den Umgebungsbedingungen ebenfalls stark unterschieden. Dabei hatten die Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen gewachsen sind, eine durchschnittliche C-Konzentration von 37,52 %. Um 4,22 %P höher waren die C-Konzentrationen bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen, die durchschnittlich bei 41,74 % gelegen hat. Bei den unbegasten Pflanzen war die Spannweite der Ergebnisse deutlich höher als bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen.

Auch bei der Art *Populus deltoides* waren die Unterschiede bei den C-Konzentrationen in den Blättern, abhängig von den Umgebungsbedingungen, sehr hoch. Die C-Konzentrationen in den Blättern der unbegasten Pflanzen lag bei 38,19 %. Auch hier war die Spannweite der Messergebnisse hoch. Die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen hatten dagegen eine deutlich höhere C-Konzentration von 43,19 % in den Blättern und war somit um 5,00 %P höher als bei den unbegasten Pflanzen.

Bei der Gegenüberstellung der Messergebnisse von *Populus x canadensis* und den beiden Elternarten *Populus nigra* und *Populus deltoides* gab es nur zum Teil signifikante Unterschiede bei den C- Konzentrationen in den Blättern (Tabelle 109).

Unter Umgebungsbedingungen haben sich die C- Konzentrationen in den Blättern der Arten *Populus x canadensis* und *Populus nigra* kaum unterschieden, wobei die C- Konzentration bei den Hybridpappeln um 1,72 %P höher war. Unter erhöhten  $CO_2$ - Bedingungen waren die Unterschiede jedoch signifikant, wobei die C- Konzentration bei den Hybridpappeln um 0,43 %P höher war.

Beim direkten Vergleich zwischen den Arten *Populus x canadensis* und *Populus deltoides* sind bei beiden Versuchsbedingungen keine signifikanten Unterschiede beobachtet worden. Unter Umgebungsbedingungen waren bei den Hybridpappeln die C- Konzentrationen in den Blättern gegenüber den Pflanzen der Art *Populus deltoides* tendenziell höher (+1,05 %P). Unter erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  waren die C- Konzentrationen wiederum bei den Pflanzen der Gruppe *Populus deltoides* höher (1,02 %P), wobei keine statistische Signifikanz zwischen den Messergebnissen beider Gruppen bestanden hat.

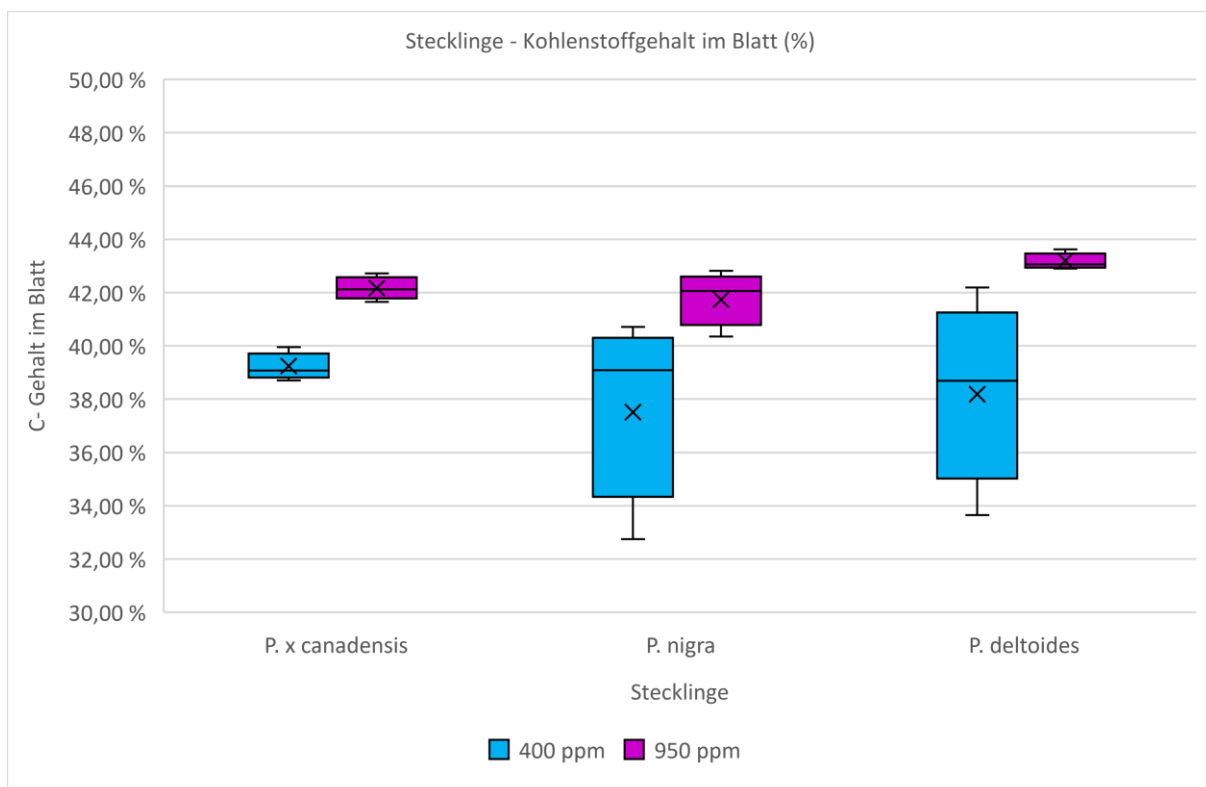


Abbildung 97: Kohlenstoffgehalt im Blatt von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
C- Gehalt Blatt	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,002	0,83	stark
<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,048	0,58	stark
<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,026	0,64	stark
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	nein	0,895	-	-
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,015	0,81	stark
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 400 ppm	nein	0,895	-	-
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	1,000	-	-

Tabelle 109: Signifikanztest zwischen den Kohlenstoffgehalten in den Blättern von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration (950 ppm)

## 5.17 Elementaranalyse – N- Konzentration Blatt

### 5.17.1 Einjährige Pflanzen – N- Konzentration im Blatt

Eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration in der Atmosphäre hatte zum Teil einen signifikanten Einfluss auf die N- Konzentration in den Blättern der einjährigen Pflanzen (Tabelle 110), (Abbildung 98).

Bei der Hybridpappel *Populus x canescens* hatte eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration einen starken Effekt auf die N- Konzentration in den Blättern der Pflanzen. Dabei hatten die Pflanzen, die Umgebungsbedingungen ausgesetzt waren, eine durchschnittliche N- Konzentration von 2,86 % bei einer gleichzeitig sehr geringen Spannweite der Messergebnisse. Signifikant niedriger waren die Messwerte der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen. Hier lagen die N- Konzentrationen in den Blättern bei durchschnittlich 2,09 % und waren somit um 0,77 %P geringer.

Bei der Art *Populus tremula* haben sich die N- Konzentrationen nicht signifikant voneinander unterschieden. Dabei waren die N- Konzentrationen bei den Kontrollpflanzen etwas höher und lagen durchschnittlich bei 3,27 %. Bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen war die N- Konzentration dagegen um 0,31 %P geringer und lag bei 2,96 %. Bei dieser Art war die Spannweite der Messergebnisse bei den unbegasten Pflanzen deutlich höher.

Bei der Pappelart *Populus alba* waren wiederum signifikante Unterschiede bei der N- Konzentration in den Blättern der Pflanzen erfasst worden. Auch hier war die N- Konzentration der unbegasten Pflanzen etwas höher und lag bei durchschnittlich

2,81 %. Um 0,46 %P niedriger waren die Messwerte bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen, die durchschnittlich bei 2,35 % gelegen haben.

Beim Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canescens* und den beiden Arten *Populus tremula* und *Populus alba* sind nur zum Teil signifikante Unterschiede beobachtet worden (Tabelle 110).

Zwischen *Populus x canescens* und *Populus tremula* sind unter Umgebungsbedingungen keine signifikanten Unterschiede bei der N- Konzentration in den Blättern der Pflanzen festgestellt worden. Dabei waren die N- Konzentration bei *Populus tremula* um 0,41 %P höher als bei den Hybridpappeln. Unter erhöhten  $CO_2$ - Bedingungen waren die N- Konzentrationen in den Blättern signifikant unterschiedlich. Dabei hatten die Blätter der Art *Populus tremula* um 0,87 %P höhere N- Konzentrationen als die Hybridpappeln.

Beim Vergleich zwischen *Populus x canescens* und *Populus alba* sind bei beiden Versuchsbedingungen keine signifikanten Unterschiede bei der N- Konzentration in den Blättern der Pflanzen festgestellt worden. Beide Gruppen lagen auf einem sehr ähnlichen Niveau, wobei die N- Konzentrationen der Hybridpappeln unter Normalbedingungen um 0,05 %P höher waren. Unter erhöhten  $CO_2$ - Bedingungen waren jedoch die N- Konzentrationen der Art *Populus alba* um 0,26 %P höher als bei den Hybridpappeln.



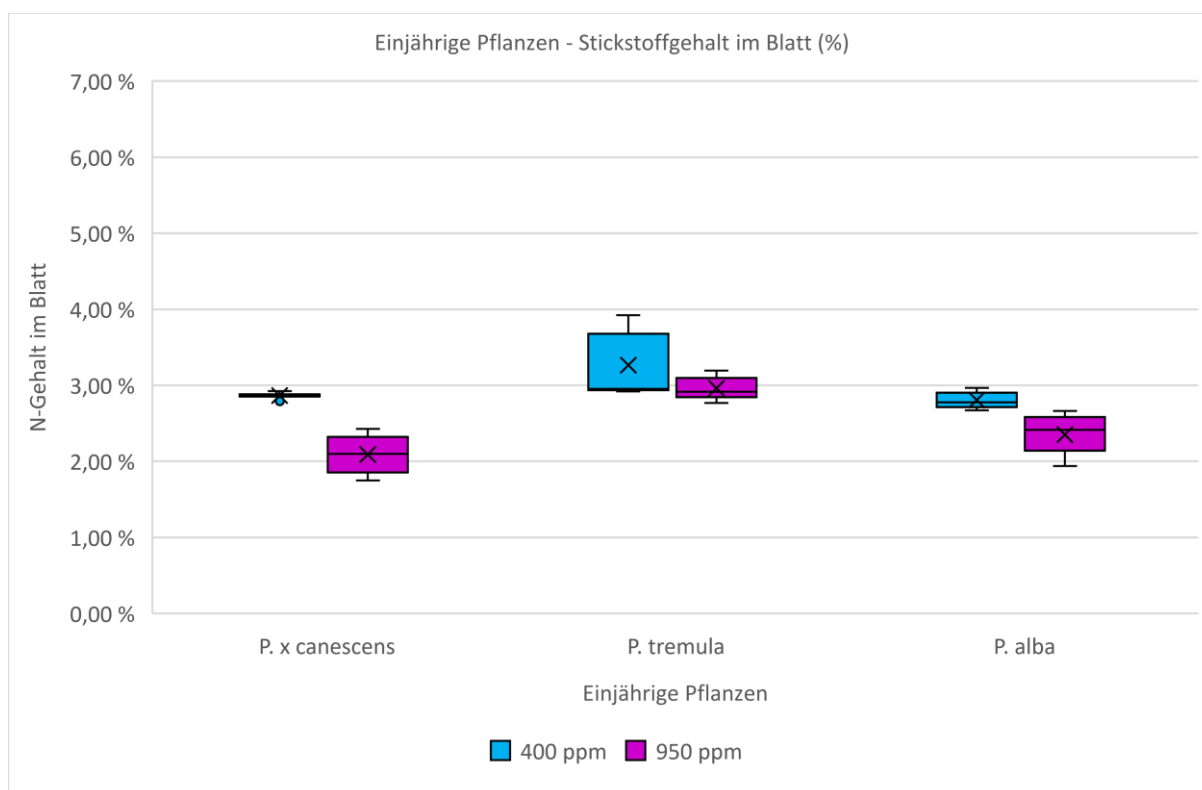


Abbildung 98: Stickstoffgehalt im Blatt von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
N- Gehalt Blatt	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,002	0,83	stark
<i>P. tremula</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,132	-	-
<i>P. alba</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,002	0,83	stark
<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 400 ppm	nein	0,092	-	-
<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,002	0,96	stark
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	nein	1,000	-	-
<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	1,000	-	-

Tabelle 110: Signifikanztest zwischen den Stickstoffgehalten in den Blättern von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

### 5.17.2 Stecklinge – N- Konzentration im Blatt

Bei der Gruppe der Stecklinge hatte eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration hohe Auswirkungen auf die N-Konzentration in den Blättern der Pflanzen (Tabelle 111), (Abbildung 99).

Bei der Hybridpappel *Populus x canadensis* haben sich die N-Konzentrationen der Blätter abhängig von den Umgebungsbedingungen stark voneinander unterschieden. Dabei hatten die Pflanzen der Kontrollgruppe eine durchschnittliche N-Konzentration

von 4,62 %, bei einer sehr geringen Spannweite der Messergebnisse. Um 1,15 %P niedriger waren die N- Konzentrationen der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen, die durchschnittlich bei 3,47 % gelegen haben. Bei den begasten Pflanzen war die Spannweite der Messergebnisse etwas höher.

Auch bei der Art *Populus nigra* waren die Unterschiede bei den N- Konzentrationen im Blatt zwischen begasten und unbegasten Pflanzen signifikant. Hier waren die N- Konzentrationen bei den unbegasten Pflanzen um 1,17 %P höher und lagen durchschnittlich bei 4,73 %. Bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen lag dagegen der durchschnittliche N- Gehalt der Blätter bei 3,56 %.

Bei der Pappelart *Populus deltoides* waren die Unterschiede am geringsten, jedoch war auch hier ein signifikanter Effekt durch das erhöhte  $CO_2$  zu erkennen. Dabei hatten die Pflanzen der Kontrollgruppe eine durchschnittliche N- Konzentration von 4,32 % in den Blättern, die um 0,97 %P höher war als bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen. Hier lag die N- Konzentration bei 3,35 %.

Bei allen paarweisen Vergleichen ist eine starke Effektstärke ermittelt worden.

Bei den Vergleichen zwischen der Hybridpappel *Populus x canadensis* und den Arten *Populus nigra* und *Populus deltoides* sind bei keinen der beiden Versuchsbedingungen signifikante Unterschiede bei der N- Konzentration der Blätter beobachtet worden (Tabelle 111).

Beim Vergleich zwischen *Populus x canadensis* und *Populus nigra* waren die Unterschiede bei der N- Konzentration bei beiden Versuchsbedingungen gering, wobei die Art *Populus nigra* um 0,11 %P höhere N- Konzentrationen in den Blättern gehabt hat als die Hybridpappeln. Unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration lagen die Unterschiede zwischen der Hybridpappel und *Populus nigra* bei 0,09 %P.

Auch beim Vergleich zwischen der Hybridpappel und *Populus deltoides* waren die Messergebnisse sehr ähnlich. Hier hatten die Hybridpappeln bei beiden Versuchsbedingungen höhere N- Konzentrationen. Unter Umgebungsbedingungen waren die Unterschiede bei den N- Konzentrationen in den Blättern um 0,30 %P höher als bei erhöhten  $CO_2$ - Bedingungen (+0,12 %P).

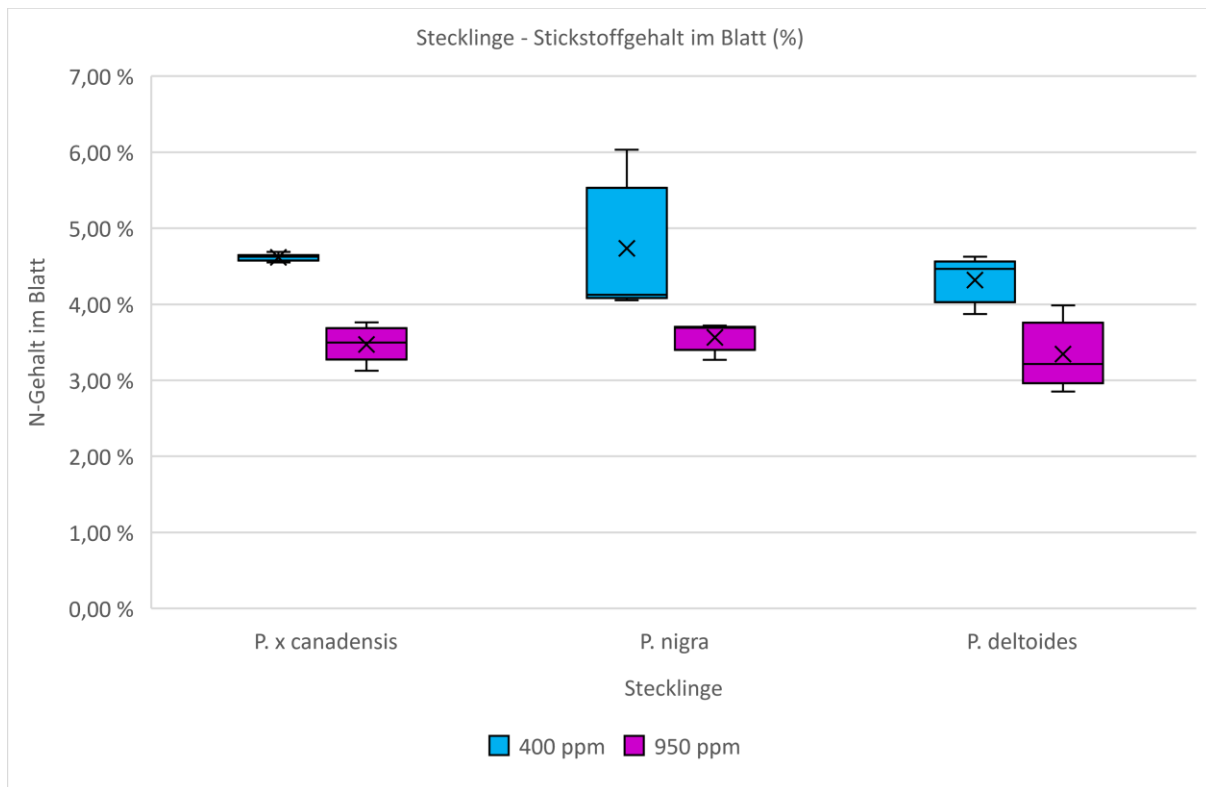


Abbildung 99: Stickstoffgehalt im Blatt von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
N-Gehalt Blatt	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,002	0,83	stark
<i>P. deltoides</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,026	0,64	stark
<i>P. nigra</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,002	0,83	stark
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 400 ppm	nein	0,172	-	-
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,653	-	-
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 400 ppm	nein	0,172	-	-
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,653	-	-

Tabelle 111: Signifikanztest zwischen den Stickstoffgehalten in den Blättern von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

## 5.18 Elementaranalyse – C- Konzentration Wurzel

### 5.18.1 Einjährige Pflanzen – C- Konzentration Wurzel

Bei der Gruppe der einjährigen Pflanzen hatte eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre keinen signifikanten Einfluss auf die C- Konzentration in den Wurzeln der Pflanzen (Tabelle 112), (Abbildung 100).

Bei der Hybridpappel *Populus x canescens* waren die Unterschiede bei der C-Konzentration in den Wurzeln je nach Versuchsbedingungen sehr gering. Dabei hatten die Pflanzen der Kontrollgruppe eine durchschnittliche C-Konzentration von 46,06 %. Die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen hatten dagegen eine durchschnittliche C-Konzentration von 45,8 % und waren somit um 0,26 %P geringer. Die Spannweite der Messergebnisse war bei der Gruppe der begasten Pflanzen deutlich höher als bei der Kontrollgruppe.

Bei der Art *Populus tremula* waren die Unterschiede ebenfalls gering. Dabei hatten die Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen gewachsen sind, um 1,37 %P höhere C-Konzentrationen in den Wurzeln als die mit  $CO_2$  begaste Pflanzengruppe. Die Wurzeln der Kontrollpflanzen hatten eine durchschnittliche C-Konzentration von 44,87 %. Die C-Konzentration in den Wurzeln der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen war etwas geringer und lag bei 43,50 %.

Auch bei *Populus alba* sind keine signifikanten Unterschiede bei der C-Konzentration in den Wurzeln der Pflanzen beobachtet worden. Die Kontrollpflanzen hatten dabei eine durchschnittliche C-Konzentration von 45,21 %. Um 0,88 %P niedriger waren die C-Konzentrationen der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen, die bei 44,33 % gelegen hat. Auch war die Spannweite der Messergebnisse bei der Gruppe der begasten Pflanzen deutlich höher.

Beim Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canescens* und den Pappelarten *Populus tremula* und *Populus alba* sind keine signifikanten Unterschiede weder unter Umgebungsbedingungen noch bei erhöhten  $CO_2$ - Bedingungen beobachtet worden (Tabelle 112).

Unter Umgebungsbedingungen hatten die Hybridpappeln um 1,19 %P und 0,85 %P höhere C-Konzentrationen als die Pappelarten *Populus tremula* und *Populus alba*. Unter erhöhten  $CO_2$ - Bedingungen waren die Unterschiede ähnlich, wie unter Normalbedingungen. Hier hatten die Hybridpappeln tendenziell höhere C-Konzentrationen in den Wurzeln. Dabei waren die Unterschiede zwischen den Arten unter erhöhtem  $CO_2$  etwas höher (2,30 %P und 1,47 %P) als unter Normalbedingungen.

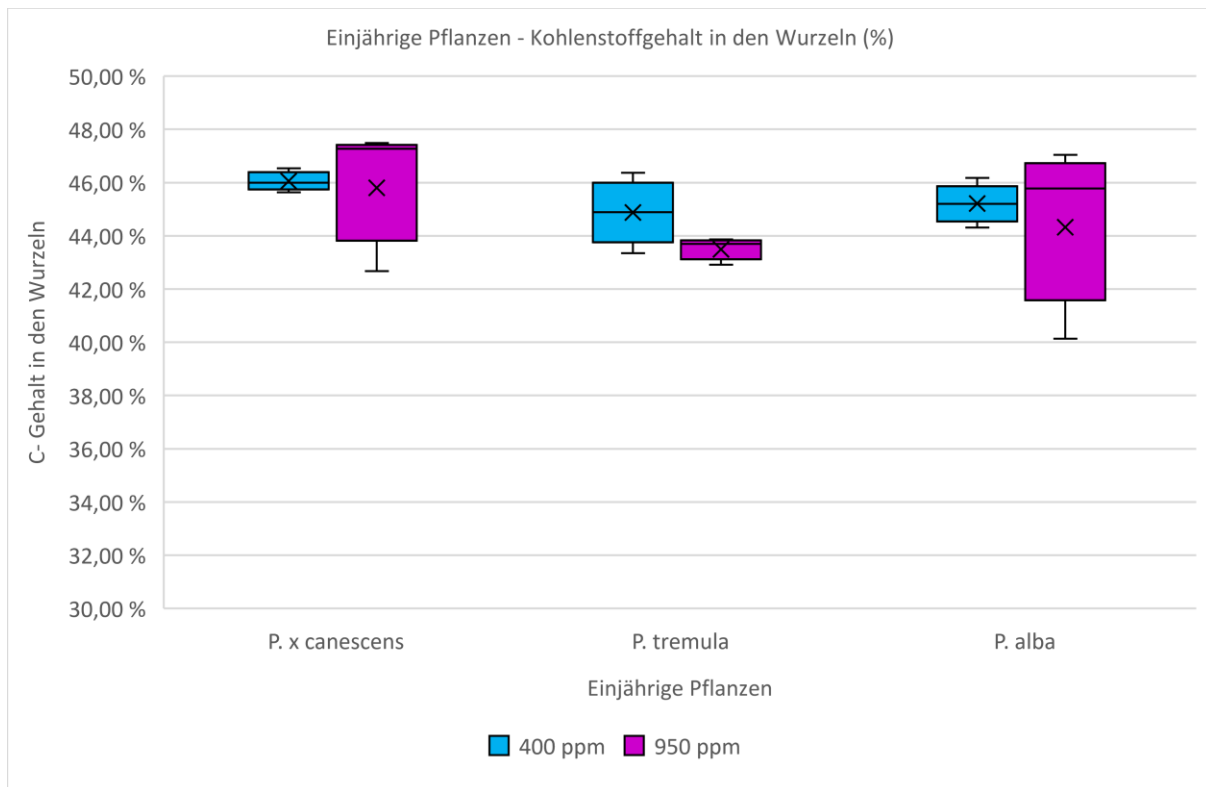


Abbildung 100: Kohlenstoffgehalt in den Wurzeln von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
C- Gehalt in Wurzeln	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r-Wert	Effektstärke
<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	nein	0,394	-	-
<i>P. tremula</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,132	-	-
<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,818	-	-
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	nein	0,169	-	-
<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,296	-	-
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	nein	0,169	-	-
<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,296	-	-

Tabelle 112: Signifikanztest zwischen den Kohlenstoffgehalten in den Wurzeln von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

### 5.18.2 Stecklinge – C- Konzentration Wurzel

Bei der Gruppe der Stecklinge gab es nur vereinzelte Unterschiede bei der C-Konzentration in den Wurzeln, abhängig von den Versuchsbedingungen den die Pflanzen ausgesetzt waren (Tabelle 113), (Abbildung 101).

Bei der Hybridpappel *Populus x canadensis* wurden keine signifikanten Unterschiede bei der C- Konzentration in den Wurzeln beobachtet. Bei den Pflanzen der

Kontrollgruppe hat die C- Konzentration bei 44,95 % gelegen. Um 1,82 %P höher war die C- Konzentration bei den begasten Pflanzen (46,77 %).

Bei der Art *Populus nigra* hatte eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration keinen signifikanten Einfluss auf die C- Konzentration der Wurzeln. Hier lagen die Messwerte beider Gruppen sehr nah beieinander. Die Kontrollpflanzen hatten dabei eine durchschnittliche C- Konzentration von 47,90 %, die um 0,20 %P höher war als bei den begasten Pflanzen, wo die C- Konzentration bei durchschnittlich 47,70 % gelegen hat.

Bei der Art *Populus deltoides* sind hingegen signifikante Unterschiede bei den C- Konzentration beobachtet worden. Hier hatten die Pflanzen der Kontrollgruppe eine durchschnittliche C- Konzentration von 45,90 %. Um 1,73 %P höher war die C- Konzentration bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen, die hier bei 47,63 % gelegen hat. Dabei ist eine starke Effektstärke zwischen den beiden Gruppen beobachtet worden. Beim Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canadensis* und den Pappeln *Populus nigra* und *Populus deltoides* sind keine signifikanten Unterschiede bei der C- Konzentration durch eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration beobachtet worden (Tabelle 113).

Beim Vergleich zwischen der Hybridpappel und der Art *Populus nigra* waren unter Umgebungsbedingungen die C- Konzentrationen bei *Populus nigra* um 2,95 %P höher als bei den Hybridpappeln. Auch unter erhöhtem  $CO_2$  war die C- Konzentration bei *Populus nigra* höher, wobei die Unterschiede geringer waren (0,93 %P) als unter Umgebungsbedingungen.

Auch beim Vergleich zwischen *Populus x canadensis* und *Populus deltoides* waren die Unterschiede sehr gering. Unter Normalbedingungen waren die C- Konzentrationen bei den Pappeln *Populus deltoides* im Vergleich um 0,95 %P höher als bei der Hybridpappel. Ähnlich war es auch unter erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$ , wo auch hier die *Populus deltoides* um 0,86 %P höhere C- Konzentrationen in den Wurzeln hatte als die Hybridpappel.

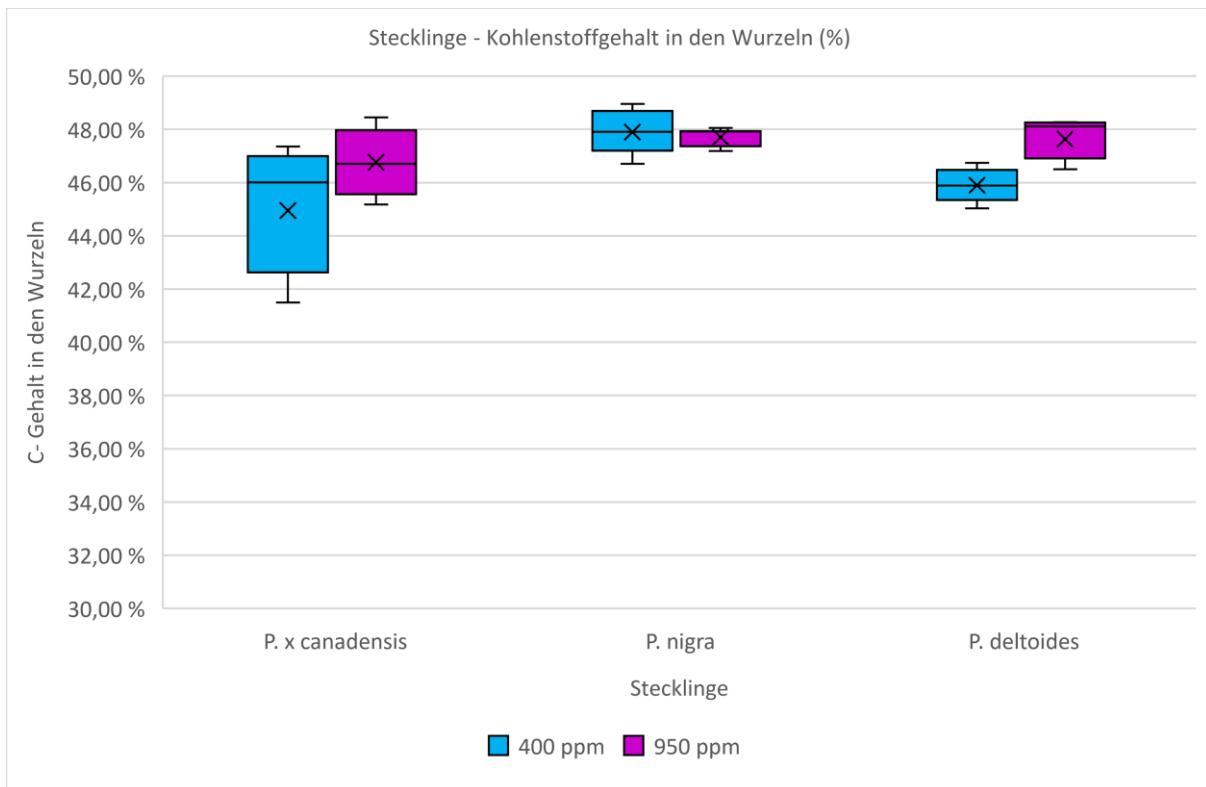


Abbildung 101: Kohlenstoffgehalt in den Wurzeln von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
C- Gehalt in Wurzeln	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r-Wert	Effektstärke
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	nein	0,394	-	-
<i>P. deltooides</i> 400 ppm < <i>P. deltooides</i> 950 ppm	ja	0,026	0,64	stark
<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,937	-	-
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltooides</i> 400 ppm	nein	1,000	-	-
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. deltooides</i> 950 ppm	nein	0,717	-	-
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	nein	0,060	-	-
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,717	-	-

Tabelle 113: Signifikanztest zwischen den Kohlenstoffgehalten in den Wurzeln von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

## 5.19 Elementaranalyse – N- Konzentration Wurzel

### 5.19.1 Einjährige Pflanzen – N- Konzentration Wurzeln

Bei der Gruppe der einjährigen Pflanzen hatte eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration nur teilweise eine signifikante Auswirkung auf die N- Konzentration der Wurzeln der Pflanzen (Tabelle 114), (Abbildung 102).

Bei der Hybridpappel *Populus x canescens* haben sich die N- Konzentrationen in den Wurzeln der Pflanzen nicht signifikant voneinander unterschieden. Die Pflanzen der Kontrollgruppe hatten im Durchschnitt eine N- Konzentration von 1,37 % in den Wurzeln. Um 0,02 %P höher war die N- Konzentration bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen, die bei 1,39 % gelegen hat.

Bei der Art *Populus tremula* hatte eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration einen signifikanten Einfluss auf die N- Konzentration in den Wurzeln der Pflanzen gehabt. Die unbegasten Pflanzen hatten im Durchschnitt eine N- Konzentration von 2,21 %. Um 0,59 %P geringer war die N- Konzentration bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen, die bei 1,62 % gelegen hat.

Bei *Populus alba* hatte eine erhöhte  $CO_2$  - Konzentration keinen Einfluss auf die N- Konzentration in den Wurzeln der Pflanzen. Hier lagen die durchschnittlichen Werte beider Gruppen auf einem ähnlichen Niveau, wobei die unbegasten Pflanzen eine geringfügig höhere N- Konzentration von 1,99 % und die begasten Pflanzen dagegen eine N-Konzentration von 1,98 % gehabt haben.

Auch beim Vergleich zwischen *Populus x canescens* und den Arten *Populus tremula* und *Populus alba* sind teilweise signifikante Unterschiede bei der N- durch eine erhöhte  $CO_2$  - Behandlung beobachtet worden (Tabelle 114).

Zwischen *Populus x canescens* und *Populus tremula* sind bei Umgebungsbedingungen signifikante Unterschiede bei der N- Konzentration in den Wurzeln festgestellt worden. So hatten die Hybridpappeln eine um 0,84 %P niedrigere N- Konzentration als *Populus tremula*. Unter erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  waren jedoch die Unterschiede deutlich geringer (0,23 %P) und statistisch nicht signifikant.

Unter Umgebungsbedingungen haben sich die N-Konzentrationen der Arten *Populus x canescens* und *Populus alba* nicht unterschieden. Hier waren die N- Konzentrationen der Art *Populus alba* um 0,62 %P höher. Unter erhöhter  $CO_2$  - Konzentration waren jedoch die Unterschiede der N- Konzentration in den Wurzeln signifikant, wobei auch hier die N- Konzentrationen von *Populus alba* um 0,59 %P höher war als bei den Hybridpappeln.



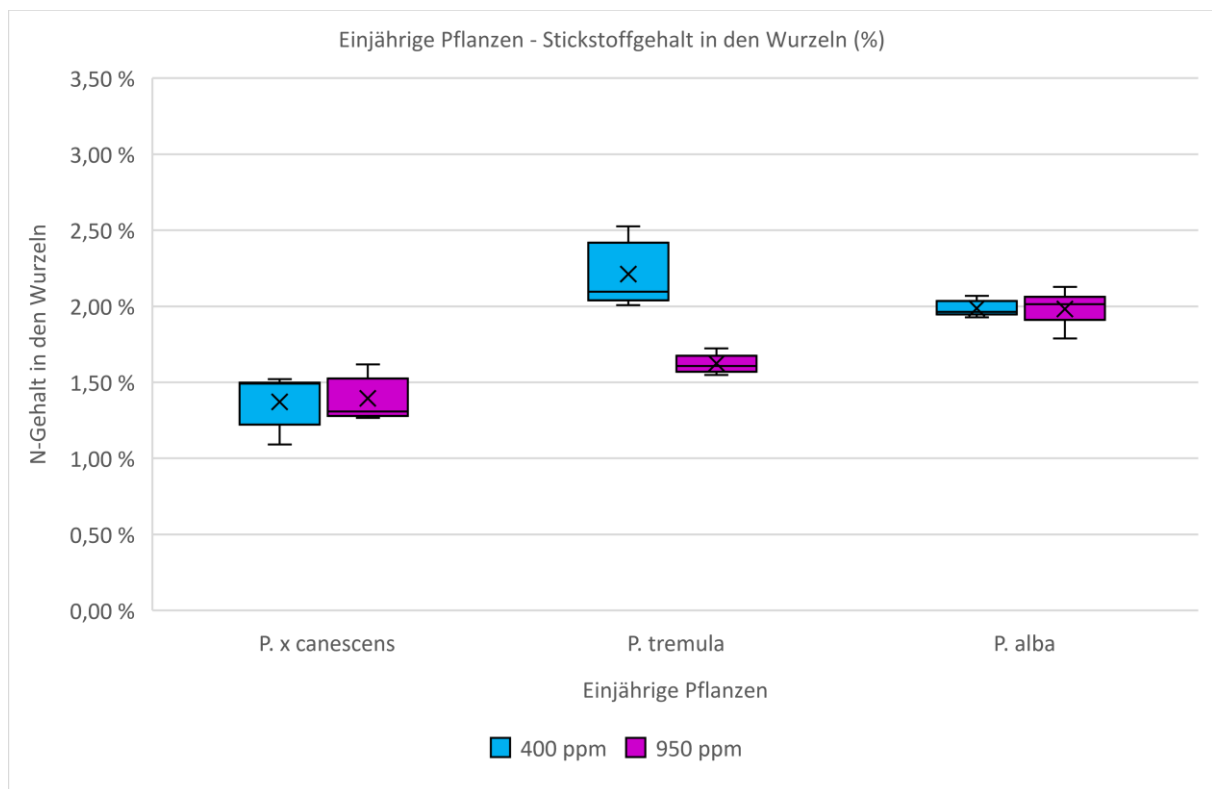


Abbildung 102: Stickstoffgehalt in den Wurzeln von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
N-Gehalt in Wurzeln	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	nein	0,818	-	-
<i>P. tremula</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,002	0,83	stark
<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,818	-	-
<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 400 ppm	ja	0,001	1,00	stark
<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,583	-	-
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	nein	0,092	-	-
<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,001	1,00	stark

Tabelle 114: Signifikanztest zwischen den Stickstoffgehalten in den Wurzeln von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

### 5.19.2 Stecklinge – N- Konzentration Wurzeln

Bei der Gruppe der Stecklinge hatte eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration teilweise einen signifikanten Einfluss auf die N- Konzentration in den Wurzeln der Pflanzen (Tabelle 115), (Abbildung 103).

Bei der Hybridpappel *Populus x canadensis* waren die Unterschiede zwischen den mit  $CO_2$  begasten und unbegasten Pflanzen signifikant. Die Pflanzen der Kontrollgruppe

hatten dabei eine durchschnittliche N- Konzentration von 1,99 %. Um 0,36 %P geringer waren die N- Konzentrationen bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen, die bei 1,63 % gelegen haben.

Auch bei *Populus deltoides* waren die Unterschiede deutlich, wobei die begasten Pflanzen eine um 0,60 %P höhere N- Konzentration hatten als die Kontrollgruppe. Dabei hatten die Pflanzen, die Normalbedingungen ausgesetzt waren, eine N- Konzentration von 2,10 %. Die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen hatten dagegen eine N- Konzentration von 2,70 % in den Wurzeln.

Bei *Populus nigra* waren dagegen keine signifikanten Unterschiede bei der N- Konzentration, abhängig von den Versuchsbedingungen, festgestellt worden. Hier hatten die Pflanzen der Kontrollgruppe mit 1,98 % eine etwas höhere N- Konzentration (+0,13 %P) als die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen, die eine N- Konzentration von 1,85 % hatten.

Beim Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus canadensis* und den Arten *Populus nigra* und *Populus deltoides* sind nur wenig Unterschiede bei der N- Konzentration in den Wurzeln der Pflanzen beobachtet worden (Tabelle 115).

Beim Vergleich zwischen *Populus x canadensis* und der Art *Populus deltoides* sind unter Umgebungsbedingungen keine Unterschiede zwischen beiden Arten beobachtet worden. Hier hatte *Populus deltoides* um 0,11 %P höhere N- Konzentrationen als die Hybridpappeln. Deutlich größer waren die Unterschiede unter erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$ . Mit einem Unterschied von 1,07 %P haben die Pflanzen der Art *Populus deltoides* eine höhere N- Konzentration in den Wurzeln gehabt als die Hybridpappeln.

Zwischen *Populus x canadensis* und *Populus nigra* sind bei beiden Versuchsbedingungen keine Unterschiede bei der N- Konzentration beobachtet worden. Unter Umgebungsbedingungen hatten die Hybridpappeln eine um 0,01 %P höhere N- Konzentration als die Art *Populus nigra*. Unter erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  waren die N- Konzentrationen von *Populus nigra* wiederum höher (+0,22 %P), wobei auch hier kein signifikanter Unterschied festgestellt werden konnte.

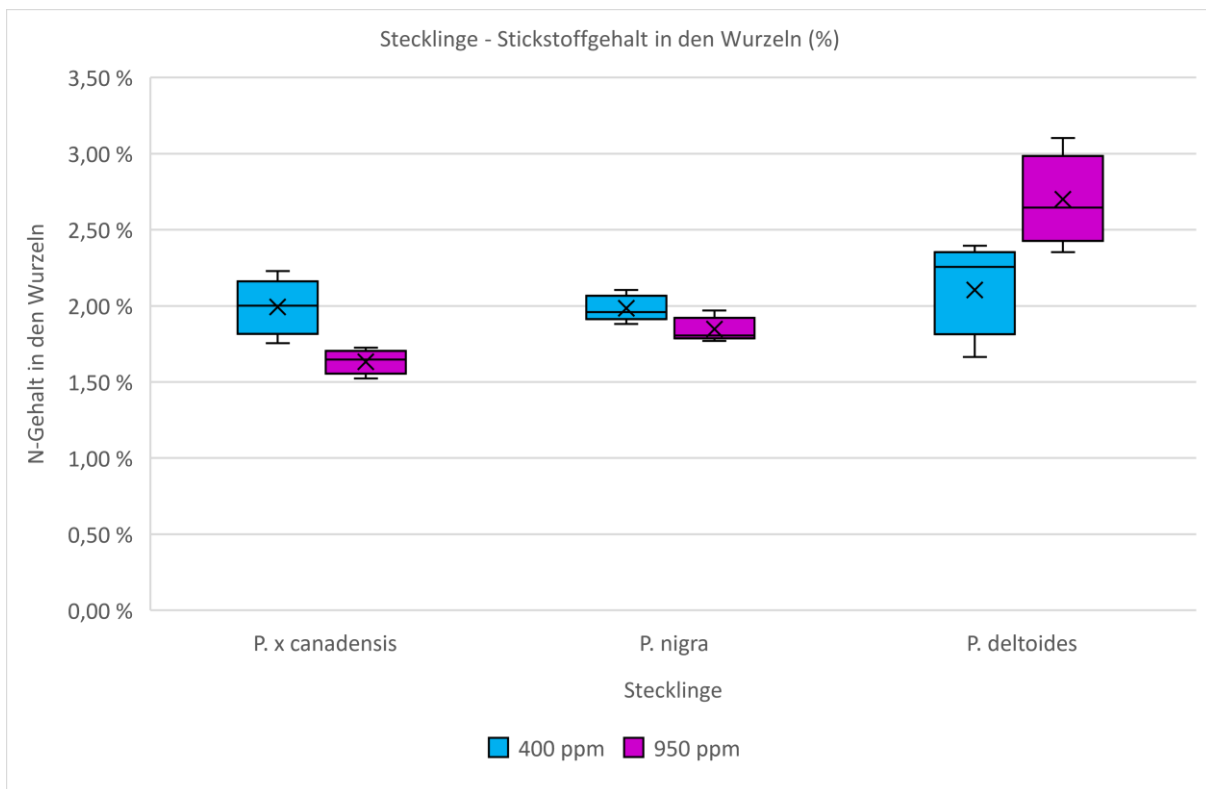


Abbildung 103: Stickstoffgehalt in den Wurzeln von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
N- Gehalt in Wurzeln	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,002	0,83	stark
<i>P. deltooides</i> 400 ppm < <i>P. deltooides</i> 950 ppm	ja	0,026	0,64	stark
<i>P. nigra</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,093	-	-
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. deltooides</i> 400 ppm	nein	0,519	-	-
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. deltooides</i> 950 ppm	ja	0,000	1,00	stark
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 400 ppm	nein	0,519	-	-
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,155	-	-

Tabelle 115: Signifikanztest zwischen den Stickstoffgehalten in den Wurzeln von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm)

## 5.20 Elementaranalyse – C/N- Verhältnis Stamm

### 5.20.1 Einjährige Pflanzen – C/N- Verhältnis Stamm

Eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre hatte bei allen einjährigen Pflanzengruppen keinen signifikanten Einfluss auf das C/N-Verhältnis im Holz (Tabelle 116), (Abbildung 104).

Bei der Hybridpappel *Populus x canescens* hat sich das C/N- Verhältnis zwischen den begasten und unbegasten Pflanzengruppen nur tendenziell unterschieden. Dabei hatten die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen ein C/N- Verhältnis von 111,35 und war somit um 12,46 % niedriger als bei den Kontrollpflanzen, bei dem das C/N- Verhältnis durchschnittlich bei 127,21 gelegen hat.

Auch bei *Populus tremula* waren die Unterschiede beim C/N- Verhältnis, abhängig von dem  $CO_2$ - Gehalt, nur geringfügig. Dabei hatten die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen ein C/N- Verhältnis von 158,66. Bei Kontrollpflanzen war das C/N- Verhältnis um 26,68 % niedriger als bei den begasten Pflanzen und lag bei 125,24. Dabei war die Spannweite der Messergebnisse bei der begasten Gruppe deutlich höher.

Ebenfalls waren die Unterschiede bei der Art *Populus alba* sehr gering. Hier hatten die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen ein durchschnittliches C/N- Verhältnis von 141,69 und war um 20,76 % höher als bei den Kontrollpflanzen, bei denen das C/N- Verhältnis bei 141,69 gelegen hat.

Auch beim Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canescens* und den Arten *Populus tremula* und *Populus alba* sind keine signifikanten Unterschiede bei den C/N Verhältnissen im Stamm der Pflanzen beobachtet worden (Tabelle 116).

Beim Vergleich zwischen *Populus x canescens* und *Populus tremula* waren bei beiden Versuchsbedingungen die C/N- Verhältnisse sehr ähnlich. Unter Umgebungsbedingungen war das C/N- Verhältnis von *Populus tremula* um 1,54 % niedriger als bei den Hybridpappeln. Bei erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  waren wiederum die C/N- Verhältnisse von *Populus tremula* um 42,49 % höher als bei *Populus x canescens*.

Beim Vergleich zwischen *Populus x canescens* und *Populus alba* waren ähnliche Ergebnisse ermittelt worden. Hier hatte *Populus alba* unter Umgebungsbedingungen um 7,76 % geringere C/N- Verhältnisse als *Populus x canescens*. Unter erhöhtem  $CO_2$  waren wiederum die durchschnittlichen C/N- Verhältnisse der Art *Populus alba* um 27,25 % höher als bei den Hybridpappeln.

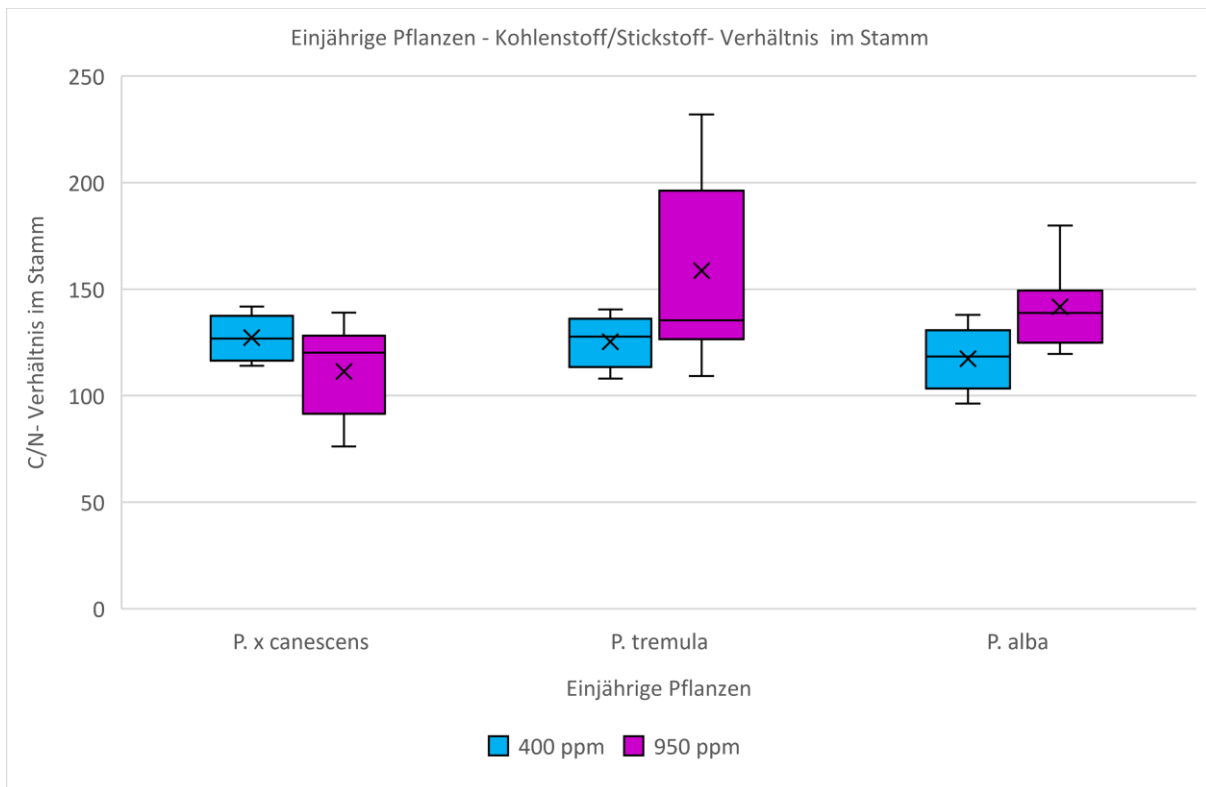


Abbildung 104: C/N- Verhältnis im Stamm von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
C/N- Verhältnis Stamm	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P.x canescens</i> 950 ppm	nein	0,485	-	-
<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,310	-	-
<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,065	-	-
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	nein	0,484	-	-
<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,143	-	-
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	nein	0,484	-	-
<i>P.x canescens</i> 950 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,143	-	-

Tabelle 116: Signifikanztest zwischen den C/N- Verhältnissen in den Stämmen von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration (950 ppm)

### 5.20.2 Stecklinge – C/N- Verhältnis Stamm

Bei der Pflanzengruppe der Stecklinge hatte eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration in der Atmosphäre zum Teil signifikante Auswirkungen auf das C/N- Verhältnis der Pflanzen (Tabelle 117), (Abbildung 105).

Bei der Hybridpappel *Populus x canescens* waren die Unterschiede beim C/N- Verhältnis, abhängig von den Umgebungsbedingungen, signifikant. Dabei hatten die Kontrollpflanzen ein durchschnittliches C/N- Verhältnis von 68,74 bei einer Spannweite

von 42,81. Deutlich höher waren die Ergebnisse den begasten Pflanzen, deren durchschnittliches C/N- Verhältnis bei 114,34 gelegen hat und um 66,34 % höher war als bei den Kontrollpflanzen. Die Spannweite dieser Gruppe war wiederum deutlich geringer und lag bei 20,96.

Auch bei *Populus deltoides* waren die Unterschiede signifikant. Hier war das C/N-Verhältnis der Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, um 102,36 % höher als bei den Kontrollpflanzen. Die Kontrollpflanzen hatten dabei ein durchschnittliches C/N-Verhältnis von 29,59. Deutlich höher war das C/N Verhältnis bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen, das hier bei 59,88 gelegen hat.

Bei der Art *Populus nigra* gab es bei den Messergebnissen kaum Unterschiede. Die begasten Pflanzen hatten dabei ein durchschnittliches C/N- Verhältnis von 58,35 und war um 4,04 % höher als bei den Kontrollpflanzen, bei denen das C/N- Verhältnis 56,09 betragen hat. Auch die Spannweite der Ergebnisse war bei beiden Gruppen auf einem ähnlichen Niveau.

Beim Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canadensis* und den Arten *Populus nigra* und *Populus deltoides* sind ebenfalls zum Teil signifikante Unterschiede beobachtet worden (Tabelle 117).

Dabei haben sich bei beiden Versuchsbedingungen die C/N- Verhältnisse der Arten *Populus x canadensis* und *Populus deltoides* signifikant unterschieden. Besonders unter Umgebungsbedingungen waren die Unterschiede sehr stark, wobei *Populus deltoides* um 56,95 % geringere C/N- Verhältnisse hatte als die Hybridpappeln. Unter erhöhten  $CO_2$ - Bedingungen waren die Unterschiede ebenfalls stark, jedoch im Vergleich etwas schwächer. Dabei hatte *Populus deltoides* ein um 47,63 % geringeres C/N- Verhältnis als *Populus x canadensis*.

Zwischen der Hybridpappel und *Populus nigra* sind nur unter erhöhten  $CO_2$ - Bedingungen signifikante Unterschiede festgestellt worden. Unter Umgebungsbedingungen hatte *Populus nigra* nur um 18,42 % geringere C/N-Verhältnisse im Stamm als die Hybridpappeln. Unter erhöhtem  $CO_2$  waren die Unterschiede deutlich höher, wobei die C/N- Verhältnisse von der Art *Populus nigra* um 48,97 % geringer waren als bei *Populus x canadensis*.

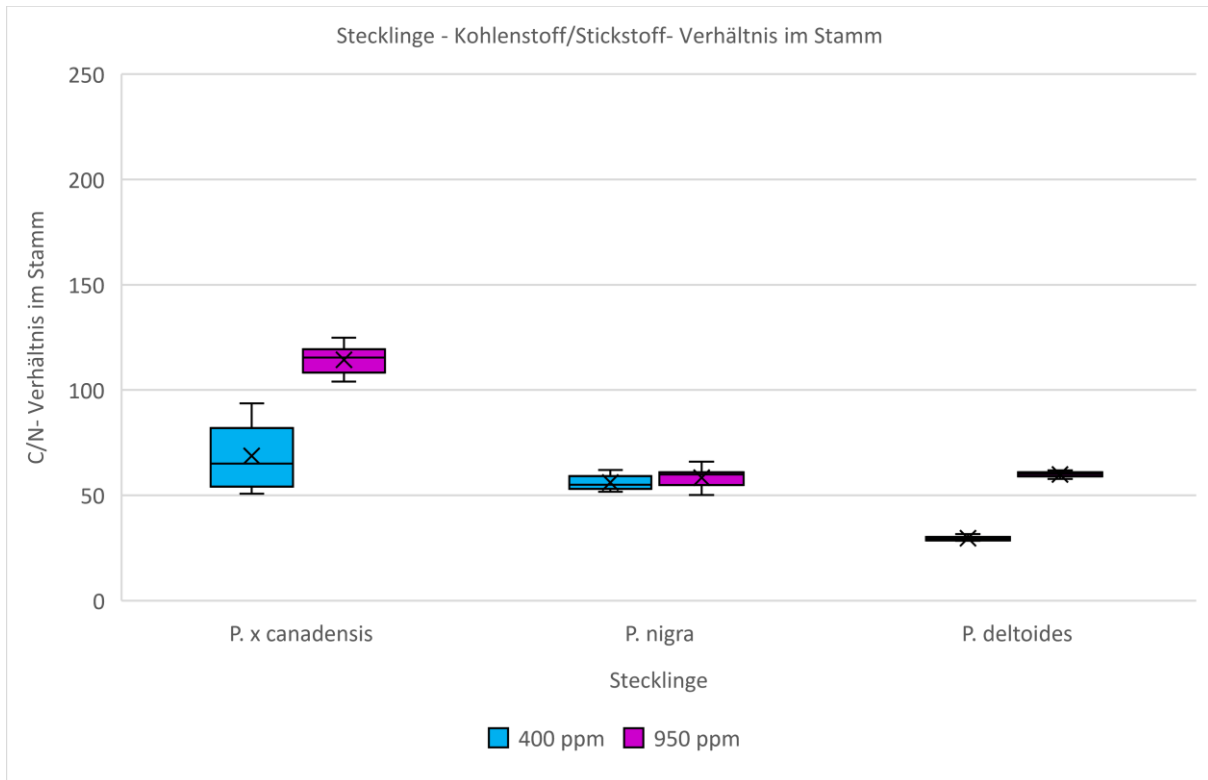


Abbildung 105: C/N- Verhältnis im Stamm von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
C/N- Verhältnis Stamm	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,002	0,83	stark
<i>P. deltooides</i> 400 ppm < <i>P. deltooides</i> 950 ppm	ja	0,029	0,81	stark
<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,522	-	-
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. deltooides</i> 400 ppm	ja	0,010	0,92	stark
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltooides</i> 950 ppm	ja	0,044	0,61	stark
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm > <i>P. nigra</i> 400 ppm	nein	1,000	-	-
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,007	0,87	stark

Tabelle 117: Signifikanztest zwischen den C/N- Verhältnissen in den Stämmen von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration (950 ppm)

## 5.21 Elementaranalyse – C/N- Verhältnis Blatt

### 5.21.1 Einjährige Pflanzen – C/N- Verhältnis Blatt

Eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration in der Atmosphäre hatte teilweise einen signifikanten Einfluss auf das C/N- Verhältnis in den Blättern der Pflanzen (Tabelle 118), (Abbildung 106).

Bei der Hybridpappel *Populus x canescens* hatten die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen ein durchschnittliches C/N- Verhältnis von 21,34, das um 47,01 % höher war als bei den Kontrollpflanzen. Bei den Pflanzen, die Umgebungsbedingungen ausgesetzt waren, lag das C/N- Verhältnis bei 14,52. Dabei war die Spannweite der Messergebnisse bei den unbegasten Pflanzen deutlich geringer.

Bei *Populus tremula* hatte eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration keinen signifikanten Einfluss auf das C/N- Verhältnis im Blatt. Dabei hatten die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen ein durchschnittliches C/N- Verhältnis von 14,59, das um 12,92 % höher war als bei den Kontrollpflanzen, deren C/N- Verhältnis bei 12,92 gelegen hat.

Bei *Populus alba* waren die Unterschiede signifikant. Die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen hatten ein durchschnittliches C/N- Verhältnis von 18,71 und war um 23,54 % höher als bei den Blättern der unbegasten Pflanzen. Deren C/N- Verhältnis lag bei 18,71.

Beim Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canescens* und den Arten *Populus tremula* und *Populus nigra* sind nur vereinzelt signifikante Unterschiede beim C/N- Verhältnis beobachtet worden (Tabelle 118).

Beim Vergleich zwischen Hybridpappel und *Populus tremula* waren nur unter erhöhten  $CO_2$ - Bedingungen die C/N- Verhältnisse in den Blättern signifikant unterschiedlich. Unter Umgebungsbedingungen lagen die Messwerte beider Arten sehr nah beieinander, wobei das C/N- Verhältnis bei *Populus tremula* um 11,03 % geringer war als bei den Hybridpappeln. Unter erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  waren die Unterschiede signifikant. Hier hatte *Populus tremula* ein um 31,66 % geringeres C/N- Verhältnis als *Populus x canescens*.

Beim Vergleich zwischen *Populus x canescens* und *Populus alba* waren unter Umgebungsbedingungen und unter erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  keine signifikanten Unterschiede bei den C/N- Verhältnissen in den Blättern beobachtet worden. Dabei hatte *Populus alba* unter Umgebungsbedingungen um 4,30 % höhere C/N- Verhältnisse als die Hybridpappeln. Unter erhöhten  $CO_2$ - Bedingungen waren wiederum die C/N- Verhältnisse in den Blättern von *Populus alba* um 12,36 % niedriger als die der Art *Populus x canescens*. Die Unterschiede waren nicht signifikant.



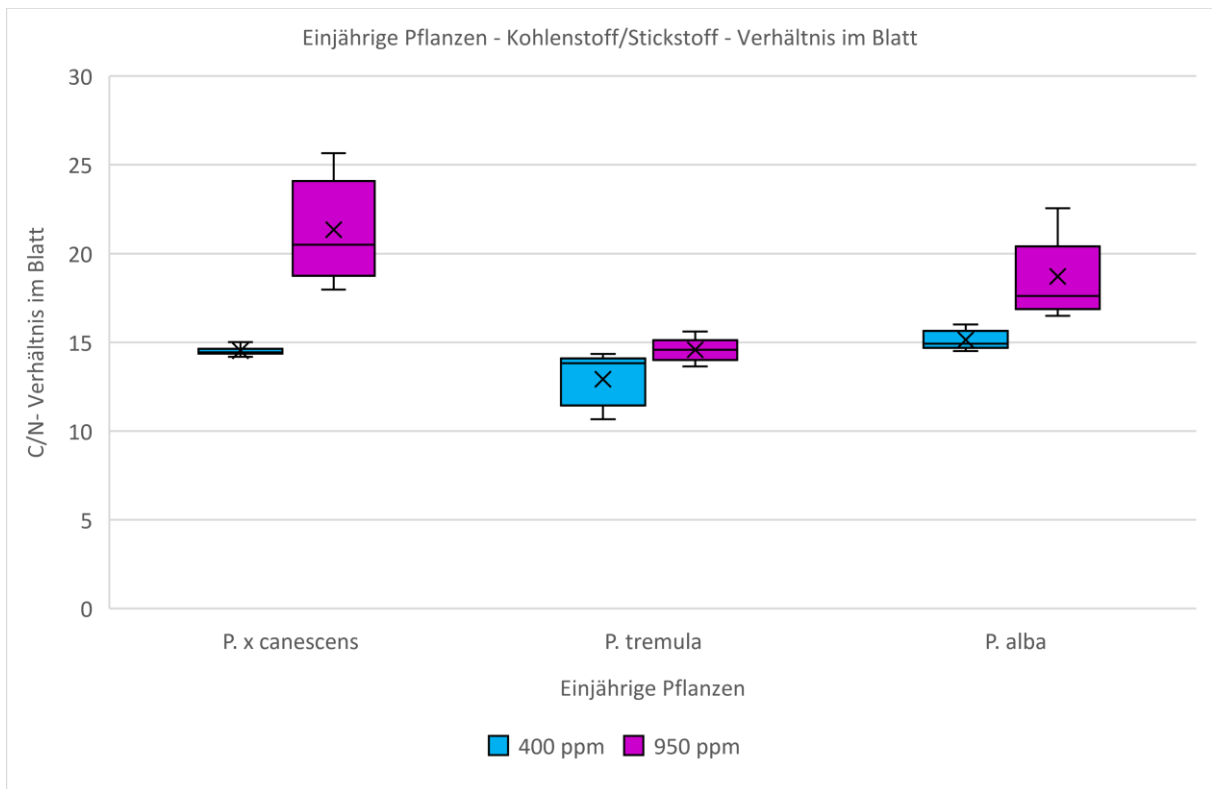


Abbildung 106: C/N- Verhältnis im Blatt von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO<sub>2</sub>- Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
C/N- Verhältnis Blatt	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canescens</i> 400 ppm < <i>P.x canescens</i> 950 ppm	ja	0,002	0,83	stark
<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,093	-	-
<i>P. alba</i> 400 ppm < <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,002	0,83	stark
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	nein	0,092	-	-
<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,002	0,98	stark
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	nein	0,529	-	-
<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,838	-	-

Tabelle 118: Signifikanztest zwischen den C/N- Gehältern in den Blättern von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter CO<sub>2</sub>- Konzentration (950 ppm)

### 5.21.2 Stecklinge – C/N- Verhältnis Blatt

Bei der Gruppe der Stecklinge sind zum Teil signifikante Auswirkungen durch eine erhöhte CO<sub>2</sub>- Konzentration auf das C/N- Verhältnis in den Blättern der Pflanzen beobachtet worden (Tabelle 119), (Abbildung 107).

Bei der Hybridpappel *Populus x canadensis* waren durch eine erhöhte CO<sub>2</sub>- Konzentration die C/N- Verhältnisse in den Blättern der mit CO<sub>2</sub> begasten Pflanzen signifikant höher als bei der Kontrollgruppe. Dabei hatten die mit CO<sub>2</sub> begasten

Pflanzen ein durchschnittliches C/N- Verhältnis von 12,20, das um 43,51 % höher war als bei den Kontrollpflanzen. Diese hatten ein durchschnittliches C/N- Verhältnis von 8,5.

Auch bei der Art *Populus nigra* sind durch eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration signifikante Unterschiede beim C/N- Verhältnis der Blätter beobachtet worden. Hier waren die C/N- Verhältnisse der Kontrollpflanzen deutlich geringer als bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen. Die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen hatten ein durchschnittliches C/N- Verhältnis von 11,76, das um 41,47 % höher war als bei den Kontrollpflanzen, die ein durchschnittliches C/N Verhältnis von 8,31 gehabt haben. Die Messergebnisse der Kontrollpflanzen hatten wiederum eine deutlich höhere Spannweite als die Gruppe der begasten Pflanzen.

Nur geringe Unterschiede sind bei der Art *Populus deltoides* beobachtet worden. Hier hatten die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen ein C/N- Verhältnis von 13,05, das um 41,66 % höher war als bei den unbegasten Pflanzen, deren C/N- Verhältnis durchschnittlich bei 9,21 gelegen hat. Das erhöhte  $CO_2$  hatte keinen signifikanten Einfluss auf das C/N- Verhältnis in den Blättern.

Die Vergleiche zwischen der Hybridpappel *Populus x canadensis* und den Arten *Populus nigra* und *Populus deltoides* haben ergeben das bei beiden Versuchsbedingungen keine Unterschiede beobachtet worden sind (Tabelle 119).

Beim direkten Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canadensis* und *Populus nigra* waren unter beiden Bedingungen die Unterschiede ähnlich niedrig. Unter Umgebungsbedingungen waren die C/N- Verhältnisse bei *Populus nigra* um 2,18 % geringer als bei den Hybridpappeln. Unter erhöhtem  $CO_2$  waren die Unterschiede etwas höher und lagen bei 3,57 %.

Beim Vergleich zwischen *Populus x canadensis* und der Art *Populus deltoides* waren die C/N- Verhältnisse in den Blättern der Pappeln unter beiden Bedingungen tendenziell höher als bei den Hybridpappeln. Dabei hatte *Populus deltoides* unter Normalbedingungen um 8,36 % höhere C/N- Verhältnisse als die Hybridpappel. Unter erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  betrug der Unterschied 6,97 % und war damit etwas niedriger.

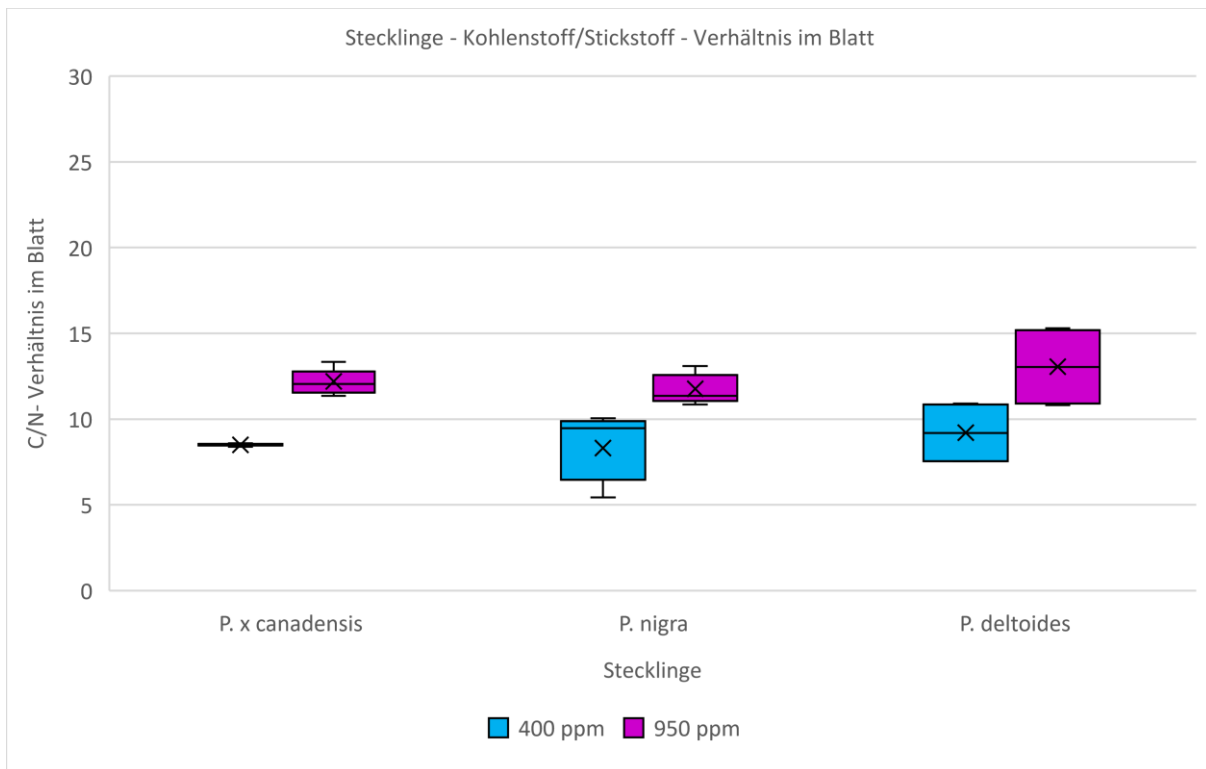


Abbildung 107: C/N- Verhältnis im Blatt von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
C/N- Verhältnis Blatt	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,002	0,83	stark
<i>P. deltoides</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,114	-	-
<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,002	0,83	stark
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 400 ppm	nein	0,790	-	-
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,656	-	-
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	nein	0,790	-	-
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,656	-	-

Tabelle 119: Signifikanztest zwischen den C/N- Verhältnissen in den Blättern von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration (950 ppm)

## 5.22 Elementaranalyse – C/N- Verhältnis Wurzeln

### 5.22.1 Einjährige Pflanzen – C/N- Verhältnis Wurzeln

Bei den einjährigen Pflanzen hatte eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration zum Teil sehr unterschiedliche Auswirkungen auf das C/N- Verhältnis der Wurzeln (Tabelle 120), (Abbildung 108).

Beispielweise sind bei der Hybridpappel *Populus x canescens* keine Auswirkungen auf das C/N- Verhältnis in den Wurzeln durch eine erhöhte  $CO_2$ - Verhältnis beobachtet worden. Dabei hatten die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen ein durchschnittliches C/N- Verhältnis von 33,13, das um 3,25 % niedriger war als das C/N- Verhältnis der Kontrollpflanzen, das hier bei 34,25 gelegen hat.

Bei der Art *Populus tremula* ist wiederum ein signifikanter Einfluss von erhöhtem  $CO_2$  auf das C/N- Verhältnis der Pflanzen beobachtet worden. Bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen hat das durchschnittliche C/N- Verhältnis bei 26,84 gelegen und war um 31,28 % höher als bei den Kontrollpflanzen, deren Durchschnitt bei 20,45 gelegen hat. Bei *Populus alba* waren die C/N- Verhältnisse der mit  $CO_2$  begasten und unbegasten Pflanzen sehr ähnlich und haben sich nicht signifikant voneinander unterschieden. Die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen hatten ein durchschnittliches C/N- Verhältnis von 22,34, das um 1,90 % niedrigerer war als das C/N- Verhältnis der Kontrollpflanzen, das durchschnittlich bei 22,78 gelegen hat.

Beim Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canescens* und den Arten *Populus tremula* und *Populus alba* sind zum Teil durch das erhöhte  $CO_2$  signifikante Unterschiede zwischen den Arten beobachtet worden (Tabelle 120).

Beim direkten Vergleich zwischen *Populus x canescens* und *Populus tremula* waren unter Normalbedingungen die C/N- Verhältnisse in den Wurzeln von *Populus tremula* um 40,3 % signifikant geringer als bei den Hybridpappeln. Unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration in der Atmosphäre waren die C/N- Verhältnis beider Arten sehr ähnlich. Auch hier war das durchschnittliche C/N- Verhältnis in den Wurzeln von *Populus tremula* um 18,99 % niedriger als bei den Hybridpappeln, wodurch die Unterschiede nicht signifikant waren.

Beim direkten Vergleich zwischen den Arten *Populus x canescens* und *Populus alba* sind signifikante Einflüsse durch eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration auf das C/N- Verhältnis beobachtet worden. Unter Umgebungsbedingungen haben sich die C/N- Verhältnisse beider Gruppen nicht signifikant voneinander unterschieden. Dabei hatte *Populus alba* um 33,49 % geringere C/N- Verhältnisse als *Populus x canescens*. Auch unter erhöhten  $CO_2$ - Bedingungen war das C/N- Verhältnis von *Populus alba* niedriger als bei den Hybridpappeln, wobei der Unterschied 32,56 % betragen hat.

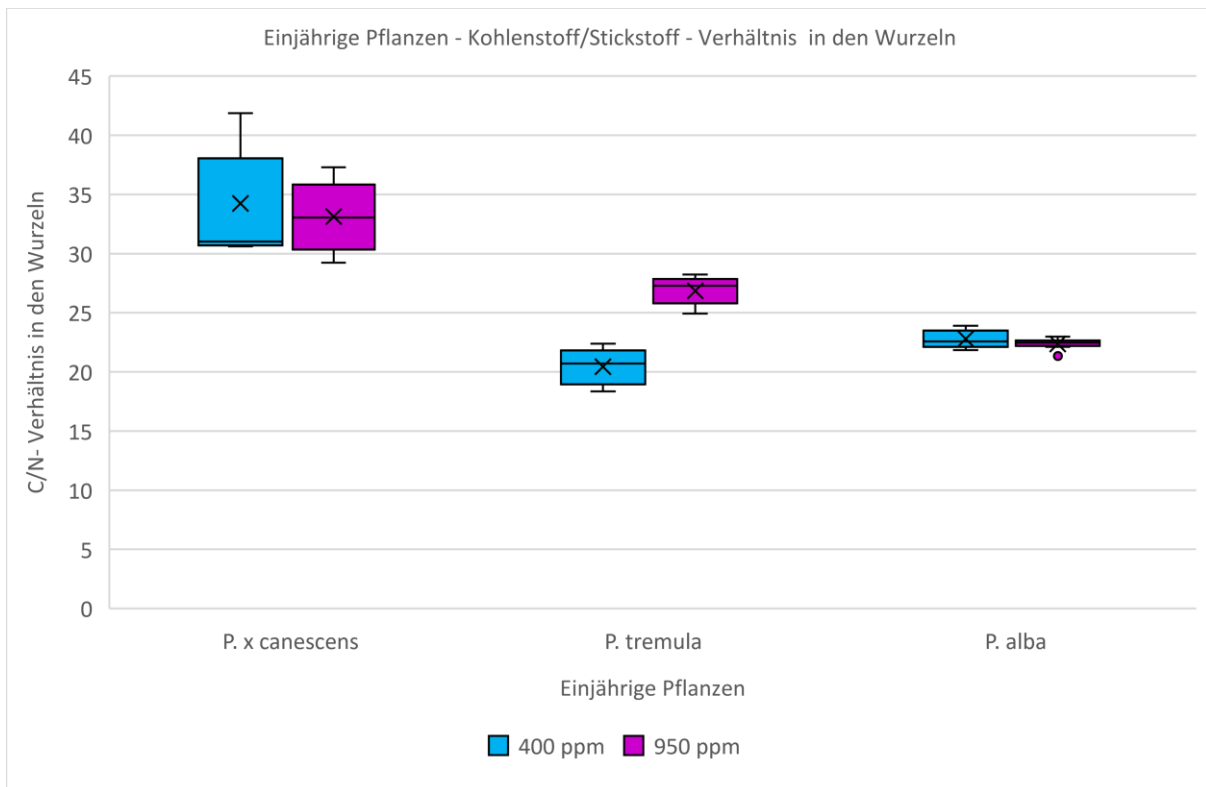


Abbildung 108: C/N- Verhältnis in den Wurzeln von einjährigen Pflanzen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
C/N- Verhältnis Wurzeln	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P.x canescens</i> 950 ppm	nein	0,818	-	-
<i>P. tremula</i> 400 ppm < <i>P. tremula</i> 950 ppm	ja	0,002	0,83	stark
<i>P. alba</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 950 ppm	nein	0,966	-	-
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. tremula</i> 400 ppm	ja	0,001	1,06	stark
<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. tremula</i> 950 ppm	nein	0,155	-	-
<i>P.x canescens</i> 400 ppm > <i>P. alba</i> 400 ppm	nein	0,092	-	-
<i>P.x canescens</i> 950 ppm > <i>P. alba</i> 950 ppm	ja	0,000	1,12	stark

Tabelle 120: Signifikanztest zwischen den C/N- Verhältnis in den Wurzeln von einjährigen Pflanzen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration (950 ppm)

### 5.22.2 Stecklinge – C/N- Gehalt Wurzeln

Bei der Gruppe der Stecklinge sind auch hier durch eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration zum Teil signifikante Auswirkungen auf die C/N- Konzentration in den Wurzeln der Pflanzen beobachtet worden (Tabelle 121), (Abbildung 109).

Bei der Hybridpappel *Populus x canadensis* hat sich das C/N- Verhältnis der mit  $CO_2$  Pflanzen signifikant von der Kontrollgruppe unterschieden. Dabei hatten die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen ein durchschnittliches C/N- Verhältnis von 28,70 und war um 26,56 % höher als bei der Kontrollgruppe, deren durchschnittlicher Wert bei 22,68 gelegen hat.

Auch bei *Populus nigra* sind signifikante Einflüsse durch eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration beobachtet worden. Die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen hatten ein durchschnittliches C/N- Verhältnis von 25,87, dass um 6,88 % höher war als bei den Kontrollpflanzen. Die unbegasten Pflanzen hatten ein durchschnittliches C/N- Verhältnis von 24,20.

Bei der Art *Populus deltoides* sind keine signifikanten Auswirkungen auf das C/N- Verhältnis der Pflanzen beobachtet worden. Dabei hatten die mit  $CO_2$  begasten Pflanzen ein durchschnittliches C/N- Verhältnis von 19,34, das um 19,99 % geringer war als bei den Kontrollpflanzen, bei dem der Durchschnittswert bei 24,17 gelegen hat. Auch beim Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canadensis* und den beiden Arten *Populus deltoides* und *Populus nigra* ist zum großen Teil kein Einfluss einer erhöhten  $CO_2$ - Konzentration auf das C/N- Verhältnis der Wurzeln zwischen den Arten beobachtet worden (Tabelle 121).

Beim direkten Vergleich zwischen *Populus x canadensis* und *Populus deltoides* waren die C/N- Verhältnisse der beiden Arten unter Umgebungsbedingungen ähnlich. Dabei hatten die Pappeln der Art *Populus deltoides* ein um 6,59 % höheres C/N- Verhältnis als die Hybridpappeln. Unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration hatte *Populus deltoides* ein geringeres C/N- Verhältnis, dass um 32,61 % niedriger war. Dabei waren die Unterschiede signifikant.

Beim direkten Vergleich zwischen *Populus x canadensis* und *Populus nigra* sind bei beiden Versuchsbedingungen keine signifikanten Unterschiede beim C/N- Verhältnis zwischen beiden Arten beobachtet worden. Unter Umgebungsbedingungen hatte *Populus nigra* ein um 6,71 % höheres C/N- Verhältnis als die Hybridpappeln. Unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration waren wiederum die C/N- Verhältnisse von *Populus nigra* um 9,88 % geringer.

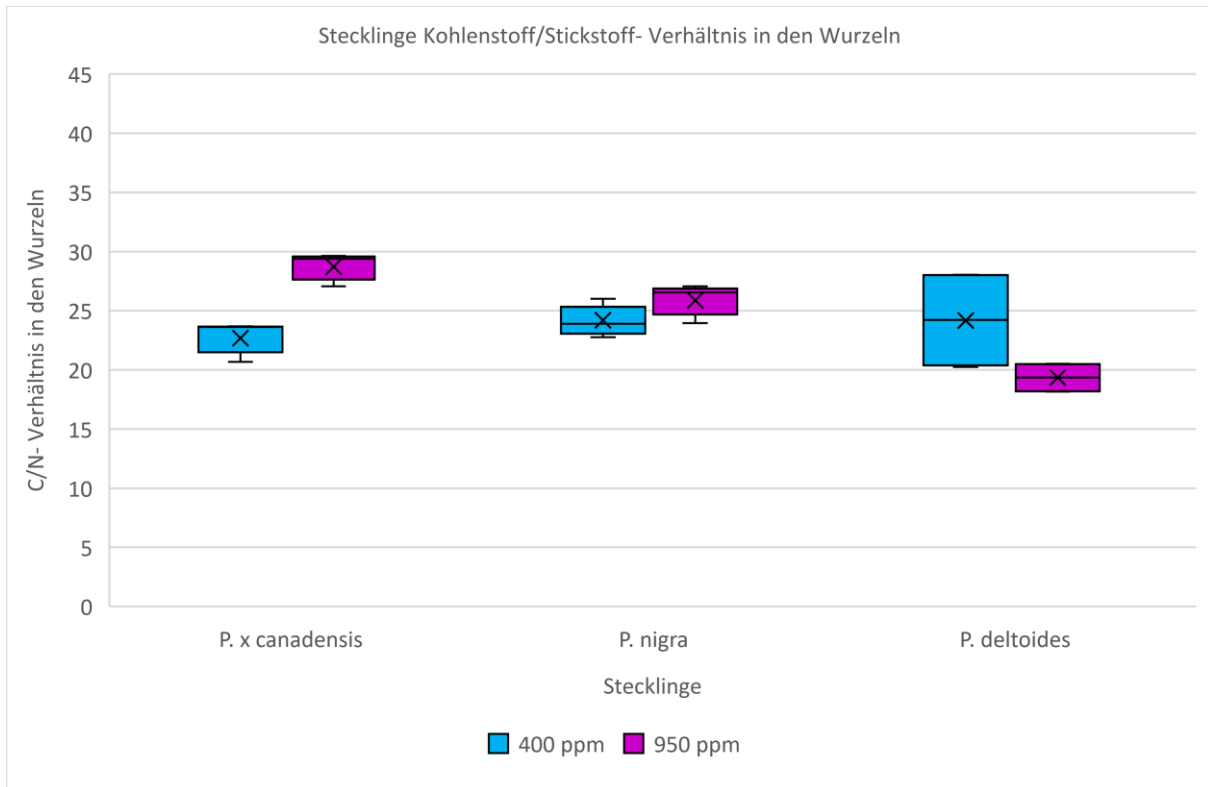


Abbildung 109: C/N- Verhältnis in den Wurzeln von Stecklingen, die unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration (950 ppm) ausgesetzt waren

Signifikanztest				
C/N-Verhältnis Wurzeln	Signifikanz	Exakte Signifikanz	r	Effektstärke
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P.x canadensis</i> 950 ppm	ja	0,002	0,83	stark
<i>P. deltoides</i> 400 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	nein	0,343	-	-
<i>P. nigra</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 950 ppm	ja	0,041	0,60	stark
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. deltoides</i> 400 ppm	nein	0,479	-	-
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. deltoides</i> 950 ppm	ja	0,001	1,11	stark
<i>P.x canadensis</i> 400 ppm < <i>P. nigra</i> 400 ppm	nein	0,479	-	-
<i>P.x canadensis</i> 950 ppm > <i>P. nigra</i> 950 ppm	nein	0,118	-	-

Tabelle 121: Signifikanztest zwischen den C/N- Verhältnissen in den Wurzeln von Stecklingen unter Umgebungsbedingungen (400 ppm) und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration (950 ppm)

## 5.23 Lignin- und Kohlenhydratgehalte

### 5.23.1 Einjährige Pflanzen – Lignin- und Kohlenhydratgehalte *Populus x canescens*

Bei der Gruppe der einjährigen Pflanzen hatte eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration zum Teil unterschiedliche Einflüsse auf mengenmäßige Verteilung des Lignins und der verschiedenen Holzzucker im Stamm der Pflanzen (Tabelle 122).

Bei der Hybridpappel *Populus x canescens* waren wenig Effekte durch eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration auf die prozentuale Verteilung der Lignin- und Kohlenhydratmenge im Holz beobachtet worden (Tabelle 122).

Dabei haben sich die Lignin- Anteile der Pflanzen beider Gruppen tendenziell unterschieden, wobei die Ligningehälter bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen nicht signifikant höher waren. Der Anteil des säurelöslichen Lignins war dagegen bei den Kontrollpflanzen tendenziell höher. Die Unterschiede waren signifikant. Bei der Menge der Holzzucker hatte eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration keinen Einfluss auf die prozentuale Verteilung im Holz.

Der Glucose- Anteil war bei den Kontrollpflanzen im direkten Vergleich zu den begasten Pflanzen tendenziell höher, jedoch ohne statistische Signifikanz. Der Xylose-Anteil hat sich nicht signifikant unterschieden, wobei dieser bei den begasten Pflanzen tendenziell höher war. Bei den Monosacchariden Galaktose und Arabinose haben sich die Anteile beider Gruppen nicht unterschieden. Die Mannose- Anteile haben sich tendenziell unterschieden und waren bei den begasten Pflanzen niedriger, jedoch nicht statistisch signifikant.

Beim Rhamnose- Anteil gab es zwischen den begasten Pflanzen und Kontrollpflanzen beider Gruppen keine Unterschiede und keine ermittelte Signifikanz. Bei der Gesamtsumme der vorhandenen Holzzucker sind tendenzielle Unterschiede festgestellt worden, die jedoch nicht signifikant waren.

Der Extraktgehalt war bei den begasten Pflanzen signifikant höher als bei den Kontrollpflanzen.



### 5.23.2 Einjährige Pflanzen – Lignin- und Kohlenhydratgehalte *Populus tremula*

Bei der Pappelart *Populus tremula* hatte eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration nur wenig Einflüsse auf die Anteile von verschiedenen Holzzuckern und Lignin im Holz (Tabelle 122).

Die Ligningehälter beider Gruppen haben durch eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre sich tendenziell voneinander unterschieden. Dabei waren die Unterschiede nicht signifikant.

Beim Anteil des säurelöslichen Lignins wurden keine Unterschiede zwischen beiden Gruppen festgestellt. Bei den Monosacchariden waren mehr Einflüsse durch das erhöhte  $CO_2$  erkennbar. So war der Glucose-Anteil bei den begasten Pflanzen signifikant höher als bei den Pflanzen der Kontrollgruppe.

Beim Xylose-Gehalt wurden zwischen beiden Gruppen tendenzielle Unterschiede erfasst, jedoch lag keine statistische Signifikanz vor.

Der Mannose- und Arabinose-Anteil haben sich tendenziell voneinander unterschieden, jedoch wurde keine statistische Signifikanz ermittelt.

Die Rhamnose-Anteile haben sich ebenfalls signifikant voneinander unterschieden, wobei die Unterschiede sehr klein waren. Ebenfalls bewirkte eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration eine Reduzierung der Galactose-Anteile im Holz. Dabei waren tendenzielle Unterschiede erfasst worden, die statistisch signifikant waren. Die erhöhte  $CO_2$ -Konzentration hatte dagegen bei der Gesamtsumme der Zucker einen signifikanten Einfluss, wobei die Unterschiede bei der Gesamtsumme bei den begasten Pflanzen höher war als bei den Pflanzen der Kontrollgruppe. Der Extraktgehalt hat sich tendenziell unterschieden. Es lag keine statistische Signifikanz vor.

### 5.23.3 *Einjährige Pflanzen – Lignin- und Kohlenhydratgehalte Populus alba*

Bei der Pappelart *Populus alba* hatte eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration wenig Einflüsse auf die prozentuale Verteilung der Lignin- und Kohlenhydratmenge im Holz (Tabelle 122).

So hatte das erhöhte  $CO_2$  in der Atmosphäre keinen signifikanten Einfluss auf die Ligningehälter im Holz. Hier haben die Werte beider Gruppen sich tendenziell unterschieden, wobei der Ligningehalt bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen höher war. Dagegen gab es beim Anteil des säurelöslichen Lignins signifikante Unterschiede. Die begasten Pflanzen hatten niedrigere Anteile von säurelöslichem Lignin als die Kontrollpflanzen.

Der Glucose- Anteil im Holz der Pflanzen hat sich durch eine erhöhte  $CO_2$ - Belastung in der Atmosphäre nicht signifikant verändert. Der Glucose- Anteil war bei den begasten Pflanzen tendenziell höher als bei den Kontrollpflanzen. Die Xylose- Anteile der Pflanzen beider Gruppen haben sich nicht signifikant voneinander unterschieden. Bei den restlichen Monosacchariden sind ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen den begasten und unbegasten Pflanzen beobachtet worden. Bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen war der Arabinose- und Galaktose- Anteil tendenziell höher. Der Rhamnose- und Mannose- Anteil war wiederum bei den begasten Pflanzen reduziert, wobei die Unterschiede nicht signifikant waren.

Beim Extraktgehalt wurden tendenzielle Unterschiede beobachtet. Zwischen der begasten und unbegasten Pflanzengruppe lag eine statistische Signifikanz vor, bei dem der Extraktgehalt der begasten Pflanzen niedriger war.

### 5.23.4 *Einjährige Pflanzen – Lignin- und Kohlenhydratgehalte Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen*

Beim Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canescens* und den Pappelarten *Populus tremula* und *Populus alba* sind unter Umgebungsbedingungen nur wenig signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen erfasst worden (Tabelle 123).

Zwischen *Populus x canescens* und *Populus tremula* gab es tendenzielle Unterschiede beim Gehalt vom Lignin und säurelöslichem Lignin im Holz, der jedoch nicht signifikant

war. Dabei war der Gehalt bei den Hybridpappeln tendenziell höher. Der Rhamnose-Gehalt war bei den Hybridpappeln ebenfalls tendenziell höher als bei der Art *Populus tremula*, jedoch waren auch hier die Unterschiede nicht signifikant. Dagegen war der Mannose- Gehalt bei den Hybridpappen tendenziell geringer als bei *Populus tremula*. Dabei waren die Unterschiede signifikant. Der Arabinose- Gehalt hat sich tendenziell unterschieden, jedoch lag zwischen den Anteilen beider Arten keine Signifikanz vor. Der Galactose- Gehalt war bei *Populus tremula* tendenziell höher. Dabei waren die Unterschiede signifikant. Die Xylose- Gehälter haben sich nicht signifikant voneinander unterschieden. Es wurden Tendenzen ermittelt, bei den der Xylose- Gehalt von *Populus tremula*- Individuen höher war. Der Glucose- Gehalt war bei den Hybridpappeln höher, jedoch lag keine Signifikanz zwischen beiden Arten vor. Auch wurden Unterschiede bei der Summe der Zucker und dem Extraktgehalt erfasst, die ebenfalls nicht signifikant waren.

Zwischen *Populus x canescens* und *Populus alba* wurden unter Umgebungsbedingungen ebenfalls nur wenig signifikante Unterschiede ermittelt.

Der Ligningehalt war bei den Hybridpappeln höher, jedoch bestand zwischen den Werten beider Arten keine statistische Signifikanz. Die Menge an säurelöslichem Lignin war bei den Hybridpappeln tendenziell höher, jedoch lag auch hier keine statistische Signifikanz vor. Auch der Rhamnose- Gehalt war bei den Hybridpappeln tendenziell höher. Die Unterschiede waren aber nicht signifikant. Es konnten Unterschiede bei der Menge an Glucose und Xylose zwischen beiden Arten ermittelt werden, die aber ebenfalls nicht signifikant waren. Tendenzielle Unterschiede wurden bei den Anteilen an Rhamnose und Mannose festgestellt werden, die nicht signifikant waren. Keine Unterschiede wurden bei den Anteilen von Arabinose und Galaktose zwischen den beiden Arten ermittelt.

Die Summe der Zucker war bei den Hybridpappeln geringer als bei *Populus alba*. Die Unterschiede waren signifikant. Der Extraktgehalt war wiederum bei den Hybridpappeln signifikant höher.

### 5.23.5 Einjährige Pflanzen – Lignin- und Kohlenhydratgehalte Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter $CO_2$ -Konzentration

Unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration waren die Unterschiede bei der prozentualen Verteilung der Lignin- und Kohlenhydratmenge im Holz zwischen Hybridpappeln und den Arten *Populus tremula* und *Populus alba* tendenziell höher.

Beim prozentualen Anteil von Lignin im Holz gab es zwischen der Hybridpappel *Populus x canescens* und der Pappelart *Populus tremula* Unterschiede.

Dadurch, dass unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration der Ligningehalt bei den Hybridpappeln gestiegen ist, und bei *Populus tremula* gesunken ist, waren die Unterschiede signifikant (Tabelle 123). Beim Anteil des säurelöslichen Lignins sind dagegen keine Unterschiede festgestellt worden, die signifikant waren.

Bei den prozentualen Anteilen der Monosaccharide waren Unterschiede beobachtet worden. Die Hybridpappeln hatten dabei unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration einen höheren Rhamnose-Anteil im Holz. Dadurch, dass bei *Populus tremula* dieser Anteil bei einer erhöhten  $CO_2$  Belastung gesunken ist, wurden tendenzielle Unterschiede erfasst, die statistisch signifikant waren.

Beim Mannose-Gehalt sind ebenfalls Unterschiede festgestellt worden. Hier bewirkte eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration eine Reduzierung des Mannose-Gehaltes im Holz der Hybridpappeln und eine gleichzeitige Steigerung bei der Art *Populus tremula*, wodurch signifikante Unterschiede zwischen den beiden Gruppen festgestellt werden konnten. Beim Arabinose-Anteil im Holz haben unter erhöhten  $CO_2$ -Bedingungen die prozentualen Anteile in den Pflanzen sich nicht unterschieden. Es lag keine statistische Signifikanz vor. Die Galactose-Anteile waren zwischen *Populus x canescens* und *Populus tremula* zwar signifikant verschieden, jedoch waren hier die Unterschiede nur sehr klein. Der Xylose-Anteil war bei der Pappelart *Populus tremula* tendenziell höher als bei den Hybridpappeln, jedoch lag keine statistische Signifikanz zwischen den Werten vor. Beim Glucose-Anteil waren Unterschiede zwischen *Populus x canescens* und *Populus tremula* erfasst worden, die statistisch signifikant waren. Dabei waren die Anteile bei *Populus tremula* höher als bei den Hybridpappeln. Auch die Summe der Zucker war bei der Art *Populus tremula* signifikant höher als bei den Hybridpappeln. Dagegen war der Extraktgehalt wiederum bei den Hybridpappeln signifikant höher.

Zwischen den Arten *Populus x canescens* und *Populus alba* sind weniger signifikante Unterschiede erfasst worden.

Der Gehalt vom Lignin und säurelöslichen Lignin war im direkten Vergleich bei den Hybridpappeln höher, jedoch waren die Unterschiede nicht signifikant.

Der Rhamnose- Anteil war bei den Hybridpappeln tendenziell höher als bei *Populus alba*. Die Unterschiede waren nicht signifikant. Dagegen war der Mannose- Gehalt bei *Populus alba* tendenziell höher als bei den Hybridpappeln. Es lag aber keine statistische Signifikanz vor. Beim Arabinose- Anteil lagen keine Unterschiede zwischen beiden Arten vor. Der Galactose- Anteil war bei *Populus alba* zwar tendenziell höher, jedoch lag auch hier keine statistische Signifikanz vor. Wiederum war bei den Hybridpappeln der Xylose- Anteil tendenziell höher, jedoch waren die Unterschiede nicht signifikant. Der Glucose- Anteil war bei der Hybridpappel *Populus x canescens* signifikant niedriger als bei der *Populus alba*. Ebenfalls war die Summe der Zucker bei den Hybridpappeln niedriger als bei *Populus alba*. Dabei waren die Unterschiede statistisch signifikant. Der Extraktgehalt war bei den Hybridpappeln signifikant höher als bei der Art *Populus alba*.

Einjährige Pflanzen	Säurelösliches Lignin (%)	Rückstand Lignin (%)	Monosaccharide						Summe Zucker (%)	Extraktgehalt (%)
			Rhamnose (%)	Mannose (%)	Arabinose (%)	Galaktose (%)	Xylose (%)	Glucose (%)		
<i>P. x canescens</i> 400	3,16 ↓*	20,45 ↑	0,41 ↑	1,66 ↓	0,28 ↑	0,60 ↑	14,69 ↑	40,25 ↓	57,89 ↓	5,63 ↑*
<i>P.x canescens</i> 950	3,00	20,53	0,42 ↑	1,48 ↓	0,29 ↑	0,61 ↑	15,00 ↑	39,40 ↓	57,19 ↓	8,17 ↑*
<i>P. tremula</i> 400	2,85 ↑	19,78 ↓	0,39 ↓*	2,24 ↑	0,36 ↓	0,76 ↓*	14,81 ↑	39,55 ↑*	58,10 ↑*	6,53 ↓
<i>P. tremula</i> 950	2,89	19,24	0,34 ↓*	2,32 ↑	0,29 ↓	0,66 ↓*	15,56 ↑	43,13 ↑*	62,31 ↑*	6,23 ↓
<i>P. alba</i> 400	3,05 ↓*	19,65 ↑	0,39 ↓	1,80 ↓	0,27 ↑	0,67 ↑	15,49 ↓	41,04 ↑	59,66 ↑	3,69 ↓*
<i>P. alba</i> 950	2,85	19,97	0,38 ↓	1,73 ↓	0,29 ↑	0,76 ↑	14,70 ↓	42,31 ↑	60,18 ↑	3,27 ↓*

Tabelle 122: Signifikanztest zwischen den Lignin- und Kohlenhydratanteil im Holz von unbegasteten (400 ppm) und begasteten (950 ppm) einjährigen Pflanzen

Einjährige Pflanzen	Säurelösliches Lignin	Rückstand Lignin	Monosaccharide						Summe Zucker	Extraktgehalt
			Rhamnose	Mannose	Arabinose	Galaktose	Xylose	Glucose		
<i>P. x canescens</i> 400	↑	↑	↑	↓*	↓	↓*	↓	↑	↓	↓
<i>P. tremula</i> 400										
<i>P. x canescens</i> 950	↑	↑*	↑*	↓*	↑	↓*	↓	↓*	↓*	↑*
<i>P. tremula</i> 950										
<i>P. x canescens</i> 400	↑	↑	↑	↓	↑	↓	↓	↓	↓*	↑*
<i>P. alba</i> 400										
<i>P. x canescens</i> 950	↑	↑	↑	↓	↑	↓	↑	↓*	↓*	↑*
<i>P. alba</i> 950										

Tabelle 123: Signifikanztest zwischen den Lignin- und Kohlenhydratanteil im Holz von Hybridpappeln und Elternarten (einjährige Pflanzen), unterschieden nach Versuchsbedingungen

### 5.23.6 Stecklinge – Lignin- und Kohlenhydratgehalte *Populus x canadensis*

Bei der Gruppe der Stecklinge sind zum Teil signifikante Einflüsse durch eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration auf die prozentuale Verteilung der Lignin- und Kohlenhydratmenge im Holz beobachtet worden (Tabelle 124).

Bei der Hybridpappel *Populus x canadensis* hatte eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration einen signifikanten Einfluss auf den Ligningehalt der Pflanzen. Dabei hatten die Pflanzen, die einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration ausgesetzt waren, tendenziell niedrigere Ligningehälter als die Kontrollpflanzen. Ähnliche Effekte wurden beim Gehalt des säurelöslichen Lignins beobachtet. Auch hier war der Gehalt bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen reduziert. Bei den Monosacchariden waren wechselhafte Ergebnisse beobachtet worden. Der Glucose-Anteil hat sich bei den Pflanzen, die einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration ausgesetzt waren, signifikant erhöht. Dabei wurden tendenzielle Unterschiede erfasst. Beim Xylose-Anteil im Holz konnten zwischen den begasten und unbegasten Pflanzen tendenzielle Unterschiede festgestellt werden, die aber nicht statistisch signifikant waren. Ebenfalls wurden bei den Monosacchariden Galactose und Arabinose keine Unterschiede festgestellt. Deren Gehälter haben sich nicht signifikant voneinander unterschieden. Beim Mannose-Anteil wurden tendenzielle Unterschiede gemessen, deren Werte sich nicht signifikant voneinander unterschieden haben. Beim Rhamnose-Anteil waren wiederum signifikante Effekte beobachtet worden, bei dem die Unterschiede sehr klein waren. Hier hat sich der Anteil durch eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre reduziert.

Bei der Gesamtsumme der Zucker waren zwischen begasten und unbegasten Pflanzen signifikante Unterschiede festgestellt worden. Die Pflanzen, die unter erhöhten  $CO_2$  ausgesetzt waren, hatten höhere Anteile als die Kontrollpflanzen. Beim Extraktgehalt hat sich der Anteil im Holz bei einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre tendenziell reduziert, wobei die Unterschiede signifikant waren.

### 5.23.7 Stecklinge – Lignin- und Kohlenhydratgehalte *Populus nigra*

Bei der Art *Populus nigra* konnten tendenzielle Unterschiede durch das erhöhte  $CO_2$  auf die prozentuale Verteilung der Lignin- und Kohlenhydratmenge im Holz beobachtet werden (Tabelle 124).

Unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration in der Atmosphäre war der Ligningehalt von *Populus nigra* signifikant höher als bei den Kontrollpflanzen. Dagegen ist der Anteil an säurelöslichem Lignin bei einer erhöhten  $CO_2$ - Konzentration gesunken, wobei keine Signifikanz vorgelegen hat. Der Glucose- Anteil im Holz hat sich durch eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration nicht signifikant verändert und war bei den begasten Pflanzen tendenziell höher. Der Xylose- Anteil war bei den Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, tendenziell niedriger als bei den Kontrollpflanzen. Hier hat eine statistische Signifikanz vorgelegen.

Beim Galactose- Anteil sind keine Unterschiede festgestellt worden. Es lag keine Signifikanz vor. Beim Arabinose- Anteil sind tendenzielle Unterschiede festgestellt worden, bei dem der Anteil bei den Kontrollpflanzen höher war, jedoch lag bei dem Vergleich keine statistische Signifikanz vor. Die Mannose- Konzentration hat sich wiederum bei einer  $CO_2$ - Behandlung signifikant geändert, wobei die Konzentration bei den begasten Pflanzen tendenziell niedriger war. Beim Rhamnose- Gehalt sind keine Unterschiede zwischen den beiden Gruppen festgestellt worden. Es lag keine Signifikanz vor. Bei der Summe der Zucker sind tendenzielle Unterschiede festgestellt worden, die jedoch nicht statistisch signifikant waren. Der Extraktgehalt der begasten Pflanzen war zwar tendenziell niedriger als bei den Kontrollpflanzen, jedoch bestand auch hier keine statistische Signifikanz zwischen den Werten.

### 5.23.8 Stecklinge – Lignin- und Kohlenhydratgehalte *Populus deltoides*

Bei der Pappelart *Populus deltoides* sind signifikante Einflüsse durch das erhöhte  $CO_2$  auf prozentuale Verteilung der Lignin- und Kohlenhydratmenge im Holz beobachtet worden (Tabelle 124).

Die erhöhte  $CO_2$ - Konzentration hatte keinen signifikanten Einfluss auf den Ligningehalt der Pflanzen. Der Lignin- Anteil war bei den begasten Pflanzen tendenziell höher als bei den Kontrollpflanzen. Dagegen wurde der Anteil des



säurelöslichen Lignins im Holz signifikant von der  $CO_2$ - Behandlung beeinflusst. Die Pflanzen, die erhöhtem  $CO_2$  ausgesetzt waren, hatten tendenziell geringere Anteile an säurelöslichem Lignin im Holz als die Kontrollpflanzen.

Bei den Monosacchariden sind signifikante Effekte durch die erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre beobachtet worden. Die Glucose- Konzentration im Holz hat sich aber durch eine  $CO_2$ - Behandlung nicht signifikant verändert.

Der Xylose- Anteil war bei den begasten Pflanzen geringer als bei den Kontrollpflanzen. Die Unterschiede waren signifikant. Beim Galactose- Anteil wurden tendenzielle Unterschiede erfasst, die statistisch signifikant waren. Beim Arabinose- Anteil wurden keine Unterschiede zwischen den Gruppen ermittelt. Es lag bei diesem Vergleich keine statistische Signifikanz vor.

Der Rhamnose- Gehalt war dagegen bei den begasten Pflanzen signifikant reduziert, jedoch waren die Unterschiede sehr klein.

Der Mannose- Gehalt war bei den begasten Pflanzen signifikant höher.

Die Summe der Zucker hat sich bei der Pflanzengruppe *Populus deltoides* nicht signifikant geändert, wobei bei den begasten Pflanzen die Summe tendenziell reduziert war. Der Extraktgehalt wurde signifikant von der erhöhten  $CO_2$ -Konzentration beeinflusst. Dabei wurden tendenzielle Unterschiede zwischen den Gruppen ermittelt, bei den die begasten Pflanzen niedrigere Extrakt- Gehälter aufgewiesen haben als die Kontrollpflanzen

#### 5.23.9 *Stecklinge – Lignin- und Kohlenhydratgehalte Hybridpappel vs. Pappel unter Umgebungsbedingungen*

Beim direkten Vergleich zwischen der Hybridpappel *Populus x canadensis* und den Pappelarten *Populus nigra* und *Populus deltoides* sind unter Umgebungsbedingungen signifikante Unterschiede bei den Lignin- und Zuckergehalten im Holz der Pflanzen erfasst worden (Tabelle 125).

Der Ligningehalt war bei den Hybridpappeln höher als bei *Populus nigra*. Dabei waren die Unterschiede signifikant. Der Anteil an säurelöslichem Lignin war dagegen bei den Hybridpappeln tendenziell geringer. Dabei lag keine statistische Signifikanz vor. Beim Rhamnose- Anteil sind keine Unterschiede zwischen beiden Arten erfasst worden. Mannose war dagegen bei den Hybridpappeln anteilmäßig weniger vorhanden als bei

den Pappeln der Art *Populus nigra*. Es lag eine statistische Signifikanz vor. Der Arabinose- Gehalt war bei den Hybridpappeln tendenziell geringer als *Populus nigra*. Dabei waren die Unterschiede signifikant. Tendenzielle Unterschiede gab es auch beim Galaktose- Gehalt, der ebenfalls bei der Art *Populus nigra* signifikant höher war als bei den Hybridpappeln. Der Xylose- Gehalt war bei den Hybridpappeln höher, jedoch waren die Unterschiede nicht signifikant. Der Glucose- Anteil war bei *Populus nigra* höher. Hier konnte eine statistische Signifikanz zwischen den Werten beider Arten ermittelt werden. Die Summe der Zucker und der Extraktgehalt waren ebenfalls bei den Hybridpappeln geringer. Es wurde eine statistische Signifikanz zwischen den Werten beider Arten ermittelt.

Der Lignin Anteil war bei den Hybridpappeln höher als bei *Populus deltoides*. Dabei waren die Unterschiede signifikant. Beim Anteil von säurelöslichem Lignin waren wiederum bei den Hybridpappeln die Konzentrationen tendenziell geringer, wobei eine statistische Signifikanz zwischen beiden Arten vorgelegen hat. Der Rhamnose- Gehalt war bei den Hybridpappeln tendenziell geringer. Bei diesem Vergleich lag keine Signifikanz vor. Der Mannose- Gehalt hat sich bei beiden Gruppen nicht voneinander unterschieden. Der Arabinose- und Galactose- Gehalt war bei den Hybridpappeln tendenziell geringer, wobei bei beiden Vergleichen eine statistische Signifikanz vorgelegen hat. Auch der Xylose- Gehalt war bei den Hybridpappeln niedriger als bei *Populus deltoides*. Es wurde eine statistische Signifikanz zwischen den Werten beider Gruppen ermittelt. Der Glucose- Gehalt war bei den Hybridpappeln tendenziell geringer, wobei keine statistische Signifikanz vorgelegen hat. Tendenzielle Unterschiede wurden bei der Summe der Zucker ermittelt, bei den die Hybridpappeln signifikant niedrigere Anteile hatte als die Pflanzen der Art *Populus deltoides*. Der Extraktgehalt war bei den Hybridpappeln ebenfalls geringer, wobei auch hier eine statistische Signifikanz zwischen den Werten beider Arten vorgelegen hat.

#### 5.23.10 Stecklinge – Lignin- und Kohlenhydratgehalte Hybridpappel vs. Pappel unter erhöhter $CO_2$ - Konzentration

Auch bei einer erhöhten  $CO_2$ - Konzentration in der Umgebung waren die Unterschiede zwischen der Hybridpappel *Populus x canadensis* und den Arten *Populus nigra* und *Populus deltoides* zum Teil signifikant (Tabelle 125).

Der Ligningehalt hat sich zwischen den Arten *Populus x canadensis* und *Populus nigra* zwar unterschieden, jedoch lag keine Signifikanz vor. Dabei war der Ligningehalt bei den Hybridpappeln geringer. Auch der Anteil an säurelöslichem Lignin war bei den Hybridpappeln niedriger. Dabei lag eine statistische Signifikanz vor. Beim Rhamnose-Gehalt konnten keine Unterschiede zwischen beiden Arten ermittelt werden. Der Mannose- Gehalt war bei den Hybridpappeln höher, jedoch lag keine statistische Signifikanz vor. Beim Arabinose- Gehalt wurden keine Unterschiede zwischen der Hybridpappel und der Art *Populus nigra* ermittelt. Der Galaktose- Anteil war bei den Hybridpappeln tendenziell geringer als bei *Populus nigra*. Dabei lag eine statistische Signifikanz vor. Der Xylose- Anteil war dagegen bei den Hybridpappeln höher, jedoch hat bei diesem Vergleich keine statistische Signifikanz vorgelegen. Die Glucose- Anteile haben sich zwischen beiden Arten nicht voneinander unterschieden. Auch bei der Summe der Zucker waren die Unterschiede nicht signifikant. Dabei war der Anteil bei der Art *Populus nigra* niedriger als bei den Hybridpappeln. Der Extraktgehalt war bei den Hybridpappeln geringer als bei *Populus nigra*. Dabei waren die Unterschiede signifikant.

Der Ligningehalt war bei den Hybridpappeln höher als bei *Populus deltoides*. Die Unterschiede waren nicht signifikant. Dagegen war der Anteil an säurelöslichem Lignin bei den Hybridpappeln signifikant geringer als bei der Art *Populus deltoides*. Der Rhamnose- Anteil war bei den Hybridpappeln tendenziell niedriger als bei *Populus deltoides*. Es lag dabei eine statistische Signifikanz vor. Die Mannose- Gehälter beider Arten haben sich nicht voneinander unterschieden. Dagegen waren die Arabinose-, Galaktose- und Xylose- Gehälter der Hybridpappeln tendenziell geringer als bei *Populus deltoides*. Dabei waren die Unterschiede signifikant. Der Glucose- Anteil war dagegen bei den Hybridpappeln höher. Dabei waren die Unterschiede nicht signifikant. Bei der Summe der Zucker wurden nur tendenzielle Unterschiede zwischen den beiden Arten erfasst, die ebenfalls nicht signifikant waren. Der Extraktgehalt war bei den Hybridpappeln signifikant niedriger als bei *Populus deltoides*.

Stecklinge	Säurelösliches Lignin (%)	Rückstand Lignin (%)	Monosaccharide						Summe Zucker (%)	Extraktgehalt (%)
			Rhamnose (%)	Mannose (%)	Arabinose (%)	Galaktose (%)	Xylose (%)	Glucose (%)		
<i>P. x canadensis</i> 400	3,08 ↓*	23,82 ↓*	0,37 ↓*	1,92 ↑	0,32 ↓	0,56 ↓	14,03 ↑	40,46 ↑*	57,67 ↑*	3,69 ↓*
<i>P. x canadensis</i> 950	2,66	21,05	0,35	2,09	0,32	0,55	14,10	42,85	60,24	3,26
<i>P. nigra</i> 400	3,27 ↓	21,79 ↑*	0,36 ↑	2,41 ↓*	0,44 ↓	0,74 ↑	13,98 ↓*	42,48 ↑	60,40 ↓	4,67 ↓
<i>P. nigra</i> 950	3,13	22,01	0,36	1,98	0,39	0,75	13,46	42,84	59,79	4,10
<i>P. deltooides</i> 400	3,64 ↓*	18,00 ↑	0,43 ↓*	1,90 ↑*	0,57 ↓	0,84 ↓*	16,41 ↓*	40,66 ↑	60,81 ↓	5,70 ↓*
<i>P. deltooides</i> 950	3,24	18,78	0,40	2,10	0,51	0,78	14,69	41,60	60,08	4,23

Tabelle 124: Signifikanztest zwischen den Lignin- und Kohlenhydratanteil im Holz von unbegasten (400ppm) und begasten (950 ppm) Stecklingen

Stecklinge	Säurelösliches Lignin	Rückstand Lignin	Monosaccharide						Summe Zucker	Extraktgehalt
			Rhamnose	Mannose	Arabinose	Galaktose	Xylose	Glucose		
<i>P. x canadensis</i> 400	↓	↑*	↑	↓*	↓*	↓*	↑	↓*	↓*	↓*
<i>P. nigra</i> 400										
<i>P. x canadensis</i> 950	↓*	↓	↓	↑	↓	↓*	↑	↑	↑	↓*
<i>P. nigra</i> 950										
<i>P. x canadensis</i> 400	↓*	↑*	↓	↑	↓*	↓*	↓*	↓	↓*	↓*
<i>P. deltooides</i> 400										
<i>P. x canadensis</i> 950	↓*	↑	↓*	↓	↓*	↓*	↓*	↑	↑	↓*
<i>P. deltooides</i> 950										

Tabelle 125: Signifikanztest zwischen den Lignin- und Kohlenhydratanteil im Holz von Hybridpappeln und Elternarten (Stecklinge), unterschieden nach Versuchsbedingungen

## 6 Diskussion

Die vorliegende Studie an ausgewählten Hybridpappeln und deren Elternarten konzentrierte sich auf die Untersuchung der physiologischen Parameter wie Nettophotosyntheserate, stomatäre Leitfähigkeit, Transpiration und interzelluläre  $CO_2$ -Konzentration unter erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  und Umgebungsbedingungen. Des Weiteren wurden phänologische Parameter wie Pflanzenhöhe und die Biomasse der Stämme und Wurzeln der Versuchspflanzen erfasst.

Die holzanatomischen Untersuchungen richteten sich auf die Erfassung der Jahrringbreite, der Gefäßfläche, sowie der Gefäßdichte der Pflanzen.

Ergänzend zu den holzanatomischen Untersuchungen ist bei den Blättern der Versuchspflanzen die Blattfläche, sowie die Spaltöffnungsgröße der Stomata ermittelt worden.

Die holzchemischen Untersuchungen hatten das Ziel, die verschiedenen Mengen der im Holz vorhandenen Zucker sowie die Lignin- Konzentration der Pflanzen zu erfassen.

Ebenfalls wurde beim Stamm-, Wurzel- und Blattmaterial eine Elementaranalyse durchgeführt, bei der die exakte Stickstoff- und Kohlenstoff- Konzentration in der Biomasse der Pflanzen ermittelt wurde.

Die Studie hatte zum Ziel zu klären, inwieweit eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration in der Atmosphäre einen signifikanten Einfluss auf die physiologischen, anatomischen und holzchemischen Eigenschaften der Pflanzen hat. Darüber hinaus sollte bei einem direkten Vergleich zwischen Hybridpappeln und Elternarten untersucht werden, wie sich die Arten auf eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration in der Atmosphäre einstellen und ob signifikante Unterschiede vorliegen.

## 6.1 Physiologische Reaktionen auf eine erhöhte $CO_2$ -Konzentration

### 6.1.1 *Nettophotosyntheserate*

Anhand der erhobenen Daten der saisonalen Gaswechselfmessungen hat sich gezeigt, dass eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre einen signifikanten Einfluss auf die Nettophotosyntheserate der Pflanzen hat. Dieser Effekt ist bei allen Pflanzengruppen während der Vegetationsperiode beobachtet worden. Es bestätigt die Annahme von Nakino und Mae, dass erhöhtes atmosphärisches  $CO_2$  starke Auswirkungen auf die Photosynthese der Pflanzen haben kann (Makino und Mae 1999). Auch die Aussage, dass eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration die Photosynthese der Pflanzen stimuliert, kann anhand der vorliegenden Ergebnisse ebenfalls bestätigt werden (Makino und Mae 1999; Ceulemans et al. 1995a). Der mögliche Effekt, dass die Photosyntheserate sich über den Saisonverlauf wieder verringern kann, wurde bei den Gaswechselfversuchen ebenfalls zum Teil bei einigen Pflanzengruppen beobachtet und bestätigt die Ergebnisse der wissenschaftlichen Arbeiten von Makino und Mae und Ceulemans et al. (Makino und Mae 1999; Ceulemans et al. 1997; Ainsworth und Rogers 2007).

Der Zeitpunkt in der Saison, bei dem die Photosyntheseraten der Pflanzen wieder sinken, hat sich bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen und den Kontrollpflanzen nicht eindeutig unterschieden. Somit konnten die Ergebnisse von Centritto et al. 2004 nicht bestätigt werden, bei denen die Photosyntheseraten der mit  $CO_2$  begasten Hybridpappel *Populus x euramericana* früher gesunken ist als bei den unbegasten Pflanzen der gleichen Art (Centritto et al. 2004).

Bei den verschiedenen Pflanzengruppen war die Photosyntheserate der begasten Pflanzen um 21,15 % bis 87,03 % höher als bei den Kontrollpflanzen. Diese Ergebnisse unterstützen die Erkenntnisse von Ceulmans & Mousseau 1994, die eine Zunahme der Photosyntheserate an Laubbäumen um 61% beobachtet haben.

Bei den vorliegenden Ergebnissen dieser Arbeit waren die Nettophotosyntheseraten der Hybridpappeln unter beiden Versuchsbedingungen teilweise deutlich niedriger als bei den Elternarten. Dieser Effekt ist sowohl bei den einjährigen Pflanzen als auch bei den Stecklingen beobachtet worden und verhält sich gegenteilig zu den überlegenen Wuchsstärken der Hybridpappeln gegenüber den Pappelarten. Diese Beobachtung

steht im Einklang mit den Ergebnissen von Zanewich, bei denen sich das Gesamtmuster der Wachstumsstärke der Hybriden nicht bei der photosynthetischen Leistung wiedergespiegelt hat (Zanewich et al. 2018). Auch bei den Untersuchungen von Pärnik et al (2014) war der Gaswechsel der hybriden Espen zum Teil geringer als bei den diploiden und triploiden Bäumen, wobei die Individuen erst 2,5 Monate alt waren (Pärnik et al. 2014). Mit zunehmendem Alter waren die Ergebnisse der Hybrid-Espen entweder gleich zu den triploiden Pflanzen oder höher als bei den diploiden Pappeln (Pärnik et al. 2014). Zum Teil weisen auch diese Ergebnisse Parallelen zu den Ergebnissen dieser Studie auf.

Eine mögliche Erklärung für die im Vergleich häufig niedrigeren Nettphotosyntheseraten der Hybridpappeln bei gleichzeitig überlegenen Wachstumsraten ist vermutlich die Wahl der Messblätter. Durch die im Vergleich enorme Größe der Hybridpappeln waren besonders ab Mitte der Messperiode nur eingeschränkt Blätter aus dem oberen Kronendach erreichbar, ohne die Pflanzen bei den Messungen zu beschädigen. Möglich ist, dass bei den Hybridpappeln also besonders oft Schattenblätter für die Messungen gewählt worden sind, was den niedrigeren Gaswechsel-Raten bei den Hybridpappeln im Vergleich zu den Elternarten erklären könnte.

### 6.1.2 Transpirationsrate

Anhand der ermittelten Ergebnisse dieser Arbeit ist erkennbar, dass eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre überwiegend eine Erhöhung der Transpirationsrate während der gesamten Messperiode bewirkt hat, wobei häufig keine eindeutigen Trends beobachtet werden konnten. Die Ergebnisse können zum Teil nicht die Aussagen und Erkenntnisse vorausgegangener wissenschaftlicher Arbeiten bestätigen, die besagen, dass eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Regel die Transpirationsrate der Pflanzen sinken lässt (Ainsworth und Rogers 2007; Kirschbaum 2000). Die Ergebnisse von Picon et al (1996) konnten somit nicht bestätigt werden, bei dem die Transpirationsraten von *Quercus robur*- Individuen unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration gesunken sind. Auch die Ergebnisse von Overdieck und Forstreuer (1994) und Tognetti et al (1999), bei denen die Transpirationsraten von *Fagus sylvatica* und Hybridpappel Klonen von *Populus x euramericana* unter erhöhter  $CO_2$ -

Konzentration in der Atmosphäre gesunken sind, stehen nicht im Einklang mit den Erkenntnissen dieser Arbeit.

Jedoch gibt es auch Parallelen zu Ergebnissen anderer wissenschaftlicher Arbeiten. So bestätigen die vorliegenden Ergebnisse die Erkenntnisse von Tricker et al. (2009), bei denen die Transpirationsraten von Hybridpappel- Klonen unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration gestiegen sind (Tricker et al. 2009). Auch die Ergebnisse von den durchgeführten Langzeitversuchen von Tricker et al. (2005) haben ergeben, dass die Transpirationsraten von Pappeln (*Populus euramericana*) unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration steigen können und stimmen somit mit den Erkenntnissen dieser Untersuchung überein (Tricker et al. 2005). Auch die Hybridpappel- Klone *Populus trichocarpa* x *Populus deltoides* haben bei den Gewächshausversuchen von Johnson et al. (2002) deutlich höhere Transpirationsraten unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration aufgewiesen, wobei sich die Transpirationsrate fast verdoppelt hat (Johnson et al. 2002). Bei den saisonalen Untersuchungen in dieser Arbeit waren die Transpirationsraten der begasten Pflanzen insgesamt zwischen 6,27 % bis 34,27 % höher als bei den Kontrollpflanzen und somit in der Regel nicht deutlich höher wie bei den Untersuchungen von Johnson et al 2002 (Johnson et al. 2002).

Bei der Betrachtung der Messergebnisse zwischen den Hybridpappeln und den Elternarten konnte bei den einjährigen Pflanzen zum Teil ein signifikanter Unterschied beobachtet werden. Besonders unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration waren die Transpirationsraten der Elternarten deutlich höher als bei den Hybridpappeln. Bei der Gruppe der Stecklinge waren keine Unterschiede erkennbar. Hier lagen die Transpirationsraten der Hybridpappeln in der Regel zwischen den Ergebnissen beider Elternarten unter beiden Untersuchungsbedingungen.

### 6.1.3 Stomatäre Leitfähigkeit

Anhand der erfassten saisonalen Ergebnisse ist erkennbar, dass eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration die stomatäre Leitfähigkeit zum Teil signifikant beeinflusst hat. Bei allen Pappelgruppen war über die gesamte Messperiode gesehen die stomatäre Leitfähigkeit bei den Pflanzen, die einer erhöhten  $CO_2$ - Konzentration ausgesetzt waren, höher als bei den Pflanzen der Kontrollgruppe. Im Verlauf der Messperiode sank in der Regel die stomatäre Leitfähigkeit der Pflanzen, wobei auch Ausnahmen



beobachtet werden konnten. Der Effekt einer Steigerung der stomatären Leitfähigkeit unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration wird von den meisten Erkenntnissen vorausgegangener wissenschaftlicher Arbeiten nicht unterstützt und stellt im Vergleich eher eine Ausnahme dar. Die Ergebnisse sind gegenläufig zu den Erkenntnissen von beispielweise Bernachi et al (2003), bei dessen Untersuchungen die stomatären Leitfähigkeiten der Pappeln gesunken sind (Bernacchi et al. 2003). Auch die Ergebnisse von Radoglou et al (1990) konnten nicht bestätigt werden. Radoglou et al (1990) hatten festgestellt, dass bei gleich mehreren Pappelarten die stomatäre Leitfähigkeit unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration gesunken ist (Radoglou und Jarvis 1990).

Ebenfalls können die Erkenntnisse von Calfapietra et al (2005) und Bosac et al. (1995) nicht bestätigt werden. Sie zeigten, dass die stomatären Leitfähigkeiten von Hybridpappeln unter erhöhtem atmosphärischem  $CO_2$  gesunken sind (Calfapietra et al. 2005; Bosac et al. 1995).

Anhand der vorliegenden Ergebnisse kann kein eindeutiger Heterosis-Effekt bei den Hybridpappeln festgestellt werden. Bei den einjährigen Pflanzen waren die stomatären Leitfähigkeiten der Hybridpappeln sogar meist geringer als bei den Elternarten. Bei den Stecklingen lagen die Werte der Hybridpappeln eher zwischen den beiden Elternarten.

Wie aus der Literatur zu entnehmen ist, kann die stomatäre Leitfähigkeit von mehreren Umweltfaktoren beeinflusst werden (Ainsworth und Rogers 2007).

Da die hybriden Pappeln bei einer ähnlichen Wasserversorgung deutlich höhere Pflanzendimensionen aufgewiesen haben als die Elternarten, könnte bei den Hybridpappeln ein Selbstschutz-Mechanismus zur Wassereinsparung ausgelöst worden sein, um auch bei Wasserknappheit bestehen zu können. Diese Vermutung könnte zumindest die geringen stomatären Leitfähigkeiten der Hybridpappeln erklären.

#### *6.1.4 Interzellulare $CO_2$ -Konzentration*

Die vorliegenden Ergebnisse zeigten, dass eine erhöhte atmosphärische  $CO_2$ -Konzentration einen sehr starken Einfluss auf die interzellulare  $CO_2$ -Konzentration in den Blättern der Pflanzen haben kann. Dieser Effekt war hinsichtlich der Untersuchungen vorausgegangener Forschungsarbeiten zu erwarten. Dabei scheint

eine höhere Verfügbarkeit an  $CO_2$  in der Atmosphäre dazu zu führen, dass das Potential zur „Zwischenspeicherung“ des Kohlenstoffdioxids in den Interzellularen in dem Moment besonders gut ausgeschöpft und maximal von der Pflanze genutzt wird. Bezüglich der Unterscheidung zwischen den Hybridpappeln und Elternarten sind im Zuge der Gaswechselfmessungen keine auffälligen Unterschiede zwischen den Arten bei beiden Versuchsbedingungen aufgefallen.

Bei den einjährigen hybriden Pappeln war gerade zum Ende die interzellulare  $CO_2$ -Konzentration im direkten Vergleich geringer als bei den Elternarten. Bei den Stecklingen lagen die Werte der Hybridpappeln zum Ende der Messperiode eher zwischen den Ergebnissen beider Elternarten.

#### *6.1.5 Zusammenhänge und Korrelation von Gaswechselfparametern*

Neben den eigentlichen ermittelten Ergebnissen sind auch einige signifikante Zusammenhänge zwischen den einzelnen gemessenen Gaswechselfparametern beobachtet worden (Tabelle 126). So sind bei allen untersuchten Hybridpappel- und Elternarten signifikant positive Korrelationen zwischen der Nettophotosyntheserate und der stomatären Leitfähigkeit beobachtet worden. Gerade unter Normalbedingungen waren die Korrelationen überwiegend mit einer starken Effektstärke gemessen worden. Unter erhöhter atmosphärischer  $CO_2$ -Konzentration waren die Korrelationen in der Regel deutlich schwächer, wobei die Effektstärken zwischen „stark“ und „schwach“ variierten und dadurch noch immer signifikant waren. Dieser Effekt lässt sich vermutlich dadurch begründen, dass unter erhöhter atmosphärischer  $CO_2$ -Konzentration die Nettophotosyntheseraten recht deutlich bei den meisten Pflanzen gestiegen sind, währenddessen die stomatären Leitfähigkeiten bei den begasten Pflanzen auf einem ähnlichen Niveau zu den Kontrollpflanzen verblieben sind, wenn auch hier zum Teil ebenfalls erhöhte Werte ermittelt worden sind. Das zeigt, dass unter erhöhter atmosphärischer  $CO_2$ -Konzentration bei Pappeln die stomatären Leitfähigkeiten nur geringfügig steigen, jedoch dabei die Nettophotosyntheserate von diesem geringen Effekt unbeeinflusst blieb und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration deutlich mehr Kohlenstoff bindet als unter Normalbedingungen.

Da die Transpirationsrate stark mit der stomatären Leitfähigkeit zusammenhängt, sind die Korrelationen zwischen Nettphotosyntheserate und Transpirationsrate sehr ähnlich wie bei der Korrelation zwischen Nettphotosyntheserate und stomatärer Leitfähigkeit. Auch hier waren die positiven Korrelationen unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration schwächer.

Auch die Nettphotosyntheserate und die interzelluläre  $CO_2$ -Konzentration haben bei allen Pappelarten korreliert, wobei die Ergebnisse nicht einheitlich waren. Auffällig ist, dass überwiegend negative Korrelationen beobachtet worden sind und somit bei den meisten Pappelarten die Nettphotosyntheserate gesunken ist und die interzelluläre  $CO_2$ -Konzentration wiederum gestiegen ist. Dieser Effekt war gerade unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration stärker ausgeprägt. Diese negative Korrelation ist vermutlich dadurch zu begründen, dass bei einem großen Teil der Pappelarten die Nettphotosyntheserate im Laufe der Messperiode nachgelassen hat, wobei jedoch die interzelluläre  $CO_2$ -Konzentration überwiegend bis zum Ende der Messungen konstant war.

Korrelationen von Gaswechselfparametern		Korrelationskoeffizient		
		Stomatäre Leitfähigkeit	Interzelluläre $CO_2$ -Konzentration	Transpirationsrate
<i>P. x canescens</i> 400 ppm	Nettphotosyntheserate	0,867**	0,131*	0,748**
<i>P. x canescens</i> 950 ppm		0,647**	0,128*	0,664**
<i>P. tremula</i> 400 ppm	Nettphotosyntheserate	0,851**	- 0,156**	0,803**
<i>P. tremula</i> 950 ppm		0,224**	- 0,440**	0,196**
<i>P. alba</i> 400 ppm	Nettphotosyntheserate	0,773**	- 0,149**	0,773**
<i>P. alba</i> 950 ppm		0,241**	- 0,268**	0,269**
<i>P. x canadensis</i> 400 ppm	Nettphotosyntheserate	0,820**	0,031	0,717**
<i>P. x canadensis</i> 950 ppm		0,664**	- 0,081**	0,619**
<i>P. nigra</i> 400 ppm	Nettphotosyntheserate	0,840**	- 0,314**	0,867**
<i>P. nigra</i> 950 ppm		0,285**	- 0,234**	0,195**
<i>P. deltoides</i> 400 ppm	Nettphotosyntheserate	0,815**	0,171**	0,788**
<i>P. deltoides</i> 950 ppm		0,424**	- 0,590**	0,372**

\*\* Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig) // \*Die Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant (zweiseitig)

Tabelle 126: Korrelationsanalyse von Gaswechselfparametern mit Signifikanzanalyse

## 6.2 Phänologische Untersuchungen

### 6.2.1 Oberirdische Biomasse

Bei der Erfassung des Trockengewichts war bei einem Großteil der untersuchten Pflanzengruppen feststellbar, dass eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration die Biomasse der Pflanzen steigen lassen kann, wenn auch nur zum Teil mit signifikanten Unterschieden. Eine Ausnahme stellen hier die Pappelarten *Populus tremula* und *Populus deltoides* dar, wo keine statistische Signifikanz ermittelt worden ist sowie

*Populus nigra*, bei der entgegen den Erwartungen die unbegasteten Pflanzen signifikant höhere Biomassen hatten als die begasteten Pflanzen.

Dass bei den restlichen Arten durch die  $CO_2$ - Begasung die Pflanzen zum großen Teil mit einer höheren Biomasseproduktion signifikant reagieren, war ein zu erwartendes Ergebnis und deckt sich zum großen Teil mit den Ergebnissen vorausgegangener wissenschaftlicher Arbeiten (Curtis und Wang 1998; Baker und Thomas 1992).

Bei den Untersuchungen variierte die Zunahme der produzierten Biomasse zwischen 50,94 % und 234,81 % und bestätigt somit die Ergebnisse vorausgegangener Arbeiten, bei denen Zunahmen von 22- 90 % beobachtet worden sind (Gielen und Ceulemans 2001). Bezugnehmend auf die einzelnen untersuchten Pappelarten konnten auch die Ergebnisse von Wait et al. (1999) bestätigt werden, bei denen eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration keine Auswirkungen auf die Biomasseproduktion von Pappeln der Art *Populus deltoides* hatte (Wait et al. 1999).

Auch die Ergebnisse von Bosac et al. (1995) sind den vorliegenden Ergebnissen ähnlich, wo unter einer  $CO_2$ - Begasung die Gesamtbiomasse von *Populus x canadensis*- Pflanzen um 38 % zugenommen hat (Bosac et al. 1995). Jedoch waren die Unterschiede bei den vorliegenden Ergebnissen deutlich stärker.

Die Ergebnisse von Calfapietra et al (2003) sind dagegen zum Teil gegensätzlich, da bei diesen Versuchen (FACE) eine Zunahme bei den Pappelarten *Populus alba* und *Populus nigra* beobachtet worden war und bei den durchgeführten saisonalen Versuchen jedoch nur bei *Populus alba* eine Steigerung der Biomasse beobachtet worden ist (Calfapietra et al. 2003).

Beim Vergleich zwischen den Hybridpappeln und Elternarten ist aufgefallen, dass besonders die hybriden Pappeln von einer erhöhten  $CO_2$ - Konzentration über den Messzeitraum hinweg profitiert haben, wobei gleichzeitig bei den Elternarten nur wenig Unterschiede erkennbar waren. Eine Ausnahme ist die Art *Populus alba*, bei der die Biomasseproduktion stark unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration zugenommen hat. Durch die starke Zunahme der Biomasse bei den Hybridpappeln unter erhöhter  $CO_2$  Konzentration kann in dem Zusammenhang von einem Heterosis- Effekt ausgegangen werden. Dabei könnte die Überlegenheit auf eine bessere Effizienz der photosynthetischen Leistung der hybriden Pappeln zurückzuführen sein. Denn Untersuchungen haben gezeigt, dass eine durch erhöhtes  $CO_2$  verursachte starke photosynthetische Leistung direkt zu einer starken Biomasseproduktion führen kann (Baker und Thomas 1992).

## 6.2.2 Unterirdische Biomasse

Anhand der vorliegenden Ergebnisse zur Wurzelmasse sind nur wenig signifikante Effekte beobachtet worden. Bei der Gruppe der einjährigen Pflanzen wurde bei keiner Pflanzengruppe die Wurzel- Biomasse durch die erhöhte  $CO_2$ - Konzentration signifikant beeinflusst. Überwiegend waren hier sogar die Trockengewichte der Kontrollpflanzen (*Populus tremula*, *Populus x canescens*) tendenziell höher.

Die Hybridpappeln zeigten unter beiden Untersuchungsbedingungen keine nennenswerten Dominanz- Effekte gegenüber beiden Elternarten. Zwar waren die Wurzelmassen grundsätzlich höher, jedoch konnte nur im direkten Vergleich zwischen der Hybridpappel und der Art *Populus alba* ein signifikanter Effekt beobachtet werden. Bezugnehmend auf vorausgegangene Untersuchungen stellen diese Ergebnisse zum Teil eine Bestätigung dar.

Beispielweise haben Zanewich et al (2018) festgestellt, dass Hybridpappeln bei suboptimalen Temperaturbedingungen und einer normalen  $CO_2$ - Konzentration stärkere Wurzeln aufweisen können als die Elternarten (Zanewich et al. 2018).

Bei der Gruppe der Stecklinge schien das erhöhte  $CO_2$  einen stärkeren Effekt gehabt zu haben, denn zum Teil waren die Wurzel- Biomassen der begasteten Pflanzen deutlich höher. Nur bei *Populus nigra* ist kein signifikanter Effekt beobachtet worden.

Unter Umgebungsbedingungen haben sich die Hybridpappeln und die beiden Pappelarten bezugnehmend auf die Wurzel- Biomasse nicht signifikant voneinander unterschieden. Nur unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration war sichtbar, dass hier die Hybridpappeln deutlich komplexere Wurzeln gebildet hatten als die beiden Pappelarten.

Im Vergleich zu anderen wissenschaftlichen Arbeiten konnten die Ergebnisse dieser Arbeit aufgrund der überwiegend fehlenden statistischen Signifikanz nur zum Teil die Erkenntnisse der Literatur stützen und stellen somit ein eher überraschendes Ergebnis dar.

So konnten die Ergebnisse von Norby et al (1992) nur zum Teil bestätigt werden. Diese zeigten, dass der Feinwurzel- Anteil unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration gestiegen war (Norby et al. 1992). Dabei ist zu beachten, dass bei diesen Untersuchungen der Feinwurzel- Gehalt von einer anderen Spezies (*Liriodendron tulipifera* L) untersucht

wurde und damit eine unmittelbare Vergleichbarkeit zu den vorliegenden Ergebnissen schwierig ist.

Bezugnehmend auf vorausgegangene Untersuchungen an Pappeln können die vorliegenden Ergebnisse die Resultate anderer wissenschaftlicher Arbeiten aber zum Teil bestätigen. So haben Calfapietra et al (2003) ebenfalls beobachtet, dass eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration die Wurzelmasse an *Populus nigra* und *Populus alba* steigen lassen kann (Calfapietra et al. 2003). Lucal et al. (2003) haben bei den gleichen Pappelarten ähnliche Ergebnisse bei Begasungsexperimenten beobachtet (Lukac et al. 2003). Dabei sind jedoch die vorliegenden Ergebnisse dieser Arbeit statistisch nicht signifikant und stellen eine Tendenz dar.

Auch Tupker et al. (2003) haben festgestellt, dass unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration die Wurzelbiomasse von Espen steigen kann (Tupker et al. 2003).

Eine von King et al. (2001) festgestellte sehr starke Zunahme der Wurzelbiomasse an Pappeln (*Populus tremuloides*, +113%) wurde bei keinen der untersuchten Pappelarten dieser Arbeit in dieser Stärke festgestellt (King et al. 2001).

Eine Reduzierung der Wurzel- Biomasse, die bei den Gruppen *Populus x canescens* und *Populus tremula* beobachtet worden ist, bestätigt die Ergebnisse von Brown et al. (2007), Handa et al. (2008) und Bader et al. (2009), jedoch sind auch hier andere Spezien untersucht worden, bei teilweise extremen lokalen Wachstumsbedingungen (Brown et al. 2007; Handa et al. 2008; Bader et al. 2009). Daher ist hier eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse nur eingeschränkt sinnvoll.

Gerade für die Hybridpappeln, die ähnliche Wurzelmassen bei gleichzeitig hohen Pflanzendimensionen aufgewiesen haben, kann dies ein erheblicher Nachteil unter Praxisbedingungen darstellen, da durch Extremwetterereignisse wie Stürme die Gefahr von Sturmschäden sehr wahrscheinlich steigt.

### 6.2.3 Höhenzuwachs

Im Zuge der phänologischen Untersuchungen ist festgestellt worden, dass eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration keinen signifikanten Effekt auf die Endhöhe der Versuchspflanzen hatte. Grundsätzlich ist aber anhand der Ergebnisse erkennbar, dass teilweise bei den Pappelarten, mit Ausnahme von *Populus nigra*, *Populus tremula* und *Populus deltoides*, die Pflanzenhöhen zum Erntezeitpunkt bei den begasten Pflanzen höher waren als bei den Kontrollpflanzen. Durch die sehr starke

Überschneidung der Messergebnisse ist aber keine statistische Signifikanz zwischen den Gruppen festgestellt worden.

Während der Messungen sind meist nur bei den mit  $CO_2$  begasten Hybridpappeln zum Teil signifikant schnellere Höhenzunahmen erfasst worden als bei den Kontrollgruppen. Meist waren jedoch die Messwerte zwischen begasten und unbegasten Pflanzen der weiteren Arten sehr ähnlich. Dass bei den Arten *Populus deltoides* und *Populus nigra* bei den Kontrollpflanzen sogar eine (nicht signifikante) schnellere Höhenzunahme über die Messperiode hinweg vorlag als bei den begasten Pflanzen, stellt hier eher ein unerwartetes Ergebnis dar.

Vorausgegangene Untersuchungen mit erhöhtem atmosphärischen  $CO_2$  an Pappeln können anhand der vorliegenden Messergebnisse zum Teil bestätigt werden.

Beispielweise sind die Ergebnisse von Bosac et al. (1995) ähnlich, denn es wurde festgestellt, dass eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration die Höhe von Hybridpappel-Klonen (*Populus x canadensis*) um 13 % steigen lassen kann (Bosac et al. 1995). Mit einer Zunahme von 22,95 % sind die vorliegenden Messergebnisse sogar nochmal deutlich höher.

Auch können die Ergebnisse von Radoglou und Jarvis (1990) und von Ceulemans et al. (1995,1996) anhand der vorliegenden Ergebnisse bestätigt werden. Die Arbeiten haben an verschiedenen Pappelarten eine Steigerung der Pflanzenhöhe unter erhöhtem  $CO_2$  ermittelt (Radoglou und Jarvis 1990; Ceulemans et al. 1995a; Ceulemans et al. 1996).

Die Arbeiten von Lou et al. (2005) bei denen die Pflanzenhöhen unter erhöhtem  $CO_2$  von beispielweise *Populus nigra* steigen und bei *Populus alba* eher sinken, sind jedoch gegensätzlich zu den vorliegenden Ergebnissen dieser Arbeit (Luo et al. 2005).

Besonders auffällig sind dagegen die Vergleiche zwischen Hybridpappeln und den zugehörigen Elternarten. Hier waren bei den einjährigen Pflanzen und bei den Stecklingen deutliche Unterschiede beim Höhenwachstum erkennbar. Unter beiden Versuchsbedingungen waren bereits früh Unterschiede sichtbar und haben sich im Laufe der Messperiode verstärkt, wobei unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration die Unterschiede noch einmal etwas stärker waren. Anhand dieser Ergebnisse ist der Hinweis gegeben, dass Hybridpappeln unter Normal- und erhöhten  $CO_2$ -Bedingungen ein stärkeres Höhenwachstum aufweisen als die Elternarten.

Diese Ergebnisse unterstützen zum Teil die Erkenntnisse von Zanewich et al (2018), bei denen Hybridpappeln ein stärkeres Höhenwachstum aufgewiesen haben als die

Elternarten, wobei hier zu beachten ist, dass die Versuche bei suboptimalen Temperaturbedingungen stattgefunden haben (Zanewich et al. 2018). Bei höheren Temperaturen haben sich die Pflanzhöhen wieder angeglichen und wurden zum Teil von den Elternarten übertroffen (Zanewich et al. 2018).

Auch vorausgegangene Untersuchungen, bei denen Hybridpappeln ein besonders starkes Höhenwachstum aufweisen konnten, bestätigen die vorliegenden Ergebnisse (Dillen et al. 2009a).

Bei den von Tupker et al. (2003) durchgeführten Versuchen unter erhöhtem  $CO_2$  ist dagegen festgestellt worden, dass unter einer  $CO_2$ - Begasung die Höhe von Hybridpappeln zwar zunahm (um 8,7 %), jedoch nicht statistisch signifikant (Tupker et al. 2003). Dagegen waren die Zunahmen der Pflanzhöhen unter erhöhtem  $CO_2$  der gleichzeitig untersuchten Aspen zunächst signifikant höher gegenüber der Kontrollgruppe, jedoch schwächte sich dieser Effekt später ab (Tupker et al. 2003).

#### 6.2.4 Stammdurchmesser – radialer Zuwachs

Die vorliegenden Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration einen Effekt auf das radiale Wachstum der Pflanzen hat. Dabei waren jedoch überwiegend die Unterschiede zwischen begasten Pflanzen und Kontrollgruppe nicht signifikant, jedoch ist anhand der Ergebnisse und dem Saisonverlauf ein Effekt erkennbar. Besonders bei den beiden Hybridpappeln *Populus x canescens* und *Populus x canadensis* waren deutliche Unterschiede bei den Stammstärken erkennbar. Unter den Elternarten war nur bei der Gruppe *Populus alba* ein signifikanter Effekt erfasst worden. Dadurch, dass bei allen untersuchten Pappelarten und Hybridpappeln der radiale Zuwachs, wenn auch nur zum Teil signifikant, durch eine  $CO_2$ - Begasung zugenommen hatte, können die Erkenntnisse von vorausgegangenen Untersuchungen bestätigt werden. So waren beispielweise die Ergebnisse von Bosac et al (1995), Ceulemans et al (1996), Isebrand et al. (2021) und von Tognetti et al (1999), die verschiedene Pappelarten bei erhöhtem  $CO_2$  untersucht haben, ähnlich. Dabei ist zu beachten, dass die Umgebungsbedingungen und das Versuchslayout der vorausgegangenen Untersuchungen sich teilweise unterschieden haben. Jedoch scheint sehr wahrscheinlich, dass *Populus*- Arten deutlich auf eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration reagieren. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen auch, dass



die Hybridpappeln unter beiden Versuchsbedingungen zum Ende der Messperiode einen stärkeren Stammdurchmesser aufgewiesen haben als die Elternarten. Bereits im Laufe der Messperiode war früh der stärkere Zuwachs bei den Hybridpappeln erkennbar, wobei bei der Gruppe der Stecklinge der schnellere Zuwachs der Hybridpappeln besonders stark sichtbar war. Bei den einjährigen Pflanzen waren die radialen Zuwächse der Gruppen ähnlicher. Zum Ende der Messperiode waren bei den einjährigen Pflanzen Unterschiede erkennbar, jedoch nicht signifikant. Die Unterschiede bei den Stecklingen waren dagegen knapp unter der Signifikanzgrenze. Die Ergebnisse zeigen einen interessanten Hinweis über ein mögliches, überlegenes radiales Wachstum von Hybridpappeln. Wenn auch nicht signifikant, unterstützen die Ergebnisse allgemeine Annahmen über Heterosis-Effekte bei Hybridpappeln, wobei ein stärkeres Radialwachstum auf eine bessere Resistenz gegenüber abiotischen Umweltfaktoren hindeuten kann.

#### 6.2.5 Blattfläche

Anhand der vorliegenden Ergebnisse ist erkennbar, dass eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre einen eher niedrigen Einfluss auf die Entwicklung der Blätter von Hybridpappeln und den Elternarten hat. Im direkten Vergleich zwischen den unbegasteten und mit  $CO_2$  begasteten Pflanzen waren unter den einjährigen Pflanzen nur bei der Art *Populus alba* eine signifikante Zunahme der Blattfläche beobachtet worden. Bei *Populus tremula* waren sogar die Blattflächen der unbegasteten Pflanzen größer als bei den Pflanzen, die einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration ausgesetzt waren. Bei der Gruppe der Stecklinge wurde auch überwiegend kein signifikanter Einfluss einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration auf die Blattflächen beobachtet. Die Art *Populus deltoides* stellt hier eine Ausnahme dar, da die Blattflächen unter einer  $CO_2$ -Begasung signifikant reduziert waren.

Anhand der vorliegenden Ergebnisse können die Erkenntnisse vorausgegangener Untersuchungen nur zum Teil bestätigt werden. Beispielsweise haben Radoglou und Jarvis (1990) eine Zunahme der Blattfläche von verschiedenen *Populus*-Stecklingen beobachten können (Radoglou und Jarvis 1990). Unter anderem haben auch Gardner et al. (1995) festgestellt, dass bei verschiedenen Hybridpappel-Klonen eine Zunahme der Blattfläche bei den Pflanzen, die einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration ausgesetzt

waren, zu beobachten war. Auch konnte Tylor ähnliche Effekte einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration auf die Blattfläche von *Populus*- Individuen feststellen (Taylor et al. 1994; Ferris et al. 1993).

Bosac et al. (1995) haben dagegen bei Versuchen mit Hybridpappeln keinen signifikanten Effekt einer erhöhten  $CO_2$ - Konzentration auf die Blattausdehnung der Pflanzen beobachten können (Bosac et al. 1995). Teilweise waren die Blattflächen der begasten Pflanzen sogar geringer, was im Zuge der vorliegenden Messergebnisse teilweise bestätigt werden kann (Bosac et al. 1995). Das zeigt, dass das Blattwachstum verschiedener Pappelarten unterschiedlich auf erhöhte  $CO_2$ -Konzentration reagiert. Zumindest kann anhand der vorliegenden Ergebnisse nicht pauschal gesagt werden, dass eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration die Blattfläche von *Populus*- Individuen steigen lässt. Vielmehr sollte zwischen den Arten unterschieden werden.

Beim Vergleich zwischen der Blattflächenausprägung von Hybridpappeln und den Elternarten waren die Ergebnisse eindeutiger. Bei den einjährigen Pflanzen sowie bei den Stecklingen waren die Blättflächen der Hybridpappeln stets größer, wenn auch nur zum Teil signifikant. Besonders aber bei der Pflanzengruppe der Stecklinge waren die Ergebnisse deutlich. Hier hat sich gezeigt, dass unter Normalbedingungen, sowie auch unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration die Blattflächen der Hybridpappeln deutlich größer waren als bei den Elternarten, was auf eine Heterosis hindeuten kann. Die Ergebnisse dieser Arbeit unterstützen die Erkenntnisse vorausgegangener Arbeiten. So haben Zanewich et al. (2018) ebenfalls bei Vergleichen zwischen Hybridpappeln und deren Elternarten festgestellt, dass die Hybridpappeln eine größere Blattfläche aufgewiesen haben (Zanewich et al. 2018). Dass eine größere Blattfläche gleichzeitig zu einem größerem Stammvolumen führen kann, zeigte Ridge et al. (1986) bei Versuchen, bei denen Hybridpappeln mit den Elternarten verglichen worden sind (Ridge et al. 1986). Auch hier bestätigen die Erkenntnisse dieser Arbeit zum großen Teil die Ergebnisse von Ridge et al 1986 (Ridge et al. 1986). Daher scheint wahrscheinlich, dass unter anderem auch wegen der größeren Blattflächen die hybriden Pappeln ein überlegenes Wachstum aufgewiesen haben.

### 6.2.6 Spaltöffnungen (Stomata)

Anhand der vorliegenden Ergebnisse wird ersichtlich, dass eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre bei fast allen untersuchten Gruppen einen signifikanten Effekt auf die Größe der Spaltöffnungen gehabt hat. Dabei waren bei den betroffenen Gruppen die Spaltöffnungen bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen signifikant größer. Die Hybridpappel *Populus x canadensis* stellt hier eine Ausnahme dar. Trotz der fehlenden Signifikanz ist jedoch auch bei dieser Gruppe ein leichter Effekt durch das erhöhte  $CO_2$  erkennbar.

Aufgrund der unterschiedlichen Resultate, die der Literatur zu entnehmen sind, kann durch die vorliegenden Ergebnisse nur ein Teil der Erkenntnisse aus anderen wissenschaftlichen Arbeiten bestätigt werden.

Beispielweise haben Radoglou und Jarvis (1990) und Ceulemans et al. (1995b) bei ihren Untersuchungen mit Pappeln keinen Einfluss durch das erhöhte  $CO_2$  auf die Spaltöffnungsgröße erkennen können (Radoglou und Jarvis 1990; Ceulemans et al. 1995b). Dohney-Adams et al. (2012) haben dagegen festgestellt, dass eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration wiederum zu kleineren Spaltöffnungen bei den Pflanzen führen kann (Doheny-Adams et al. 2012).

Bei Langzeitversuchen an *Betula pendula* wurde wiederum festgestellt, dass durch eine steigende  $CO_2$ -Konzentration auch die Größe der Spaltöffnungen zunehmen kann (Wagner et al. 1996).

Wiederum stellen diese über 6 verschiedene Pappelarten einheitlichen Ergebnisse umso mehr ein überraschendes Resultat dar. Scheinbar reagieren Pappeln besonders empfindlich auf eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration und passen sich durch eine Vergrößerung der Spaltöffnungen veränderten atmosphärischen Bedingungen an. Dieser Effekt scheint schon bei sehr jungen Pflanzen aufzutreten, da auch bei allen untersuchten Stecklingen der Durchmesser der Spaltöffnungen erhöht war.

Jedoch sollte der Vergleich zwischen Pappelarten und weiteren Arten vorsichtig erfolgen, da die Blattmorphologie sich unterscheiden kann.

Beim Vergleich zwischen den Hybridpappeln und den Elternarten konnte dagegen kein eindeutiger Trend beobachtet werden. Bei den einjährigen Pflanzen lag die Stomatagröße der Hybridpappeln zwischen den beiden Elternarten, wobei dieses Verhältnis bei Normalbedingungen und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration

vorherrschte. Bei der Gruppe der Stecklinge hatten wiederum unter Normalbedingungen die Hybridpappeln größere Spaltöffnungen, aber nur zum Teil signifikant. Unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration reagierten die Elternarten stärker auf das  $CO_2$  mit höheren Zunahmen der Spaltöffnungen, wodurch die Spaltöffnungen der Hybridpappeln (zum Teil signifikant) kleiner waren. Die Beobachtung lässt darauf schließen, dass die Hybridpappeln eher weniger auf das erhöhte  $CO_2$  reagieren als die Elternarten.

#### 6.2.7 Zusammenhänge von morphologischen Eigenschaften des Blatts

Bei den morphologischen Eigenschaften der untersuchten Blätter konnte zum großen Teil bei keiner der Pappel- und Hybridpappel- Arten ein statistisch signifikanter Zusammenhang ermittelt werden (Tabelle 127). Zwar waren bei den Arten *Populus x canescens* und *Populus tremula* zum Teil vereinzelt signifikante Korrelationen festgestellt worden, jedoch verhielten sich diese nur teilweise analog zu den anderen untersuchten Arten. So ist beispielweise eine negative Korrelation zwischen dem Stomata- Durchmesser und der stomatären Leitfähigkeit bei *Populus x canescens* beobachtet worden. Dieses Ergebnis hat eher überrascht, da bei diesem Vergleich eine positive Korrelation zu erwarten war. Die Ergebnisse anderer Arten zeigen in dieser Hinsicht ein gemischtes Bild, wobei keine klare Tendenz abgeleitet werden kann. Hier waren die Korrelationen nicht signifikant. Auch bei der Korrelation von Stomata- Durchmesser und Blatt- Fläche konnten keine signifikanten Zusammenhänge ermittelt werden. Auch hier waren die Ergebnisse nicht einheitlich. Einzig bei der Art *Populus tremula* wurden signifikante Korrelationen ermittelt, die vermutlich eher zufälliger Natur sind, da bei keiner der anderen Gruppen eine Signifikanz festgestellt werden konnte.

Korrelationen von morphologischen Eigenschaften des Blatts		Korrelationskoeffizient	
		Blatt-Fläche	Stomatäre Leitfähigkeit
<i>P. x canescens</i> 400 ppm	Stomata-Durchmesser	0,790	-0,217
<i>P. x canescens</i> 950 ppm		-0,404	-0,363*
<i>P. tremula</i> 400 ppm	Stomata-Durchmesser	-0,471**	0,500
<i>P. tremula</i> 950 ppm		0,422	0,166
<i>P. alba</i> 400 ppm	Stomata-Durchmesser	0,118	0,106
<i>P. alba</i> 950 ppm		-0,008	0,201
<i>P. x canadensis</i> 400 ppm	Stomata-Durchmesser	-0,174	0,179
<i>P. x canadensis</i> 950 ppm		0,310	-0,601
<i>P. nigra</i> 400 ppm	Stomata-Durchmesser	0,200	0,078
<i>P. nigra</i> 950 ppm		-0,112	-0,213
<i>P. deltoides</i> 400 ppm	Stomata-Durchmesser	-0,420	-0,053
<i>P. deltoides</i> 950 ppm		-0,107	-0,007

\*\* Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig) // \*Die Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant (zweiseitig)

Tabelle 127: Korrelationsanalyse von morphologischen Eigenschaften des Blatts mit Signifikanzanalyse

### 6.2.8 Holzanatomie

Die holzanatomischen Untersuchungen dieser Arbeit haben ergeben, dass eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration einen signifikanten Effekt auf ausgewählte holzanatomische Eigenschaften von bestimmten Pappel-Arten haben kann.

Bei Betrachtung der radialen Zuwächse war überwiegend bei fast allen untersuchten Hybridpappel- und Pappel-Arten eine signifikant erhöhte Wachstumsleistung erkennbar. Einzig bei *Populus tremula* waren die Jahrringzunahmen bei den Kontrollpflanzen höher als bei den begasten Pflanzen. Dieses Erkenntnis kann zum Teil nicht die Ergebnisse vorausgegangener Untersuchungen bestätigen. Beispielsweise waren bei den Versuchen von Lotfiomran et al. (2015) zwar teilweise signifikant stärkere Jahrringzuwächse unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration beobachtet worden, wiederum waren die Ergebnisse bei den parallel untersuchten Pappeln der Art *Populus x canescens* nicht signifikant. Hierbei ist zu beachten, dass die Versuche unter variierender Nährstoffversorgung und einer etwas niedrigeren  $CO_2$ -Begasung stattgefunden haben. Dennoch geben die vorliegenden Ergebnisse darauf einen Hinweis, dass unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration (950 ppm) der radiale Zuwachs signifikant bei Pappeln zunehmen kann.

Unterscheidet man bei den vorliegenden Ergebnissen zwischen Hybridpappeln und Elternarten, so fällt auf, dass besonders die Hybridpappeln zum Teil sehr starke Jahrringzuwächse gegenüber den Elternarten aufgewiesen haben. Unter Normalbedingungen, wie auch unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration scheint das Wachstum von Hybridpappeln schneller zu sein als bei den Elternarten. Diese Überlegenheit der Hybridpappeln könnte ein wesentlicher Vorteil sein, sich auch außerhalb von

Laborbedingungen gegenüber den Elternarten durchzusetzen, da schnelleres radiales Wachstum zu einer besseren Standfestigkeit führen kann und wiederum mögliche Beschädigungen durch abiotische Umweltfaktoren wie Unwetterereignisse abmildert. Eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration hatte auch bei weiteren anatomischen Eigenschaften einen signifikanten Einfluss. So hatte eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration einen überwiegend signifikanten Einfluss auf die Größe der Gefäßflächen der Pflanzen der untersuchten Arten. Eine Ausnahme stellt hier *Populus x canescens* dar, bei der die Gefäßflächen der Kontrollpflanzen im Durchschnitt etwas größer waren als bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen. Bei allen weiteren untersuchten Hybridpappel und Pappelarten waren die Gefäßflächen der Pflanzen, die einer erhöhten atmosphärischen  $CO_2$ -Konzentration ausgesetzt war, signifikant erhöht.

Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen die Erkenntnisse vorausgegangener Untersuchungen nur zum Teil, da die gewonnenen Ergebnisse anderer wissenschaftlicher Arbeiten sehr unterschiedlich ausfallen. Besonders dadurch, dass holzanatomische Untersuchungen an Pappeln bezüglich eines möglichen Einflusses einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration in der Vergangenheit eher selten waren, ist ein direkter Vergleich mit Baumarten und deren Reaktion auf eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration schwierig. Dennoch können die vorliegenden Ergebnisse die Erkenntnisse von Atkinson und Taylor (1996) bestätigen. Die Arbeit zeigte, dass *Quercus*- Individuen mit einer signifikanten Erhöhung der Querschnittfläche von Tracheen reagiert haben (Atkinson und Taylor 1996). Auch sind ähnliche Effekte bei Erlen und Buchen unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration beobachtet worden (Watanabe et al. 2008; Lotfiomran et al. 2015).

Die Ergebnisse von Luo (2004), bei denen die Gefäße durch eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration bei *Populus x euramericana* und *Populus nigra* signifikant größer waren, können anhand der vorliegenden Ergebnissen bestätigt werden (Luo et al. 2005). Gleichzeitig wurde bei den Untersuchungen bei *Populus alba* kein signifikanter Einfluss beobachtet, was sich gegensätzlich zu den vorliegenden Ergebnissen verhält (Luo et al. 2005). Auch ist bei den Untersuchungen von Lotfiomran et al. (2015) bei Hybridpappeln der Art *Populus x canescens* kein signifikanter Effekt durch die erhöhte  $CO_2$ -Konzentration beobachtet worden (Lotfiomran et al. 2015). Dies kann anhand der vorliegenden Ergebnisse bestätigt werden.

Daraus kann geschlossen werden, dass insbesondere die Gefäßdichte der Hybridpappel *Populus x canescens* wenig durch eine erhöhte atmosphärische  $CO_2$ -Konzentration beeinflusst wird.

Auch der Vergleich zwischen Hybridpappel- und Pappel- Arten hat gezeigt, dass überwiegend die hybriden Pappeln unter beiden Versuchsbedingungen signifikant höhere Gefäßflächen aufgewiesen haben als die Elternarten. Unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration scheint sich der Effekt aber abzuschwächen, denn beispielweise waren hier die Gefäßflächen von *Populus alba* größer als bei *Populus x canescens* und wiederum die Gefäßflächen von *Populus nigra* größer als von *Populus x canadensis*. Die Ergebnisse zeigen wiederum auch, dass Hybridpappeln begünstigt durch größere Gefäßflächen eine überlegene Wasserleitfähigkeit aufweisen könnten als die Elternarten. Jedoch ist für einen überlegenen Wassertransport nicht allein die Gefäßgröße, sondern auch die Gefäßdichte relevant. Dabei haben die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit ergeben, dass bei allen untersuchten Baumarten eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration einen signifikanten Einfluss auf die Gefäßdichte im Holz hatte. Dabei waren unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration die Gefäßdichten bei allen Pflanzen stark reduziert. Diese sehr eindeutigen Ergebnisse können auch hier nur zum Teil mit den Ergebnissen vorausgegangener Arbeiten verglichen werden. Zum großen Teil waren die Ergebnisse in vorausgegangenen Arbeiten nicht signifikant, oder die Untersuchungen zeigten eine Zunahme der Gefäßdichte im Holz (Atkinson und Taylor 1996; Watanabe et al. 2008; Vaz et al. 2012; Lotfiomran et al. 2015). Auch bei Versuchen mit Pappeln waren keine signifikanten Unterschiede durch eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration bei der Gefäßdichte erkennbar (Lotfiomran et al. 2015). Durch die überwiegende Variabilität der Ergebnisse vorausgegangener Arbeiten stellen die ermittelten eindeutigen Tendenzen ein unerwartetes Ergebnis dar. Auch beim Vergleich zwischen Hybridpappeln und Pappeln waren, wenn auch nur teilweise signifikant, Tendenzen erkennbar. So hatten die Pappeln bei allen Arten und bei beiden Versuchsbedingungen höhere Gefäßdichten im Holz als die Hybridpappeln. Bei der Gruppe der einjährigen Pflanzen waren nur beim Vergleich zwischen *Populus x canescens* und *Populus tremula* unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration die Unterschiede signifikant. Dagegen waren besonders bei der Gruppe der Stecklinge die Gefäßdichten der Pappeln überwiegend signifikant höher als bei den Hybridpappeln. Eine Ausnahme stellt hier der Vergleich *Populus x canadensis* und *Populus nigra* unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration dar. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass Hybridpappeln und

Pappeln bei unterschiedlichen Umweltbedingungen verschiedene Anpassungsformen entwickeln. So weisen Hybridpappeln ein schnelleres radiales Wachstum auf bei einer gleichzeitig höheren Gefäßfläche, aber wiederum einer deutlich niedrigeren Gefäßdichte als die untersuchten Elternarten. So hatten die Elternarten dagegen ein langsamerer radiales Wachstum bei gleichzeitig kleineren Gefäßflächen, jedoch aber mit einer deutlich höheren Anzahl von Gefäßen.

### 6.2.9 Zusammenhänge von anatomischen Eigenschaften des Holzes

Bei der Frage, ob es zwischen den holzanatomischen Eigenschaften und den Gaswechsel- Parametern einen signifikanten Zusammenhang gibt, sind im Zuge der Korrelationsanalysen vereinzelt signifikante Ergebnisse ermittelt worden (Tabelle 128). Beispielweise war bei der Hälfte der untersuchten Pflanzengruppen, die Normalbedingungen ausgesetzt waren, ein zum Teil negativer signifikanter Zusammenhang zwischen radialem Zuwachs und der Größe der Gefäßfläche ermittelt worden. Dabei schien bei einer stärkeren Jahrringbreite die Gefäßfläche im Holz abzunehmen.

Unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration war nur noch bei *Populus x canadensis* dieser negative Zusammenhang statistisch signifikant. Bei den restlichen Arten war der Zusammenhang bei einer erhöhten  $CO_2$ - Konzentration positiv, wobei nur bei *Populus x canescens* und *Populus nigra* eine Signifikanz vorgelegen hat. Diese Zusammenhänge, wenn zum Teil auch nicht signifikant, können ein Hinweis darauf sein, dass unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration Pflanzen bei einer stärkeren Jahrringbildung auch größere Gefäße bilden, was für die Pflanzen von Vorteil sein könnte, da dadurch ein schnellerer Wassertransport innerhalb der Pflanze bestehen würde. Somit wäre möglicherweise die Wasserversorgung der Blätter bei anspruchsvollen Umweltbedingungen wie starkem Wind und hohen Temperaturen wahrscheinlicher gesichert.

Bei der Ermittlung eines möglichen Zusammenhangs zwischen dem radialen Zuwachs und der Nettphotosyntheserate war bei der Hälfte der Pappelarten unter Normalbedingungen teilweise eine signifikant negative Korrelation ermittelt worden. Dabei schien bei den betroffenen Gruppen bei einer schwächeren Nettphotosyntheserate die Jahrringbreite tendenziell breiter zu sein. Auch dies ist ein Zusammenhang, der eher überraschend und möglicherweise zufälliger Natur ist.



Unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration sind dagegen bei allen Pappelarten signifikant positive Korrelationen ermittelt worden. Dieser Zusammenhang gibt einen Hinweis darauf, dass bei einer stärkeren photosynthetischen Leistung der radiale Zuwachs der Pflanze signifikant zunimmt. Bei der Ermittlung eines möglichen Zusammenhangs zwischen dem radialen Zuwachs und der stomatären Leitfähigkeit waren unter Normalbedingungen keine eindeutigen Tendenzen ermittelt worden. Nur bei *Populus nigra* waren signifikante positive Zusammenhänge zwischen den beiden Größen erfasst worden. Unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration zeichnete sich bei dem überwiegenden Anteil an untersuchten Pflanzengruppen ein signifikant positiver Zusammenhang zwischen dem radialen Zuwachs und der stomatären Leitfähigkeit ab. So scheinen die betroffenen Pflanzengruppen bei einer erhöhten stomatären Leitfähigkeit gleichzeitig einen stärkeren radialen Zuwachs zu haben, was wiederum bedeuten kann, dass unter diesen Gegebenheiten mehr  $CO_2$  gebunden werden kann.

Korrelationen von holzanatomischen Eigenschaften		Korrelationskoeffizient		
		Gefäßfläche	Nettophotosyntheserate	Stomatäre Leitfähigkeit
<i>P. x canadensis</i> 400 ppm	Radialer Zuwachs (Jahrringbreite)	-0,470	- 0,243**	0,109
<i>P. x canadensis</i> 950 ppm		0,155**	0,131*	-0,009
<i>P. tremula</i> 400 ppm	Radialer Zuwachs (Jahrringbreite)	- 0,151**	0,079	-0,101
<i>P. tremula</i> 950 ppm		0,039	0,382**	- 0,146*
<i>P. alba</i> 400 ppm	Radialer Zuwachs (Jahrringbreite)	0,101	0,099	-0,118
<i>P. alba</i> 950 ppm		0,026	0,524**	0,192**
<i>P. x canadensis</i> 400 ppm	Radialer Zuwachs (Jahrringbreite)	- 0,122*	- 0,276**	0,081
<i>P. x canadensis</i> 950 ppm		- 0,147*	0,304**	0,273**
<i>P. nigra</i> 400 ppm	Radialer Zuwachs (Jahrringbreite)	- 0,187**	0,316**	0,217**
<i>P. nigra</i> 950 ppm		0,140*	0,333**	0,199**
<i>P. deltoides</i> 400 ppm	Radialer Zuwachs (Jahrringbreite)	-0,068	- 0,117*	-0,098
<i>P. deltoides</i> 950 ppm		0,108	0,318**	0,146*

\*\* Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig) // \*Die Korrelation ist auf dem 0,05 Niveau signifikant (zweiseitig)

Tabelle 128: Korrelationsanalyse von holzanatomischen Eigenschaften und Gaswechselfparameter mit Signifikanzanalyse

### 6.2.10 C/N Konzentration

Eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration in der Atmosphäre hatte bei den untersuchten Pflanzen zum Teil einen signifikanten Effekt auf die Stickstoff (N) und Kohlenstoff (C) Konzentration in verschiedenen Teilen der Pflanzen.

Beispielweise waren die Kohlenstoff- Konzentrationen in den Stämmen der mit  $CO_2$  begasten Pflanzen zum großen Teil erhöht, wobei nur teilweise eine statistische Signifikanz vorgelegen hat. Die Pappelart *Populus tremula* stellt hier eine Ausnahme dar, bei der die Kohlenstoff- Konzentrationen bei den unbegasten Pflanzen höher war, wobei auch hier die Unterschiede ebenfalls nicht signifikant waren.

Zwischen Hybridpappeln und Elternarten gab es bei der Kohlenstoff- Konzentration in den Stämmen der Pflanzen nur vereinzelt signifikante Unterschiede.

Bei den untersuchten Blättern der Versuchspflanzen waren die Ergebnisse eindeutiger. Hier waren bei fast allen Pflanzengruppen die Kohlenstoff- Konzentration bei den begasten Pflanzen signifikant höher. Nur bei der Pappelart *Populus alba* waren die Ergebnisse nicht signifikant, wobei auch hier die Kohlenstoff- Konzentration in den Blättern der begasten Pflanzen höher war.

Zwischen Hybridpappeln und Elternarten sind überwiegend keine signifikanten Unterschiede bei der Kohlenstoff- Konzentration im Blatt festgestellt worden.

Die Kohlenstoff- Konzentrationen in den Wurzeln der Pflanzen zeigte durch eine erhöhte  $CO_2$ - Begasung keinen einheitlichen Trend. Überwiegend war die Kohlenstoff- Konzentration bei den Wurzeln der unbegasten Pflanzen höher, jedoch waren die Ergebnisse statistisch nicht signifikant.

Auch zwischen Hybridpappeln und Elternarten sind keine signifikanten Unterschiede bei der Kohlenstoff- Konzentration in den Wurzeln festgestellt worden.

Die Stickstoffkonzentration in den Stämmen der Pflanzen hat sich durch eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration zum großen Teil nicht signifikant verändert. Einzig bei den Pappelarten *Populus canadensis* und *Populus deltoides* war der Stickstoffgehalt in den Stämmen der Pflanzen signifikant verringert.

Zwischen Hybridpappeln und Elternarten waren nur bei der Gruppe der Stecklinge die Unterschiede signifikant, wobei ausschließlich die Elternarten überwiegend signifikant höhere Stickstoffkonzentrationen aufgewiesen haben.

Bei den untersuchten Blättern der Pflanzen waren die Ergebnisse eindeutiger. Hier war bei fast allen Pflanzenarten die Stickstoffkonzentration in den Blättern der begasten Pflanzen signifikant verringert. Nur bei der Art *Populus tremula* waren die Unterschiede nicht signifikant.

Zwischen Hybridpappeln und Elternarten waren die Stickstoffkonzentrationen in den Blättern der Pflanzen überwiegend nicht signifikant unterschiedlich.

Bei den untersuchten Wurzeln der Pflanzen war bei der Stickstoffkonzentration kein eindeutiger Trend zu beobachten. Bei den Gruppen, in denen eine statistische Signifikanz festgestellt worden war (*Populus tremula*, *Populus x canadensis*, *Populus nigra*), waren die Stickstoffkonzentrationen bei den mit  $CO_2$  begasten Pflanzen reduziert.

Zwischen Hybridpappeln und Elternarten waren nur zum Teil signifikante Unterschiede erfasst worden, wobei die Pappeln in den Wurzeln eine höhere Stickstoffkonzentration aufgewiesen haben.

Auch diese Ergebnisse bestätigen zum Teil die Erkenntnisse von vorherigen Untersuchungen bezüglich eines möglichen Einflusses einer erhöhten  $CO_2$  Konzentration in der Atmosphäre auf die Stickstoff- und Kohlenstoffkonzentration in bestimmten Pflanzenteilen.

Beispielweise konnten im Zuge dieser Untersuchung die Erkenntnisse von Curtis und Teeri (1992) bestätigt werden, die eine Verringerung der Stickstoffkonzentration bei *Populus euramericana*- Individuen unter erhöhtem  $CO_2$  beobachtet hatten (Curtis et al. 1995). Auch bei den von Lindroth et al (1993) durchgeführten Versuchen sind bei *Populus tremuloides*- Individuen verringerte Stickstoffkonzentrationen in den Blättern der begasten Pflanzen beobachtet worden (Lindroth et al. 1993). Dagegen wurden bei *Populus grandidentata*- Pflanzen keine signifikanten Effekte von einer erhöhten  $CO_2$  Konzentration auf die Stickstoffkonzentration in Blättern beobachtet (Curtis et al. 1995). Auch bei Versuchen mit *Populus euramericana* sind keine signifikanten Effekte durch das erhöhte  $CO_2$  auf das C/N- Verhältnis im ganzen Baum beobachtet worden (Pregitzer et al. 1995).

Bei der vorliegenden Arbeit war dagegen zum Teil das C/N- Verhältnis in bestimmten Abschnitten der Pflanzen signifikant erhöht, wobei bei den untersuchten Stämmen, Blättern und Wurzeln das erhöhte C/N- Verhältnis signifikant war. Bei den einjährigen Pflanzen wurde das C/N- Verhältnis beim Holzmaterial nicht durch eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration beeinflusst. Bei der Gruppe der Stecklinge dagegen waren die C/N- Verhältnisse überwiegend signifikant erhöht. Das untersuchte Blattmaterial zeigte dagegen bei beiden Gruppen einen überwiegend signifikanten Einfluss von erhöhtem  $CO_2$  auf das C/N- Verhältnis von Hybridpappeln und Elternarten. Bei den untersuchten Wurzeln waren dagegen bei den einjährigen Pflanzen nur bei der Art *Populus tremula* die Unterschiede signifikant. Bei den Stecklingen dagegen wurden überwiegend signifikant höhere C/N- Verhältnisse beobachtet, wobei die Art *Populus deltoides* hier eine Ausnahme darstellt.

Beim Vergleich zwischen Hybridpappel und Elternarten waren die C/N- Verhältnisse teilweise signifikant voneinander abweichend. Wo bei den einjährigen Stämmen der Pflanzen keine signifikanten Effekte beobachtet worden sind, waren überwiegend die C/N- Verhältnisse von den Hybridpappeln der Stecklinge höher als bei den Elternarten.

Beim untersuchten Blattmaterial waren kaum signifikante Unterschiede beim C/N-Verhältnis zwischen Hybridpappeln und Elternarten beobachtet worden.

Beim Wurzelmaterial waren teilweise die C/N-Verhältnisse der Hybridpappeln, überwiegend unter einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration höher als bei den Elternarten. Da bei den Pflanzen überwiegend eine verringerte Stickstoffkonzentration durch eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration beobachtet wurde, sind die C/N-Verhältnisse bei den Pflanzen angestiegen. Eine mögliche Ursache für eine niedrigere Stickstoffkonzentration im Gewebe unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration kann beispielweise eine „Biomasseverdünnung“ oder auch eine herabgesetzte Effizienz der Wurzelbildung sein (Taub und Wang 2008). Auch wird in diesem Zusammenhang in der Literatur teilweise eine positive Korrelation zwischen einer verminderten Transpirationsrate und einer dadurch niedrigen Stickstoffkonzentrationen im Gewebe erwähnt und wurde unter anderem bei *Populus deltoides*- Individuen beobachtet (Taub und Wang 2008; Del Pozo et al. 2007; Polley et al. 1999; McDonald et al. 2002). Da bei den Pflanzen tendenziell höhere Transpirationsraten bei den begasten Pflanzen festgestellt worden sind, scheint die Vermutung, dass eine verminderte Stickstoffaufnahme durch niedrige Transpirationsraten ausgelöst wird, unwahrscheinlich.

Eine Biomasseverdünnung als Grund für die niedrigeren Stickstoffkonzentrationen scheint hier wahrscheinlicher. Eine sogenannte Biomasseverdünnung tritt immer dann auf, wenn die Zunahme der Gesamtbiomasse einer Pflanze, die erhöhtem atmosphärischem  $CO_2$  ausgesetzt ist, höher ist als eine entsprechende Zunahme von Stickstoff (Taub und Wang 2008). Da bei den untersuchten Hybridpappeln und Elternarten die oberirdische und unterirdische Biomasse durch eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration teilweise zugenommen hat, kann anhand der vorliegenden Ergebnisse diese Hypothese unterstützt werden.

### 6.2.11 *Lignin- und Kohlenhydratgehalte*

Die vorliegenden Ergebnisse haben gezeigt, dass eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre teilweise einen signifikanten Effekt auf die mengenmäßige Verteilung des Lignins und der verschiedenen Holzzucker im Holz hatte. Beispielsweise ist bei fast allen untersuchten Baumarten der Anteil an säurelöslichem Lignin unter erhöhter

atmosphärischen  $CO_2$ - Konzentration gesunken, wobei teilweise die Unterschiede klein waren. Bei den Arten *Populus x canescens*, *Populus alba*, *Populus x canadensis* und *Populus deltoides* war die Reduzierung signifikant.

Bei den einjährigen Pflanzen hatte das erhöhte  $CO_2$  keinen signifikanten Effekt auf den Anteil an Lignin im Holz. Bei den Stecklingen waren die Ergebnisse nicht einheitlich. Bei *Populus x canadensis* ist der Anteil signifikant gesunken, bei *Populus nigra* wiederum signifikant gestiegen, wobei tendenzielle Unterschiede ermittelt worden sind.

Durch die überwiegend reduzierten Lignin- Anteile, die bei den verschiedenen Pflanzengruppen beobachtet worden sind, können Erkenntnisse aus der Literatur zum Teil bestätigt werden. Beispielweise haben Cotrufo und Ineson (2000) beobachtet, dass unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration der Lignin- Anteil bei Buchenzweigen um 12 % zurück gehen kann (Cotrufo und Ineson 2000). Ähnliche Ergebnisse wurden auch bei Weißbirken beobachtet (Kostiainen et al. 2006). Bei Versuchen mit *Populus*- Individuen wurde unter anderem kein Einfluss auf den Lignin- Anteil im Holz erfasst (Kostiainen et al. 2008). Bei Versuchen mit *Populus tremula x alba* sind die Lignin- Anteile im Holz durch eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration wiederum gestiegen (Richet et al. 2012). Ähnliche Ergebnisse wurden bei *Populus euramericana* beobachtet, wobei hier eine Stickstoff Düngung stattgefunden hat (Luo und Polle 2009).

Der Rhamnose- Anteil wurde wenig durch eine erhöhte  $CO_2$ - Begasung beeinflusst. Bei den Vergleichen, bei dem eine statistische Signifikanz vorgelegen hat, waren die Unterschiede klein.

Der Mannose- Anteil im Holz wurde weitestgehend nur tendenziell durch eine  $CO_2$ - Begasung beeinflusst. Signifikante Unterschiede wurden bei *Populus nigra* beobachtet, wo der Mannose- Anteil gesunken ist. Bei der Gruppe *Populus deltoides* ist der Mannose- Anteil wiederum signifikant gestiegen.

Der Arabinose- Anteil wurde bei keiner Pflanzenart signifikant beeinflusst. Hier waren aber die Unterschiede weitestgehend klein.

Der Galaktose- Anteil ist bei den meisten untersuchten Pflanzen gesunken. Die Tendenzen bei den Arten *Populus tremula* und *Populus deltoides* waren signifikant.

Der Xylose Anteil war bei *Populus deltoides* und *Populus nigra* signifikant durch eine erhöhte  $CO_2$ - Begasung reduziert, wobei bei der Gruppe *Populus nigra* tendenzielle Unterschiede erfasst worden sind. Bei allen weiteren untersuchten Pflanzenarten waren die Unterschiede nicht signifikant.

Der Glucose- Anteil ist bei den meisten Arten (mit Ausnahme von *Populus x canescens*) gestiegen, wobei bei *Populus tremula* und *Populus nigra* der Anstieg signifikant war. Diese Ergebnisse verhalten sich gegensätzlich zu den Erkenntnissen von Kostainen et al. (2006), bei denen ein reduzierter Zellulose- Anteil unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration ermittelt worden ist, wobei auch hier zu beachten ist, dass Weißbirken und keine Pappeln untersucht worden sind (Kostiainen et al. 2006). Bei Versuchen mit Pappeln wurde dagegen gezeigt, dass die Effekte durch eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration variieren können. Zum Teil ist kein signifikanter Effekt auf den Zellulose- Anteil beobachtet worden (Kostiainen et al. 2008). Andererseits kann der Anteil an Alpha- Zellulose unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration steigen (Kaakinen et al. 2004).

Die Summe der im Holz enthaltenen Zucker sind bei *Populus x canadensis* und *Populus tremula* durch die  $CO_2$ - Begasung signifikant gestiegen. Bei allen anderen Arten war kein signifikanter Effekt zu beobachten.

Vorausgegangene Untersuchungen zeigten eine hohe Variabilität einer möglichen Beeinflussung durch eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration, bezüglich der Anteile aus löslichen Zuckern im Holz, deren Anteile bei Pappeln entweder gestiegen oder gesunken sind (Kostiainen et al. 2008).

Der Extraktgehalt in den Pflanzen wurde bei einem großen Teil der untersuchten Pflanzenarten durch eine  $CO_2$ - Begasung reduziert, wobei bei *Populus x canadensis* und bei *Populus deltoides* die Unterschiede signifikant waren. Dabei waren die Unterschiede bei der Art *Populus x canadensis* eher Tendenzen. Bei *Populus x canescens* sind wiederum die Extraktgehalte bei einer  $CO_2$ - Begasung angestiegen. Dabei waren die Unterschiede signifikant.

Auch hier sind die Angaben in der Literatur dazu nicht einheitlich. Zum einen kann der Anteil an Extraktstoffen unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration steigen (Weißbirken) (Kostiainen et al. 2006). Auf der anderen Seite können die Effekte, die durch eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration ausgelöst werden variieren. So kann der Extraktgehalt in Pappeln sinken oder auch steigen (Kostiainen et al. 2008).

Die unterschiedlichen Trends zeigen, dass die Reaktion von Bäumen durch eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration in der Atmosphäre sehr verschieden ausfallen können. Da ein einheitlicher Trend fehlt, lassen sich nur sehr schwer Rückschlüsse daraus ziehen, welche genauen Mechanismen für eine erhöhte oder eine verminderte Holzzucker-

Produktion verantwortlich sind. Auch in vorausgegangenen Untersuchungen bleiben diese Effekte unerklärt.

Die Vergleiche zwischen Hybridpappel und Elternarten haben ergeben, dass bei den einjährigen Pflanzen und bei den Stecklingen teilweise signifikante Tendenzen zwischen den Arten zu erkennen waren.

Der Lignin- Anteil war bei den einjährigen Pflanzen ähnlich. Unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration konnte ein signifikanter Unterschied zwischen der Hybridpappel *Populus x canescens* und *Populus tremula* erfasst werden. Bei der Gruppe der Stecklinge waren nur bei Umgebungsbedingungen signifikante Unterschiede erfasst worden. Die Ergebnisse zeigten, dass der Lignin- Anteil bei Umgebungsbedingungen und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration bei Hybridpappeln höher sein kann als bei den Elternarten, jedoch waren die Unterschiede nicht signifikant.

Der Anteil an säurelöslichem Lignin war bei den einjährigen Pflanzen unter Normalbedingungen und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration bei den Hybridpappeln höher als bei den Elternarten. Es wurden teilweise Tendenzen zwischen den Ergebnissen der Arten ermittelt. Die Unterschiede waren nicht signifikant, wodurch kein eindeutiger Unterschied zwischen Hybridpappeln und Elternarten nachgewiesen werden konnte.

Bei der Gruppe der Stecklinge war der Anteil an säurelöslichen Ligninen bei den Hybridpappeln bei Umgebungsbedingungen und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration niedriger. Dabei waren bei fast allen Vergleichen die Unterschiede signifikant, jedoch ist zu beachten, dass teilweise die Ergebnisse sich nur tendenziell unterscheiden haben. Die Ergebnisse zeigen jedoch einen einheitlichen Trend, der darauf hindeuten kann, dass bei jungen Hybridpappeln möglicherweise der Anteil an säurelöslichem Lignin geringer sein kann als bei den Elternarten.

Bei der Gruppe der einjährigen Pflanzen waren die Rhamnose- Anteile der Hybridpappeln unter beiden Versuchsbedingungen tendenziell höher als bei den Elternarten. Jedoch lag überwiegend keine Signifikanz vor. Bei der Gruppe der Stecklinge war überwiegend der Rhamnose- Anteil bei den Hybridpappeln niedriger, wobei die Unterschiede gering waren. Somit zeigen die Ergebnisse Tendenzen, die jedoch statistisch nicht gesichert sind.

Bei den Monosacchariden Mannose, Arabinose, Galactose und Xylose war der Anteil bei den einjährigen Hybridpappeln ebenfalls überwiegend niedriger als bei den Elternarten. Eine statistische Signifikanz lag bei einzelnen Vergleichen vor. Bei der

Gruppe der Stecklinge waren die Ergebnisse ähnlich. Besonders auffällige Unterschiede wurden beim Galaktose- Anteil und zum Teil beim Arabinose- Anteil ermittelt. Hier waren die Unterschiede zwischen Hybridpappeln und Elternarten überwiegend signifikant. Anhand der Ergebnisse konnten Tendenzen ermittelt werden, die darauf schließen, dass der Anteil an bestimmten Monosacchariden bei Hybridpappeln tendenziell niedriger sein kann als bei den Elternarten.

Der Glucose- Anteil war bei den einjährigen Hybridpappeln überwiegend niedriger als bei den Elternarten. Bei den Unterschieden konnte teilweise eine statistische Signifikanz ermittelt werden. Es konnten keine eindeutigen Tendenzen bei der Gruppe der Stecklinge ermittelt werden. Die Ergebnisse waren auch hier überwiegend nicht signifikant.

Die Summe der Zucker war bei den einjährigen Hybridpappeln und zum Teil bei den Stecklings-Hybriden geringer als bei den Elternarten. Besonders bei den einjährigen Pflanzen waren die Unterschiede vermehrt signifikant. Die Ergebnisse zeigen eine eindeutige Tendenz zu einem niedrigeren Anteil an Monosacchariden bei den Hybridpappeln im Vergleich zu den Elternarten.

Der Extraktgehalt war bei den einjährigen Pappelhybriden dagegen überwiegend höher als bei den Elternarten. Anhand der recht eindeutigen Unterschiede lag überwiegend eine statistische Signifikanz vor, die daraus schließen lässt, dass der Extraktgehalt bei Pappelhybriden höher sein kann als bei den Elternarten. Besonders in Hinblick auf die stoffliche Nutzung von Extraktstoffen ist dieses Ergebnis interessant. Dagegen war bei der Gruppe der Stecklinge der Extraktgehalt bei den Hybridpappeln unter beiden Versuchsbedingungen wiederum signifikant niedriger als bei den Elternarten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Ergebnisse unter Anderem abhängig von Art und Alter der Pflanzen sein können. Eine Übertragbarkeit auf weitere Pappelarten ist in diesem Fall schwer und sollte mit Vorsicht vorgenommen werden. Auch Vergleiche mit anderen Versuchen sind zwar möglich, aber es sollten der jeweilige Versuchsaufbau, die untersuchte Baumart und das Alter der untersuchten Individuen mitberücksichtigt werden. Aufgrund der hohen Anzahl an untersuchten Pappelarten konnten jedoch anhand der vorliegenden Ergebnisse Tendenzen ermittelt werden, die unterschiedliche Reaktionen von Hybridpappeln und Elternarten unter Umgebungsbedingungen und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration aufzeigen.



## 7 Schlussfolgerung

Für den pflanzlichen Stoffwechsel ist atmosphärisches  $CO_2$  lebensnotwendig. Häufig ist in der Literatur bei einer erhöhten atmosphärischen  $CO_2$  - Konzentration von einem „Düngeeffekt“ bei der pflanzlichen Entwicklung berichtet worden, dessen Ausmaß durchaus variieren kann. Bei der vorliegenden Arbeit konnte bei Hybridpappeln und deren Elternarten an ausgewählten untersuchten Parametern ein signifikanter Effekt durch eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration festgestellt werden. Zusammenfassend konnte folgendes gezeigt werden:

- Die Nettphotosyntheserate wurde bei einjährigen Pflanzen und Stecklingen signifikant von einer erhöhten  $CO_2$  - Konzentration beeinflusst und war erhöht.
- Unter Umgebungsbedingungen und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration waren die Nettphotosyntheseraten der Hybridpappeln größtenteils niedriger als bei den Elternarten
- Die stomatäre Leitfähigkeit wurde bei den meisten Pflanzen durch eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration beeinflusst und war überwiegend erhöht.
- Unter Umgebungsbedingungen und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration war die stomatäre Leitfähigkeit der Hybridpappeln größtenteils niedriger als bei den Elternarten
- Die Transpirationsrate wurde bei den meisten Pflanzen durch eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration beeinflusst und war überwiegend erhöht.
- Unter Umgebungsbedingungen und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration waren die Transpirationsraten der Hybridpappeln überwiegend niedriger als bei den Elternarten
- Die interzelluläre  $CO_2$ - Konzentration wurde bei einjährigen Pflanzen und Stecklingen signifikant von einer erhöhten  $CO_2$  - Konzentration beeinflusst und war stark erhöht.
- Die interzelluläre  $CO_2$ - Konzentration war unter Umgebungsbedingungen bei den Hybridpappeln überwiegend signifikant geringer als bei den Elternarten. Unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration konnten größtenteils keine eindeutigen Trends ermittelt werden
- Die oberirdische Biomasse wurde von einer erhöhten  $CO_2$ - Konzentration beeinflusst und war überwiegend erhöht, wobei nur teilweise eine statistische Signifikanz vorgelegen hat
- Die oberirdische Biomasse war bei den Hybridpappeln unter Umgebungsbedingungen und unter erhöhter  $CO_2$  - Konzentration überwiegend signifikant höher als bei den Elternarten

- Die unterirdische Biomasse wurde eher weniger von einer erhöhten atmosphärischen  $CO_2$ -Konzentration beeinflusst und war in den meisten Fällen ähnlich zu den unbegasteten Pflanzen
- Die unterirdische Biomasse der Hybridpappeln war unter Umgebungsbedingungen und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration in der Regel höher als bei den Elternarten, wobei nur selten eine statistische Signifikanz vorgelegen hat
- Der Höhenzuwachs wurde zum Teil von einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration beeinflusst und war erhöht, jedoch lag eher selten eine statistische Signifikanz vor
- Der Höhenzuwachs war bei den Hybridpappeln gegenüber den Elternarten unter Umgebungsbedingungen und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration signifikant erhöht
- Der radiale Zuwachs war bei den meisten Pflanzengruppen durch eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration höher, jedoch lag nur zum Teil eine Signifikanz vor
- Der radiale Zuwachs war bei den Hybridpappeln unter Umgebungsbedingungen und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration größtenteils höher als bei den Elternarten
- Bei der Vermessung der Blattflächen konnte kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Blattentwicklung und einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration in der Atmosphäre festgestellt werden
- Die Blattfläche der Hybridpappeln war unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration und unter Umgebungsbedingungen ausschließlich größer, wobei überwiegend eine statistische Signifikanz vorgelegen hat
- Die Größe der Spaltöffnungen wurde überwiegend von einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration signifikant beeinflusst und war zum großen Teil erhöht
- Bei der Vermessung der Spaltöffnungen konnten keine eindeutigen Unterschiede zwischen Hybridpappeln und Elternarten festgestellt werden. Bei der Gruppe der Stecklinge schienen jedoch unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration die Durchmesser der Spaltöffnungen bei den Hybridpappeln kleiner auszufallen als bei den Elternarten
- Die Größe der Gefäße wurde überwiegend durch eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration signifikant beeinflusst und war in der Regel erhöht
- Die Gefäße der Hybridpappeln waren zum großen Teil signifikant weitulmiger als die der Elternarten unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration und unter Umgebungsbedingungen
- Der Jahrringzuwachs wurde ebenfalls durch die erhöhte  $CO_2$ -Konzentration beeinflusst und war bei den meisten Pflanzengruppen signifikant höher
- Der Jahrringzuwachs der Hybridpappeln war unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration und unter Umgebungsbedingungen zum großen Teil stärker ausgeprägt als bei den Elternarten

- Eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration hat einen reduzierenden Effekt auf die Gefäßdichte der Pflanzen– bei allen Pflanzengruppe war die Gefäßdichte signifikant niedriger
- Die Gefäßdichte war unter beiden Versuchsbedingungen bei den Hybridpappeln niedriger als bei den Elternarten, wobei größtenteils keine Signifikanz vorgelegen hat
- Bei den meisten Pflanzengruppen lag im Holz ein höheres C/N Verhältnis bei den mit  $CO_2$ - begasten Pflanzen vor
- Bei den einjährigen hybriden Pappeln konnte kein signifikanter Unterschied zu den Elternarten bei beiden Versuchsbedingungen ermittelt werden. Jedoch haben die hybriden Pappel— Stecklinge unter beiden Versuchsbedingungen tendenziell ein höheres C/N Verhältnis aufgewiesen
- Bei allen Pflanzengruppen war im Blatt das C/N Verhältnis durch eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration höher
- Bei der einjährigen Pflanzengruppe hatten die Hybridpappeln durchweg ein höheres C/N Verhältnis im Blatt als die Elternarten, wobei überwiegend keine statistische Signifikanz vorgelegen hat. Bei den Stecklingen sind keine eindeutigen Tendenzen beobachtet worden.
- In den Wurzeln konnte kein eindeutiger Einfluss einer erhöhten atmosphärischen  $CO_2$ - Konzentration auf das C/N Verhältnis festgestellt werden
- Bei der einjährigen Pflanzengruppe hatten die Hybridpappeln ein höheres C/N Verhältnis in den Wurzeln als die Elternarten, wobei teilweise keine statistische Signifikanz vorgelegen hat. Bei den Stecklingen sind keine eindeutigen Tendenzen beobachtet worden.
- Eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration hatte keinen eindeutigen Einfluss auf die Lignin- Konzentration im Holz aller untersuchten Arten
- Die Lignin- Konzentration war bei beiden Versuchsbedingungen bei den einjährigen Hybridpappeln tendenziell höher als bei den Elternarten. Bei den Stecklingen war der Anteil des säurelöslichen Lignins bei den Hybridpappeln geringer als bei den Elternarten. Der Lignin- Anteil war dagegen überwiegend bei den Pappelhybriden höher.
- Die Glucose- Anteil war dagegen bei den meisten untersuchten Pflanzengruppen durch eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration erhöht
- Der Glucose- Anteil war bei den Hybridpappeln bei beiden Versuchsbedingungen geringer als bei den Elternarten
- Eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration hatte keinen eindeutigen Einfluss auf die Xylose- Konzentration
- Die Xylose- Konzentration war bei den Hybridpappeln überwiegend geringer als bei den Elternarten
- Bei der Summe der Zucker war kein eindeutiger Trend zu beobachten, der eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration als Ursache definieren könnte
- Die Summe der Zucker war bei den Hybridpappeln überwiegend geringer als bei den Elternarten

- Der Extraktgehalt ist häufig bei einer erhöhten  $CO_2$  - Konzentration gesunken
- Der Extraktgehalt war zum großen Teil bei den Hybridpappeln geringer als bei den Elternarten

Die Ergebnisse der durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass eine erhöhte  $CO_2$ - Konzentration einen signifikanten Einfluss auf bestimmte Eigenschaften von jungen Pappeln haben kann. Dabei ist ebenfalls festgestellt worden, dass sich unter Umgebungsbedingungen und unter erhöhter  $CO_2$ - Konzentration die physiologischen und chemischen Eigenschaften zwischen Hybridpappeln und deren Elternarten durchaus unterscheiden können. Diese Erkenntnisse geben einen Hinweis darauf, inwieweit Hybridpappeln und deren Elternarten bei einer erhöhten  $CO_2$ - Konzentration in der Zukunft reagieren könnten. Besonders die Ergebnisse zur Wuchsstärke und Biomasseproduktion, bei den die Hybridpappeln deutlich stärker waren als ihre Elternarten, sind nützliche Hinweise auf mögliche Reaktionen der Pflanzen in der voraussichtlich zukünftig vorherrschenden Atmosphäre. Auf der anderen Seite werden sich neben der Steigerung der  $CO_2$ - Konzentration auch weitere Umweltparameter in der Biosphäre verändern. Besonders langanhaltende Trockenheit mit wenig Niederschlagsereignissen könnten ein wesentlicher Stressfaktor für junge Pflanzen und Bäume werden. Daher wäre es sinnvoll, in Zukunft die Untersuchungen zu den Reaktionen der Pflanzen auf diesem Gebiet auszuweiten. Unter Beachtung, dass die Versuche unter Laborbedingungen (Gewächshausversuche) stattgefunden haben, sind die Ergebnisse unter der Berücksichtigung zu bewerten, dass Laborergebnisse nicht direkt auf die Realbedingungen in der Natur übertragbar sind. Vielmehr dienen diese Laborergebnisse dazu als ein zuverlässiges Instrument gesicherte Daten zu liefern, die wenig durch externe Faktoren wie Umwelteinflüsse manipuliert worden sind. Daher dienen diese Ergebnisse als eine Grundlage für voraussichtliche Verhaltensweisen der Pflanzen in spezifischen Umgebungsbedingungen. Auf Grundlage dieser gesammelten Daten wären zukünftige Versuche an älteren Pappeln sowie außerhalb eines Gewächshauses (Freilandbedingungen) durchaus sinnvoll, um Ergebnisse nah der örtlichen Begebenheiten zu erhalten. Das angewandte Versuchslayout auf andere wirtschaftlich wichtige Nutzhölzer wie diverse Nadelholzbaumarten anzuwenden wäre ebenfalls interessant für die Forschung, um weitere Wissenslücken zu schließen.

## 8 Literaturverzeichnis

Ainsworth, Elizabeth A.; Rogers, Alistair (2007): The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising CO<sub>2</sub>: mechanisms and environmental interactions. In: *Plant, Cell & Environment* 30 (3), S. 258–270. DOI: 10.1111/j.1365-3040.2007.01641.x.

Amthor, Jeffrey S. (1995): Terrestrial higher-plant response to increasing atmospheric [CO<sub>2</sub>] in relation to the global carbon cycle. In: *Global Change Biology* 1 (4), S. 243–274. DOI: 10.1111/j.1365-2486.1995.tb00025.x.

Atkinson, C. J.; Taylor, J. M. (1996): Effects of elevated CO<sub>2</sub> on stem growth, vessel area and hydraulic conductivity of oak and cherry seedlings. In: *New Phytol* 133 (4), S. 617–626. DOI: 10.1111/j.1469-8137.1996.tb01930.x.

Bader, Martin; Hiltbrunner, Erika; Körner, Christian (2009): Fine root responses of mature deciduous forest trees to free air carbon dioxide enrichment (FACE). In: *Functional Ecology* 23 (5), S. 913–921. DOI: 10.1111/j.1365-2435.2009.01574.x.

Baker, N. R.; Thomas, Howard (Hg.) (1992): Crop photosynthesis. Place of publication not identified: Elsevier.

Barigah, T. S.; Saugier, B.; Mousseau, M.; Guittet, J.; Ceulemans, R. (1994): Photosynthesis, leaf area and productivity of 5 poplar clones during their establishment year. In: *Ann. For. Sci.* 51 (6), S. 613–625. DOI: 10.1051/forest:19940607.

Bate, Nicholas J.; Rood, Stewart B.; Blake, Terence J. (1988): Gibberellins and heterosis in poplar. In: *Canadian Journal of Botany* 66 (6), S. 1148–1152. DOI: 10.1139/b88-165.

Bernacchi, C. J.; Calfapietra, C.; Davey, P. A.; Wittig, V. E.; Scarascia-Mugnozza, G. E.; Raines, C. A.; Long, S. P. (2003): Photosynthesis and stomatal conductance responses of poplars to free-air CO<sub>2</sub> enrichment (PopFACE) during the first growth cycle and immediately following coppice. In: *New Phytologist* 159 (3), S. 609–621. DOI: 10.1046/j.1469-8137.2003.00850.x.

Blaschke, L.; Forstreuter, M.; Sheppard, L. J.; Leith, I. K.; Murray, M. B.; Polle, A. (2002): Lignification in beech (*Fagus sylvatica*) grown at elevated CO<sub>2</sub>

concentrations: interaction with nutrient availability and leaf maturation. In: *Tree Physiol* 22 (7), S. 469–477. DOI: 10.1093/treephys/22.7.469.

Bosac, C.; Gardner, S.D.L.; Taylor, G.; Wilkins, D. (1995): Elevated CO<sub>2</sub> and hybrid poplar: a detailed investigation of root and shoot growth and physiology of *Populus euramericana*, 'Primo'. In: *Forest Ecology and Management* 74 (1-3), S. 103–116. DOI: 10.1016/0378-1127(94)03506-R.

Brown, Alisha Lea Pagel; Day, Frank P.; Hungate, Bruce A.; DRAKE, BERT G.; Hinkle, C. Ross (2007): Root biomass and nutrient dynamics in a scrub-oak ecosystem under the influence of elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. In: *Plant and Soil* 292 (1-2), S. 219–232. DOI: 10.1007/s11104-007-9218-4.

Brown, Kevin; Higginbotham, K. O. (1986): Effects of carbon dioxide enrichment and nitrogen supply on growth of boreal tree seedlings. In: *Tree Physiol* 2 (1\_2\_3), S. 223–232. DOI: 10.1093/treephys/2.1-2-3.223.

Bundesforschungszentrum für Wald (2023): Lexikon waldschädigende Luftverunreinigungen und Klimawandel. Online verfügbar unter <http://bfw.ac.at/rz/wlv.lexikon?keywin=2374>, zuletzt aktualisiert am 11.03.2023, zuletzt geprüft am 11.03.2023.

Cain, Nancy P.; Ormrod, Douglas P. (1984): Hybrid vigour as indicated by early growth characteristics of *Populus deltoides*, *P. nigra*, and *P. × euramericana*. In: *Can. J. Bot.* 62 (1), S. 1–8. DOI: 10.1139/b84-001.

Calfapietra, C.; Gielen, B.; Galema, A. N. J.; Lukac, M.; Angelis, P. de; Moscatelli, M. C. et al. (2003): Free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE) enhances biomass production in a short-rotation poplar plantation. In: *Tree Physiol* 23 (12), S. 805–814. DOI: 10.1093/treephys/23.12.805.

Calfapietra, Carlo; Tulva, Ingmar; Eensalu, Eve; Perez, Marta; Angelis, Paolo de; Scarascia-Mugnozza, Giuseppe; Kull, Olevi (2005): Canopy profiles of photosynthetic parameters under elevated CO<sub>2</sub> and N fertilization in a poplar plantation. In: *Environmental Pollution* 137 (3), S. 525–535. DOI: 10.1016/j.envpol.2005.01.038.

Campbell, John S.; Mahoney, John M.; Rood, Stewart B. (1993): A lack of heterosis in natural poplar hybrids from southern Alberta. In: *Can. J. Bot.* 71 (1), S. 37–42. DOI: 10.1139/b93-005.

Centritto, M.; Nascetti, P.; Petrilli, L.; Raschi, A.; Loreto, F. (2004): Profiles of isoprene emission and photosynthetic parameters in hybrid poplars exposed to free-air CO<sub>2</sub> enrichment+. In: *Plant, Cell & Environment* 27 (4), S. 403–412. DOI: 10.1111/j.1365-3040.2003.01156.x.

Cervera, M. T.; Storme, V.; Soto, A.; Ivens, B.; van Montagu, M.; Rajora, O. P.; Boerjan, W. (2005): Intraspecific and interspecific genetic and phylogenetic relationships in the genus *Populus* based on AFLP markers. In: *TAG. Theoretical and applied genetics. Theoretische und angewandte Genetik* 111 (7), S. 1440–1456. DOI: 10.1007/s00122-005-0076-2.

Ceulemans, R. (1995): Growth and Physiology of One-year old Poplar (*Populus*) Under Elevated Atmospheric CO<sub>2</sub> Levels. In: *Annals of Botany* 75 (6), S. 609–617. DOI: 10.1006/anbo.1995.1066.

Ceulemans, R.; Impens, I.; Steenackers, V. (1987): Variations in photosynthetic, anatomical, and enzymatic leaf traits and correlations with growth in recently selected *Populus* hybrids. In: *Can. J. For. Res.* 17 (4), S. 273–283. DOI: 10.1139/x87-047.

Ceulemans, R.; Jiang, X. N.; Shao, B. Y. (1995a): Effects of Elevated Atmospheric CO<sub>2</sub> on Growth, Biomass Production and Nitrogen Allocation of Two *Populus* Clones. In: *Journal of Biogeography* 22 (2/3), S. 261. DOI: 10.2307/2845920.

Ceulemans, R.; Shao, B. Y.; Jiang, X. N.; Kalina, J. (1996): First- and second-year aboveground growth and productivity of two *Populus* hybrids grown at ambient and elevated CO<sub>2</sub>. In: *Tree Physiol* 16 (1\_2), S. 61–68. DOI: 10.1093/treephys/16.1-2.61.

Ceulemans, R.; Taylor, G.; Bosac, C.; Wilkins, D.; Besford, R. T. (1997): Photosynthetic acclimation to elevated CO<sub>2</sub> in poplar grown in glasshouse cabinets or in open top chambers depends on duration of exposure. In: *J Exp Bot* 48 (9), S. 1681–1689. DOI: 10.1093/jxb/48.9.1681.

Ceulemans, R.; van Praet, L.; Jiang, X. N. (1995b): Effects of CO<sub>2</sub> enrichment, leaf position and clone on stomatal index and epidermal cell density in poplar (*Populus*). In: *New Phytologist* 131 (1), S. 99–107. DOI: 10.1111/j.1469-8137.1995.tb03059.x.

Ceulemans, Reinhart (1990): Genetic variation in functional and structural productivity determinants in poplar. Amsterdam: Thesis Publishers.

Ceulemans R. & Mousseau M. (1994): Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on woody plants. In: *New Phytologist* (127), S. 425–446.

Clifton-Brown, John; Harfouche, Antoine; Casler, Michael D.; Dylan Jones, Huw; Macalpine, William J.; Murphy-Bokern, Donal et al. (2019): Breeding progress and preparedness for mass-scale deployment of perennial lignocellulosic biomass crops switchgrass, miscanthus, willow and poplar. In: *Global change biology. Bioenergy* 11 (1), S. 118–151. DOI: 10.1111/gcbb.12566.

Cohen, Jacob (1988): Statistical power analysis for the behavioral sciences. Second edition. Hillsdale, N.J.: L. Erlbaum Associates. Online verfügbar unter <https://permalink.obvsg.at/>.

Cotrufo, M. Francesca; Ineson, Phil (2000): Does elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations affect wood decomposition? In: *Plant and Soil* 224 (1), S. 51–57. DOI: 10.1023/A:1004771426605.

Cotrufo, M. Francesca; Ineson, Phil; Scott, AndY. (1998): Elevated CO<sub>2</sub> reduces the nitrogen concentration of plant tissues. In: *Global Change Biology* 4 (1), S. 43–54. DOI: 10.1046/j.1365-2486.1998.00101.x.

Curtis, Peter S.; Teeri, James A. (1992): Seasonal responses of leaf gas exchange to elevated carbon dioxide in *Populus grandidentata*. In: *Can. J. For. Res.* 22 (9), S. 1320–1325. DOI: 10.1139/x92-175.

Curtis, Peter S.; Vogel, Christoph S.; Pregitzer, Kurt S.; Zak, Donald R.; Teeri, James A. (1995): Interacting effects of soil fertility and atmospheric CO<sub>2</sub> on leaf area growth and carbon gain physiology in *Populus euramericana* (Dode) Guinier. In: *New Phytologist* 129 (2), S. 253–263. DOI: 10.1111/j.1469-8137.1995.tb04295.x.

Curtis, Peter S.; Vogel, Christoph S.; Wang, Xianzhong; Pregitzer, Kurt S.; Zak, Donald R.; Lussenhop, John et al. (2000): Gas exchange, leaf nitrogen, and growth efficiency of *populus tremuloides* in a CO<sub>2</sub>-enriched atmosphere. In: *Ecological Applications* 10 (1), S. 3–17. DOI: 10.1890/1051-0761(2000)010[0003:GELNAG]2.0.CO;2.

Curtis, Peter S.; Wang, Xianzhong (1998): A meta-analysis of elevated CO<sub>2</sub> effects on woody plant mass, form, and physiology. In: *Oecologia* 113 (3), S. 299–313. DOI: 10.1007/s004420050381.



Del Pozo, Alejandro; Pérez, Pilar; Gutiérrez, Diego; Alonso, Aitor; Morcuende, Rosa; Martínez-Carrasco, Rafael (2007): Gas exchange acclimation to elevated CO<sub>2</sub> in upper-sunlit and lower-shaded canopy leaves in relation to nitrogen acquisition and partitioning in wheat grown in field chambers. In: *Environmental and Experimental Botany* 59 (3), S. 371–380. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2006.04.009.

Deutscher Wetterdienst (2016): Nationaler Klimareport 2016. Online verfügbar unter [https://www.fortbildung-klimawandel.de/wp-content/uploads/2017/01/DWD\\_Nationaler\\_klimareport\\_2016.pdf](https://www.fortbildung-klimawandel.de/wp-content/uploads/2017/01/DWD_Nationaler_klimareport_2016.pdf), zuletzt geprüft am 02.08.2023.

Dickson, R. E.; Coleman, M. D.; Riemenschneider, D. E.; Isebrands, J. G.; Hogan, G. D.; Karnosky, D. F. (1998): Growth of five hybrid poplar genotypes exposed to interacting elevated CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>. In: *Can. J. For. Res.* 28 (11), S. 1706–1716. DOI: 10.1139/x98-150.

Dillen, Sophie Y.; Marron, Nicolas; Sabatti, Maurizio; Ceulemans, Reinhart; Bastien, Catherine (2009a): Relationships among productivity determinants in two hybrid poplar families grown during three years at two contrasting sites. In: *Tree Physiol* 29 (8), S. 975–987. DOI: 10.1093/treephys/tpp036.

Dillen, Sophie Y.; Storme, Véronique; Marron, Nicolas; Bastien, Catherine; Neyrinck, Sabrina; Steenackers, Marijke et al. (2009b): Genomic regions involved in productivity of two interspecific poplar families in Europe. 1. Stem height, circumference and volume. In: *Tree Genetics & Genomes* 5 (1), S. 147–164. DOI: 10.1007/s11295-008-0175-8.

Doheny-Adams, Timothy; Hunt, Lee; Franks, Peter J.; Beerling, David J.; Gray, Julie E. (2012): Genetic manipulation of stomatal density influences stomatal size, plant growth and tolerance to restricted water supply across a growth carbon dioxide gradient. In: *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences* 367 (1588), S. 547–555. DOI: 10.1098/rstb.2011.0272.

Eckenwalder, James E. (1984): Natural intersectional hybridization between North American species of *Populus* (Salicaceae) in sections Aigeiros and Tacamahaca. II. Taxonomy. In: *Can. J. Bot.* 62 (2), S. 325–335. DOI: 10.1139/b84-051.

Faix, Oskar (2003): Grundlagen der Holzchemie, Teil 2 B. Akzessorische Bestandteile, Biosynthese und Repetitorium der chemischen Grundlagen.

Vorlesungsskript Studiengang Holzwirtschaft, Universität Hamburg. Vorlesungsskript. Universität Hamburg.

Ferris, R.; Ranasinghe, C. S.; Gardner, S.D.L.; Taylor, G.; Bosac, C. (1993): Increased leaf expansion following exposure to elevated CO<sub>2</sub> due to altered cell wall properties. Online verfügbar unter <http://cri.nsf.ac.lk/handle/1/3524>.

Franks, P. J.; Beerling, D. J. (2009a): CO<sub>2</sub>-forced evolution of plant gas exchange capacity and water-use efficiency over the Phanerozoic. In: *Geobiology* 7 (2), S. 227–236. DOI: 10.1111/j.1472-4669.2009.00193.x.

Franks, Peter J.; Beerling, David J. (2009b): Maximum leaf conductance driven by CO<sub>2</sub> effects on stomatal size and density over geologic time. In: *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 106 (25), S. 10343–10347. DOI: 10.1073/pnas.0904209106.

Franz Binder (2015): Hybridpappel. In: Torsten Vor, Hermann Spellmann, Andreas Bolte und Christian Ammer (Hg.): Potenziale und Risiken eingeführter Baumarten. Baumartenportraits mit naturschutzfachlicher Bewertung. Unter Mitarbeit von Norbert Bartsch. Göttingen: Universitätsverlag Göttingen (Göttinger Forstwissenschaften, Band 7), S. 155–166. Online verfügbar unter [https://www.researchgate.net/profile/franz-binder-3/publication/290444497\\_hybridpappel](https://www.researchgate.net/profile/franz-binder-3/publication/290444497_hybridpappel).

Friedl, Thomas; Raven, Peter H.; Evert, Ray Franklin; Eichhorn, Susan E. (Hg.) (2006): Biologie der Pflanzen. 4. Auflage. Berlin, New York: Walter de Gruyter.

Gardner, Simon D. L.; Freer-Smith, Peter H.; Tucker, J.; Taylor, Gail (2005): Elevated CO<sub>2</sub> protects poplar (*Populus trichocarpa* × *P. deltoides*) from damage induced by O<sub>3</sub>: identification of mechanisms. In: *Functional Plant Biol.* 32 (3), S. 221–235. DOI: 10.1071/FP04131.

Gardner, Simon D. L.; Taylor, Gail; Bosac, Creana (1995): Leaf growth of hybrid poplar following exposure to elevated CO<sub>2</sub>. In: *New Phytologist* 131 (1), S. 81–90. DOI: 10.1111/j.1469-8137.1995.tb03057.x.

Gaudillere, J.; Mousseau, Marie (1989): Short term effect of CO<sub>2</sub> enrichment on leaf development and gas exchange of young poplars (*Populus euramericana* cv. I 214). In: *Acta Oecologica Oecologia Plantarum*, S. 95–105. Online verfügbar unter <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordid=fr8905268>.

Genetic variation in functional and structural productivity determinants in poplar (1990).

Gielen, B.; Ceulemans, R. (2001): The likely impact of rising atmospheric CO<sub>2</sub> on natural and managed Populus: a literature review. In: *Environmental Pollution* 115 (3), S. 335–358. DOI: 10.1016/S0269-7491(01)00226-3.

Gifford, Roger M.; Barrett, Damian J.; Lutze, Jason L. (2000): The effects of elevated [CO<sub>2</sub>] on the C:N and C:P mass ratios of plant tissues. In: *Plant and Soil* 224 (1), S. 1–14. DOI: 10.1023/A:1004790612630.

Global carbon dioxide growth in 2018 reached 4th highest on record | National Oceanic and Atmospheric Administration (2022). Online verfügbar unter <https://www.noaa.gov/news/global-carbon-dioxide-growth-in-2018-reached-4th-highest-on-record>, zuletzt aktualisiert am 03.05.2022, zuletzt geprüft am 03.05.2022.

Gom, Lori A.; Rood, Stewart B. (1999): The discrimination of cottonwood clones in a mature grove along the Oldman River in southern Alberta. In: *Can. J. Bot.* 77 (8), S. 1084–1094. DOI: 10.1139/b99-123.

Grosser, Dietger (2007): Die Hölzer Mitteleuropas. Ein mikrographischer Lehratlas. Reprint der 1. Aufl. von 1977. Remagen: Kessel.

Handa, I. Tanya; Hagedorn, Frank; Hättenschwiler, Stephan (2008): No stimulation in root production in response to 4 years of in situ CO<sub>2</sub> enrichment at the Swiss treeline. In: *Funct Ecology* 22 (2), S. 348–358. DOI: 10.1111/j.1365-2435.2007.01372.x.

Harrison, R. G. (1990): Hybrid zones: windows on evolutionary process. Cornell University, Ithaca, NY 14853, USA. (Oxford Surveys in Evolutionary Biology, 7).

Hauk, Andrea (2013): Wie funktioniert eigentlich ein Photometer? In: *Biologie in unserer Zeit* 43 (4), S. 212. DOI: 10.1002/biuz.201390073.

Hensel, Lukas (2014): Lukopolis - Biologie. Online verfügbar unter <http://www.lukashensel.de/biomain.php?biopage=fotosyn>, zuletzt aktualisiert am 02.08.2023, zuletzt geprüft am 02.08.2023.

Heß, Dieter (2008): Pflanzenphysiologie. Grundlagen der Physiologie und Biotechnologie der Pflanzen. 11., komplett neu bearbeitete und neu gestaltete

Auflage. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer (UTB Botanik, Biologie, Agrarwissenschaften, 8393).

Hofmann, David J.; Butler, James H.; Tans, Pieter P. (2009): A new look at atmospheric carbon dioxide. In: *Atmospheric Environment* 43 (12), S. 2084–2086. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.12.028.

IPCC (2014): Climate change 2013. The physical science basis ; Working Group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Elektronische Ressource]. Geneva: WMO IPCC.

Isebrand, J. G.; Mc Donald, E. P.; Kruger, E.; Hendrey, G.; Percy, K.; Pregitzer, K. et al. (2001): Growth responses of *Populus tremuloides* clones to interacting elevated carbon dioxide and tropospheric ozone. In: *Environmental Pollution* 115 (3), S. 359–371. DOI: 10.1016/S0269-7491(01)00227-5.

Jäger, Eckehart J.; Neumann, Stefanie; Ohmann, Erich (2003): Botanik. Mit 28 Tabellen. 5., neu bearb. Aufl. Heidelberg, Berlin: Spektrum Springer.

Johnson, Jon D.; Tognetti, Roberto; Paris, Piero (2002): Water relations and gas exchange in poplar and willow under water stress and elevated atmospheric CO<sub>2</sub>. In: *Physiologia Plantarum* 115 (1), S. 93–100. DOI: 10.1034/j.1399-3054.2002.1150111.x.

Kaakinen, Seija; Kostianen, Katri; Ek, Fredrik; Saranpää, Pekka; Kubiske, Mark E.; Sober, Jaak et al. (2004): Stem wood properties of *Populus tremuloides*, *Betula papyrifera* and *Acer saccharum* saplings after 3 years of treatments to elevated carbon dioxide and ozone. In: *Global Change Biology* 10 (9), S. 1513–1525. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2004.00814.x.

Kadereit, Joachim W.; Körner, Christian; Kost, Benedikt; Sonnewald, Uwe (2014): Strasburger – Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Keeling, C. D.; Whorf, T. P.; Wahlen, M.; van der Plicht, J. (1995): Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. In: *Nature* 375 (6533), S. 666–670. DOI: 10.1038/375666a0.

Keeling, Charles D. (1998): Rewards and Penalties of Monitoring the Earth. In: *Annu. Rev. Energy. Environ.* 23 (1), S. 25–82. DOI: 10.1146/annurev.energy.23.1.25.

- King, J.; Pregitzer, K.; Zak, D.; Sober, J.; Isebrands, J.; Dickson, R. et al. (2001): Fine-root biomass and fluxes of soil carbon in young stands of paper birch and trembling aspen as affected by elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and tropospheric O<sub>3</sub>. In: *Oecologia* 128 (2), S. 237–250. DOI: 10.1007/s004420100656.
- Kirschbaum, Miko U. F. (2000): Forest growth and species distribution in a changing climate. In: *Tree Physiol* 20 (5\_6), S. 309–322. DOI: 10.1093/treephys/20.5-6.309.
- Kirschbaum, Miko U. F.; McMillan, Andrew M. S. (2018): Warming and Elevated CO<sub>2</sub> Have Opposing Influences on Transpiration. Which is more Important? In: *Curr Forestry Rep* 4 (2), S. 51–71. DOI: 10.1007/s40725-018-0073-8.
- Kostiainen, Katri; Jalkanen, Hanna; Kaakinen, Seija; Saranpää, Pekka; Vapaavuori, Elina (2006): Wood properties of two silver birch clones exposed to elevated CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>. In: *Global Change Biol* 12 (7), S. 1230–1240. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2006.01165.x.
- Kostiainen, Katri; Kaakinen, Seija; Warsta, Elina; Kubiske, Mark E.; Nelson, Neil D.; Sober, Jaak et al. (2008): Wood properties of trembling aspen and paper birch after 5 years of exposure to elevated concentrations of CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub>. In: *Tree Physiol* 28 (5), S. 805–813. DOI: 10.1093/treephys/28.5.805.
- Kuehny, Jeff S.; Peet, Marry M.; Nelson, Paul V.; Willits, Dan H. (1991): Nutrient Dilution by Starch in CO<sub>2</sub>-enriched Chrysanthemum. In: *J Exp Bot* 42 (6), S. 711–716. DOI: 10.1093/jxb/42.6.711.
- Larcher, Walter (1994): Ökophysiologie der Pflanzen. Leben, Leistung und Streßbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt ; 78 Tabellen. 5., völlig Neubearb. Aufl. Stuttgart: Ulmer (UTB für Wissenschaft Große Reihe Botanik, Agrar- und Forstwissenschaften, Ökologie, 8074).
- Larigauderie, A.; Reynolds, J. F.; Strain, B. R. (1994): Root response to CO<sub>2</sub> enrichment and nitrogen supply in loblolly pine. In: *Belowground Responses to Rising Atmospheric CO<sub>2</sub>: Implications for Plants, Soil Biota, and Ecosystem Processes*: Springer, Dordrecht, S. 21–32. Online verfügbar unter [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-0851-7\\_3](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-0851-7_3).
- Lehnen, Ralph (2022): Bestimmung der Holzzucker mittels Boratkomplex-Anionenaustauschchromatographie. Hamburg.

Leitch, Ilja; Bennet, Michael D. (1997): Polyploidy in angiosperms. In: *trends in plant science* 1997 (2), S. 470–476. Online verfügbar unter <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1360138597011540>, zuletzt geprüft am 24.03.2022.

Li, Bailian; Howe, Glenn T.; Wu, Rongling (1998): Developmental factors responsible for heterosis in aspen hybrids (*Populus tremuloides* x *P. tremula*). In: *Tree Physiol* 18 (1), S. 29–36. DOI: 10.1093/treephys/18.1.29.

Liberloo, Marion; Lukac, Martin; Calfapietra, Carlo; Hoosbeek, Marcel R.; Gielen, Birgit; Miglietta, Franco et al. (2009): Coppicing shifts CO<sub>2</sub> stimulation of poplar productivity to above-ground pools: a synthesis of leaf to stand level results from the POP/EUROFACE experiment. In: *New Phytologist* 182 (2), S. 331–346. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2008.02754.x.

LI-COR®Bioscience: Using the LI-6400/LI-6400XT. Portable Photosynthesis System. Version 6. Li-Cor Inc. Online verfügbar unter <https://www.licor.com/documents/s8zyqu2vwndny903qutg>, zuletzt geprüft am 13.02.2022.

LI-COR®Bioscience (2016): LI-6400XT System Photosynthesis, Fluorescence, Respiration. Online verfügbar unter <https://licor.app.boxenterprise.net/s/ifuhfcjga0wvh94lkysz>, zuletzt aktualisiert am 02.08.2023, zuletzt geprüft am 02.08.2023.

Lindroth, Richard L.; Kinney, Karl K.; Platz, Cynthia L. (1993): Responses of Deciduous Trees to Elevated Atmospheric CO<sub>2</sub>: Productivity, Phytochemistry, and Insect Performance. In: *Ecology* 74 (3), S. 763–777. DOI: 10.2307/1940804.

Loladze, Irakli (2002): Rising atmospheric CO<sub>2</sub> and human nutrition: toward globally imbalanced plant stoichiometry? In: *Trends in Ecology & Evolution* 17 (10), S. 457–461. DOI: 10.1016/S0169-5347(02)02587-9.

López-Caamal, Alfredo; Tovar-Sánchez, Efraín (2014): Genetic, morphological, and chemical patterns of plant hybridization. In: *Rev. Chil. de Hist. Nat.* 87 (1). DOI: 10.1186/s40693-014-0016-0.

Lotfiomran, Neda; Fromm, Jörg; Luinstra, Gerrit A. (2015): Effects of elevated CO<sub>2</sub> and different nutrient supplies on wood structure of European beech (*Fagus*

sylvatica) and gray poplar (*Populus × canescens*). In: *IAWA J* 36 (1), S. 84–97. DOI: 10.1163/22941932-00000087.

Lukac, Martin; Calfapietra, Carlo; Godbold, Douglas L. (2003): Production, turnover and mycorrhizal colonization of root systems of three *Populus* species grown under elevated CO<sub>2</sub> (POPFACE). In: *Global Change Biol* 9 (6), S. 838–848. DOI: 10.1046/j.1365-2486.2003.00582.x.

Luo, Zhi-Bin; Langenfeld-Heyser, Rosemarie; Calfapietra, Carlo; Polle, Andrea (2005): Influence of free air CO<sub>2</sub> enrichment (EUROFACE) and nitrogen fertilisation on the anatomy of juvenile wood of three poplar species after coppicing. In: *Trees* 19 (2), S. 109–118. DOI: 10.1007/s00468-004-0369-0.

Luo, Zhi-Bin; Polle, Andrea (2009): Wood composition and energy content in a poplar short rotation plantation on fertilized agricultural land in a future CO<sub>2</sub> atmosphere. In: *Global Change Biology* 15 (1), S. 38–47. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2008.01768.x.

Makino, A.; Mae, T. (1999): Photosynthesis and Plant Growth at Elevated Levels of CO<sub>2</sub>. In: *Plant Cell Physiol* 40 (10), S. 999–1006. DOI: 10.1093/oxfordjournals.pcp.a029493.

Marchi, Susanna; Tognetti, Roberto; Vaccari, Francesco Primo; Lanini, Mario; Kaligarič, Mitja; Miglietta, Francesco; Raschi, Antonio (2004): Physiological and morphological responses of grassland species to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations in FACE-systems and natural CO<sub>2</sub> springs. In: *Functional Plant Biol.* 31 (2), S. 181–194. DOI: 10.1071/fp03140.

Matamala, Roser; González-Meler, Miquel A.; Jastrow, Julie D.; Norby, Richard J.; Schlesinger, William H. (2003): Impacts of fine root turnover on forest NPP and soil C sequestration potential. In: *Science* 302 (5649), S. 1385–1387. DOI: 10.1126/science.1089543.

Matyssek, Rainer; Fromm, Jörg; Rennenberg, Heinz; Roloff, Andreas (2010): *Biologie der Bäume. Von der Zelle zur globalen Ebene*. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer (UTB Biologie, Agrar- und Forstwissenschaften, Landschaftsplanung, 8450).

Matyssek, Rainer; Herppich, Werner B. (2019): *Experimentelle Pflanzenökologie. Grundlagen und Anwendungen. 2., stark überarbeitete und erweiterte Auflage*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum (Springer eBook Collection).

- McCarthy, Megan (2007): Lecture\_22\_2007.ppt. Online verfügbar unter [http://www.marric.us/files/HS\\_2\\_CAM\\_C3\\_photosynthesis.pdf](http://www.marric.us/files/HS_2_CAM_C3_photosynthesis.pdf), zuletzt geprüft am 02.08.2023.
- McDonald, Evan P.; Erickson, John E.; Kruger, Eric L. (2002): Research note: Can decreased transpiration limit plant nitrogen acquisition in elevated CO<sub>2</sub>? In: *Functional Plant Biol.* 29 (9), S. 1115–1120. DOI: 10.1071/fp02007.
- McKown, Athena D.; Guy, Robert D. (2018): Hybrid vigour - poplars play it cool. In: *Tree Physiol* 38 (6), S. 785–788. DOI: 10.1093/treephys/tpy055.
- Miyazawa, Shin-Ichi; Livingston, Nigel J.; Turpin, David H. (2006): Stomatal development in new leaves is related to the stomatal conductance of mature leaves in poplar (*Populus trichocarpa* P. deltoides). In: *J Exp Bot* 57 (2), S. 373–380. DOI: 10.1093/jxb/eri278.
- Möller, Ralf (2007): Crop platforms for cell wall biorefining. Lignocellulose feedstocks. Newbury: CPL Press.
- Mortensen, Leiv M. (1994): Effects of Carbon Dioxide Concentration on Assimilate Partitioning, Photosynthesis and Transpiration of *Betula pendula* Roth, and *Picea abies* (L.) Karst. Seedlings at Two Temperatures. In: *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science* 44 (3), S. 164–169. DOI: 10.1080/09064719409410240.
- Nelson, Neil D.; Meilan, Richard; Berguson, William E.; McMahon, Bernard G.; Cai, Meijun; Buchman, Daniel (2019): Growth performance of hybrid poplar clones on two agricultural sites with and without early irrigation and fertilization. In: *Silvae Genetica* 68 (1), S. 58–66. DOI: 10.2478/sg-2019-0011.
- Norby, Richard J.; Gunderson, Carla A.; Wullschlegel, Stan D.; O'Neill, E. G.; McCracken, Mary K. (1992): Productivity and compensatory responses of yellow-poplar trees in elevated CO<sub>2</sub>. In: *Nature* 357 (6376), S. 322–324. DOI: 10.1038/357322a0.
- Norby, Richard J.; Ledford, Joanne; Reilly, Carolyn D.; Miller, Nicole E.; O'Neill, Elizabeth G. (2004): Fine-root production dominates response of a deciduous forest to atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment. In: *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 101 (26), S. 9689–9693. DOI: 10.1073/pnas.0403491101.



Norby, Richard J.; Wullschleger, S. D.; Gunderson, C. A.; Johnson, D. W.; Ceulemans, R. (1999): Tree responses to rising CO<sub>2</sub> in field experiments: implications for the future forest. In: *Plant, Cell & Environment* 22 (6), S. 683–714. DOI: 10.1046/j.1365-3040.1999.00391.x.

Ogaya, R.; Llorens, L.; Peñuelas, J. (2011): Density and length of stomatal and epidermal cells in "living fossil" trees grown under elevated CO<sub>2</sub> and a polar light regime. In: *Acta Oecologica* 37 (4), S. 381–385. DOI: 10.1016/j.actao.2011.04.010.

O'Neill, E. G.; Luxmoore, R. J.; Norby, R. J. (1987): Elevated atmospheric CO<sub>2</sub> effects on seedling growth, nutrient uptake, and rhizosphere bacterial populations of *Liriodendron tulipifera* L. In: *Plant and Soil* 104 (1), S. 3–11. DOI: 10.1007/BF02370618.

Orlovic, S. (1993): An investigation of stomata variability. M. Sc. Thesis, Belgrade. Forestry Faculty of Belgrade.

Orlovic, S.; Guzina V.; Krstic B.; Merkulov L. (1997): Genetic Variability in Anatomical, Physiological and Growth Characteristics of Hybrid Poplar (*Populus x euramericana* DODE (GUINIER)) and Eastern Cottonwood (*Populus deltoides* BARTR.) Clones 1997 (4), S. 183–190. Online verfügbar unter [https://www.thuenen.de/media/institute/fg/PDF/Silvae\\_Genetica/1998/Vol.\\_47\\_Heft\\_4/47\\_4\\_183.pdf](https://www.thuenen.de/media/institute/fg/PDF/Silvae_Genetica/1998/Vol._47_Heft_4/47_4_183.pdf), zuletzt geprüft am 13.04.2022.

Oschmann, Wolfgang (2016): Evolution der Erde. Geschichte der Erde und des Lebens. 1. Auflage, Online-Ausgabe. Stuttgart, Bern: UTB GmbH; Haupt (utb-studi-e-book, 4401). Online verfügbar unter <https://elibrary.utb.de/doi/book/10.36198/9783838544014>.

Overdieck, D.; Forstreuter, M. (1994): Evapotranspiration of beech stands and transpiration of beech leaves subject to atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment. In: *Tree Physiol* 14 (7\_9), S. 997–1003. DOI: 10.1093/treephys/14.7-8-9.997.

Pachauri, Rajendra K. (2016): Klimaänderung 2014. Synthesebericht : Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). Genf, Schweiz: IPCC. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle Bonn 2016.

Paige, Ken N.; Capman, William C. (1993): The effects of host-plant genotype, hybridization, and environment on gall-aphid attack and survival in cottonwood: the importance of genetic studies and the utility of RFLPS. In: *Evolution* 47 (1), S. 36–45. DOI: 10.1111/j.1558-5646.1993.tb01197.x.

Pärnik, Tiit; Ivanova, Hiie; Keerbergh, Olav; Vardja, Rael; Niinemets, Ulo (2014): Tree age-dependent changes in photosynthetic and respiratory CO<sub>2</sub> exchange in leaves of micropropagated diploid, triploid and hybrid aspen. In: *Tree Physiol* 34 (6), S. 585–594. DOI: 10.1093/treephys/tpu043.

Picon, C.; Guehl, J. M.; Aussenac, G. (1996): Growth dynamics, transpiration and water-use efficiency in *Quercus robur* plants submitted to elevated CO<sub>2</sub> and drought. In: *Ann. For. Sci.* 53 (2-3), S. 431–446. DOI: 10.1051/forest:19960225.

Polley, H. Wayne; Johnson, Hyrum B.; Tischler, Charles R.; Torbert, H. Allen (1999): Links between Transpiration and Plant Nitrogen: Variation with Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentration and Nitrogen Availability. In: *International Journal of Plant Sciences* 160 (3), S. 535–542. DOI: 10.1086/314145.

Poorter, H.; van Berkel, Y.; Baxter, R.; Hertog, J. den; Dijkstra, P.; Gifford, R. M. et al. (1997): The effect of elevated CO<sub>2</sub> on the chemical composition and construction costs of leaves of 27 C<sub>3</sub> species. In: *Plant, Cell & Environment* 20 (4), S. 472–482. DOI: 10.1046/j.1365-3040.1997.d01-84.x.

Pregitzer, Kurt S.; DeForest, Jared L.; Burton, Andrew J.; Allen, Michael F.; Ruess, Roger W.; Hendrick, Ronald L. (2002): Fine root architecture of nine north american trees. In: *Ecological Monographs* 72 (2), S. 293–309. DOI: 10.1890/0012-9615(2002)072[0293:FRAONN]2.0.CO;2.

Pregitzer, Kurt S.; Zak, Donald R.; Curtis, Peter S.; Kubiske, Mark E.; Teeri, James A.; Vogel, Christoph S. (1995): Atmospheric CO<sub>2</sub>, soil nitrogen and turnover of fine roots. In: *New Phytologist* 129 (4), S. 579–585. DOI: 10.1111/j.1469-8137.1995.tb03025.x.

Purcell, C.; Batke, S. P.; Yiotis, C.; Caballero, R.; Soh, W. K.; Murray, M.; McElwain, J. C. (2018): Increasing stomatal conductance in response to rising atmospheric CO<sub>2</sub>. In: *Ann Bot* 121 (6), S. 1137–1149. DOI: 10.1093/aob/mcx208.

- Radoglou, K. M.; Jarvis, P. G. (1990): Effects of CO<sub>2</sub> Enrichment on Four Poplar Clones. I. Growth and Leaf Anatomy. In: *Ann Bot* 65 (6), S. 617–626. DOI: 10.1093/oxfordjournals.aob.a087978.
- Rasch, Björn; Friese, Malte; Hofmann, Wilhelm (2021): *Quantitative Methoden*. 5. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer (Lehrbuch).
- Richet, Nicolas; Afif, Dany; Tozo, Koffi; Pollet, Brigitte; Maillard, Pascale; Huber, Françoise et al. (2012): Elevated CO<sub>2</sub> and/or ozone modify lignification in the wood of poplars (*Populus tremula* x *alba*). In: *J Exp Bot* 63 (11), S. 4291–4301. DOI: 10.1093/jxb/ers118.
- Richter, Gerhard (1997): *Stoffwechselfysiologie der Pflanzen. Physiologie und Biochemie des Primär- und Sekundärstoffwechsels ; 10 Tabellen*. 6., völlig Neubearb. Aufl. Stuttgart: Thieme.
- Ridge, C. R.; Hinckley, T. M.; Stettler, R. F.; van Volkenburgh, E. (1986): Leaf growth characteristics of fast-growing poplar hybrids *Populus trichocarpa* x *P. deltoides*. In: *Tree Physiol* 1 (2), S. 209–216. DOI: 10.1093/treephys/1.2.209.
- Rieseberg, Loren H.; Carney, Shanna E. (1998): Plant hybridization. In: *New Phytologist* 140 (4), S. 599–624. DOI: 10.1046/j.1469-8137.1998.00315.x.
- Rogers, H. H.; Runion, G. B.; Krupa, S. V. (1994): Plant responses to atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment with emphasis on roots and the rhizosphere. In: *Environmental Pollution* 83 (1-2), S. 155–189. DOI: 10.1016/0269-7491(94)90034-5.
- Rood, Stewart B.; Goater, Lori A.; McCaffrey, David; Montgomery, Joshua S.; Hopkinson, Chris; Pearce, David W. (2017): Growth of riparian cottonwoods: heterosis in some intersectional *Populus* hybrids and clonal expansion of females. In: *Trees* 31 (3), S. 1069–1081. DOI: 10.1007/s00468-017-1531-9.
- Roth, Sherry K.; Lindroth, Richard L. (1995): Elevated atmospheric CO<sub>2</sub>: effects on phytochemistry, insect performance and insect-parasitoid interactions. In: *Global Change Biol* 1 (3), S. 173–182. DOI: 10.1111/j.1365-2486.1995.tb00019.x.
- Sadava, David; Hillis, David M.; Heller, H. Craig; Hacker, Sally D.; Markl, Jürgen (2019): *Purves Biologie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Sakalli, Ilkay (2023): File:Laubblatt - Aufbau.png – Wikimedia Commons. Online verfügbar unter [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b4/Laubblatt\\_](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b4/Laubblatt_)

\_Aufbau.png?uselang=de, zuletzt aktualisiert am 19.07.2023, zuletzt geprüft am 02.08.2023.

Samuelson, Lisa J.; Seiler, John R. (1993): Interactive Role of Elevated CO<sub>2</sub>, Nutrient Limitations, and Water Stress in the Growth Responses of Red Spruce Seedlings. In: *for sci* 39 (2), S. 348–358. DOI: 10.1093/forestscience/39.2.348.

Scheid, Sandro; Vogl, Stefanie (2021): Data Science. Grundlagen, Methoden und Modelle der Statistik. München: Hanser.

Schopfer, Peter; Brennicke, Axel (2010): Pflanzenphysiologie. 7. Aufl. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl.

Schubert, Charlotte (2006): Can biofuels finally take center stage? In: *Nat Biotechnol* 24 (7), S. 777–784. DOI: 10.1038/nbt0706-777.

Stettler, R. F.; Koster, R.; Steenackers, V. (1980): Interspecific crossability studies in poplars. In: *TAG. Theoretical and applied genetics. Theoretische und angewandte Genetik* 58 (6), S. 273–282. DOI: 10.1007/BF00265179.

Stettler, Reinhard F.; Fenn, Ruth C.; Heilman, Paul E.; Stanton, Brian J. (1988): Populustrichocarpa × Populusdeltoides hybrids for short rotation culture: variation patterns and 4-year field performance. In: *Can. J. For. Res.* 18 (6), S. 745–753. DOI: 10.1139/x88-114.

Taub, Daniel R.; Wang, Xianzhong (2008): Why are nitrogen concentrations in plant tissues lower under elevated CO<sub>2</sub>? A critical examination of the hypotheses. In: *Journal of Integrative Plant Biology* 50 (11), S. 1365–1374. DOI: 10.1111/j.1744-7909.2008.00754.x.

Taylor, Gail; Ceulemans, R.; Ferris, R.; Gardner, S.D.L.; Shao, B. Y. (2001): Increased leaf area expansion of hybrid poplar in elevated CO<sub>2</sub>. From controlled environments to open-top chambers and to FACE. In: *Environmental Pollution* 115 (3), S. 463–472. DOI: 10.1016/S0269-7491(01)00235-4.

Taylor, Gail; Ranasinghe, Sananthanie; Bosac, Creana; Gardner, S.D.L.; Ferris, Rachel (1994): Elevated CO<sub>2</sub> and plant growth: cellular mechanisms and responses of whole plants. In: *J Exp Bot* 45 (Special\_Issue), S. 1761–1774. DOI: 10.1093/jxb/45.Special\_Issue.1761.

Tognetti, Roberto; Longobucco, Anna; Raschi, Antonio; Miglietta, Franco; Fumagalli, Ivano (1999): Responses of two *Populus* clones to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration in the field. In: *Annals of Forest Science* 1999 (56), S. 493–500. Online verfügbar unter [https://www.afs-journal.org/articles/forest/pdf/1999/06/AFS\\_0003-4312\\_1999\\_56\\_6\\_ART0006.pdf](https://www.afs-journal.org/articles/forest/pdf/1999/06/AFS_0003-4312_1999_56_6_ART0006.pdf), zuletzt geprüft am 20.06.2022.

Tricker, Penny J.; Pecchiari, Marco; Bunn, Steve M.; Vaccari, Francesco P.; Peressotti, Alessandro; Miglietta, Franco; Taylor, Gail (2009): Water use of a bioenergy plantation increases in a future high CO<sub>2</sub> world. In: *Biomass and Bioenergy* 33 (2), S. 200–208. DOI: 10.1016/j.biombioe.2008.05.009.

Tricker, Penny J.; Trewin, Harriet; Kull, Olevi; Clarkson, Graham J. J.; Eensalu, Eve; Tallis, Matthew J. et al. (2005): Stomatal conductance and not stomatal density determines the long-term reduction in leaf transpiration of poplar in elevated CO<sub>2</sub>. In: *Oecologia* 143 (4), S. 652–660. DOI: 10.1007/s00442-005-0025-4.

Tupker, Kendall A.; Thomas, Barb R.; Macdonald, S. Ellen (2003): Propagation of trembling aspen and hybrid poplar for agroforestry: potential benefits of elevated CO<sub>2</sub> in the greenhouse. In: *Agroforestry Systems* 59 (1), S. 61–71. DOI: 10.1023/A:1026141220731.

Umweltbundesamt (2023): Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre (Monatsmittelwerte). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/bild/kohlendioxid-konzentration-in-der-atmosphaere>, zuletzt aktualisiert am 02.08.2023, zuletzt geprüft am 02.08.2023.

Uremovic, A.; Dokk Glawischnig, T.; Schuseil, J.; Saake, B.; Borchmann, A.; Herrmann, A.; Puls, J. (1994): Chromatographische Untersuchungen zur quantitativen Bestimmung der Holzzucker. In: *Holz als Roh-und Werkstoff* 52 (6), S. 347–354. DOI: 10.1007/bf02615383.

van Vuuren, Margret M. I.; Robinson, David; Fitter, Alastair H.; Chasalow, Scott D.; Williamson, Lisa; Raven, John A. (1997): Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and soil water availability on root biomass, root length, and N, P and K uptake by wheat. In: *New Phytologist* 135 (3), S. 455–465. DOI: 10.1046/j.1469-8137.1997.00682.x.

Vaz, M.; Cochard, H.; Gazarini, L.; Graça, J.; Chaves, M. M.; Pereira, J. S. (2012): Cork oak (*Quercus suber* L.) seedlings acclimate to elevated CO<sub>2</sub> and water stress:

photosynthesis, growth, wood anatomy and hydraulic conductivity. In: *Trees* 26 (4), S. 1145–1157. DOI: 10.1007/s00468-012-0691-x.

Vilà, Montserrat; Weber, Ewald; Antonio, Carla M.D (2000): Conservation Implications of Invasion by Plant Hybridization. In: *Biological Invasions* 2 (3), S. 207–217. DOI: 10.1023/A:1010003603310.

Vincent, Gustav; Polnar, Miroslav (1968): Heterosiseffekt bei Pappelhybriden 1968. Online verfügbar unter [https://www.thuenen.de/media/institute/fg/PDF/Silvae\\_Genetica/1970/Vol.\\_19\\_Heft\\_2-3/19\\_2-3\\_\\_69.pdf](https://www.thuenen.de/media/institute/fg/PDF/Silvae_Genetica/1970/Vol._19_Heft_2-3/19_2-3__69.pdf), zuletzt geprüft am 30.03.2023.

Volgger, Michael (2008): Lichtmikroskopie- Theorie und Anwendung. Unter Mitarbeit von Irene Lichtscheidl. Hg. v. Einrichtung Cell Imaging und Ultrastrukturforschung. Universität Wien. Online verfügbar unter [www.univie.ac.at/mikroskopie](http://www.univie.ac.at/mikroskopie).

Wagner, F.; Below, R.; Klerk, P. D.; Dilcher, D. L.; Joosten, H.; Kürschner, W. M.; Visscher, H. (1996): A natural experiment on plant acclimation: lifetime stomatal frequency response of an individual tree to annual atmospheric CO<sub>2</sub> increase. In: *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 93 (21), S. 11705–11708. DOI: 10.1073/pnas.93.21.11705.

Wait, D. Alexander; Jones, Clive G.; Wynn, Jules; Woodward, F. Ian (1999): The fraction of expanding to expanded leaves determines the biomass response of *Populus* to elevated CO<sub>2</sub>. In: *Oecologia* 121 (2), S. 193–200. DOI: 10.1007/s004420050921.

Watanabe, Yoko; Tobita, Hiroyuki; Kitao, Mitsutoshi; Maruyama, Yutaka; Choi, DongSu; Sasa, Kaichiro et al. (2008): Effects of elevated CO<sub>2</sub> and nitrogen on wood structure related to water transport in seedlings of two deciduous broad-leaved tree species. In: *Trees* 22 (4), S. 403–411. DOI: 10.1007/s00468-007-0201-8.

Weiler, Elmar W.; Nover, Lutz (2008): Allgemeine und molekulare Botanik. 30 Tabellen. Stuttgart, New York: Thieme.

Whitham, Thomas G. (1989): Plant Hybrid Zones as Sinks for Pests. In: *Science* 244 (4911), S. 1490–1493. DOI: 10.1126/science.244.4911.1490.

Willert, Dieter J. von; Matyssek, Rainer; Herppich, Werner (1995): Experimentelle Pflanzenökologie. Grundlagen und Anwendungen. Stuttgart, New York: Thieme.

Willför, Stefan; Pranovich, Andrey; Tamminen, Tarja; Puls, Juergen; Laine, Christiane; Suurnäkki, Anna et al. (2009): Carbohydrate analysis of plant materials with uronic acid-containing polysaccharides—A comparison between different hydrolysis and subsequent chromatographic analytical techniques. In: *Industrial Crops and Products* 29 (2-3), S. 571–580. DOI: 10.1016/j.indcrop.2008.11.003.

Wisseemann, Volker (2007): Plant evolution by means of hybridization. In: *Systematics and Biodiversity* 5 (3), S. 243–253. DOI: 10.1017/S1477200007002381.

Zanewich, Karen P.; Pearce, David W.; Rood, Stewart B. (2018): Heterosis in poplar involves phenotypic stability: cottonwood hybrids outperform their parental species at suboptimal temperatures. In: *Tree physiology* 38 (6), S. 789–800. DOI: 10.1093/treephys/tpy019.

## 9 Anhang

### 9.1 Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit hatte das Ziel, den Einfluss einer erhöhten atmosphärischen  $CO_2$ -Konzentration auf die physiologischen, anatomischen und chemischen Eigenschaften von Hybridpappeln und Pappeln zu untersuchen. Dazu sollte neben dem direkten Einfluss einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration auch untersucht werden, inwieweit sich die Reaktionen der Hybridpappeln von denen der Elternarten unter Umgebungsbedingungen und unter erhöhter  $CO_2$ -Konzentration unterscheiden.

Dazu wurden zwei Gruppen von Pflanzenindividuen verschiedenen Alters in kontrollierten Gewächshausversuchen einer erhöhten  $CO_2$ -Konzentration ausgesetzt. Die erste Gruppe bestand aus einjährigen Pflanzen der Pappelarten *Populus x canescens* und den Elternarten *Populus tremula* und *Populus alba*. Die zweite Gruppe bestand aus Stecklingen der Pappelarten *Populus x canadensis* und deren Elternarten *Populus nigra* und *Populus deltoides*.

Die Versuche haben gezeigt, dass eine erhöhte  $CO_2$ -Konzentration einen signifikanten Einfluss auf bestimmte Eigenschaften von jungen Hybridpappeln und Pappeln haben kann. Auch haben die Ergebnisse Hinweise darauf gegeben, inwieweit sich die Reaktionen der Hybridpappeln von denen der Elternarten unter gleichen Umweltbedingungen unterscheiden. Teilweise konnte mit den Ergebnissen gezeigt werden, dass unter beiden Versuchsbedingungen die Hybridpappeln bei bestimmten Eigenschaften den Elternarten überlegen sind. Die vorliegenden Ergebnisse geben einen Hinweis darauf, wie die verschiedenen Pappelarten auf eine zukünftige erhöhte atmosphärische  $CO_2$ -Konzentration unterschiedlich reagieren könnten



## 9.2 Abstract

The aim of this study was to investigate the influence of an increased atmospheric  $CO_2$ -concentration on the physiological, anatomical and chemical properties of hybrid poplars and poplars. In addition to the direct influence of an increased  $CO_2$ -concentration, it was also to be investigated to what extent the reactions of the hybrid poplars differ from their parents under ambient conditions and under an increased  $CO_2$ -concentration.

For this purpose, two groups of plant individuals of different ages were exposed to an increased  $CO_2$ -concentration in controlled greenhouse experiments. The first group consisted of one-year-old plants of the poplar species *Populus x canescens* and the parents *Populus tremula* and *Populus alba*. The second group consisted of cuttings of the poplar species *Populus x candensis*, *Populus nigra* and *Populus deltoides*.

The experiments have shown that an increased  $CO_2$ -concentration can have a significant influence on certain characteristics of young hybrid poplars and poplars. The results have also given indications of the extent to which the responses of the hybrid poplars differ from those of the parents under the same environmental conditions. In part, the results have shown that under both experimental conditions, the hybrid poplars are superior to the parents in certain characteristics. The present results give an indication of how the different poplar species might react differently to a future increased atmospheric  $CO_2$ -concentration.

### 9.3 Verwendete Hilfsmittel

<b>Name (Hersteller)</b>	<b>Verwendung</b>
AutoCAD LT 2022 (Autodesk)	Anfertigung von Zeichnungen, Skizzen und Abbildungen
ASE 350 (Dionex)	Lösungsmittlextraktor – Extraktion
Hydrax S 30 (Carl Zeiss AG)	Mikrotom – Anfertigung von Schnitten für holzanatomische Untersuchungen
IBM SPSS Statistics 27 (IBM Corporation)	Durchführung Test auf Normalverteilung und Signifikanztest
LI-3000C (Li-Cor Biosciences GmbH)	Vermessung der Blattfläche
LI-6400 XT (Li-Cor Biosciences GmbH)	Gaswechsellmessgerät – Gaswechsellmessungen an den Blättern von Versuchspflanzen
MF 10 (ICA)	Universalmühle – Zerkleinerung Versuchsmaterial
Microsoft 365 (Microsoft Corporation)	Auswertung von Daten und Messergebnissen und Erstellung von Grafiken
MM 400 (Retsch)	Schwingmühle – Nachzerkleinerung von Versuchsmaterial

Perkin Elmer Modell 650 (Perkin Elmer)	Spektralphotometer – Messung der Extinktion
Photoshop CS6 extended (Adobe Systems)	Zusammenfügen von Bildern für die Bildanalyse
Quanta, Modell FEG 250 (Quanta)	Feldemissionsrasterelektronenmikroskop – Vermessung von Spaltöffnungen
SC510 (Biorad)	Beschichtungsanlage – Gold-Bedampfung für Versuchsmaterial
Software Li-6400XT 4.6.3 (LI-COR Biosciences GmbH)	Software für das Gaswechsellmessgerät Li-6400XT
TW 8 Wasserbad (Julabo)	Thermostat – Hilfsmittel für Hydrolyse
Vario EL cube (elementar)	Elementaranalysator – Erfassung der Parameter für die Elementaranalysen
VX-75 (Systec)	Standautoklave – Nachhydrolyse
ZEN Pro 2012 (Carl Zeiss AG)	Anfertigung von Bildern und Vermessung von holzanatomischen Parameter
Zeiss Mikroskop Axioskop 40 Carl Zeiss AG	Betrachtung der holzanatomischen Parameter
xT microscope Server (Quanta)	Vermessung Spaltöffnungen