

TEXTE

82/2023

Abschlussbericht

Validierung des phytotoxischen Ozonflusses in Nadeln und Blättern als Voraussetzung einer realitätsnahen, integrierten Risikobewertung für die Ökosystemleistungen von Wäldern in Deutschland

valORTree-Projekt

von:

Dr. Manuela Baumgarten, Dr. Bálint Jáklí,
LS Land Surface-Atmosphere Interactions, Technische Universität München, Freising
Prof. Dr. Ludger Grünhage,
Dessau

Herausgeber:
Umweltbundesamt

TEXTE 82/2023

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3717 51257 0
FB000962

Abschlussbericht

Validierung des phytotoxischen Ozonflusses in Nadeln und Blättern als Voraussetzung einer realitätsnahen, integrierten Risikobewertung für die Ökosystemleistungen von Wäldern in Deutschland

valORTree-Projekt

von

Dr. Manuela Baumgarten, Dr. Bálint Jáklí,

LS Land Surface-Atmosphere Interactions, Technische
Universität München, Freising

Prof. Dr. Ludger Grünhage,


Dessau


Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Technische Universität München, TUM School of Life Science, LS Land Surface-
Atmosphere Interactions, AG Ökophysiologie der Pflanzen
Hans-Carl-von-Carlowitz-Platz 2
85354 Freising

Abschlussdatum:

September 2022

Redaktion:

Fachgebiet Luftreinhaltung und terrestrische Ökosysteme II 4.3, Simone Richter
Gudrun Schütze

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juni 2023

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung

Bodennahes Ozon ist ein phytotoxischer Luftschadstoff dessen troposphärische Hintergrundkonzentration sich im Zuge der Industrialisierung vervielfacht hat und in Zukunft wahrscheinlich weiter ansteigen wird. Ozon wird von Pflanzen über die Stomata aufgenommen, wo es oxidative Stress auslöst und letztendlich die Nettoprimärproduktion verringert. Das schwächt die CO₂-Senkenstärke von Forstökosystemen und beeinträchtigt die Wirtschaftlichkeit wichtiger europäischer Baumarten wie Buche und Fichte. Über die im Mapping Manual (CLRTAP 2017) zusammengefassten und vom Umweltbundesamt verwendeten Modelle (DO₃SE, FO₃REST) lassen sich ozonbedingte jährliche Produktivitätseinbußen über artspezifische Dosis-Wirkungs-Funktionen berechnen. Voraussetzung dafür ist eine möglichst realistische Abschätzung der Ozonaufnahme als Funktion der stomatären Leitfähigkeit (als POD_Y, phytotoxische Ozondosis oberhalb eines Schwellenwerts von $Y \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Aufgrund bisher fehlender technischer Möglichkeiten wurden die verwendeten Modelle nicht auf Basis von Messungen der stomatären Ozonaufnahme validiert. Außerdem fehlt für Waldbaumarten, im Gegensatz zu wichtigen Kulturpflanzen, eine Wichtungsfunktion, welche die Interaktion zwischen der kumulierten Ozonaufnahme und der Stomataregulierung abbildet. Zusätzlich existiert bisher keine Möglichkeit, das Ozonrisiko für zukünftige, durch steigende Temperaturen und erhöhte atmosphärische CO₂-Konzentrationen gekennzeichnete Szenarien zu bewerten. Im vorliegenden Projekt wurden daher sowohl eine Ozon- als auch eine CO₂-Wichtungsfunktion (f_{O_3} , f_{CO_2}) entwickelt und für Buche und Fichte parametrisiert. Dazu wurden aus Naturverjüngung entnommene Buchen und Fichten über drei Vegetationsperioden in den Klimakammern der TUMmesa-Phytotronanlage kultiviert und verschiedenen dynamischen, auf einen Waldstandort im Spessart regionalisierten Klimaszenarien ausgesetzt. Die Szenarien beinhalteten einen Ozongradienten unter gegenwärtigen Klimabedingungen, sowie zwei Zukunftsszenarien für das Ende des 21. Jahrhunderts mit unterschiedlich stark erhöhter Jahresmitteltemperatur und CO₂-Konzentration. Die f_{O_3} -Funktion verdeutlichte im Modellansatz, dass bei Buche unter gegenwärtigen klimatischen Bedingungen bereits im Laufe des Blattaustriebs eine ozondosisbedingte Beeinträchtigung der stomatären Leitfähigkeit auftreten kann. Im Gegensatz dazu wurde die stomatäre Leitfähigkeit von Fichte nicht durch die Ozondosis beeinträchtigt. Durch Implementierung der f_{CO_2} -Funktion konnte gezeigt werden, dass unter steigendem CO₂ in den Zukunftsszenarien eine Verringerung der stomatären Leitfähigkeit (insbesondere bei Buche) bei gleichzeitig aufrechterhaltener Produktivität zu erwarten ist. Dadurch werden die stomatäre Ozonaufnahme und somit die zu erwartenden Produktivitätseinbußen gegenüber der Gegenwart – abhängig von Unsicherheiten bei der zukünftigen Entwicklung der troposphärischen Ozonkonzentration – signifikant verringert sein. Über die Neuentwicklung eines Sensors (TransP) zur indirekten, kontinuierlichen *in-situ* Bestimmung der stomatären Ozonaufnahme konnten die Mapping Manual Modelle für Buche und Fichte validiert und deren Parametrisierung aktualisiert werden. Abschließend wurde ein Satz Transferfunktionen entwickelt, welche ein Abschätzen des POD_Y auf Grundlage von Xylemsaftflussmessungen an Buchen ermöglicht.

Abstract

Ground-level ozone is a phytotoxic air pollutant whose tropospheric background concentration has multiplied with industrialization and is likely to increase further in the future. Ozone is taken up by plants through the stomata, where it induces oxidative stress and reduces net primary production. This weakens the CO₂ sink strength of forest ecosystems and affects the economic viability of important European tree species such as beech and spruce. Using the models summarized in the Mapping Manual (CLRTAP 2017) and employed by the German Federal Environment Agency (DO₃SE, FO₃REST), ozone-induced annual productivity losses can be calculated via species-specific dose-response-functions. This requires a robust estimate of ozone uptake as a function of stomatal conductance (as POD_V, phytotoxic ozone dose above a threshold of Y nmol m⁻² s⁻¹). So far, the Mapping Manual models have not been validated based on measurements of stomatal ozone uptake because technical capabilities for continuous measurement of stomatal conductance are missing. Furthermore, in contrast to crops, a weighting function representing the interaction between cumulative ozone uptake and stomatal regulation is missing for forest species. Additionally, the ozone risk in future scenarios – characterized by rising temperatures and increased atmospheric CO₂ concentrations – cannot be assessed because a CO₂ sensitivity function has not been implemented so far. Therefore, in the present project, both ozone and CO₂ weighting functions (f_{O_3} , f_{CO_2}) were developed and parameterized for beech and spruce. For this purpose, beech and spruce sampled from natural regeneration were cultivated over three vegetation periods in the climate chambers of the TUMmesa phytotron facility and exposed to different dynamic climate scenarios regionalized to a forest site in the German Spessart region. The scenarios included an ozone gradient under current climate conditions, as well as two future scenarios for the end of the 21st century with varying degrees of increased annual mean temperature and CO₂ concentration. Introducing the f_{O_3} function into the models showed ozone dose-induced impairment of stomatal conductance can already occur during leaf emergence in beech under current climatic conditions. In contrast, stomatal conductance of spruce was not affected by the accumulated ozone dose. By implementing the f_{CO_2} function, it was shown that stomatal conductance (especially in beech) decreases under elevated CO₂ in future scenarios while productivity is maintained. As a result, stomatal ozone uptake and thus expected productivity losses may be significantly reduced compared to the present, depending on uncertainties in the future development of tropospheric ozone concentration. The mapping manual models for beech and spruce were validated and their parameterization updated by employing a novel sensor (TransP) that was designed for indirect, continuous *in-situ* determination of stomatal ozone uptake. Finally, a set of transfer functions was developed to estimate POD_V based on xylem sap flow measurements in beech.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis	13
Abkürzungsverzeichnis	15
Zusammenfassung.....	19
Summary	29
1 Risiken für das Wachstum von Waldbäumen durch troposphärisches Ozon	38
1.1 Wirkung von Ozon auf Pflanzen.....	38
1.2 Entwicklung der O ₃ -Konzentration	38
1.3 Gefährdung von Waldbäumen.....	38
1.4 Stomatäre Ozondosis und Critical-Level-Konzept als Beurteilungs-instrument	39
1.5 Motivation und Zielsetzung von valORTree.....	40
1.5.1 Motivation für die Überprüfung des Ozonaufnahme-Risikomodells	40
1.5.1.1 Unsicherheiten bei der Beurteilung ozonbedingter Wachstumseinschränkungen bei Wäldern	40
1.5.1.2 Überprüfung der Ozonaufnahmemodelle zur Absicherung der O ₃ -Risikobewertung und Abschätzung der Tauglichkeit für die Zukunft.....	41
1.5.2 Projektziele, Methoden und Erfordernisse.....	42
2 Überprüfung und Aktualisierung der flussbasierten Methodik zur Ozonrisikobewertung von Waldbaumarten unter gegenwärtigen und zukünftigen Klimabedingungen	45
2.1 Konzeption eines experimentellen Setups für gegenwärtige und zukünftige Bedingungen	45
2.1.1 Regionalisierte dynamische Klimareihen als Voraussetzung für die ökologische Klimafolgenforschung in modernen Phytotronanlagen	45
2.1.1.1 Auswahl eines Muster-Waldstandortes für die Generierung der Klimareihen	45
2.1.1.2 Methode zur Generierung der Klimareihen für die Gegenwart und zukünftige Bedingungen	46
2.1.1.3 Methode zur Generierung der entsprechenden Ozon- und Kohlestoffdioxid- Konzentrationen für die Gegenwart und zukünftige Bedingungen.....	49
2.1.2 Experimentelles Design zur Abschätzung der Risiken von Wäldern in Deutschland für die Gegenwart und für zukünftige Klimawandel-Bedingungen	50
2.1.2.1 Beschreibung der TUMmesa-Phytotrone	50
2.1.2.2 Klima- und Emissions-Szenarien im Phytotronexperiment	50
2.1.2.3 Experimentelles Setup	51
2.1.3 Vorarbeiten und Vorbereitung der Probestämme	52
2.1.4 Bewässerung, Düngung und Pflanzenschutz	53

2.1.4.1	Bewässerung.....	53
2.1.4.2	Düngung.....	54
2.1.4.3	Pflanzenschutz	55
2.1.5	Charakterisierung von Blattmerkmalen.....	56
2.1.5.1	Bestimmung von Austriebsmerkmalen und -zeitpunkt.....	56
2.1.5.2	Charakterisierung von Blatt- und Nadelsymptomen.....	62
2.2	Einführung einer neuen Methode zur kontinuierlichen Messung der stomatären Ozonflüsse für Buchen und Fichten	70
2.2.1	Kalibrierung des TransP-Sensors gegen Hochpräzisionswägung.....	70
2.2.2	Referenzmessungen mit Li-6400/Li-6800 Gaswechselsystemen.....	72
2.2.3	Validierung des neuen Messverfahrens gegenüber Gaswechselfmessungen.....	74
2.2.4	Geltungsbereich der TransP-Sensoren	76
2.2.5	Saisonaler Verlauf von Transpiration und Blattleitfähigkeit.....	76
2.3	Berechnung stomatärer Ozonflüsse	79
2.3.1	Kontinuierliche Bestimmung stomatärer Ozonflüsse mittels TransP-Sensor.....	79
2.3.2	Modellierung stomatärer Ozonflüsse über das FO ₃ REST Modell	81
2.3.2.1	Berechnung von g_s	81
2.3.2.2	Berechnung von F_{O_3}	83
2.3.2.3	Parametrisierung nach Mapping Manual	83
2.3.2.4	Einfluss des Grenzschichtwiderstandes r_b auf die modellierten POD _{ys}	86
2.3.3	Anpassung und Erweiterung des Parametersatzes für Buche.....	87
2.3.3.1	Angepasste Parametrisierung für f_{temp}	88
2.3.3.2	Entwicklung einer CO ₂ -Funktion f_{CO_2} für Buche.....	89
2.3.3.3	Entwicklung einer Ozonfunktion f_{O_3} für Buche.....	90
2.3.3.4	Zusammenfassung der Erweiterungen und Anpassungen des Modells für Buche	92
2.3.4	Anpassung und Erweiterung des Parametersatzes für Fichte	94
2.3.4.1	Entwicklung einer CO ₂ -Funktion f_{CO_2} für Fichte	95
2.3.4.2	Entwicklung einer Ozonfunktion f_{O_3} für Fichte	95
2.3.4.3	Zusammenfassung der Erweiterungen und Anpassungen des Modells für Fichte	96
2.4	Überprüfung der Ozondosis-Wirkungsbeziehung für die Abschätzung von Biomasseverlusten bei Waldbäumen	99
2.4.1	Biomasseproduktion bei Buchen und Fichten unter gegenwärtigen und zukünftigen Bedingungen im Phytotronexperiment	100
2.4.2	Ozondosis-Wirkungs-Beziehung und Ozonrisiko für Buchen und Fichten im Phytotronexperiment	103

2.4.3	Einfluss der CO ₂ -Wichtungs-Funktion unter Freilandbedingungen auf das modellierte Ozonrisiko bei Buche und Fichte für Zukunftsszenarien (2100)	109
2.5	Kritische Belastungswerte (<i>critical levels</i>) und Zielwerte (<i>target values</i>) als Grundlage für die Ozon-Risikobewertung für Waldbäume in Deutschland.....	116
2.6	Ozon-Risikobewertung für Waldbäume in Deutschland für verschiedene Zukunftsszenarien	116
2.6.1	Auswirkungen verschiedener Ozon-Belastungsszenarien auf die stomatäre O ₃ -Aufnahme unter gegenwärtigen Klimaverhältnissen	118
2.6.2	Auswirkungen verschiedener O ₃ -Belastungsszenarien auf die stomatäre O ₃ -Aufnahme unter zukünftigen Klimaverhältnissen	123
2.6.2.1	Kenngößen der Lufttemperatur	123
2.6.2.2	Kenngößen der O ₃ -Belastungssituation	123
3	Skalierung von Ozondosen bei adulten Buchen mit unterschiedlichem Belaubungsbezug (sonnenexponierte Belaubung, Gesamtblaubung) – Ermittlung einer Transferfunktion für die Bestimmung von POD _y SPEC aus gemessenen POD _y _SF.....	129
3.1	Vorbemerkung - Skalierung der Ozonaufnahme von sonnenexponierter zu Gesamtbaum-Belaubung bei adulten Buchen	129
3.1.1	Kurze Beschreibung des Projekts KLIP15	130
3.1.2	Lage der Untersuchungsflächen	131
3.1.3	Xylemsaftflussmessungen zur Bestimmung der Baumtranspiration.....	132
3.1.4	Ermittlung der stomatären Ozonaufnahme	133
3.2	Skalierung der Ozonaufnahme von der Gesamtbaumebene auf die sonnenexponierte Belaubung für Buchen mittels einer Transferfunktion	133
3.2.1	Modellierung von POD _y SPEC mit FO ₃ REST_beech und Rekalkulierung der POD _y _SF für Einzelbäume an verschiedenen Waldstandorten für die Jahre 2010-2012	133
3.2.2	Ableitung einer Transferfunktion für die Skalierung von POD _y _SF zu POD _y SPEC.....	134
4	Folgerungen und Empfehlungen	138
5	Quellenverzeichnis	142

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Standorte der meteorologischen Stationen „Spessart“ und „Schauinsland“	46
Abbildung 2:	Workflow zur Generierung der Testreferenzjahre	47
Abbildung 3:	Experimentelles Setup	52
Abbildung 4:	Nährstoffgehalte in der Trockenmasse von Buchenblättern bzw. Fichtennadeln	55
Abbildung 5:	Austriebsmerkmale bei Buchen (angepasst nach Mall 2017) ..	58
Abbildung 6:	Austriebsmerkmale bei Fichten (angepasst nach Mall 2017) ..	59
Abbildung 7:	Buchenaustrieb bei den unterschiedlichen Behandlungen in 2020 und 2021	60
Abbildung 8:	Fichtenaustrieb bei den unterschiedlichen Behandlungen in 2020 und 2021	61
Abbildung 9:	Boniturschlüssel für visuell sichtbare ozonbedingte Symptome an der Belaubung von Fichten	63
Abbildung 10:	Boniturschlüssel für visuell sichtbare ozonbedingte Symptome an der Belaubung von Buchen	64
Abbildung 11:	Ozonbedingte visuell sichtbare Blattsymptome (Chlorotic Mottling) an Fichten bei den unterschiedlichen Behandlungen in Juni und August 2019, 2020 und 2021	65
Abbildung 12:	Ozonbedingte visuell sichtbare Blattsymptome an Buchen bei den unterschiedlichen Behandlungen im Juni und August 2019, 2020 und 2021	66
Abbildung 13:	Chlorophyllgehalte (als SPAD-Wert) von symptomfreien und symptomatischen Buchenblättern (links), prozentuale Chlorophyllgehalte im Vergleich zu symptomfreien Buchenblättern (rechts) bei den unterschiedlichen Behandlungen	67
Abbildung 14:	Negativabzug von der Blattunterseite eines Buchenblattes zur Bestimmung der Stomatazahl (25-fache Vergrößerung, links) und der Stomatafläche (40-fache Vergrößerung, rechts)	68
Abbildung 15:	Stomatazahl und -größe von Buchenblättern bei den unterschiedlichen Behandlungen	69
Abbildung 16:	Aufbau des TransP-Sensors zur kontinuierlichen Messung der Transpiration	70
Abbildung 17:	Kalibrierung der TransP-Sensoren mittels Präzisionswägung ..	72
Abbildung 18:	Häufigkeit und zeitliche Verteilung der Transpirationmessungen mittels Li-6400/Li-6800	73
Abbildung 19:	Korrelation mikrometeorologischer Größen bei parallelen Messungen mit Li-6400/Li-6800 und TransP	74

Abbildung 20:	Zusammenhang zwischen mittels Licor und TransP gemessener Transpiration, Grenzschichtleitfähigkeit und Entkopplungsfaktor Ω	75
Abbildung 21:	Saisonaler Verlauf von Bodenfeuchte, Transpiration und Leitfähigkeit von Buche	77
Abbildung 22:	Saisonaler Verlauf von Bodenfeuchte, Transpiration und Leitfähigkeit von Fichte.....	78
Abbildung 23:	Verlauf des mittels TransP bestimmten kumulierten stomatären Ozonflusses F_{O_3}	80
Abbildung 24:	Korrelation zwischen gemessenem und modelliertem POD_Y ..	85
Abbildung 25:	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Grenzschichtwiderstandes r_b	86
Abbildung 26:	Parametrisierung von f_{phen} , f_{light} , f_{VPD} und f_{PAW} für Buche.....	88
Abbildung 27:	Parametrisierung von f_{temp} für Buche	89
Abbildung 28:	Parametrisierung von f_{CO_2} für Buche	90
Abbildung 29:	Parametrisierung von f_{O_3} für Buche.....	91
Abbildung 30:	Korrelation zwischen gemessenen und modellierten POD_Y für Buche	93
Abbildung 31:	Parametersatz für Fichte	94
Abbildung 32:	Parametrisierung von f_{CO_2} für Fichte	95
Abbildung 33:	Parametrisierung von f_{O_3} für Fichte.....	96
Abbildung 34:	Korrelation zwischen gemessenen und modellierten POD_Y für Fichte	98
Abbildung 35:	Methode zur Verwendung des Ref10 POD_Y (d.h. POD_Y bei 10 ppb konstanten O_3) als Referenzpunkt für die Ableitung des kritischen O_3 -Wertes	99
Abbildung 36:	Biomassen, Wurzel-Spross-Verhältnis und prozentuale Zuwachsveränderung im Vergleich zur Kontrolle (PC-PI) für Buchen bei den Behandlungen im Phytotronexperiment.....	101
Abbildung 37:	Biomassen, Wurzel-Spross-Verhältnis und prozentuale Zuwachsveränderung im Vergleich zur Kontrolle (PC-PI) für Fichten bei den Behandlungen im Phytotronexperiment.....	102
Abbildung 38:	Ozondosis-Wirkungsbeziehung für Buchen/ Birken und Fichten	103
Abbildung 39:	Dosis-Wirkungs-Beziehung für Buche/Birke (nach Mapping Manual, CLRTAP 2017) mit den gemessenen POD_1 SPEC-Werten bei Buche für die Behandlungen im Gegenwartsklima mit Ozongradient (oben) und für die Behandlungen im Zukunftsszenario (unten) im Phytotronexperiment.....	106
Abbildung 40:	Dosis-Wirkungs-Beziehung für Fichte (nach Mapping Manual, CLRTAP 2017) mit den gemessenen POD_1 -Werten bei Fichte für die Behandlungen im Gegenwartsklima mit Ozongradient	

	(oben) und für die Behandlungen im Zukunftsszenario (unten) im Phytotronexperiment107
Abbildung 41:	Gemessene Blattleitfähigkeit an Buchen und Fichten für die Behandlungen im Phytotronexperiment.....108
Abbildung 42:	Ozonrisiko modelliert für Buche unter Freilandbedingungen bei erhöhten O ₃ -Konzentrationen in Zukunftsszenarien (RCP2.6, 8.5; O ₃ nach valortree-Testreferenzjahren bzw. nach Sicard et al. 2017) & Einfluss der CO ₂ -Wichtungsfunktion (f_{CO_2} , erweiterte Parametrisierung) auf das Ozonrisiko bei Zukunftsszenarien mit erhöhtem CO ₂112
Abbildung 43:	Ozonrisiko modelliert für Fichte unter Freilandbedingungen bei erhöhten O ₃ -Konzentrationen in Zukunftsszenarien (RCP2.6, 8.5; O ₃ nach valortree-Testreferenzjahren bzw. nach Sicard et al. 2017) & Einfluss der CO ₂ -Wichtungsfunktion (f_{CO_2} , erweiterte Parametrisierung) auf das Ozonrisiko bei Zukunftsszenarien mit erhöhtem CO ₂113
Abbildung 44:	POD ₁ SPEC-Werte für Buche mit und ohne Berücksichtigung des Einflusses der O ₃ -Belastung auf das Stomataverhalten (Datenquelle: Luftmessstation Spessart, 1987 – 2016).....119
Abbildung 45:	POD ₁ SPEC-Werte für Fichte (Datenquelle: Luftmessstation Spessart, 1987 – 2016)119
Abbildung 46:	POD ₁ SPEC-Werte für Buche mit $f_{O_3} = 1$ (links) und mit f_{O_3} parametrisiert (rechts) unter gegenwärtigen Klimaverhältnissen (Testreferenzjahr Gegenwart)121
Abbildung 47:	POD ₁ SPEC-Werte für Fichte unter gegenwärtigen Klimaverhältnissen (Testreferenzjahr Gegenwart)121
Abbildung 48:	POD ₁ SPEC-Werte für Buche (links) und Fichte (rechts) für verschiedene O ₃ -Belastungsszenarien unter zukünftigen Klimaverhältnissen unter Berücksichtigung des Einflusses der atmosphärischen CO ₂ -Konzentration auf das Stomataverhalten126
Abbildung 49:	Beziehung der gemessenen blattflächen-gewichteten stomatären Ozonaufnahmen von adulten Buchen (POD _y _SF) und der nach Mapping Manual (CLRTAP 2017) modellierten blattflächen-gewichteten POD _y SPEC-Werte auf Basis aller Einzelbaummessungen.....134
Abbildung 50:	Beziehung der gemessenen blattflächen-gewichteten stomatären Ozonaufnahmen von adulten Buchen (POD _y _SF) und der mit der erweiterten Parametrisierung für Mapping Manual, CLRTAP, 2017) modellierten blattflächen-gewichteten POD _y SPEC-Werte auf Basis aller Einzelbaummessungen.....135

Abbildung 51:	Korrelation der nach Mapping Manual (CLRTAP 2017) modellierten $POD_{\gamma}SPEC$ -Werte mit den mittels der Transferfunktion aus POD_{γ_SF} errechneten $POD_{\gamma}SPEC$ -Werten für adulte Buchen136
Abbildung 52:	Korrelation der mit der erweiterten Parametrisierung (für Mapping Manual (CLRTAP, 2017) modellierten $POD_{\gamma}SPEC$ -Werte mit den mittels der Transferfunktion aus POD_{γ_SF} errechneten $POD_{\gamma}SPEC$ -Werten für adulte Buchen136

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ausgewählte Kombinationen regionaler und globaler Klimamodelle zur Erzeugung der Testreferenzjahre47
Tabelle 2:	Kennzahlen der Testreferenzjahre (TRJ) für PC, RCP2.6 und RCP8.5.....51
Tabelle 3:	Jahresmittelwert der Bodenfeuchte53
Tabelle 4:	Austriebsbeginn und -ende (Datum) der Buchen und Fichten in den Jahren 2020 und 202156
Tabelle 5:	Mittels TransP berechnete $POD_{\gamma}s$81
Tabelle 6:	Parametersatz nach Mapping Manual (CLRTAP 2017).....84
Tabelle 7:	Angepasster und erweiterter Parametersatz für Buche92
Tabelle 8:	Erweiterter Parametersatz für Fichte.....96
Tabelle 9:	Auswirkung der CO_2 -Wichtungsfunktion (f_{CO_2}) auf den Zeitpunkt des erstmaligen ozondosisbedingten Auftretens einer Einschränkung der stomatären Leitfähigkeit, einer minimalen stomatären Leitfähigkeit für Buchen, sowie der erstmaligen Überschreitung des Critical Levels für die Ozonbelastung (CL) für Buche/Birke und Fichte114
Tabelle 10:	Kenngößen für die O_3 -Exposition für verschiedene O_3 -Szenarien in Messhöhe der lufthygienischen Messstation Spessart ($z = 3,5$ m) unter gegenwärtigen Klimaverhältnissen (Testreferenzjahr Gegenwart)120
Tabelle 11:	$POD_{\gamma}SPEC$ -Werte für Buche und Fichte unter gegenwärtigen Klimaverhältnissen (Testreferenzjahr Gegenwart)120
Tabelle 12:	Kenngößen für die Lufttemperatur in Messhöhe der lufthygienischen Messstation Spessart für Gegenwarts- und Zukunftsszenarien (Messhöhe $z = 3,5$ m)123
Tabelle 13:	Kenngößen für die O_3 -Exposition für verschiedene O_3 -Szenarien in Messhöhe der lufthygienischen Messstation Spessart124
Tabelle 14:	Beginn, Ende und Dauer der Wachstumszeit der Buche unter sich ändernden Klimabedingungen125

Tabelle 15:	POD ₁ SPEC-Werte für Buche und Fichte unter gegenwärtigen und zukünftigen Klimaverhältnissen unter Berücksichtigung des Einflusses der atmosphärischen CO ₂ -Konzentration auf das Stomataverhalten	125
Tabelle 16:	Lage und Bestandsscharakteristik der Untersuchungsflächen des KLIP15-Projekts (aus Baumgarten und Kühn 2014)	131
Tabelle 17:	Bodeneigenschaften an den Untersuchungsplots des KLIP15-Projekts (aus Baumgarten und Kühn 2014)	132

Abkürzungsverzeichnis

a_{CO2}	Parameter der Wichtungsfunktion für die atmosphärische CO ₂ -Konzentration im Stomatamodell (f_{CO_2})
a_{light}	Parameter der Wichtungsfunktion für die photosynthetisch aktive Photonenflussdichte (PPFD) im Stomatamodell (f_{light})
A_{Nadel}	Nadelfläche [cm ²]
AOTX	<i>accumulated exposure over a threshold of X ppb</i> [ppb h]
A_{start_FD}	Parameter der Wichtungsfunktion für Phänologie im Stomatamodell (f_{phen})
A_{end_FD}	Parameter der Wichtungsfunktion für Phänologie im Stomatamodell (f_{phen})
bPOD	Parameter der Wichtungsfunktion für die akkumulierte Ozonaufnahme im Stomatamodell (f_{O_3})
bt	Parameter der Wichtungsfunktion für die Lufttemperatur im Stomatamodell (f_{temp})
[CO₂]	atmosphärische Kohlenstoffdioxidkonzentration
[O₃]	externe Ozonkonzentration [ppb]
CL	<i>critical level</i> , kritische Belastungswerte
CL_{AOTX}	expositionsbasierter <i>critical level</i>
CLRTAP	<i>Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution</i>
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CV	<i>flux-based critical level</i> , flussbasierte kritische Belastungswerte
DRF	<i>dose-response function</i> , Ozondosis-Wirkungs-Funktion
DS	<i>drought stress</i> , Trockenstress
DWD	Deutscher Wetterdienst
E	Transpirationsrate [mmol m ⁻² s ⁻¹]
e_a	Atmosphärischer Partialdruck von Wasserdampf [kPa]
E_c	<i>crown transpiration</i> , über Xylemsaftflussmessungen bestimmte Transpiration
e_i	Partialdruck von Wasserdampf im Blatinneren [kPa]
E_{Licor}	Transpiration, gemessen mit den mobilen Gaswechselsystemen Li-6400 und Li-6800 [mmol m ⁻² s ⁻¹]
ESD	<i>empirical statistical downscaling</i>
E_{TransP}	Transpiration, gemessen mit TransP-Sensor [mmol m ⁻² s ⁻¹]
EURO-CORDEX	<i>Coordinated Downscaling Experiment - European Domain</i>
f_{CO2}	Wichtungsfunktion für die atmosphärische CO ₂ -Konzentration im Stomatamodell
f_{light}	Wichtungsfaktor für die photosynthetisch aktive Photonenflussdichte (PPFD) im Stomatamodell
f_{min}	minimale Stomataleitfähigkeit relativ zu g _{max}
F_{O3}	Stomatärer Ozonfluss [nmol m ⁻² s ⁻¹]
f_{O3}	Wichtungsfunktion für die akkumulierte Ozonaufnahme im Stomatamodell

f_{PAW}	Wichtungsfunktion für das pflanzenverfügbare Bodenwasser im Stomatamodell
f_{phen}	Phänologie-abhängiger Wichtungsfaktor im Stomatamodell
f_{phen_a}	Parameter der Wichtungsfunktion für Phänologie im Stomatamodell (f _{phen})
f_{phen_c}	Parameter der Wichtungsfunktion für Phänologie im Stomatamodell (f _{phen})
f_{phen_e}	Parameter der Wichtungsfunktion für Phänologie im Stomatamodell (f _{phen})
f_{phen_1_FD}	Parameter der Wichtungsfunktion für Phänologie im Stomatamodell (f _{phen})
f_{phen_4_FD}	Parameter der Wichtungsfunktion für Phänologie im Stomatamodell (f _{phen})
F_{Sonnenblatt,stom,O3}	stomatäre O ₃ -Aufnahme der Sonnenblätter an der Bestandesoberfläche bezogen auf die projizierte Blattfläche (PLA) [nmol m ⁻² s ⁻¹]
f_{temp}	Wichtungsfunktion für die Lufttemperatur im Stomatamodell
f_{VPD}	Wichtungsfunktion für das Dampfdruckdefizit der Luft im Stomatamodell
g_b	<i>boundary layer conductance</i> , Grenzschichtleitfähigkeit [mol m ⁻² s ⁻¹]
G_c	<i>crown conductance</i> , Leitfähigkeit der Baumkrone
GCM	<i>global climate model</i>
g	Leitfähigkeit gegenüber gasförmiger Diffusion
g_{ext}	externe Leitfähigkeit [m s ⁻¹]
g_{max}	artspezifische maximale Stomataleitfähigkeit [mmol m ⁻² s ⁻¹]
g_s	<i>stomatal conductance</i> , stomatäre Leitfähigkeit [mmol m ⁻² s ⁻¹]; [m s ⁻¹]
g_{s,O3}	stomatäre Leitfähigkeit gegenüber Ozon [nmol m ⁻² s ⁻¹]; [m s ⁻¹]
g_{s,O3}rel	stomatäre Leitfähigkeit gegenüber Ozon, relativ zu g _{max}
g_t	Blattleitfähigkeit [mmol m ⁻² s ⁻¹]
g_{t,H2O}	Blattleitfähigkeit gegenüber Wasserdampf [mmol m ⁻² s ⁻¹]
g_{t,O3}	Blattleitfähigkeit gegenüber Ozon [mmol m ⁻² s ⁻¹]
r	Widerstand gegenüber gasförmiger Diffusion (<i>resistance</i>)
r_b	Widerstand der Grenzschicht [s m ⁻¹]
r_c	Blattoberflächenwiderstand [s m ⁻¹]
r_s	stomatärer Widerstand [s m ⁻¹]
r_t	gesamter Blattwiderstand [s m ⁻¹]
HLNUG	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
ICP	<i>International Cooperative Program</i> , Internationales Kooperationsprogramm
IPCC	<i>International Panel on Climate Change</i> , Weltklimarat
l	Liter
LED	<i>light emitting diode</i>
L_{Trieb}	Trieblänge [cm]
Lu	schluffiger Lehm
NMVOC	<i>non-methane volatile organic compounds</i>
O₃	Ozon
P	Luftdruck [hPa]

PAW	<i>Plant Available Water</i> , pflanzenverfügbares Bodenwasser [%]
PAW_t	Parameter der Wichtungsfunktion für das pflanzenverfügbare Bodenwasser im Stomatamodell (f_{PAW})
PC	<i>Present Climate</i> , Gegenwartsklima
PC-HIGH	<i>Present Climate – HIGH ozone concentration</i>
PC-MOD	<i>Present Climate – MODerately increased ozone concentration</i>
PC-PC	<i>Present Climate – Present Climate ozone concentration</i>
PC-PI	<i>Present Climate – Pre-Industrial ozone concentration</i>
PLA	<i>projected leaf area</i> , projizierte Blattfläche
POD_{0,max}	Parameter der Wichtungsfunktion für die akkumulierte Ozonaufnahme im Stomatamodell (f_{O_3})
POD_{0,min}	Parameter der Wichtungsfunktion für die akkumulierte Ozonaufnahme im Stomatamodell (f_{O_3})
POD_Y	<i>Phytotoxic Ozone Dose over a threshold of Y nmol m⁻² s⁻¹</i> Phytotoxische Ozon-Dosis über dem Schwellenwert $Y \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ [mmol m^{-2}]
POD_{Y_SF}	über Xylemsaftflussmessungen bestimmter POD _Y
POD_{YIAM}	vegetationstypenspezifischer POD _Y
POD_{YSPEC}	speziesspezifischer POD _Y
ppb	<i>parts per billion</i>
PPFD	photosynthetisch aktive Photonenflussdichte [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
ppm	<i>parts per million</i>
RB_{annual}	mittlere jährliche prozentuale Abnahme der Biomasse im Vergleich zu einer Kontrolle
RCM	<i>regional climate model</i>
RCP	<i>representative concentration pathways</i> , repräsentative Konzentrationspfade
Ref10 POD_Y	Referenz-Biomasse, die unter vorindustriellen Bedingungen bei mittleren Ozonkonzentration von 10 ppb produziert wurde
ReKlieEs-De	Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland
R_g	<i>global radiation</i> , Globalstrahlung [W m^{-2}]
rh	<i>relative humidity</i> , relative Luftfeuchte [%]
SF	<i>sapflow</i> , Xylemsaftfluss
SFB 607	Sonderforschungsbereich 607 „Wachstum und Parasitenabwehr - Wettbewerb um Ressourcen in Nutzpflanzen aus Land- und Forstwirtschaft“ der TU München
SVP	<i>saturation vapor pressure</i> , Sättigungsdampfdruck der Luft [kPa]
TA	Temperatur in 1 mm Distanz zum TransP-Referenzkörper [°C]
t_a, T_{Luft}	Lufttemperatur [°C]
T_{Blatt}	Blatttemperatur [°C]
TdJ	Tag des Jahres
TDR	Time-Domain-Reflektometer

t_{max}	Parameter der Wichtungsfunktion für die Lufttemperatur im Stomatamodell (f _{temp})
t_{min}	Parameter der Wichtungsfunktion für die Lufttemperatur im Stomatamodell (f _{temp})
t_{opt}	Parameter der Wichtungsfunktion für die Lufttemperatur im Stomatamodell (f _{temp})
TP	Trockenphase
TR	Temperatur des TransP-Referenzkörpers [°C]
TRJ	Testreferenzjahr
TUM	Technische Universität München
TUMmesa	TUM Model Ecosystem Analyser
TV	<i>target value</i> , Zielwert
u	Windgeschwindigkeit [m s ⁻¹]
UBA	Umweltbundesamt
Uls	lehmig-sandiger Schluff
UV	ultraviolet
VPD	<i>Vapor Pressure Deficit</i> , Dampfdruckdefizit [kPa]
VPD_{Blatt}	Differenz im Dampfdruck zwischen Blatinnerem und -äußerem [Pa kPa ⁻¹]
VPD_{Luft}	Dampfdruckdefizit der Luft [kPa]
VPD_{max}	Parameter der Wichtungsfunktion für das Dampfdruckdefizit im Stomatamodell (f _{VPD})
VPD_{min}	Parameter der Wichtungsfunktion für das Dampfdruckdefizit im Stomatamodell (f _{VPD})
VWC	<i>Volumetric Water Content</i> , volumetrischer Bodenwassergehalt
ΔE	E _{TransP} - E _{Licor} [mmol m ⁻² s ⁻¹]
ΔT	Temperaturdifferenz zwischen Blatt und TransP-Referenzkörper [°C]
Ω	Entkoppelungsfaktor, Maß für die Abhängigkeit der Transpiration von der stomatären Leitfähigkeit

Zusammenfassung

Einleitung

Bodennahes Ozon ist neben seiner Humantoxizität gegenwärtig einer der wichtigsten Luftschadstoffe für Pflanzen. Ozon gelangt über die Stomata in das Innere der Pflanzen und kann von dort aus zu multiplen Schädigungen führen, die das Pflanzenwachstum beeinträchtigen, sobald die Kompensation durch pflanzliche Entgiftungsreaktionen überfordert ist.

Waldökosysteme fungieren weltweit noch als Kohlenstoff-Senken. Studien zur Ozon-Wirkung auf Wälder zeigen jedoch, dass schon gegenwärtige Ozon-Konzentrationen zu einem Verlust der Nettoprimär-Produktion führen können. Damit wird das Potential der Wälder zur Kohlenstoffsequestrierung deutlich vermindert. Zunehmende Zuwächse aufgrund zukünftig weiter steigender CO₂-Konzentration können die ozoninduzierten Zuwachseinbußen nach ersten globalen Abschätzungen jedoch nur teilweise kompensieren. Die Interaktionen zwischen Ozonbelastung und steigenden CO₂-Gehalten und weiterer Klimawandelfaktoren sind noch weitgehend ungeklärt. Ozonbedingte Produktionseinbußen tragen zusätzlich zu einer Minderung der CO₂-Fixierung bei und verstärken somit die Risiken des Klimawandels.

Motivation

Die Grundlage für die Risikobewertung der Ozonbelastung bei Wäldern sind Ozondosis-Wirkungs-Funktionen für verschiedene Baumarten, welche die Biomasseproduktion im Vergleich zu einer Kontrolle bei unterschiedlichen Ozondosen zeigen (CLRTAP, 2017). Hierfür wurden die Ergebnisse aus verschiedenen Ozonbelastungs-Experimenten mit Sämlingen oder Jungbäumen herangezogen, die vor allem in Open-Top-Kammern in den 1980er und 1990er-Jahren durchgeführt wurden. Ein zunächst konzentrationsbasierte Ansatz wurde nachträglich durch Modellierung in einen für die toxikologische Belastung relevanten, ozonflussbasierten Ozonaufnahme-Ansatz überführt und entsprechende Schwellenwerte (Critical Levels) abgeleitet, ab welchen Wachstumseinbußen zu erwarten sind. Mit dem derzeit gängigen ozonflussbasierten POD_Y-Ansatz wird die stomatäre Ozonaufnahme als **Phytotoxische Ozon-Dosis** über einem rezeptorpflanzen-spezifischen Entgiftungs-Schwellenwert **Y** bestimmt (POD_Y), wobei hierfür während der Tageslichtstunden stündliche Ozonflüsse für die jeweilige Vegetationszeit akkumuliert werden.

Welchen Anteil die Ozonbelastung an Zuwachsrückgängen bei Waldbeständen hat, ist aufgrund der multiplen Einflussfaktoren schwer zu ermitteln. Teilweise widersprüchliche Ergebnisse zu ozonbedingten Wachstumseinschränkungen haben Zweifel an der Gültigkeit der Methode und der Ozon-Dosis-Wirkungs-Funktionen für die Ableitung von Schwellenwerten aufkommen lassen. Die Verwendung von Sämlingen oder jungen Bäumen und die Aufzucht unter kontrollierten experimentellen Bedingungen wird als mögliche Limitierung bei der Extrapolation von Ozoneffekten auf Waldbestände diskutiert, da die natürlichen Bestandes- und Konkurrenzsituationen meist nicht einbezogen werden können.

Daher wurden ab Beginn der 2000er Jahre auch vermehrt Untersuchungen mit adulten Bäumen unter möglichst naturnahen Bedingungen durchgeführt. Abhängig von Region, Standort und Baumart wurden dabei sehr unterschiedliche Ergebnisse ermittelt. Mehrere Studien für Buchen- und Fichten-Waldstandorte in Deutschland zeigten jedoch für viele Jahre deutliche Überschreitungen der derzeit für die modellierte Ozonaufnahme geltenden Schwellenwerte. Dies wies auf erhebliche (nicht untersuchte) Zuwachseinbußen hin. Eine epidemiologische Studie zu ozonbedingten Wachstumseinbußen bei Buchen und Fichten in der Schweiz konnte für Buche eine gute Übereinstimmung der Dosis-Wirkungs-Funktion mit experimentellen Daten

zeigen. In Waldbeständen in Italien konnten trotz Überschreitung der Schwellenwerte dagegen keine ozonbedingten Biomasseeinbußen nachgewiesen werden.

Eine Validierung der aus Ozonaufnahme-Risikomodellen resultierenden Ozonflüsse und Ozonaufnahmen bei Bäumen konnte bisher durch empirische Messungen nicht überzeugend gezeigt werden. Eine wichtige Voraussetzung hierfür sind ungestörte und kontinuierliche Messungen der stomatären Leitfähigkeit. Die gängigen Blattgaswechsel-Messungen zur Bestimmung der stomatären Leitfähigkeit in einer ventilierten Küvette bilden die ungestörten Bedingungen in den Blattgrenzschichten nicht ab und eignen sich zudem nicht für kontinuierliche, an einer Vielzahl an Pflanzen parallel durchgeführte Messungen. Bei der Bestimmung der stomatären Leitfähigkeit über Xylemsaftfluss-Messungen ist die Bezugsgröße die Gesamtbelaubung, während bei der Modellierung jedoch ausschließlich auf die sonnenexponierte Belaubung Bezug genommen wird. Eine Skalierung der beiden Referenzgrößen ist bisher nur näherungsweise möglich. Beide genannten Methoden eignen sich somit nicht für die Validierung der modellierten Ozonaufnahmen.

Bei den bisherigen Ozonaufnahme-Risikomodellen werden wichtige, die Stomataregulierung beeinflussende Umweltgrößen, wie erhöhte externe Ozon- und CO₂-Konzentrationen, nicht berücksichtigt. Erhöhte stomatäre Ozonaufnahmen führen zu einem dauerhaft erhöhten Level an oxidativem Stress im Blattgewebe, was ab einer bestimmten kumulativen Aufnahme zu beschleunigter und verfrühter Seneszenz führen kann. Für die Rezeptortypen Weizen und Kartoffel wurde bereits eine Funktion implementiert, die die Wirkung der Ozonbelastung auf die stomatäre Leitfähigkeit berücksichtigt. Für Waldbäume steht bisher noch keine entsprechende Funktion zur Verfügung. Zukünftige Klimaszenarien werden, je nach Klimamodellannahmen, durch deutlich erhöhte CO₂-Konzentrationen charakterisiert sein. Erhöhte CO₂-Konzentrationen, die den photosynthetischen Bedarf überschreiten, führen zu einem partiellen Stomataschluss, was eine verringerte stomatäre Leitfähigkeit gegenüber Ozon und folglich geringere Ozonaufnahmen zur Folge hat. Für zukünftige Klimaszenarien muss daher außerdem die langfristige CO₂-Sensitivität der stomatären Leitfähigkeit in den Modellen abgebildet werden.

Eine Überprüfung von Modellannahmen und -parametrisierung sowie eine Anpassung der Risikoabschätzung an aktuelle und auch zukünftige Bedingungen sind folglich erforderlich. Um die genannten Lücken (Validierung der modellierten Ozonflüsse durch empirische Messungen, Erweiterung der Modellparametrisierung durch Ozondosis- und CO₂-Wichtungs-Funktion für Zukunftsprognosen, Überprüfung der Ozondosis-Wirkungs-Beziehungen für Waldbäume) zu schließen und die Eignung der Risikomodellansätze für Zukunftsprognosen zu prüfen, wurde das valORTree-Projekt konzipiert.

Projektziele und Erfordernisse

Hauptziel des valORTree-Projekts war es, die Grundlagen für die Ozonrisikobewertung an Waldbäumen (Fichten, Buchen) mit auf Ozonflüssen basierenden Modellen (nach Mapping Manual, CLRTAP 2017) zu validieren und für die Einflussfaktoren „CO₂-Konzentration“ und „Ozonbelastung“ zu parametrisieren. Damit sollte, basierend auf dem gegenwärtigen wissenschaftlichen Stand, eine Bewertung des Ozonbelastungsrisikos für die aktuelle Situation wie auch für zukünftige Klimawandelbedingungen (2100) sichergestellt werden.

Als Grundlage wurde ein mehrjähriges kontrolliertes Phytotron-Experiment mit jungen Buchen und Fichten durchgeführt. Für die Simulation realistischer Klima-, Ozonbelastungs- und CO₂-Konzentrations-Szenarien für einen deutschen Referenz-Waldstandort wurden sogenannte Testreferenzjahre, basierend auf zeitlich hochaufgelösten regionalisierten dynamischen Klimareihen für die Gegenwart und zwei mögliche Zukunftsszenarien (RCP2.6 und PCP8.5 im Zeitraum 2071 - 2100) verwendet. Eine weitere Voraussetzung für die Validierung der

modellierten Ozonflüsse war die kontinuierliche, empirische Bestimmung der stomatären Ozonflüsse bei Buchen und Fichten. Hierzu wurde im valORTree-Projekt eine neue, sensorgestützte Methode etabliert.

Um das Ozonaufnahme-Risikomodell an sich gegenwärtig verändernde und für die Zukunft simulierte Umweltbedingungen anzupassen, wurde die Modell-Parametrisierung unter kontrollierten Bedingungen überprüft. Des Weiteren sollten erstmals Wichtungsfunktionen zur Berücksichtigung des Einflusses flussbasierter Ozonbelastung und langfristig erhöhter CO₂-Konzentration auf die stomatäre Leitfähigkeit erstellt werden. Abschließend sollten die mittels aktualisiertem Ozonaufnahmemodell berechneten Ozonflüsse bzw. phytotoxischen Ozondosen mit den kontinuierlich gemessenen Werten überprüft und die Abweichungen zur bisherigen gängigen Modellparametrisierung (nach Mapping Manual, CLRTAP 2017) aufgezeigt werden.

Zur Überprüfung der bestehenden Ozondosis-Wirkungs-Beziehung für Buchen und Fichten (nach Mapping Manual, CLRTAP 2017) wurden für die verschiedenen Klima-Szenarien die ober- und unterirdische Biomasse der Bäume, die Biomasseverluste in Bezug auf ein Referenzszenario mit vorindustrieller Ozonsituation und die entsprechenden Ozonaufnahmen (als POD_y) für das Phytotronexperiment bestimmt. Mit dem Ziel, eine auf dem aktuellen Stand des Wissens beruhende Ozonrisiko-Bewertung für Waldbäume in Deutschland zu erstellen, wurden mit dem neu parametrisierten Ozonaufnahme-Risiko-Modell POD₁-Werte und potentielle Biomasse-Einbußen für gegenwärtigen und zukünftigen Klimabedingungen für Buchen und Fichten unter Freilandbedingungen errechnet.

Ein zusätzliches Ziel des Projekts war die Skalierung von Ozonaufnahmedosen bei adulten Buchen mit unterschiedlichen Belaubungsbezug. Xylemsaftfluss-Messungen werden häufig genutzt, um die Ozonaufnahme bei adulten Bäumen zu ermitteln. Die stomatäre Ozonaufnahme gilt bei dieser Methode für die Gesamtblaubung des Einzelbaums bzw. für den Waldbestand, während sich die modellierten stomatären Ozonaufnahmen dagegen auf die sonnenexponierte Belaubung beziehen. Entsprechend basieren auch die bisher etablierten Ozondosis-Wirkungs-Funktion und die Critical Levels zur Abschätzung von Biomasseverlusten auf der sonnenexponierten Belaubung (Mapping Manual, CLRTAP 2017). Um Risikobewertungen (nach den gängigen Ozondosis-Wirkung-Funktionen) für Ozondosen durchführen zu können, die mittels Xylemsaftfluss-Messung bestimmt wurden, muss somit eine Skalierung der Ozondosen mit unterschiedlichem Belaubungsbezug erfolgen. Innerhalb des valORTree-Projekts entsprechend abgeleitete Transferfunktionen ermöglichen nun die Nutzung von über Xylemsaftfluss-Messung ermittelten Ozondosen für die Ozon-Risikobewertung inklusive einer Abschätzung von Biomasseverlusten nach dem Critical-Level-Konzept.

Versuchskonzeption

Kontrolliertes Experiment in Phytotronen

Die Forschungsziele im valORTree-Projekt erforderten ein mehrjähriges Experiment unter kontrollierten Bedingungen. Für die Konzeption eines derartigen kontrollierten Experiments mit unterschiedlichen Varianten zu Klimaszenarien, CO₂- und Ozon-Konzentrationen mit jungen Buchen und Fichten in ausreichender Anzahl bot die Phytotron-Anlage der Technischen Universität München (TUMmesa, Model Ecosystem Analyser, 8 Phytotrone) die notwendigen Voraussetzungen.

Versuchspflanzen und Referenz-Waldstandort

Als Versuchspflanzen wurden ein Jahr vor Beginn des Experiments im Frühjahr 2018 jeweils 100 junge, durchschnittlich 8-jährige Buchen und Fichten aus Naturverjüngung zusammen mit einem 20-Liter-Bodenmonolithen entnommen.

Um nicht nur globalklimatische, sondern insbesondere regionaldynamische Entwicklungen erfassen zu können, wurden alle Szenarien auf einen Referenz-Waldstandort im deutschen Mittelgebirgsraum regionalisiert. Die Luftmessstation Spessart des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) bot hierfür optimale Bedingungen hinsichtlich des Standorts als auch der Verfügbarkeit von Langzeitaufzeichnungen wichtiger meteorologischer Größen in stündlicher Auflösung inklusive verlässlicher Messdaten der troposphärischen Ozonkonzentration.

Regionalisierte dynamische Klimareihen für die Gegenwart und die Zukunft

Mit der Vorgabe, unterschiedliche Klimabedingungen, Ozonbelastungssituationen und CO₂-Konzentrationen für eine Referenz-Waldregion unter möglichst realistisch nachzuzeichnen und dabei nach Möglichkeit auch die mittlere saisonale und tageszeitliche Dynamik zu berücksichtigen, wurden Klimaszenarien für die Gegenwart (PC, *Present Climate*) und die Zukunft (RCP2.6 (best-case-Szenario) und RCP8.5 (worst-case-Szenario); RCP: *Representative Concentration Pathways*) erzeugt. Hierzu wurden aus einem Ensemble regionalisierter Klimamodelle über eine Rekombinationsmethode stündlich aufgelöste Klimareihen generiert. Diese sog. Testreferenzjahre zeichnen sich durch dynamische mittlere Jahres- und Tagesgänge wichtiger meteorologischer Kenngrößen aus.

Experimentelles Set-Up

Für das Gegenwartsszenario wurde ein Ozongradient bestehend aus vier verschiedenen Ozonbelastungssituationen generiert: vorindustriell (*pre-industrial*, PI), gegenwärtig (*present climate*, PC), moderat erhöht (MOD) und deutlich erhöht (HIGH). Mit den beiden zukünftigen Klimaszenarien RCP2.6 und RCP8.5 ergab sich zusätzlich ein Temperatur- und CO₂-Gradient für das Ende des 21. Jahrhunderts. RCP2.6 und RCP8.5 wurden jeweils mit temporären Trockenphasen wiederholt (RCP2.6_DS und RCP8.4_DS; DS: *drought stress*). Die acht unterschiedlichen Behandlungen wurden in den TUMmesa-Phytotronen mit jeweils 11 Buchen und 11 Fichten in den Jahren 2019-2021 jeweils von Anfang April bis Ende September durchgeführt.

Die acht verschiedenen Szenarien sind im Folgenden aufgelistet (Mittelwerte der Testreferenzjahre, ohne Anpassung an die technischen Voraussetzungen von TUMmesa, siehe Tab. 2, Abb. 3):

- PC-PI:
Gegenwartsklima (1987-2016) + vorindustrielle O₃- + gegenwärtige CO₂-Konzentration (Lufttemperatur 8,2°C, O₃ 10 ppb, CO₂ 375 ppm)
- PC-PC:
Gegenwartsklima (1987-2016) + gegenwärtige O₃- + gegenwärtige CO₂-Konzentration (Lufttemperatur 8,2°C, O₃ 29 ppb, CO₂ 375 ppm)
- PC-MOD:

Gegenwartsklima (1987-2016) + moderat erhöhte O₃- + gegenwärtige CO₂-Konzentration (Lufttemperatur 8,2°C, O₃ 32 ppb, CO₂ 375 ppm)

- PC-HIGH:
Gegenwartsklima (1987-2016) + stark erhöhte O₃- + gegenwärtige CO₂-Konzentration (Lufttemperatur 8,2°C, O₃ 36 ppb, CO₂ 375 ppm)
- RCP2.6:
Zukunftsszenario I (2071-2100) + moderate O₃- + zukünftige CO₂-Konzentration (Lufttemperatur 9,3°C, O₃ 34 ppb, CO₂ 421 ppm)
- RCP2.6_DS:
Zukunftsszenario I (2071-2100) + mäßige O₃- + zukünftige CO₂-Konzentration + Trockenphasen (Lufttemperatur 9,3°C, O₃ 34 ppb, CO₂ 421 ppm)
- RCP8.5:
Zukunftsszenario II (2071-2100) + hohe O₃- + zukünftige CO₂-Konzentration (Lufttemperatur 11,5 °C, O₃ 41 ppb, CO₂ 936 ppm)
- RCP8.5_DS:
Zukunftsszenario II (2071-2100) + hohe O₃- + zukünftige CO₂-Konzentration + Trockenphasen (Lufttemperatur 11,5°C, O₃ 41 ppb, CO₂ 936 ppm)

Um eine hinreichende statistische Absicherung der Ergebnisse gewährleisten zu können, wurde die Belegung der Phytotrone in allen drei Versuchsjahren variiert. Für eine ausreichende Nährstoffversorgung wurden den Pflanzen essentielle Nährelemente in regelmäßigen Abständen über das Gießwasser zugeführt. Die Bewässerung erfolgte über ein zeitgesteuertes Tröpfchenbewässerungssystem, dabei wurde für die Behandlungen ohne Trockenstress der Erhalt von 50 – 90 % PAW (*plant available water*, entspricht 25,5 – 37,9 % volumetrischer Bodenwassergehalt) im Substrat angestrebt. Die beiden Behandlungen mit temporären Trockenphasen erhielten jeweils für ca. 14 Tage im Juni und August eine um 30 % reduzierte Wasserversorgung. Für die Phytotronexperimente wurde zunächst ein biologisches Pflanzenschutzkonzept angewendet, in den Jahren 2020 und 2021 wurde vorbeugend zur Bekämpfung potentiell auftretender Schädlinge chemischer Pflanzenschutz eingesetzt.

Neue Methode zur kontinuierlichen Messung der stomatären Ozonflüsse für Buchen und Fichten – der TransP-Sensor

Voraussetzung für die empirische Bestimmung der phytotoxischen Ozonaufnahme zur Validierung der modellierten Ozonflüsse sind kontinuierliche, parallel an einer Vielzahl an Objekten durchgeführte Messungen der Blattleitfähigkeit lichtexponierter Blätter bzw. benadelter Zweigabschnitte.

Aufgrund fehlender technischer Möglichkeiten zur kontinuierlichen Messung stomatärer Ozonflüsse auf Einzelblattebene wurde zur Validierung des zur Ozon-Risikobewertung genutzten Modells ein neuartiger, an die spezifischen Anforderungen angepasster Sensor, TransP, entwickelt. Ausgehend von hochpräzisen Messungen verschiedener Temperaturen im unmittelbaren Blatt-Atmosphäre-System konnte über artspezifische Kalibrierfunktionen die blatt- bzw. nadelflächenspezifische Transpirationsrate kontinuierlich, ungestört und mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden. Dadurch war es möglich, über physikalische Modelle die Blattleitfähigkeit und den Ozonfluss von der Atmosphäre in das Blattinnerer zu errechnen.

Parametrisierung des verwendeten FO₃REST-Modells für experimentelle Phytotron- und Freilandbedingungen und Validierung der modellierten stomatären Ozonflüsse

Modellierung

Die Modellierung der Ozonflüsse und der Ozonaufnahmen (POD_Y) erfolgte über das FO₃REST-Modell (VDI 2310 Blatt 6 2020) auf Grundlage des in Kapitel 3 des Mapping Manual (CLRTAP, 2017) ausführlich beschriebenen Ansatzes. Zur Überprüfung der Validität des aktuell im Mapping Manual vorgeschlagen Parametersatzes wurden POD₀ und POD₁ für den Zeitraum der Vegetationsperioden 2020 und 2021 modelliert, für den mittels TransP-Sensor gemessene POD_{YS} vorlagen.

Erweiterung der Parametrisierung

Unter Berücksichtigung der technisch bedingt hohen Grenzschichtwiderstände wurde unter Phytotron-Bedingungen eine lineare Korrelation zwischen gemessenen und modellierten POD_Y für Buche und Fichte mit einem Bestimmtheitsmaß von $r^2 = 0,93$ bzw. $0,89$ bestimmt, allerdings wurden die Ozonaufnahmen (POD_Y) bei beiden Arten durch das Modell deutlich überschätzt.

Die hohe Diskrepanz zwischen gemessen und modellierten POD_Y machte Anpassungen des verwendeten Stomatamodells erforderlich. Zunächst wurden die derzeitige Parametrisierung der Wichtungsfunktionen der stomatären Leitfähigkeit für Ozon gegenüber verschiedenen Umweltgrößen (Phänologie, Strahlung, Temperatur, Wasserdampfdruckdefizit der Luft, pflanzenverfügbares Bodenwasser) - f_{phen} , f_{light} , f_{temp} und f_{VPD} sowie die neu eingeführte Funktion f_{PAW} - auf ihre Gültigkeit im valORTree-Experiment überprüft.

Weitere Anpassungen des Modells beinhalteten die Entwicklung einer Wichtungsfunktion f_{O3} , welche den hemmenden Einfluss erhöhter stomatärer Ozonaufnahmen auf die stomatäre Leitfähigkeit abbildet. Allerdings konnte dieser Zusammenhang nur bei Buche, nicht aber bei Fichte nachgewiesen werden, sodass f_{O3} nur für Buche implementiert wurde. Außerdem wurde der Einfluss einer dauerhaft erhöhten externen CO₂-Konzentration (wie sie im Zuge des Klimawandels zu erwarten ist) auf die stomatäre Leitfähigkeit über eine entsprechende f_{CO2} Funktion sowohl für Buche als auch für Fichte im Modell implementiert. Somit ist erstmalig eine Ozonrisikobewertung für zukünftige Klimaszenarien möglich.

Auf Grundlage der Messungen im valORTree-Projekt stehen nun erstmals Modellerweiterungen für die Sensitivität der stomatären Leitfähigkeit gegenüber langfristig erhöhten CO₂-Konzentrationen und der Ozonbelastung (f_{CO2} , f_{O3}) für Buchen und Fichten zur Verfügung. Im Folgenden sind die einzelnen Modellanpassungen und -erweiterungen für Buche und Fichte aufgeführt:

Buche:

- Unter Berücksichtigung der stomatären Leitfähigkeit gegenüber Ozon sowohl unter kontrollierten Bedingungen als auch unter Freilandbedingungen (Kranzberger Forst) erwiesen sich die bisherigen Parametrisierungen für f_{phen} , f_{light} und f_{VPD} als valide.
- Unter Phytotronbedingungen ließ sich ein Zusammenhang zwischen der stomatären Leitfähigkeit gegenüber Ozon und der Lufttemperatur nicht zuverlässig ableiten, da die Lufttemperaturen auf ca. 10 bis 30 °C beschränkt waren. Die bisherige Wichtungsfunktion f_{temp} für Buchen beruht auf Daten, die im Schweizer Alpenraum unter abweichenden ökologischen Bedingungen aufgenommen wurden. Von Nunn et al. (2005) wurde eine abweichende, aus Messungen an Buchen im Kranzberger Forst abgeleitete Parametrisierung vorgeschlagen ($t_{min} = 8$ °C, $t_{opt} = 21$ °C und $t_{max} = 34$ °C). Unter Einbeziehung von aktuellen, im Kranzberger Forst aufgenommenen Daten schlagen wir

für Deutschland diese „Kranzberger Parametrisierung“ für f_{temp} vor. Diese Parametrisierung wurde auch in der VDI-Richtlinie 2310 Blatt 6 (2020) übernommen.

- Der Schwellenwert PAW_t der Bodenfeuchte-Wichtungsfunktion f_{PAW} wird unter Berücksichtigung der Kranzberger Daten mit 40 % vorgeschlagen. Da das geringe Volumen des Wurzelraumes im Phytotronexperiment wohl eine höhere Sensitivität gegenüber geringen Bodenwassergehalten verursachte, wurde PAW_t für die im Experiment durchgeführten Modellierungen mit 50 % etwas höher gewählt.
- Eine Wichtungsfunktion für die CO_2 -Konzentration (f_{CO_2}) wurde basierend auf der Funktion von Medlyn et al. (2001) und den im Phytotronexperiment durchgeführten Messungen für Buchen entwickelt und mit dem Parameter $a_{CO_2} = 0,73$ im Risikomodell implementiert.
- Als Wichtungsfunktion für die Ozonbelastung (f_{O_3}) konnte für Buchen unter Freilandbedingungen eine Schwellenwertfunktion für die Ozonaufnahme auf Basis des POD_0 entwickelt werden. Die Parameter der Funktion sind $POD_{0,max} = 15 \text{ mmol m}^{-2} \text{ PLA}$ und $POD_{0,min} = 25 \text{ mmol m}^{-2} \text{ PLA}$. Unter kontrollierten Bedingungen zeigte sich ein limitierender Einfluss der Ozonaufnahme auf die stomatäre Leitfähigkeit gegenüber Ozon sowohl bei sehr niedrigen als auch bei relativ hohen POD_0 -Werten. Um diesen Hormesis-Effekt zu berücksichtigen, wurde für die im Experiment durchgeführten Modellierungen eine eigene Funktion $f_{O_3(TUMmesa)}$ in Form einer Optimumfunktion mit den Parametern $POD_{0,min} = 0 \text{ mmol m}^{-2} \text{ PLA}$, $POD_{0,opt} = 5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ PLA}$, $POD_{0,max} = 200 \text{ mmol m}^{-2} \text{ PLA}$ und $f_{min,O_3} = 0,6$ gewählt.

Fichte:

- Für Fichten konnten die bisherige Parametrisierungen von f_{phen} , f_{light} , f_{temp} und f_{VPD} sowohl im Phytotronexperiment als auch im Freiland bestätigt werden. Für die Bodenfeuchte-Wichtungsfunktion f_{PAW} wurde der Schwellenwert PAW_t mit 50 % festgelegt.
- Analog zu Buche wurde für Fichte eine Wichtungsfunktion für die Beziehung zwischen der CO_2 -Konzentration und der stomatären Leitfähigkeit (f_{CO_2}) auf Grundlage der Funktion von Medlyn et al. (2001) entwickelt. Es zeigte sich eine geringere Sensitivität der Fichte gegenüber erhöhtem CO_2 im Vergleich zur Buche. Der von Medlyn et al. (2001) vorgeschlagene Parameter $a_{CO_2} = 0,9$ wurde übernommen.
- Analog zu Buche wurde für Fichte die Beziehung zwischen der Ozonaufnahme, basierend auf dem POD_0 -Wert, und der stomatären Leitfähigkeit überprüft. Wie auch bei Buche zeigte sich unter kontrollierten Bedingungen ein gewisser Hormesis-Effekt – im Gegensatz zu Buche lag eine geringere stomatäre Leitfähigkeit jedoch nur bei niedrigen POD_0 -Werten im PC-PI-Szenario, nicht aber bei hohen POD_0 -Werten vor. Unter kontrollierten Bedingungen wurde daher eine Schwellenwertfunktion für die im Experiment durchgeführten Modellierungen mit den Parametern $POD_{0,min} = 2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ PLA}$, $POD_{0,max} = 3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ PLA}$ und $f_{min,POD_0} = 0,5$ angewandt. Für Freilandbedingungen (Datenbasis Kranzberger Forst) war aufgrund der geringen Sensitivität der Fichte gegenüber erhöhten Ozonkonzentrationen kein Effekt der kumulierten Ozonaufnahme auf die stomatäre Leitfähigkeit erkennbar. Da dauerhaft erniedrigte Ozonkonzentrationen im Gegensatz zum Phytotronexperiment im Freiland nicht vorkommen, wird die Einführung einer Ozonfunktion für Fichte nicht empfohlen.

Validierung der modellierten Ozonflüsse

Nach Anwendung der erweiterten Parametrisierung für Buche und Fichte im Risikomodell FO₃REST ergab sich eine gute Übereinstimmung von gemessenen und modellierten Ozonaufnahme-Werte mit $r^2 = 0,97$ und einer Steigung von 0,9 bzw. mit $r^2 = 0,96$ und einer Steigung von 1,0 (Abbildungen 30, 34).

Die Modellparametrisierung für Buchen wurde entsprechend der oben beschriebenen Anpassungen und der neue eingeführten f_{CO_2} - und f_{O_3} -Funktionen erweitert und konnte erfolgreich validiert werden.

Die derzeit für die Risikobewertung von Fichtenbeständen verwendete Modellparametrisierung konnte mit Bestätigung der im Mapping Manual vorgeschlagenen Parametrisierung und unter Berücksichtigung der neu eingeführten f_{CO_2} -Funktion für „continental spruce“ erfolgreich validiert werden.

Damit wurde erstmals auf der Grundlage von kontinuierlich gemessenen Daten die Validität der modellierten Ozonflüsse für Buchen und Fichten gezeigt.

Überprüfung der bestehenden Ozondosis-Wirkungs-Beziehung für Buche und Fichte im kontrollierten Phytotronexperiment

Aufgrund der im Phytotronexperiment technisch bedingt hohen Grenzschichtwiderstände um die Blätter/Nadeln waren die hier ermittelten POD₁-Werte deutlich niedriger als allgemein für Freilandbedingungen angenommen wird. Die während des Experimentzeitraums gemessenen POD₁-Werte für Buchen und Fichten lagen teilweise deutlich unterhalb des Critical-Levels von 5,2 bzw. 9,2 mmol m⁻² PLA. Für diesen Bereich der Ozondosis-Wirkungs-Funktion standen bisher keine Messdaten zur Verfügung.

Die im Phytotronexperiment gemessenen Ozonaufnahmen und Biomassen bestätigen die Ozondosis-Wirkungs-Funktion für die Behandlungen im Gegenwartsklima und für das Zukunftsszenario RCP2.6. Für das Zukunftsszenario RCP8.5 mit stark erhöhter CO₂-Konzentration konnten Biomasseverluste über die aktuelle Ozondosis-Wirkungs-Funktion jedoch nicht sinnvoll abgeschätzt werden, da Zuwachssteigerungen durch erhöhte Temperaturen und CO₂-Konzentrationen sowie verlängerte Vegetationszeiten bisher nicht berücksichtigt werden.

Die POD₁-Werte bei Fichte waren bei allen Behandlungen relativ ähnlich (~3,3 mmol m⁻² PLA). Im Zukunftsszenario RCP8.5 wurde nur eine geringfügig niedrigere Ozonaufnahme gemessen als in den durch eine vergleichbare Ozonbelastung gekennzeichneten Varianten des Ozongradienten, da Fichten auf erhöhte CO₂-Konzentrationen mit einer deutlich geringeren Einschränkung der stomatären Leitfähigkeit reagieren als Buchen. Bei Fichte wurde für alle Behandlungen im Phytotronexperiment eine höhere Zunahme der Biomasse im Vergleich zur Kontrolle (vorindustrielles Szenario) festgestellt. Ein möglicher Erklärungsansatz für diese Reaktion ist das toxikologischen Reaktionskonzept der Hormesis, wonach es bei mäßig erhöhter Stressoren-Wirkung (Ozonbelastung) zunächst zu einer Stimulation des Wachstums kommen kann. Wie auch bei Buche war die Biomasse der Fichten im RCP8.5-Szenario am höchsten.

Um Aussagen zum Ozonrisiko für zukünftige, durch erhöhte CO₂-Konzentrationen geprägte Szenarien treffen zu können, wird empfohlen, die Datenpunkte der Ozondosis-Wirkungs-

Funktionen mit der von uns vorgeschlagenen erweiterten Parametrisierung und unter Berücksichtigung der Wichtungsfunktionen f_{CO_2} und f_{O_3} zu rekalkulieren.

Empfehlungen:

- Die im valORTree-Projekt angepassten und vor allem die neu entwickelten Wichtungsfunktionen f_{CO_2} und f_{O_3} sollten für Buche und für Fichte (nur f_{CO_2}) im zur Risikobewertung genutzten Modell implementiert werden. Allerdings ist eine Implementierung von f_{CO_2} unter historischen bzw. gegenwärtigen Klimaverhältnissen bis Ende der 2010er Jahre nicht notwendig ($f_{CO_2}=1$).
- Die Ozondosis-Wirkungs-Funktionen für Buche/Birke beinhaltet für Buche bisher nur sechs Datenpunkte, die außerdem nur einen engen POD_1 -Bereich abbilden (10 -14 mmol m⁻² PLA, Biomassereduktion um 10 %). Für die Abbildung höherer Ozonbelastungen sind ausschließlich Daten von Birke vorhanden. Birke, als Pionierbaumart, und Buchen, als Klimaxbaumart, unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Wachstums- und Stressresilienz-Strategien. Zur weiteren Überprüfung sollte die Ozondosis-Wirkungs-Funktion für Buche und Fichte durch zusätzliche experimentelle Daten hinsichtlich Ozonaufnahme und Biomasseentwicklung aus Untersuchungen bei moderat erhöhter Ozonbelastung und CO₂-Konzentration ergänzt werden. Der Bereich der Ozondosis-Wirkungs-Funktion für höherer Ozondosen könnte durch entsprechende experimentelle Daten für Buche (z.B. aus dem Free Air-O₃-Fumigation Experiment im Kranzberger Forst) ergänzt werden.

Abschätzung der potentiellen ozonbedingten Biomasse-Einbußen unter gegenwärtigen und zukünftigen Freilandbedingungen in Deutschland

Die unter Berücksichtigung der erweiterten Parametrisierung modellierten Ozonaufnahmen für die im valORTree-Projekt entwickelten, realistische Freilandbedingungen der Gegenwart und Zukunft abbildenden Testreferenzjahre überschritten die Critical Levels und die vorgeschlagenen Zielwerte für Buchen und Fichten deutlich.

Die Überschreitung der Critical Levels für Buche und Fichte erfolgte schon kurz nach bzw. noch während des Austriebs. In dieser Wachstumsphase ist die neue Belaubung noch nicht vollständig ausdifferenziert und daher besonders sensitiv gegenüber Stressfaktoren.

Die Bedeutung der hier vorgeschlagenen CO₂-Wichtungs-Funktion bei der Modellierung des Ozonrisikos wurde bei den stark erhöhten CO₂-Konzentrationen im RCP8.5-Szenario insbesondere bei Buche deutlich. Im Vergleich zum Gegenwartsszenario wurden im RCP8.5-Szenario trotz erhöhter Ozonkonzentrationen niedrigere Ozonaufnahmen (als POD_0 bzw. POD_1) ermittelt. Dies entsprach in etwa dem Anteil der aufgrund erhöhter CO₂-Konzentrationen reduzierten Stomata- oder Blatt-Leitfähigkeit. Der Critical Level für Buche wurde daher deutlich später erreicht als im Gegenwartsszenario und im Zukunftsszenario RCP2.6. Bei Fichte war die Wirkung erhöhter CO₂-Konzentrationen auf die Reduktion der Leitfähigkeit deutlich schwächer ausgeprägt, und die Ozonaufnahmen stiegen im RCP8.5-Szenario deutlich an. Ohne Verwendung der CO₂-Wichtungsfunktion bei der Modellierung wird der Critical Level bei zukünftig hohen CO₂-Konzentrationen somit überschätzt. Dennoch lagen die POD_1 -Werte für die in im valORTree-Projekt überprüften Ozonbelastungs-Szenarien immer über den Critical Levels.

Insgesamt ist gegenwärtig wie auch in Zukunft von Wachstumseinbußen aufgrund der Ozonbelastung für Buchen und Fichten in deutschen Wäldern auszugehen. Aufgrund fehlender

experimenteller Datensätze sind Biomasseverluste für zukünftige, durch erhöhte CO₂-Konzentrationen gekennzeichnete Szenarien aus der Ozondosis-Wirkungs-Funktion bisher nicht abschätzbar. Bei erhöhtem CO₂ wird häufig eine Erhöhung der Biomasseproduktion prognostiziert. Eine chronisch erhöhte Ozonbelastung und damit verbundene Kompensations-Maßnahmen auf biochemischer, metabolischer und alloikatorischer Ebene können diese angenommene Biomassezunahme jedoch signifikant hemmen und somit die CO₂-Senkestärke des Ökosystems Wald mindern.

Allerdings muss auch Berücksichtigt werden, dass die Prognosen zur Entwicklung zukünftiger Ozonkonzentrationen – abhängig von den Simulationsannahmen – unterschiedlich ausfallen. Auch auf regionaler Ebene ist von unterschiedlichen Belastungssituationen auszugehen. Daher ist für eine näherungsweise Bewertung des zukünftigen Ozonrisikos für das Ökosystem Wald eine Risikomodellierung mit verschiedenen, realistischen und aktuellen Prognosen Entwicklung der Ozonkonzentrationen auf regionaler Ebene sinnvoll.

Für Bilanzierungen der CO₂-Senkestärke zukünftiger Forstökosysteme müssen diese Aspekte berücksichtigt werden.

Skalierung von Ozondosen bei adulten Buchen mit unterschiedlichem Belaubungsbezug

Die Ozondosis-Wirkungs-Funktion und die Critical Levels zur Abschätzung von Biomasseverlusten bei Waldbäumen (nach Mapping Manual, CLRTAP 2017) basieren auf modellierten Ozondosen, die für die sonnenexponierte Belaubung im oberen Baumkronenbereich abgeschätzt werden. Auf Xylemsaftfluss-Messungen basierende Ozondosen beziehen sich auf die Gesamtblaubung eines Einzelbaums. Um auf Xylemsaftfluss-Messungen basierende Ozondosen für die Ozon-Risikoabschätzung nutzen zu können, müssen die Ergebnisse auf die Bezugsgröße „sonnenexponierte Belaubungsfläche“ skaliert werden. Für eine Skalierung wurden im Rahmen des valORTree-Projekts mit Xylemsaftfluss-Messungen ermittelte Ozonaufnahme-Werte von zahlreichen adulten Buchen verschiedener Standorte (aus vergangenem Projekt) mit entsprechend modellierten Ozonaufnahme-Werten korreliert. Zur Umrechnung in Ozonaufnahmedosen für sonnenexponierte Belaubung konnte hieraus eine Transferfunktion abgeleitet werden. Die Transferfunktionen wurden sowohl für die bisherige Modellierung nach Mapping Manual (CLRTAP 2017) als auch für die im valORTree-Projekt entwickelte erweiterte Parametrisierung (Buche) für POD₀ und POD₁ entwickelt.

Die Nutzung von über Xylemsaftfluss-Messung ermittelten Ozondosen bei Buchen ist nun erstmals für die Ozon-Risikoabschätzung und die Abschätzung von Biomasseverlusten nach dem Critical-Level-Konzept möglich.

Summary

Introduction

Tropospheric ozone is, besides its human toxicity, one of the most important air pollutants for plants. Ozone enters the plants through the stomatal pores and can cause multiple damages that impair plant growth once the detoxification capacity is exceeded.

Forest ecosystems function as carbon sinks worldwide. However, studies of ozone effects on forests show that even current ozone concentrations cause a loss of net primary production, significantly reducing the potential of forests for carbon sequestration. Increased forest productivity that is associated with elevated CO₂ concentrations in future climate scenarios can, however, only partially compensate for ozone-induced productivity losses. The interactions between ozone pollution, rising CO₂ levels and other implications of climate change remain still largely unclear. Ozone-induced productivity losses contribute to a reduction in CO₂ fixation by terrestrial ecosystems and thus amplify climate change risks.

Motivation

The current approach for ozone risk assessment in forest ecosystems is based on species-specific ozone dose-response functions that relate biomass production to a control at different ozone doses (CLRTAP, 2017). For this purpose, results from various ozone exposure experiments with seedlings or young trees were used, that were mainly conducted in open-top chambers during the 1980s and 1990s. The concentration-based AOT40 approach was transformed into a flux-based approach by estimating stomatal conductance from environmental data, and corresponding thresholds (critical levels) were derived above which growth losses are to be expected. With the currently employed approach, the phytotoxic ozone dose above a receptor plant-specific detoxification threshold Y (POD_Y) is calculated from hourly resolved stomatal ozone flux data that are cumulated during daylight hours for the respective growing season.

It is difficult to estimate the contribution of ozone pollution to a productivity loss of forest stands due to the complex interaction of many environmental factors. Partially conflicting results on ozone-induced growth reduction have cast doubt on the validity of the applied methods and of deriving critical thresholds from ozone dose-response functions. The cultivation of seedlings or young trees under controlled experimental conditions has been discussed as a possible limitation in extrapolating ozone effects to forest stands, since natural stand and competition situations are usually not included in those setups.

Therefore, from the early 2000s on, studies with adult trees under conditions as close to natural conditions as possible were conducted. Depending on region, site and tree species, very different results were obtained. However, several studies conducted on German beech and spruce forest sites showed significant exceedances of the current threshold for modeled ozone uptake. This indicated substantial reductions of forest productivity. An epidemiological study on ozone-induced growth losses of beech and spruce in Switzerland could show a good agreement of the dose-response functions with experimental data for beech. In contrast, no ozone-induced biomass losses could be detected in Italian forest stands - although the critical thresholds were exceeded.

Ozone fluxes and ozone uptake of trees calculated from ozone risk uptake models could not be convincingly validated by empirical measurements so far. An important prerequisite for a robust model validation is an undisturbed and continuous measurements of stomatal conductance. Measurements of leaf gas exchange measurements – which determine stomatal conductance in a ventilated cuvette – do not reproduce undisturbed conditions in, e.g., the leaf boundary layer and, moreover, are not suitable for continuous, simultaneous measurements on a large number of samples. Measurements of xylem sap flow reflect the conductivity of a whole tree while maintaining boundary layer effects. However, ozone risk models refer ozone fluxes to the sun-exposed foliage only and the scaling between whole-tree conductivity or single-leaf stomatal conductivity and the model outputs is difficult. Thus, both leaf gas exchange and xylem sap flow are no suitable methods for the validation of ozone uptake models. Furthermore, the currently employed ozone uptake models do not consider important environmental variables for stomatal regulation, such as elevated external ozone and CO₂ concentrations.

Increased stomatal ozone uptake leads to a permanently elevated level of oxidative stress in the leaf tissue, which can result in accelerated and premature. For wheat and potato receptor types, a function that accounts for the effect of ozone exposure on stomatal conductance has already been implemented. For forest trees, no corresponding function is available yet. Future climate scenarios will be characterized by significantly elevated CO₂ concentrations (depending on climate model assumptions). Increased CO₂ concentrations that exceed the demand of photosynthesis causes partial stomatal closure, which results in reduced stomatal conductance to ozone and, thus, reduced ozone uptake. In order to allow ozone risk models to make estimates for future climate scenarios, the long-term CO₂ sensitivity of stomatal conductance must be represented in the models.

A critical revision of the model assumptions and its parameterization as well as an update of the risk assessment framework to current and future conditions are strongly required. In this context, the valORTree project was designed to fill the mentioned gaps (validation of the modeled ozone fluxes by empirical measurements, extension of the model parameterization by ozone and CO₂ weighting function, verification of ozone dose-response relationships for forest trees) and to test the suitability of the currently employed risk assessment approach for future climate scenarios.

Project objectives and requirements

The main objective of the valORTree project was to validate the methodology for ozone risk assessment for forest trees (spruce, beech) that is based on modelling stomatal ozone fluxes (according to Mapping Manual, CLRTAP 2017) and to parameterize them for the influencing factors "CO₂ concentration" and "ozone exposure".

For this purpose, a multi-year controlled phytotron experiment with young beech and spruce trees was conducted. For the simulation of realistic climate-, ozone-load- and CO₂-concentration-scenarios for a German reference forest site, so-called test reference years were generated. The test reference years consisted of on high-resolution, regionalized, dynamic climate series for the present and two possible future scenarios (RCP2.6 and PCP8.5 in the period 2071 - 2100). Another prerequisite for the validation of the modeled ozone fluxes was the continuous, empirical determination of stomatal ozone fluxes for beech and spruce. For this purpose, a new sensor-based method was established within the valORTree project.

In order to adapt the ozone uptake risk model to currently changing environmental conditions and for future climate scenarios, the model parameterization was tested under controlled conditions. Furthermore, weighting functions to account for the influence of flux-based ozone stress and long-term elevated CO₂ on stomatal conductance were to be established for the first time. Finally, the ozone fluxes or phytotoxic ozone doses estimated by the updated ozone uptake model were to be checked against continuously measured values and deviations from the currently employed model parameterization (according to Mapping Manual, CLRTAP 2017) should be shown.

To verify the existing ozone dose-response function for beech and spruce (according to Mapping Manual, CLRTAP 2017), the above- and below-ground biomass of trees, the productivity losses relative to a reference scenario with pre-industrial ozone situation, and the corresponding stomatal ozone uptake (as POD_v) were determined for different climate scenarios under controlled conditions. With the aim of providing an ozone risk assessment for forest trees in Germany based on the current state of knowledge, the newly parameterized ozone uptake risk model was used to calculate POD₁ values and potential productivity losses for present and future climatic conditions under field conditions.

An additional objective of the project was to scale ozone uptake doses in adult beech that were calculated based on different foliage references. Xylem sap flow measurements are commonly used to determine ozone uptake in adult trees. In this method, stomatal ozone uptake is referred to the total foliage of an individual tree or to the entire forest stand, whereas modeled stomatal ozone uptake refers to sun-exposed foliage only. Hence, the currently used ozone dose-response functions and the critical levels for biomass losses are also based on the sun-exposed foliage only (Mapping Manual, CLRTAP 2017). In order to perform a robust risk assessment (based on the common ozone dose-response functions) for flux-based ozone doses determined by xylem sap flow measurements, a scaling of the ozone doses with different foliage reference has to be performed. Within the valORTree project, transfer functions were derived that allow for the use of xylem-sap-flow-based ozone doses for ozone risk assessment and the estimation of biomass losses in accordance with the critical level concept.

Experiment design

Controlled phytotron experiment

The research objectives in the valORTree project required a multi-year experiment under controlled conditions. For the conception of such a controlled experiment with different climate, CO₂- and ozone-scenarios, that also allows the cultivation of young beech and spruce trees in representative numbers, the modern phytotron facility of the Technical University of Munich (TUMmesa, Model EcoSystem Analyser, 8 phytotrons) provided ideal conditions.

Experimental plants and reference forest site

One year before the start of the experiment, in spring 2018, 100 young, on average 8-year-old beech and spruce from natural regeneration were taken as experimental plants together with a 20-liter soil monolith.

In order to be able to capture not only global climatic but especially regional dynamic developments, all climate scenarios were regionalized to a reference forest site located in a

German low mountain range. The climate monitoring station Spessart of the Hessian Agency for Nature Conservation, Environment and Geology (HLNUG) offered optimal conditions with respect to the location as well as the availability of long-term records of important meteorological variables in hourly resolution including reliable records of the tropospheric ozone concentration.

Regionalized dynamic climate series for the present and the future

With the aim to reproduce different climate conditions, ozone exposure scenarios and CO₂ concentrations for a reference forest region as realistically as possible and to additionally account for seasonal and diurnal dynamics, climate scenarios were generated for the present (PC, *Present Climate*) and the future (RCP2.6 (best-case scenario) and RCP8.5 (worst-case scenario); RCP: *Representative Concentration Pathways*). For this purpose, hourly resolved climate series were generated from an ensemble of regionalized climate models using a recombination method. The resulting test reference years were characterized by dynamic annual and daily courses of important meteorological parameters.

Experimental setup

For the present scenario, an ozone gradient consisting of four different ozone exposure scenarios was generated: pre-industrial (PI), present climate (PC), moderately elevated (MOD) and significantly elevated (HIGH). With the two future climate scenarios RCP2.6 and RCP8.5, a temperature and CO₂ gradient for the end of the 21st century was additionally generated. RCP2.6 and RCP8.5 were each repeated with periods of temporally reduced soil moisture availability (RCP2.6_DS and RCP8.4_DS; DS: drought stress). The eight different treatments were executed in the TUMmesa phytotrons with 11 beech and 11 spruce in each of the years 2019-2021 from early April to late September.

The eight different scenarios are listed below (mean values of the test reference years, without adjustment for TUMmesa technical requirements, see Tab. 2, Fig. 3):

- PC-PI:
Present-day climate (1987-2016) + pre-industrial O₃ + present-day CO₂ concentration.
(air temperature 8.2°C, O₃ 10 ppb, CO₂ 375 ppm).
- PC-PC:
Present-day climate (1987-2016) + present-day O₃ + present-day CO₂ concentration.
(air temperature 8.2°C, O₃ 29 ppb, CO₂ 375 ppm)
- PC MOD:
Present climate (1987-2016) + moderately high O₃ + present CO₂ concentration.
(air temperature 8.2°C, O₃ 32 ppb, CO₂ 375 ppm)
- PC-HIGH:
Present climate (1987-2016) + high O₃ + present CO₂ concentration.
(air temperature 8.2°C, O₃ 36 ppb, CO₂ 375 ppm).
- RCP2.6:
Future scenario I (2071-2100) + moderately high O₃ + future CO₂ concentration.
(air temperature 9.3°C, O₃ 34 ppb, CO₂ 421 ppm)
- RCP2.6_DS:
Future scenario I (2071-2100) + moderately high O₃ + future CO₂ concentration + temporal drought
(air temperature 9.3°C, O₃ 34 ppb, CO₂ 421 ppm)

- RCP8.5:
Future Scenario II (2071-2100) + high O₃ + future CO₂ concentration.
(air temperature 11.5 °C, O₃ 41 ppb, CO₂ 936 ppm)
- RCP8.5_DS:
Future scenario II (2071-2100) + high O₃ + future CO₂ concentration + temporal drought
(air temperature 11.5°C, O₃ 41 ppb, CO₂ 936 ppm).

To guarantee a robust statistical validation of the results, the combination of scenario and phytotron was varied from year to year. To ensure a sufficient supply of nutrients, the plants were supplied with essential nutrients at regular intervals. Irrigation was performed via a time-controlled drip irrigation system, aiming to maintain 50-90 % PAW (Plant Available soil Water content, corresponding to 25.5-37.9 % volumetric soil water content) in the substrate for the treatments without drought stress. The two treatments with temporal drought periods received a 30% reduction of the water supply for approximately 14 days each in June and August. For the phytotron experiments, a biological plant protection concept was initially applied; in 2020 and 2021, chemical plant protection was used as a preventive measure to control potentially occurring pests.

A new method for continuous measurement of stomatal ozone fluxes for beech and spruce – the TransP sensor

An empirical determination of phytotoxic stomatal ozone uptake for the validation of modeled ozone fluxes requires continuous measurements of leaf conductance of light-exposed leaves or needled branch sections that are performed simultaneously on a large number of objects.

Due to the lack of technical capabilities to continuously measure stomatal ozone fluxes at the single leaf level, a novel sensor, TransP, was developed. Based on high-precision measurements of different temperatures in the immediate leaf-atmosphere system, the leaf- or needle-area-specific transpiration rate could be determined continuously, undisturbed and with sufficient accuracy via species-specific calibration functions. This enabled the calculation of leaf conductance and ozone fluxes via physical models.

Parameterization of the FO₃REST model and validation of modeled stomatal ozone fluxes.

Model approach

Modeling of ozone fluxes and ozone uptake (POD_V) was performed using the FO₃REST model (VDI 2310 Sheet 6 2020) that is based on the approach described in detail in Chapter 3 of the Mapping Manual (CLRTAP 2017). To check the validity of the parameter set that is recommended in the Mapping Manual, POD₀ and POD₁ were modeled for the 2020 and 2021 growing seasons and measured with the TransP sensors.

Updating the model parameterization

Due to the technical properties of the TUMmesa phytotrons, leaf boundary layer resistances were high compared to field conditions. Considering this, a tight linear correlation between measured and modeled POD_V for beech and spruce was found with an r² of 0.93 and 0.89, respectively, but ozone uptake (POD_V) was significantly overestimated by the model for both species.

Due to the high degree of deviation between measured and modeled POD_Y , an adjustment of the stomata model was required. First, the currently recommended parameterization of the weighting functions that relate stomatal conductance to various environmental variables (phenology, radiation, temperature, air water vapor pressure deficit, plant-available soil water) – f_{phen} , f_{light} , f_{temp} , and f_{VPD} , as well as the newly introduced function f_{PAW} – were tested for validity in the valORTree experiment.

Adjustments to the model included the development of a weighting function f_{O_3} , which represents the inhibition of stomatal conductance by increased stomatal ozone uptake. However, this relationship could only be demonstrated for beech, but not spruce, and f_{O_3} was implemented for beech only. Furthermore, the effect of long-term elevated external CO_2 concentration (as expected in the course of climate change) on stomatal conductance was implemented in the model via a corresponding f_{CO_2} function for both beech and spruce. Thus, for the first time, an ozone risk assessment for future climate scenarios is possible.

Based on the measurements that were performed in the valORTree project, model extensions for the sensitivity of stomatal conductance to long-term elevated CO_2 concentrations and ozone exposure (f_{CO_2} , f_{O_3}) are now available for beech and spruce for the first time. The individual model adjustments and extensions for beech and spruce are listed below:

Beech:

- Considering datasets on stomatal conductance that were acquired under both controlled and field conditions (Kranzberger Forest), the previous parameterizations for f_{phen} , f_{light} , and f_{VPD} were found to be valid.
- Under phytotron conditions, a relationship between stomatal conductance and air temperature could not be reliably derived because air temperatures were limited to a range between 10 to 30 °C. The currently recommended weighting function f_{temp} for beech is based on data recorded in the Swiss Alps under divergent ecological conditions. Nunn et al. (2005) proposed a different parameterization derived from measurements on beech trees in the Kranzberg Forest (parameters $t_{min} = 8$ °C, $t_{opt} = 21$ °C, and $t_{max} = 34$ °C). Including recent data recorded in the Kranzberg Forest, we suggest this "Kranzberg parameterization" for f_{temp} for Germany. This parameterization was also adopted in the VDI guideline 2310 part 6 (2020).
- The threshold PAW_t of the soil moisture weighting function f_{PAW} is suggested to be 40 %, taking into account the Kranzberg data. PAW_t was chosen at 50 % for the phytotron experiment, since the reduced volume of the rooting zone caused a higher sensitivity to low soil water contents.
- A weighting function for CO_2 concentration (f_{CO_2}) was developed based on the function proposed by Medlyn et al. (2001). f_{CO_2} was implemented in the risk model for beech with the parameter $a_{CO_2} = 0.73$.
- A threshold function for the relationship between stomatal conductance and ozone uptake based on POD_0 was developed for beech under field conditions (f_{O_3}). The parameters of the function are $POD_{0,max} = 15$ mmol m⁻² PLA and $POD_{0,min} = 25$ mmol m⁻² PLA. Under controlled conditions, a limiting effect of ozone uptake on stomatal conductance to ozone was shown at both very low and relatively high POD_0 . To account for this hormesis effect, a separate function $f_{O_3}(TUMmesa)$ in shape of an optimum function with parameters $POD_{0,min} = 0$ mmol m⁻² PLA,

$POD_{0,opt} = 5 \text{ mmol m}^{-2} \text{ PLA}$, $POD_{0,max} = 200 \text{ mmol m}^{-2} \text{ PLA}$, and $f_{min,O3} = 0.6$ was chosen for modeling stomatal ozone fluxes in the phytotron experiment.

Spruce:

- For spruce, the previous parameterizations of f_{phen} , f_{light} , f_{temp} , and f_{VPD} were confirmed both in the phytotron experiment and based on field data. For the soil moisture weighting function f_{PAW} , the threshold PAW_t was 50%.

- Like for beech, a weighting function for the relationship between CO_2 concentration and stomatal conductance (f_{CO2}) was developed for spruce based on the function of Medlyn et al. (2001). Spruce was found to be less sensitive to elevated CO_2 compared to beech. The parameter $a_{CO2} = 0.9$ proposed by Medlyn et al. (2001) was adopted.

- The relationship between stomatal conductance and ozone uptake, based on POD_0 , was tested for spruce. A hormesis effect was evident under controlled conditions - however, unlike beech, lower stomatal conductance was present only at low POD_0 in the PC-PI scenario, but not at high POD_0 . Therefore, in the phytotron experiment, a threshold function was applied with the parameters $POD_{0,min} = 2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ PLA}$, $POD_{0,max} = 3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ PLA}$, and $f_{min,POD0} = 0.5$. For field conditions (Kranzberger Forst database), no effect of cumulative ozone uptake on stomatal conductance was evident due to the lower sensitivity of spruce to elevated ozone concentrations. Since permanently reduced ozone concentrations do not occur in the field, in contrast to the phytotron experiment, the introduction of an ozone function for spruce is not recommended.

Validation of the modeled ozone fluxes

After applying the extended parameterization for beech and spruce in the FO₃REST risk model, a good agreement between measured and modeled ozone uptake values was found, with $r^2 = 0.97$ and a slope of 0.9 (beech, Figure 30) and with $r^2 = 0.96$ and a slope of 1.0 (spruce, Figure 34).

The model parameterization for beech was extended according to the adjustments described above and by the newly introduced functions f_{CO2} and f_{O3} . The model was successfully validated.

The model parameterization for “continental spruce” that is currently suggested in the Mapping Manual for risk assessment of spruce stands, extended by the f_{CO2} function, was successfully validated.

Thus, the validity of the modeled ozone fluxes for beech and spruce was demonstrated for the first time based on continuously measured, leaf-level data.

Verification of the existing ozone dose-response relationship for beech and spruce in the controlled phytotron experiment

Due to the high boundary layer resistances around the leaves/needles in the phytotron experiment, the POD_1 values determined here were significantly lower than generally expected for field conditions. POD_1 measured for beech and spruce during the experiment period were in mostly well below the critical level of 5.2 and 9.2 $\text{mmol m}^{-2} \text{ PLA}$, respectively. No measured data were so far available for this section of the ozone dose-response function.

The ozone uptakes and biomasses measured in the phytotron experiment confirm the ozone dose-response function for the present climate treatments and for the future scenario RCP2.6. However, for the future scenario RCP8.5 with strongly increased CO₂ concentration, biomass losses could not be reasonably estimated via the current ozone dose-response function, because growth enhancement due to increased temperatures and CO₂ as well as extended vegetation periods are not included so far.

POD₁ levels in spruce were relatively similar across treatments (~3.3 mmol m⁻² PLA). In the future scenario RCP8.5, only slightly lower ozone uptake was measured than in the PC-HIGH scenario that is characterized by comparable ozone exposure, because spruce responded to elevated CO₂ concentrations with significantly less restriction of stomatal conductance than beech. Spruce was found to have a higher increase in biomass compared to the control (pre-industrial scenario) for all treatments in the phytotron experiment. One possible explanation for this response is the toxicological concept of hormesis, according to which moderately elevated stressor effects (ozone exposure) may initially stimulate growth. As with beech, spruce biomass was highest in the RCP8.5 scenario.

To enable ozone risk assessment for future scenarios that are characterized by elevated CO₂ it is recommended to recalculate the data points of the ozone dose-response functions using the extended parameterization suggest here including weighting functions f_{CO_2} and f_{O_3} .

Recommendations:

- The weighting functions that were updated in the valORTree projects, and especially the newly developed functions f_{CO_2} and f_{O_3} are suggested for implementation in the risk assessment model for beech and for spruce (only f_{CO_2}). However, implementation of f_{CO_2} is not necessary under historical or current climate conditions until the late 2010s ($f_{CO_2}=1$).
- The ozone dose-response functions for beech/birch so far include only six data points for beech, which also represent only a narrow POD₁ range (10 -14 mmol m⁻² PLA, biomass reduction by 10 %). Higher ozone loads are only represented by data from birch. Birch, as a pioneer tree species, and beech, as a climax tree species, differ in their growth and stress resilience strategies. For further verification, the ozone dose-response function for beech and spruce should be supplemented with additional experimental data regarding ozone uptake and biomass development from studies at moderately elevated ozone exposure and CO₂ concentration. The range of the ozone dose-response function for higher ozone doses could be complemented by corresponding experimental data for beech (e.g., from the free-air O₃ fumigation experiment in the Kranzberg Forest).

Estimation of potential ozone-induced biomass losses under current and future field conditions in Germany

The POD₁ values modeled for the test reference years with the extended parameterization that was developed in the valORTree project significantly exceeded the critical levels and the suggested target values for beech and spruce.

The exceedance of the critical levels for beech and spruce occurred only shortly after or even during the budbreak stage. In this growth phase, the new foliage is not yet fully differentiated and therefore particularly sensitive to stress.

The importance of the CO₂ weighting function in modeling the ozone risk was evident under strongly elevated CO₂ in the RCP8.5 scenario, especially for beech. Compared to the present scenario, lower levels of ozone uptake (as POD₀ and POD₁, respectively) were determined in the RCP8.5 scenario despite elevated external ozone concentrations. Thus, the critical level for beech was reached much later in RCP8.5 than in the present climate scenario and in RCP2.6. For spruce, the effect of elevated CO₂ on stomatal conductance was much weaker than for beech, and ozone uptake increased significantly in the RCP8.5 scenario. Thus, without implementing f_{CO_2} in the CLRTAP model, the critical level is overestimated at future CO₂ concentrations. Nevertheless, POD₁ for the present climate ozone gradient scenarios executed in the valORTree project were always above the critical levels.

Overall, growth losses due to ozone pollution for beech and spruce in German forests are to be expected at present as well as in the future. Due to a lack of experimental data sets, biomass losses for future scenarios characterized by elevated CO₂ cannot yet be estimated from the ozone dose-response functions. Increased CO₂ is often predicted to increase biomass production. However, chronically elevated ozone and associated compensatory reactions at the biochemical, metabolic, and allocative levels may significantly inhibit this assumed growth stimulations and thus reduce the CO₂ sink strength of forest ecosystems.

However, it must be considered that predictions of future ozone concentrations may substantially differ – depending on the assumptions of the underlying simulations. Additionally, small-scale spatial variation of the pollution situation can be expected. Hence, for an approximative assessment of the future ozone risk for the forest ecosystem, risk assessment should be perfumed with different, realistic and up-to-date predictions of future ozone concentrations at the regional level.

These aspects have to be considered for estimating the CO₂ sink strength of future forest ecosystems.

Scaling of ozone doses in adult beech trees with different foliage references

The ozone dose-response functions and critical levels for estimating biomass losses in forest trees (according to Mapping Manual, CLRTAP 2017) are based on stomatal ozone uptake that is estimated for sun-exposed foliage in the upper canopy. In contrast, ozone uptake based on xylem sap flow measurements are related to the total foliage of an individual tree. In order to use ozone doses that were calculated based on xylem sap flow measurements for ozone risk assessment, the results must be re-scaled to the reference variable "sun-exposed foliage area". For scaling, POD_Y calculated from xylem sap flow measurements on numerous adult beech trees from different sites (performed in a past project) were correlated with corresponding POD_Y modelled according to CLRTAP (2017). From that, a transfer function was derived that allows for the conversion of ozone uptake doses to the sun-exposed foliage. The transfer functions were developed both for the previously suggested model parametrization according to the Mapping Manual (CLRTAP 2017) and for the extended parameterization (beech) for POD₀ and POD₁ developed in the valORTree project.

For the first time, the use of ozone uptake doses that are calculated from beech xylem sap flow measurements is now possible for ozone risk assessment and biomass loss estimation in accordance with the critical level concept.

1 Risiken für das Wachstum von Waldbäumen durch troposphärisches Ozon

1.1 Wirkung von Ozon auf Pflanzen

Troposphärisches Ozon (O_3) ist ein Luftschadstoff, der über die Stomata in das Innere der Pflanzenzellen gelangt und von dort aus über verschiedene Wirkungen das Pflanzenwachstum beeinträchtigen kann. Erhöhte Konzentrationen bodennahen Ozons wirken zellschädigend und führen zur Senkung der Photosyntheseleistung sowie zu multiplen Schädigungen bei Pflanzen, sobald die Kompensation durch pflanzliche Entgiftungsreaktionen überfordert ist (siehe Mills et al. 2011a,b, Pleijel et al. 2007, Zhu et al. 2011, Feng et al. 2012, 2019, Bender et al. 2006, Hayes et al. 2007a,b, Matyssek und Sandermann 2003, King et al. 2005, Musselman et al. 1997). Als relevantes Treibhausgas trägt bodennahes Ozon in erhöhter Konzentration neben den „klassischen Treibhausgasen“ Kohlendioxid und Methan sowie Wasserdampf nicht nur unmittelbar zu einer Erhöhung des Strahlungsantriebes in der Atmosphäre und damit zur Klimaerwärmung bei, sondern es beeinflusst auch indirekt den Kohlenstoff-Kreislauf zwischen den Landoberflächen und der Atmosphäre durch Einschränkung der pflanzlichen Kohlenstofffixierung und -speicherung (Matyssek et al. 2013a,b, 2014).

1.2 Entwicklung der O_3 -Konzentration

Die O_3 -Hintergrundkonzentrationen in den nördlichen mittleren Breiten sind seit Beginn der Industrialisierung von ca. 10 ppb um das ca. 4-fache angestiegen (Volz & Kley 1988, Fowler et al. 2001, 2008, 2009, Ehhalt et al. 2001). Während des Zeitraums 1950 bis 2000 stiegen die O_3 -Konzentrationen durchschnittlich um 1 % pro Jahr, was etwa zu einer Verdoppelung der Ozonkonzentration führte (Parrish et al. 2012, Stevenson et al. 2013). Ab den 1990er Jahren haben nationale Luftreinhalte-Maßnahmen zur Senkung der O_3 -Vorläufersubstanzen in Europa zu einer Reduktion der Spitzenkonzentrationen geführt. Die Jahresmittelwerte nahmen ab diesem Zeitraum nur noch geringfügig zu und blieben seither weiterhin auf hohem Niveau (UBA 2017, Pierre 2021). Proietti et al. (2021) zeigten in einer Studie unter Nutzung eines *chemistry-transport*-Modells, dass die bodennahen Ozonkonzentrationen in Europa im Mittel von 2000 bis 2014 leicht zurückgegangen (-2 %) sind. Für Europa wurde in ländlichen Gebieten ein Rückgang der O_3 -Konzentrationen von -0,24 ppb pro Jahr (1995-2014) und von -0,41 ppb pro Jahr (2005-2014) gegenüber der 1990er Jahre prognostiziert, während in urbanen Regionen ein tendenzieller Anstieg von 0,17 ppb pro Jahr (1995-2014) und kurzfristiger sogar um 0,27 ppb pro Jahr (2005-2014) zu verzeichnen sein sollte (Sicard 2021). Kontinentaler und hemisphärischer Langstreckentransport von O_3 und seinen Vorläufersubstanzen sowie Klimawandeleffekte können die lokalen und regionalen O_3 -Hintergrundkonzentrationen erhöhen und so Reduktionsmaßnahmen entgegenwirken (Derwent et al. 2015, Xing et al. 2015, Sicard 2017). Trendanalysen (1998-2019) für einige Mittelgebirgsstandorte in Deutschland belegen keine signifikanten Veränderungen der bodennahen Ozonkonzentration, obwohl die NO - und NO_2 -Konzentrationen signifikant zurückgingen. Die Globalstrahlung und Trockenereignisse nahmen allerdings zu, was bei, unter diesen Umständen erhöhten, biogenen NMVOC-Emissionen (*Non-Methane Volatile Organic Compounds*) zu verstärkter Ozonproduktion führen kann (Fares et al. 2007, Eghdami et al. 2020).

1.3 Gefährdung von Waldbäumen

Die meisten Waldökosysteme fungieren weltweit noch als Kohlenstoffsinken (Dixon et al. 1994, Luyssaert et al. 2008, Pan et al. 2011). Eine Metaanalyse zur O_3 -Wirkung auf Wälder der

gemäßigten Klimazone zeigte, dass schon gegenwärtige O₃-Konzentrationen Wachstumsreduktionen von ca. 7 % und einen bis zu 11 %igen Verlust der Nettoprimär-Produktion gegenüber ozonfreien Bedingungen verursachen (Wittig et al. 2009, 2007). Sitch et al. (2007) prognostizierten in ersten Modellstudien zur zukünftigen Wirkung der O₃-Belastung auf die globale Vegetation (basierend auf O₃-flussbasierten Critical Levels, bis 2100) einen 14- bis 23-prozentigen, regional sogar bis zu 30-prozentigen Verlust der Bruttoprimär-Produktion weltweit. Deutliche Biomasseverluste wurden auch in einer Reihe von unterschiedlichen experimentellen Ansätzen zur Untersuchung der Wirkung erhöhter Ozonbelastung auf verschiedenen Waldbaumarten beschrieben (Ainsworth et al. 2012).

Gegenwärtig wird aufgrund der erhöhten Stickstoffeinträge, steigender Temperaturen und steigender CO₂-Konzentration sowie verlängerter Vegetationszeiten für einen Großteil der Regionen und natürlichen Vegetationstypen in Mitteleuropa von einer Zuwachssteigerung ausgegangen (Pretzsch et al. 2014). Zunehmende Zuwächse aufgrund zukünftig weiter steigender CO₂-Konzentration können die O₃-induzierten Zuwachseinbußen nach ersten globalen Abschätzungen jedoch nur zu 17-31 % kompensieren (Sitch et al. 2007), wobei die Interaktionen zwischen O₃ und CO₂ und weiterer Klimawandelfaktoren noch weitgehend ungeklärt sind (R. Soc. 2008, Soussana et al. 2010, Piao et al. 2010, King et al. 2013, Scholes et al. 2014). Rötzer et al. (2013a,b) gehen von einem durch Klimawandel bedingten Zuwachsrückgang bei Buche in Deutschland von 30 % aus (unter Einbezug von Temperaturanstieg und Zunahme von Trockenheit). O₃-bedingte Produktionseinbußen tragen somit zusätzlich zu einer Minderung der CO₂-Fixierung bei und verstärken die Risiken des Klimawandels.

1.4 Stomatäre Ozondosis und Critical-Level-Konzept als Beurteilungsinstrument

Bodennahes Ozon ist neben seiner Humantoxizität gegenwärtig einer der wichtigsten Luftschadstoffe für Pflanzen. Im Modelling and Mapping Manual des Genfer Übereinkommens über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigungen (*Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution*, CLRTAP 2017) werden zwei Maße für eine Abschätzung der Vegetationsgefährdung durch O₃-Konzentrationen in Bestandeshöhe beschrieben.

Der konzentrationsbasierte AOTX-Ansatz (*Accumulated exposure Over a Threshold of X ppb* [ppb h]) wird als Indikator zur Abschätzung eines ökologischen Risikos angesehen. Auf dieser Grundlage erfolgt derzeit die Gefährdungsbeurteilung nach Richtlinie 2008/50/EG. Ökonomische Verlustrechnungen (Biomasse-, Ertragsverluste) auf Basis der AOTX-basierten kritischen Belastungswerte (*critical level*, CL_{AOTX}) und den zugehörigen AOTX-Wirkungs-Funktionen sollten nicht erfolgen (ICP Vegetation 2017). Die derzeitigen auf O₃-Konzentrationen in Bestandeshöhe basierten kritischen Belastungswerte für die verschiedenen Rezeptorgruppen (CLRTAP 2017, ICP Vegetation 2017) beziehen sich auf einen Schwellenwert X von 40 ppb (AOT40).

Aus toxikologischer Sicht kann nur dasjenige O₃, welches über die Spaltöffnungen aufgenommen wird, im Stoffwechsel der Pflanzen eine Wirkung entfalten (Grünhage & Jäger 1994, Krupa & Kickert 1997, Grünhage et al., 1999; Grünhage & Jäger, 2003; Musselman et al. 2006, Matyssek et al. 2007, Weigel et al. 2015). Der AOTX-Ansatz spiegelt deshalb prinzipiell die tatsächliche O₃-Belastung der Vegetation wenig realistisch wider.

Demgegenüber beruht der flussbasierte POD_Y-Ansatz (**Phytotoxische Ozon-Dosis, *phytotoxic ozone dose***) nach CLRTAP (2017) auf der Kalkulation der stomatären O₃-Aufnahme der Sonnenblätter an der Bestandesoberfläche, akkumuliert über einen bestimmten Zeitraum und abzüglich eines rezeptorspezifischen Schwellenwertes Y der stomatären O₃-Aufnahme:

$$(1) \quad POD_Y = \sum_{i=1}^n [\max(F_{\text{Sonnenblatt, stom, O}_3} - Y, 0) \cdot \Delta t]_i$$

mit

POD: Phytotoxische Ozon-Dosis bezogen auf die projizierte Blattfläche (*projected leaf area*, PLA) [mmol m⁻²]

F_{Sonnenblatt, stom, O₃}: stomatäre O₃-Aufnahme der Sonnenblätter an der Bestandesoberfläche bezogen auf die projizierte Blattfläche (PLA) [nmol m⁻² s⁻¹]

Y: Rezeptor-spezifischer Schwellenwert der stomatären O₃-Aufnahme bezogen auf projizierte Blattfläche (PLA) [nmol m⁻² s⁻¹]

Nach CLRTAP (2017) werden speziesspezifische POD_Y-Werte (POD_YSPEC) für lokale und regionale Risikostudien von vegetationstypenspezifischen POD_Y-Werten (POD_YIAM) für das großräumige *Integrated Assessment Modelling* unterschieden. Im Gegensatz zum AOT40-Ansatz wird der POD_YSPEC-Ansatz auch als geeignet angesehen, um quantitative bzw. ökonomische Biomasse- bzw. Ertragsverlustabschätzungen vorzunehmen (CLRTAP 2017).

Sowohl der AOT40- als auch der POD_Y-Index werden für Tageslichtstunden (Globalstrahlung R_g > 50 W m⁻²) berechnet. Während die Risikobeurteilung im AOT40-Ansatz auf Grundlage fixer Beurteilungszeiträume erfolgt (Richtlinie 2008/50/EG, CLRTAP 2017, ICP Vegetation 2017), werden diese im POD_YSPEC-Ansatz errechnet.

1.5 Motivation und Zielsetzung von valORTree

1.5.1 Motivation für die Überprüfung des Ozonaufnahme-Risikomodells

1.5.1.1 Unsicherheiten bei der Beurteilung ozonbedingter Wachstumseinschränkungen bei Wäldern

Nachweise von ozonbedingten Zuwachsrückgängen bei Waldbeständen sind aufgrund der multiplen Einflussfaktoren (Standorteigenschaften, Klimaschwankungen, Stickstoffeinträge, Temperatur- und CO₂-Erhöhung, veränderte Vegetationszeiten, waldbauliche Maßnahmen, methodische Ansätze) oft schwer zu erbringen. Teilweise widersprüchliche Ergebnisse zu ozonbedingten Wachstumseinschränkungen haben Zweifel an der Gültigkeit der Methode und der Ozon-Dosis-Wirkungs-Funktionen für die Ableitung von Schwellenwerten aufkommen lassen (Cailleret et al. 2018, Ferretti et al. 2018, Braun et al. 2022). Die Verwendung von Sämlingen oder jungen Bäumen und die Aufzucht unter kontrollierten experimentellen Bedingungen wird als mögliche Limitierung bei der Extrapolation von Ozoneffekten auf Waldbestände diskutiert, da die natürlichen Bestandes- und Konkurrenzsituationen meist nicht einbezogen werden können (Ainsworth et al. 2012). Daher wurden etwa ab 2000 auch vermehrt Untersuchungen mit adulten Bäumen unter realistischeren Bedingungen durchgeführt, welche abhängig von Baumart und Region oft zu unterschiedlichen Ergebnissen führten. Paoletti et al. (2017) konnten an über 700 Buchenstandorten in Italien keinen Ozoneffekt auf den Zuwachs nachweisen. Auch für 15 ICP Forest Monitoring-Waldbestände in Trentino (Italien) konnten trotz Überschreitung der Schwellenwerte keine ozonbedingten Biomasseeinbußen nachgewiesen werden. Ein *free-air* Ozon-Begasungsexperiment mit adulten, ca. 60-jährigen Buchen und Fichten im Waldbestand Kranzberger Forst zeigte nach 8-jähriger Exposition mit erhöhtem Ozon eine Reduktion der Stammzuwachses gegenüber gegenwärtigen Bedingungen von 44 % bei Buche und 3 % bei Fichte. (Pretzsch et al. 2010, Matyssek et al. 2010). Diese

Verluste konnten im Wesentlichen auch bei Modellierung der Ozonaufnahmen und Ableitung der Biomasseverluste nach dem Critical-Level-Konzept festgestellt werden (Grünhage et al. 2012, 2013, Eghdami et al. 2022). Nach einer Studie für 42 Waldstandorte in Deutschland überschritten die modellierten Ozonaufnahmen die derzeit geltenden Schwellenwerte für Ozon für Buche und Fichte seit 1975 an allen Standorten deutlich, was auf signifikante Zuwachseinschränkungen hinweist (Bender et al. 2015). Auch Baumgarten et al. (2009) fanden in einer Freilandstudie an 19 Waldstandorten in Bayern eine Überschreitung der derzeit geltenden Schwellenwerte an adulten Buchen. Aus einer Freilandstudie an 10 Buchenwaldstandorten geht hervor, dass die gemessenen Ozonaufnahmen in drei Untersuchungsjahren die Schwellenwerte überschritten, während jedoch keine statistisch abgesicherten ozonbedingten Wachstumseinbußen nachgewiesen werden konnten (Kühn et al. 2015, Baumgarten et al. 2014). Braun et al. (2022) haben kürzlich in einer epidemiologischen Studie ozonbedingte Wachstumseinbußen bei Buchen und Fichten in der Schweiz untersucht und mit experimentellen Daten verglichen. Bei Buche zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung der epidemiologischen Dosis-Wirkungs-Beziehung mit experimentellen Daten, was die Übertragbarkeit von Ergebnissen aus kontrollierten Experimenten mit Jungbäumen bestätigt. Cailleret et al. (2018) empfehlen kontrollierte Experimente und langfristige Monitoringdaten mit physiologischen und auf Waldsukzessionsprozessen basierenden Modellen zu kombinieren.

1.5.1.2 Überprüfung der Ozonaufnahmemodelle zur Absicherung der O₃-Risikobewertung und Abschätzung der Tauglichkeit für die Zukunft

Die Grundlage für die Risikobewertung der Ozonbelastung bei Wäldern sind Ozondosis-Wirkungs-Funktionen (DRF) für verschiedene Baumarten, welche die Biomasseproduktion im Vergleich zu einer Kontrolle bei unterschiedlichen Ozondosen zeigen (CLRTAP, 2017). Hierfür wurden die Ergebnisse aus verschiedenen Ozonbelastungs-Experimenten mit Sämlingen oder Jungbäumen herangezogen, die vor allem in Open-Top-Kammern in den 1980er und 1990er-Jahren durchgeführt wurden. Der zunächst konzentrationsbasierte AOT40-Ansatz wurde nachträglich durch Modellierung in den ozonflussbasierten POD_Y-Ansatz überführt und entsprechende Schwellenwerte (*critical levels*) abgeleitet, ab welchen Wachstumseinbußen zu erwarten sind (Braun & Flückiger 1995, Oksanen 2003, Karlsson et al. 2004, Ottosson et al. 2003, Uddling et al. 2004, Büker et al. 2015).

Eine Validierung der modellierten Ozonaufnahme bei Bäumen durch empirische Messungen konnte bisher nicht überzeugend gezeigt werden, da hierfür ungestörte und kontinuierliche Messungen der stomatären Leitfähigkeit (g_s) erforderlich sind. Bei der Bestimmung von g_s über Xylemsaftfluss-Messungen ist die Bezugsgröße die Gesamtbelaubung, bei der Modellierung wird jedoch ausschließlich auf die sonnenexponierte Belaubung Bezug genommen. Eine Skalierung der beiden Referenzgrößen ist bisher nur näherungsweise möglich; die gängigen Blattgaswechsel-Messungen (mobile Infrarot-Gasanalytik und Porometrie) zur Bestimmung von g_s in einer ventilierten Küvette bilden die ungestörten Bedingungen in den Blattgrenzschichten nicht ab und eignen sich zudem nicht für die kontinuierliche Messung an einer Vielzahl von Pflanzen (von Willert et al. 1995). Zudem werden bisher wichtige Einflussgrößen für die stomatäre Leitfähigkeit wie die Ozonbelastung und erhöhte CO₂-Konzentration nicht in den Modellen berücksichtigt (Reich und Lassoie 1984, Matyssek et al. 2015; Field et al. 1995, Medlyn et al. 2001).

Motivation

- ▶ widersprüchliche Ergebnisse zu ozonbedingten Wachstumseinschränkungen bei Wäldern
- ▶ mögliche Einflüsse von kontrollierten Versuchsbedingungen (Artefakte) und Beschränkungen bei der Extrapolation von Ergebnissen von jungen Bäumen auf Waldbestände
- ▶ fehlende Validierung der modellierten Ozonaufnahme bei Bäumen durch empirische Messungen
- ▶ Einbezug einer Ozondosis- und einer CO₂-Wichtungs-Funktion für Zukunftsprognosen

1.5.2 Projektziele, Methoden und Erfordernisse

Ziel des valORTree-Projekts ist es, die Grundlagen für die Ozonrisikobewertung an Waldbäumen mit auf Ozonflüssen basierenden Modellen (nach Mapping Manual, CLRTAP 2017) zu validieren und für die Einflussfaktoren CO₂- und Ozonkonzentration zu parametrisieren, um eine Bewertung des Ozonbelastungsrisikos für die aktuelle Situation wie auch für zukünftige Klimawandelbedingungen (2100) sicherzustellen.

Grundlage hierfür ist die Konzeption eines experimentellen Versuchsdesigns unter kontrollierten Bedingungen für gegenwärtige und zukünftige Bedingungen für einen Referenz-Waldstandort in Deutschland sowie für darauf basierende Auswertungen, das im Folgenden beschrieben wird (Kap. 2). Die Phytotronanlage der Technischen Universität München (TUMmesa, *Model EcoSystem Analyser*) bietet für ein derartiges Versuchsdesign die notwendigen Voraussetzungen (Kap. 2.1.2.1).

Um in den geplanten Experimenten die Klimabedingungen, die Ozonbelastungssituation und die und CO₂-Konzentrationen für die Referenzregion (Kap. 2.1.1.1) möglichst realistisch nachzuzeichnen und auch die mittlere saisonale und tageszeitliche Dynamik zu berücksichtigen, wurden Klimaszenarien für die Gegenwart (PC, *present climate*) und die Zukunft (nach RCP2.6 und RCP8.5, *representative concentration pathways*; van Vuuren et al. 2011, Riahi et al. 2011) als Testreferenzjahre (TRJ) in stündlicher zeitlicher Auflösung erzeugt (Kap. 2.1.1.2/3). Für die Gegenwarts-klimasimulation wurden jeweils vier verschiedene Ozonbelastungssituationen gewählt, mit den beiden zukünftigen Klimaszenarien RCP2.6 und RCP8.5 ergibt sich ein Klima- und CO₂-Gradient. Die beiden Zukunfts-Klimaszenarien wurden jeweils mit unlimitierter Wasserversorgung und mit temporären Trockenphasen (30%-reduzierter Wasserversorgung) angewendet (Kap. 2.1.2.2./3.).

Junge Buchen und Fichten (*Fagus sylvatica* L., *Picea abies* (L.) H. Karst.) aus Naturverjüngung wurden mit ungestörten Bodenmonolithen am Standort entnommen, getopft und für drei Vegetationsperioden unter den acht Simulationsbedingungen in Phytotronen (Klimakammern) kultiviert (Kap. 2.1.3, 2.1.4). Für die gewählten Szenarien wurden die Ozonflüsse und die phytotoxische Ozonaufnahme für Buchen und Fichten mit dem Ozonaufnahme- und Risikomodell FO₃REST modelliert (VDI 2310 Blatt 6 2020).

Voraussetzung für die Bestimmung der phytotoxischen Ozonaufnahme und die Validierung der modellierten Ozonflüsse ist die kontinuierliche Messung der Blattleitfähigkeit an der Belaubung von Fichten und Buchen. Hierfür wurde eine neue, auf Temperaturmessungen beruhende Methode zur kontinuierlichen Bestimmung der stomatären Ozonflüsse etabliert, welche über Gaswechsellmessungen bestätigt werden konnte (Kap. 2.2).

Um das Ozonaufnahmemodell an sich gegenwärtig verändernde und an die prognostizierten zukünftigen Umweltbedingungen anzupassen, wurde die Modellparametrisierung für

Stomatareaktionen beeinflussende Faktoren (nach Mapping Manual, CLRTAP 2017) unter den kontrollierten Bedingungen überprüft (Kap. 2.3). Wichtungsfunktionen zur Berücksichtigung des Einflusses der Ozonbelastung und der CO₂-Konzentration auf die stomatäre Leitfähigkeit wurden bisher nicht berücksichtigt und konnten innerhalb des Versuchsdesigns erstmals erstellt werden (Kap. 2.3.3, 2.3.4). Nach Re-Parametrisierung des Ozonaufnahmmodells konnten die gemessenen und modellierten Ozonflüsse und die phytotoxischen Ozondosen überprüft und die Abweichungen zur bisher gängigen Modellparametrisierung (nach Mapping Manual, CLRTAP 2017) gezeigt werden (Kap. 2.3.1, 2.3.2).

Nach Versuchsende wurden die ober- und unterirdische Biomasse der Bäume bestimmt. Für die verschiedenen Szenarien wurden die Biomasseverluste und mögliche Überschreitungen des Critical Levels für Ozon im Vergleich zu einem Referenzszenario mit vorindustrieller Ozonsituation ermittelt und mit der Ozondosis-Wirkungs-Funktion für Buchen und Fichten überprüft (Kap. 2.4).

Die Resultate aus dem valORTree-Projekt sollten auch in die Weiterentwicklung von Ozonrisiko- und Klimafolgenmodellen einfließen. Damit können Wachstumspotentiale und insbesondere die Kohlenstofffixierungsleistung von Wäldern für potentielle Klimaszenarien mit entsprechenden O₃- und CO₂-Konzentrationen in der Zukunft abgeschätzt und geeignete politische Maßnahmen zur Minderung der Risiken eingeleitet werden (Kap. 2.5, 2.6).

Ein weiterer Beitrag des Projektes ist die Skalierung von Ozonaufnahmedosen bei adulten Buchen mit unterschiedlichen Belaubungsbezug (Kap. 3). Dies ermöglicht die Nutzung von über Xylemsaftflussmessungen ermittelten Ozondosen für die Ozon-Risikoabschätzung. Um Risikobewertungen für Ozondosen durchführen zu können, die mittels Xylemsaftflussmessungen bestimmt wurden, muss eine Skalierung der Ozondosen mit unterschiedlichem Belaubungsbezug erfolgen. Xylemsaftflussmessungen werden häufig genutzt, um die Ozonaufnahme bei adulten Bäumen zu ermitteln. Die stomatäre Ozonaufnahme gilt bei dieser Methode für die Gesamtblaubung des Einzelbaums bzw. für den Waldbestand. Modellierte stomatäre Ozonaufnahmen beziehen sich dagegen auf die sonnenexponierte Belaubung. Entsprechend basieren auch die Ozondosis-Wirkungs-Funktion und die Critical Levels zur Abschätzung von Biomasseverlusten auf der sonnenexponierten Belaubung (Mapping Manual CLRTAP 2017). Zu bestehenden Messdatensätzen aus dem KLIP15-Projekt zur Ozonaufnahme aus Xylemsaftflussmessungen für zahlreiche Standorte mit adulten Buchen wurden im Rahmen des valORTree-Projekts die entsprechenden Ozonaufnahmen modelliert (KLIP15-Projekt „Bewertung der Leistungspotentiale der Buche im Klimawandel im Hinblick auf die Risiken von Trockenheit und Ozonbelastung“, Details siehe Baumgarten und Kühn (2014). Hieraus konnte eine Transferfunktion für die jeweils auf unterschiedliche Belaubung referenzierte Ozonaufnahme bereitgestellt werden. Diese Transferfunktion ermöglicht jetzt auch die Nutzung von über Xylemsaftflussmessungen ermittelten Ozondosen für die Abschätzung von Biomasseverlusten nach dem Critical-Level-Konzept (siehe Kap. 3).

Folgende Ziele wurden für das valORTree-Projekt definiert

- ▶ Validierung der modellierten stomatären Ozonflüsse für Buchen und Fichten unter kontrollierten Bedingungen.
- ▶ Überprüfung und Erweiterung der Parametrisierung der Ozonaufnahmemodellierung (nach Mapping Manual, CLRTAP 2017) für gegenwärtige und zukünftige Klima- und Emissionsbedingungen; Ableitung von bisher nicht berücksichtigten Wichtungsfunktionen für Ozonbelastung und erhöhtes CO₂ und Implementierung in das Modell.
- ▶ Überprüfung der bestehenden Ozondosis-Wirkungs-Beziehung für Buchen und Fichten (nach Mapping Manual, CLRTAP 2017).
- ▶ Abschätzung der potentiellen Biomasseeinbußen unter gegenwärtigen und zukünftigen Bedingungen.
- ▶ Ozonrisiko-Bewertung für Waldbäume in Deutschland für die Gegenwart und für verschiedene Zukunftsszenarien.
- ▶ Skalierung von Ozonaufnahmedosen bei adulten Buchen mit unterschiedlichem Belaubungsbezug (sonnenexponierte Belaubung, Gesamtblaubung) zur Nutzung von über Xylemsaftflussmessungen ermittelten Ozondosen (POD_y_SF) für die Ozon-Risikoabschätzung und die Abschätzung von Biomasseverlusten nach dem Critical-Level-Konzept.

Folgende Untersuchungen sind zum Erreichen der Ziele notwendig

- ▶ Simulation realistischer Klima- und Emissionsszenarien für die Gegenwart und die Zukunft (RCP2.6 und PCP8.5, 2100) im kontrollierten Klimakammerexperiment für Buchen und Fichten (TUMmesa Phytotronanlage) für einen deutschen Referenz-Waldstandort.
- ▶ Etablierung und Validierung einer Methode zur kontinuierlichen Messung der stomatären Ozonflüsse bei Buchen und Fichten.
- ▶ Gaswechselformen an Buchen und Fichten zur Bestimmung der stomatären Leitfähigkeit für die Überprüfung und Erweiterung der Parametrisierung von Ozonaufnahmemodellen (nach Mapping Manual, CLRTAP 2017).
- ▶ Bestimmung der ober- und unterirdischen Biomassen von Buchen und Fichten nach 3-jähriger Exposition unter gegenwärtigen und zukünftigen Klima- und Emissionsszenarien im kontrollierten Klimakammerexperiment.
- ▶ Implementierung der erweiterten Modellparametrisierung, Modellierung der Ozonaufnahmen und Ableitung von Biomasseverluste bei Buchen und Fichten für unterschiedliche Ozonbelastungssituationen innerhalb der verwendeten Szenarien.
- ▶ Modellierung und Re-Kalkulation von Ozonaufnahmedosen von adulten Buchen an verschiedenen Waldstandorten zur Ermittlung einer Transferfunktion für über Xylemsaftfluss-Messung ermittelten Ozonaufnahmen für die Skalierung bei unterschiedlichem Belaubungsbezug.

2 Überprüfung und Aktualisierung der flussbasierten Methodik zur Ozonrisikobewertung von Waldbaumarten unter gegenwärtigen und zukünftigen Klimabedingungen

2.1 Konzeption eines experimentellen Setups für gegenwärtige und zukünftige Bedingungen

2.1.1 Regionalisierte dynamische Klimareihen als Voraussetzung für die ökologische Klimafolgenforschung in modernen Phytotronanlagen

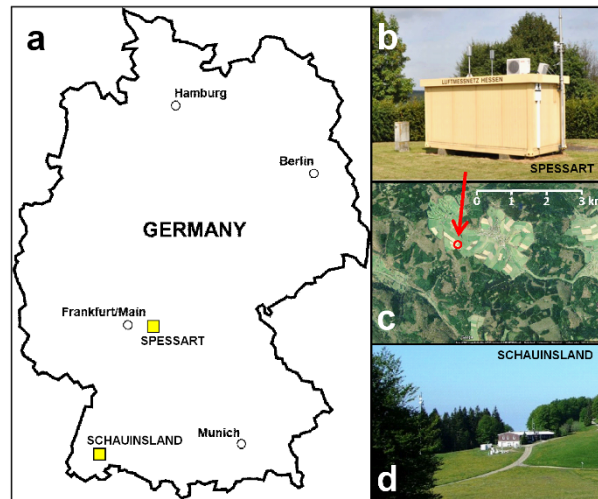
Um eine möglichst realitätsnahe mikroklimatische Umwelt in den Wachstumskammern der TUMmesa Phytotronanlage (Details siehe 2.1.2.1) zu gestalten, wurden hochauflösende Klimareihen wichtiger meteorologischer Einflussgrößen aus Modellsimulationen errechnet. Die Klimareihen wurden für drei verschiedene Szenarien entwickelt: ein das gegenwärtige Klima abbildendes Szenario und zwei Zukunftsszenarien. Die Zukunftsszenarien wurden auf Grundlage der gegensätzlichen RCP-Szenarien RCP2.6 und RCP 8.5 für das Ende des 21. Jahrhunderts berechnet. Um nicht nur globalklimatische, sondern insbesondere regionaldynamische Entwicklungen erfassen zu können, wurden alle Szenarien auf einen Musterwaldstandort im deutschen Mittelgebirgsraum regionalisiert.

2.1.1.1 Auswahl eines Muster-Waldstandortes für die Generierung der Klimareihen

Als Muster-Waldstandort für die Regionalisierung der Klimasimulationen wurde die Luftmessstation Spessart (Jossgrund-Lettgenbrunn, Code DEHE026, 497 m ü NN, 50°09'52.0"N 9°23'58.0"E) des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) ausgewählt (Abbildung 1). Die Auswahl erfolgte auf Grundlage der folgenden Kriterien (siehe Jákli et al. 2021): (i) Verfügbarkeit von Langzeitaufzeichnungen wichtiger meteorologischer Größen in stündlicher Auflösung (Temperatur, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung, Luftdruck), inklusive verlässlicher Messdaten der troposphärischen Ozonkonzentration; (ii) Lage im ländlichen Raum einer bewaldeten Region mit bewirtschafteten Buchen- und Fichtenbeständen; (iii) freie Anströmbarkeit der Station. Weitere Informationen zur Station sind unter <https://www.hlnug.de/fileadmin/scripts/recherche/info/Spessart.pdf> (aufgerufen am 22.03.2022) zusammengefasst.

Abbildung 1: Standorte der meteorologischen Stationen „Spessart“ und „Schauinsland“

(a) Lage der Stationen „Spessart“ und „Schauinsland“ in Deutschland. (b) Ansicht und (c) Lage der Station „Spessart“. (d) Ansicht der Station „Schauinsland“.



Quelle: Jákli et al. (2021); mit freundlicher Genehmigung des Hessischen Landesamts für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (b) und von C.Zinsius (UBA) (d); (b): <https://www.google.com/maps>, verändert

Die CO₂-Konzentration wurde am Standort Spessart nicht erfasst. Aus diesem Grund wurden – unter der Annahme, dass troposphärische CO₂-Konzentrationen eher auf überregionalen Skalen variieren (siehe z.B. NCAR 2013) und die mittlere CO₂-Hintergrundkonzentration im ländlichen Raum relativ homogen ist – Daten der am nächsten gelegenen CO₂-Messstation des Umweltbundesamtes, Schauinsland (1205 ü NN, 47°54′49.7″N 7°54′27.9″E), genutzt.

2.1.1.2 Methode zur Generierung der Klimareihen für die Gegenwart und zukünftige Bedingungen

2.1.1.2.1 Bereitstellung der Simulationsdaten

Die Methode zur Generierung regionalisierter, hochauflösender Klimareihen – sog. Testreferenzjahre (TRJ) – für gegenwärtige und zukünftige Klimaszenarien wurde ausführlich von Gelhardt et al. (2021) und Jákli et al. (2021) beschrieben. Die Vorgehensweise ist an die in DWD (2017) beschriebene Methodik zur Erzeugung ortsgenauer Testreferenzjahre für das Bauwesen angelehnt. Die TRJ sollen jeweils einen möglichen, durchschnittlichen Jahresgang der ausgewählten Klimaszenarien darstellen.

Für dieses Projekt wurden drei verschiedene TRJ generiert: ein das Gegenwartsklima repräsentierendes Szenario (*present climate*, PC), das einen durchschnittlichen Jahresgang des Referenzzeitraums 1987-2016 am Standort Spessart repräsentiert, sowie zwei verschiedene, mögliche Zukunftsszenarien repräsentierende, durchschnittliche Jahresgänge des Zeitraums 2071-2100. Die beiden Zukunftsszenarien basieren auf den für den 5. Sachstandsbericht des Weltklimarats IPCC entwickelten RCP-Szenarien RCP2.6 (vanVuuren et al. 2011) und RCP8.5 (Riahi et al. 2011).

Die im hier beschriebenen Projekt generierten TRJ wurden aus den im Zuge der EURO-CORDEX (Jacob et al. 2014, 2020) und ReKliEs-De (Hübener et al. 2017, 2018) Initiativen erzeugten Ensembles regionalisierter Klimasimulationen für die europäische (EURO-CORDEX) oder deutsche Domäne (ReKliEs-De) entwickelt. Über beide Initiativen werden regionale Klimasimulationen für das 0,11° Gitternetz der europäischen bzw. deutschen Domäne zur

Verfügung gestellt. Die Simulationen kombinieren ein globales Klimamodell (*Global Climate Model*, GCM) mit einem dynamisch herunterskalierten regionalen Klimamodell (*Regional Climate Model*, RCM) oder einer empirisch-statistischen Skalierungsmethode (*Empirical Statistical Downscaling*, ESD). Aus dem EURO-CORDEX / ReKliEs-De Ensemble wurden neun GCM:RCM(ESD)-Kombinationen für die Generierung der TRJ ausgewählt (Tabelle 1).

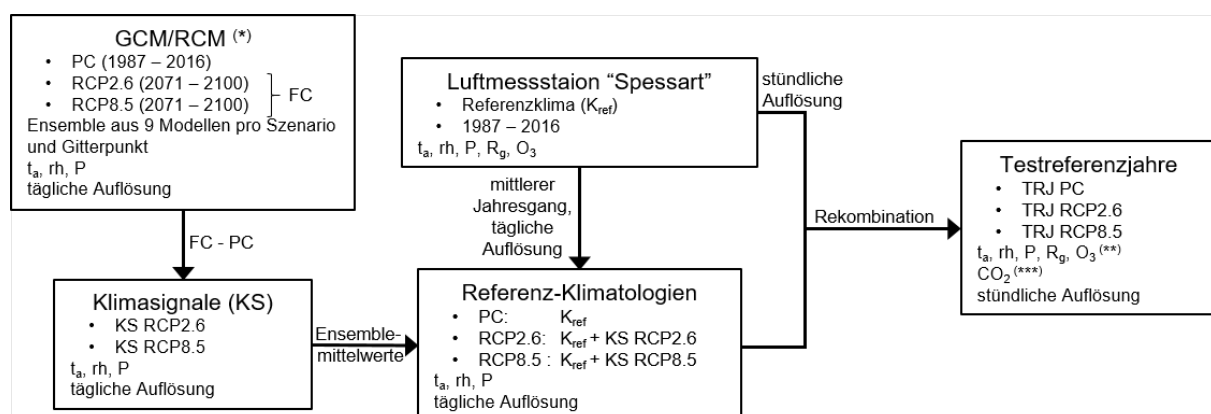
Tabelle 1: Ausgewählte Kombinationen regionaler und globaler Klimamodelle zur Erzeugung der Testreferenzjahre

Globales Klimamodell (GCM)	Regionales Klimamodell (RCM/ESD)
ICHEC-EC-EARTH (EC-EARTH Consortium, EU)	CCLM 4-8-17 SMHI-RCA4 KNMI-RACMO22E
MOHC-HADGEM2-ES (Met Office Hadley Centre, UK)	SMHI-RCA4 KNMI-RACMO22E
MPI-M-MPI-ESM-LR (Max Planck Institute for Meteorology, DE)	CCLM 4-8-17 SMHI-RCA4 KNMI-RACMO22E WETTREG2013

Quelle: Jákli et al. (2021), verändert

Für jede der ausgewählten GCM:RCM-Kombinationen wurden Simulationsdaten der Klimaszenarien PC, RCP2.6 und RCP8.5 für jeweils neun Gitterpunkte mit der Klimastation Spessart im Zentrum aus dem *Earth System Grid Federation* Datenportal heruntergeladen. Der geladenen Datensatz umfasste täglich aufgelöste Klimareihen der meteorologischen Kenngrößen Lufttemperatur t_a , relative Luftfeuchte rh und Luftdruck P . Für einige Modellkombination war rh nicht verfügbar und die spezifische Luftfeuchte wurde in rh umgerechnet.

Abbildung 2: Workflow zur Generierung der Testreferenzjahre



(*) Modellkombination aus einem globalen Klimamodell (*Global Climate Model*, GCM) und einem regionalen Klimamodell (*Regional Climate Model*, RCM)

(**) O₃ wurde aus experimentellen Gründen gegenüber der Originalpublikation (siehe Abbildungsquelle) angepasst

(***) CO₂ wurde an der Station „Schauinsland“ erfasst

Quelle: Jákli et al. (2021), verändert

2.1.1.2.2 Berechnung von Klimasignalen für die Zukunftsszenarien

Klimasignale von t_a und rh wurden für jede GCM:RCM-Kombination und jeden Gitterpunkt als Differenz zwischen den Tagesmittelwerten der PC- und RCP-Simulationen errechnet.

Anschließend wurden die Klimasignale für jedes der beiden RCP-Szenarien über alle Modellkombinationen und Gitterpunkte hinweg gemittelt. Zudem wurde ein mittlerer Jahresgang der Jahre 1987-2016 für an der Station Spessart gemessene t_a - und rh-Reihen in täglicher Auflösung als Referenzklima berechnet. Durch Addition der jeweiligen Klimasignale zum Referenzklima wurden täglich aufgelöste Jahresgänge von t_a und rh für die beiden zukünftigen Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 ermittelt. Somit wurden drei verschiedene Referenz-Klimatologien (PC, RCP2.6, RCP8.5) erzeugt (Abbildung 2).

Die RCP-Szenarien

RCP2.6

- Konzentration der atmosphärischen CO₂-Äquivalente erreichen ein Maximum in der Mitte des 21. Jahrhunderts
- Negative Emissionen: CO₂ wird aktiv aus der Atmosphäre entfernt
- Konzentration der atmosphärischen CO₂-Äquivalente etwa 400 ppm um 2100
- Temperaturerhöhung bis 2100 <2 °C (entspricht dem Pariser Klimaabkommen von 2015)

RCP8.5

- „weiter so“-Szenario, uneingeschränkte Emissionen
- Konzentration der atmosphärischen CO₂-Äquivalente etwa 1370 ppm um 2100
- Temperaturerhöhung bis 2100 etwa 4,8 °C

2.1.1.2.3 Rekombination

Über eine Rekombinationsmethode wurden die täglich aufgelösten Referenz-Klimatologien in dynamische, stündlich aufgelöste TRJ überführt. Dafür wurden charakteristische, an der Station Spessart im Referenzzeitraum gemessene Wettersegmente so rekombiniert, dass sie definierte statistischen Eigenschaften der jeweiligen Referenz-Klimatologien bestmöglich wiedergaben. Für das erste Segment, beginnend am 1. Januar, wurden alle an der Klimastation gemessenen, zehn- bis dreißigtägigen Wettersegmente gegen das entsprechende Segment der Referenz-Klimatologien auf folgende Kriterien getestet: (i) Abweichung der Mittelwerte von t_a bzw. rh; (ii) Abweichung der Standardabweichung von t_a ; (iii) absolute Abweichung von t_a zum vorherigen Segment (für alle Segmente außer dem ersten). Die Unterschiede wurden in aufsteigender Reihenfolge gelistet, und beginnend mit 0 (kleinster Unterschied) hinsichtlich ihres Rangs bewertet. Die Wertungen für die Abweichungen von t_a -Mittelwert und -Standardabweichung wurden mit 0,3 bzw. 0,7 gewichtet. Anschließend wurden die Wertungen für jedes mögliche Segment summiert und das Wettersegment mit der niedrigsten Summe wurde ausgewählt. Dieses Verfahren wurde für die folgenden Segmente bis zum 31. Dezember wiederholt. Schließlich wurden die Tageswerte der rekombinierten Wettersegmente durch die entsprechenden, in stündlicher Auflösung gemessenen Datenreihen von t_a , rh, P, R_g und O₃ ersetzt. Um den Übergang zwischen den einzelnen Segmenten zu glätten, wurden t_a , rh, P und O₃ (nicht R_g) im Zeitraum beginnend 8 Stunden vor dem Ende eines Segments bis 8 Stunden nach dem Beginn des folgenden Segments linear interpoliert. Mit diesem Verfahren wurden charakteristische, stündlich aufgelöste TRJ für die Klimaszenarien PC, RCP2.6 und RCP8.5 erzeugt (Abbildung 2).

2.1.1.3 Methode zur Generierung der entsprechenden Ozon- und Kohlestoffdioxid-Konzentrationen für die Gegenwart und zukünftige Bedingungen

2.1.1.3.1 Erzeugung stündlich aufgelöster CO₂-Reihen

Die TRJ wurden mit Datenreihen der troposphärischen CO₂-Konzentration ergänzt. Zunächst wurde der stündlich aufgelöste, mittlere Jahresgang der CO₂-Konzentration des Referenzzeitraums an der Klimastation Schauinsland auf die mittlere Konzentration desselben Zeitraums normiert. Repräsentative CO₂-Reihen für PC, RCP2.6 und RCP8.5 wurden durch Multiplikation der relativen CO₂-Reihen mit 375 ppm (Mittelwert der Station Spessart im Referenzzeitraum), 421 ppm und 936 ppm (simuliert für RCP2.6 und RCP8.5 im Jahr 2100, siehe Meinshausen et al. 2011) generiert.

2.1.1.3.2 Erzeugung eines Ozongradienten für das Gegenwartsszenario

Um eine Dosis-Wirkungs-Beziehung für die Produktivität von Waldbaumarten in Abhängigkeit von der phytotoxischen Ozonaufnahme experimentell herzuleiten, wurde das Gegenwartsszenario PC mit vier unterschiedlichen Ozonregimes wiederholt. Ziel war es, einen Ozongradienten zu erzeugen und dabei die Konzentrationen in einem realistischen Bereich zu belassen. Das mit der oben beschriebenen Methode erzeugte TRJ für das PC-Szenario wurde unter der Bezeichnung PC-PC (*Present Climate – Present Climate ozone concentration*) in den Gradienten übernommen. Laut CLRTAP (2017) sind POD_y-abhängige Produktivitätseinbußen auf eine als vorindustriell angenommen mittlere O₃-Konzentration von 10 ppb zu referenzieren. Um eine genaue Referenzierung im valORTree-Projekt zu ermöglichen, wurde ein vorindustrielles Ozonregime errechnet. Dazu wurden die stündlichen O₃-Werte aus dem TRJ PC auf den Jahresmittelwert des TRJ normiert und mit 10 ppb multipliziert. Das erhaltene PC-Szenario mit einer mittleren O₃-Konzentration von 10 ppb wird im Folgenden als PC-PI (*Present Climate – Pre-Industrial ozone concentration*) bezeichnet. Zwei weitere Ozonregimes, PC-MOD (*Present Climate – MODerately increased ozone concentration*) und PC-HIGH (*Present Climate – HIGH ozone concentration*) komplettierten den Gradient. Analog zu den Ozonregimes der Zukunftsszenarien wurden die stündlichen O₃-Konzentrationen des TRJ PC für PC-MOD bei O₃ <40 ppb um +5 ppb erhöht und O₃ >45 ppb um -5 ppb verringert. Für PC-HIGH wurde O₃ <40 ppb um +10 ppb und um +5 ppb für Werte zwischen 40 und 50 ppb erhöht; O₃ ≥50 ppb wurde um -5 ppb verringert.

2.1.1.3.3 Erzeugung von Ozonreihen für die Zukunftsszenarien

Die troposphärische O₃-Konzentration für das TRJ PC entspricht einem durchschnittlichen, an der Station Spessart von 1987-2016 gemessenen Verlauf. Der zukünftige Verlauf der troposphärischen O₃-Konzentration wurde innerhalb der EURO-CORDEX- bzw. ReKliEs-De-Ensembles nicht simuliert. Die O₃-Jahresgänge der TRJ RCP2.6 und RCP8.5 wurden daher angepasst. Für RCP2.6 wurden Stundenwerte der O₃-Konzentration <40 ppb um +5 ppb erhöht und O₃ >45 ppb um -5 ppb verringert. Für RCP8.5 wurde O₃ <40 ppb um +10 ppb und um +5 ppb für Werte zwischen 40 und 50 ppb erhöht. O₃ ≥50 ppb wurde im RCP8.5-Szenario um -5 ppb verringert. Auf diese Weise wurden die mittleren O₃-Konzentrationen der Zukunftsszenarien erhöht, die Extremwerte jedoch reduziert, wobei davon ausgegangen wurde, dass die derzeitigen Maßnahmen zur Emissionsvermeidung auch in Zukunft wirksam sein werden.

2.1.1.3.4 Trockenstressphasen in den Zukunftsszenarien

Zukünftige Klimaszenarien werden wahrscheinlich durch eine veränderte Niederschlagsverteilung und -intensität gekennzeichnet sein, die aber regional sehr unterschiedlich ausfallen kann. Die für das ReKliEs-De Gebiet für das Ende des 21. Jahrhunderts simulierten Niederschlagssummen reichen von -30 % bis +5 % für RCP2.6 und von -60 % bis

+20% für RCP8.5, relativ zum Zeitraum 2071-2100 (Hübener et al. 2017). Allerdings wird mit hoher Wahrscheinlichkeit zumindest temporärer Trockenstress für die Zukunftsszenarien erwartet. Um diesen Umstand nicht zu vernachlässigen, wurden die beiden Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 mit Phasen verminderter Bodenfeuchte repliziert. Dazu wurde die Bewässerung (siehe 2.1.4.1) in den Zeiträumen 174-185 und 230-241 (TdJ 2020) sowie 162-173 und 204-221 (TdJ 2021) eingestellt.

2.1.2 Experimentelles Design zur Abschätzung der Risiken von Wäldern in Deutschland für die Gegenwart und für zukünftige Klimawandel-Bedingungen

2.1.2.1 Beschreibung der TUMmesa-Phytotrone

Die TUMmesa-Phytotronanlage ist eine bereichsübergreifende Forschungseinrichtung der Technischen Universität München und besteht aus insgesamt acht modernen begehbaren Klimakammern, konstruiert von *regineering* GmbH (Preith, Deutschland). Die Anlage wurde ausführlich in Jákli et al. (2021) und Roy et al. (2020) beschrieben und ermöglicht eine dynamische, minutengenaue Kontrolle von t_a , rh, Licht, CO_2 und O_3 . Zusätzlich ist die Manipulation von Bodenfeuchte und -temperatur in speziellen Lysimetern und Pflanzgefäßen möglich, sowie Markierungsexperimente mit stabilen Isotopen (^{13}C , ^{15}N). Die vorkonditionierte Luft strömt über flächig perforierte Seitenwände in die Kammer ein, wobei die resultierende Luftbewegung vom Betreiber mit $<0,1 \text{ m s}^{-1}$ angegeben wird. Das LED-Beleuchtungssystem (Vossloh-Schwabe, Urbach, Deutschland) besteht aus zehn individuell ansteuerbaren Wellenlängenbereichen, die das Spektrum von UV-B bis Rot (340-730 nm) abdecken und in diesem Bereich eine zum Zeitpunkt der Konstruktion bestmögliche Simulation des natürlichen Sonnenlichtspektrums ermöglichen. Im Experiment wurde eine maximale photosynthetisch aktive Photonenflussdichte (PPFD) von $>800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ in 1 m Entfernung von den LEDs erreicht.

2.1.2.2 Klima- und Emissions-Szenarien im Phytotronexperiment

Die unter 2.1.1 beschriebenen TRJ wurden an die technischen Gegebenheiten der TUMmesa Phytotrone angepasst (Tabelle 2, Spalte TUMmesa „Zielwerte“). Die Lufttemperatur t_a wurde auf maximal 30°C beschränkt, die relative Luftfeuchte auf ein Minimum von 30 %. Tag- bzw. Nachttemperaturen unterhalb von 10°C bzw. 4°C wurden auf 10°C bzw. 4°C gesetzt und rh wurde auf 75 bzw. 90 % beschränkt. Der Luftdruck P wurde nicht reguliert. Die über die TRJ bereitgestellte Globalstrahlung R_g wurde nach Grünhage & Haenel (2008) in PPFD umgerechnet. PPFDs zwischen $600 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ und dem Maximum von $2030 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ wurden auf einen Bereich von 600 bis $800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ skaliert. PPFDs unterhalb von $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ wurden auf $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (entspricht dem Minimum von 3 % LED-Anforderung) angehoben. Die Stundenwerte der in den jeweiligen TRJ festgelegten meteorologischen Größen wurden linear angefahren. Die Gradienten dabei waren $0,08^\circ\text{C min}^{-1}$ (t_a), $0,3 \text{ \% min}^{-1}$ (rh), $0,3 \text{ ppb min}^{-1}$ O_3 und $0,7 \text{ ppm min}^{-1}$ CO_2 . Die stündlichen Änderungen der Lichtintensität erfolgten jeweils direkt ohne zeitliche Verzögerung.

Tabelle 2: Kennzahlen der Testreferenzjahre (TRJ) für PC, RCP2.6 und RCP8.5

Dargestellt sind meteorologische Kennzahlen der drei Klimaszenarien PC, RCP2.6 und RCP8.5 für den gesamten Jahresverlauf (01. Jan - 31. Dez), für die experimentelle Periode (16. Apr - 29. Sep) sowie die an die technischen Voraussetzungen von TUMmesa angepassten Größen. Für das Testreferenzjahr Gegenwart (TRJ PC) sind zusätzlich Kennzahlen der für den Ozongradienten angepassten Ozonreihen (PC-PI, PC-MOD, PC-HIGH) angegeben.

		TRJ	TRJ	TUMmesa Zielwerte
		01. Jan - 31. Dez	16. Apr - 29. Sep	16. Apr - 29. Sep
Gegenwart (PC)				
Lufttemperatur, t_a [°C]	Bereich (Mittelwert)	-10.9 - 30.1 (8.2)	3.4 - 30.1 (14.5)	4.0 - 30.0 (14.6)
relative Luftfeuchte, rh [%]	Bereich (Mittelwert)	28.0 - 100.0 (77.9)	29.5 - 100.0 (70.6)	30 - 90.0 (67.7)
Luftdruck, P [kPa]	Bereich (Mittelwert)	919 - 979 (956)	938 - 968 (956)	
CO ₂ [ppm]	Bereich (Mittelwert)	362 - 384 (375)	362 - 380 (370)	362 - 380 (370)
O ₃ [ppb]	PC-PI	0 - 32 (10)	0 - 32 (13)	0 - 32 (13)
	PC-PC	1 - 95 (29)	1 - 95 (39)	1 - 95 (39)
	PC-MOD	6 - 90 (32)	6 - 90 (40)	6 - 90 (40)
	PC-HIGH	11 - 90 (36)	11 - 90 (44)	11 - 90 (44)
Globalstrahlung, R_g [W m ⁻²]	Mittel der Tagesmaxima	447	650	
PPFD [mol m ⁻²]	Summe	8048	5954	3934
[μmol m ⁻² s ⁻¹]	Mittel der Tagesmaxima	910	1340	672
RCP2.6				
Lufttemperatur, t_a [°C]	Bereich (Mittelwert)	-6.3 - 28.9 (9.3)	-1.5 - 28.9 (15.3)	4.0 - 28.9 (15.5)
relative Luftfeuchte, rh [%]	Bereich (Mittelwert)	24.0 - 100.0 (78.8)	24.0 - 100.0 (72.3)	30.0 - 90.0 (68.3)
Luftdruck, P [kPa]	Bereich (Mittelwert)	931 - 976 (958)	939 - 970 (956)	
CO ₂ [ppm]	Bereich (Mittelwert)	406 - 432 (421)	406 - 427 (416)	406 - 427 (416)
O ₃ [ppb]	Bereich (Mittelwert)	6 - 102 (34)	9 - 102 (42)	9 - 102 (42)
Globalstrahlung, R_g [W m ⁻²]	Mittel der Tagesmaxima	483	723	
PPFD [mol m ⁻²]	Summe	8946	6701	4150
[μmol m ⁻² s ⁻¹]	Mittel der Tagesmaxima	986	1492	69
RCP8.5				
Lufttemperatur, t_a [°C]	Bereich (Mittelwert)	-5.9 - 32.5 (11.5)	0.7 - 32.5 (17.6)	4.0 - 30.0 (17.7)
relative Luftfeuchte, rh [%]	Bereich (Mittelwert)	28.0 - 100.0 (77.4)	30.4 - 100.0 (68.8)	30.0 - 90.0 (65.8)
Luftdruck, P [kPa]	Bereich (Mittelwert)	928 - 979 (955)	929 - 969 (955)	
CO ₂ [ppm]	Bereich (Mittelwert)	903 - 959 (936)	903 - 949 (924)	903 - 949 (924)
O ₃ [ppb]	Bereich (Mittelwert)	11 - 95 (41)	11 - 95 (49)	11 - 95 (49)
Globalstrahlung, R_g [W m ⁻²]	Mittel der Tagesmaxima	481	716	
PPFD [mol m ⁻²]	Summe	8616	6426	4076
[μmol m ⁻² s ⁻¹]	Mittel der Tagesmaxima	981	1477	691

Quelle: Jákli et al. (2021), verändert

2.1.2.3 Experimentelles Setup

Abbildung 3 zeigt die aus den drei TRJ PC, RCP2.6 und RCP8.5 abgeleiteten acht Szenarien des Experiments. Im Folgenden werden nur die Kurzbezeichnungen verwendet. Um eine hinreichende statistische Absicherung der Ergebnisse gewährleisten zu können, wurde die Belegung der Klimakammern durch die einzelnen Szenarien in allen drei Versuchsjahren variiert. Dabei wurden jeweils die Kammern zwischen zwei Prüfglieder getauscht, nämlich PC-PI/PC-PC, PC-MOD/PC-HIGH, RCP2.6/RCP2.6_DS und RCP8.5/RCP8.5_DS. Da viele der im Experiment genutzten Techniken und Methoden Neuentwicklung waren (z.B. Simulation dynamischer Klimareihen in TUMmesa; Sensor-Neuentwicklung, siehe Kapitel 2.2), konnten erst ab Mitte des ersten Versuchsjahres 2019 robuste Daten erhoben werden. Für die Berechnung der phytotoxischen Ozondosis müssen aber Daten einer gesamten Vegetationsperiode betrachtet werden. Den Ergebnissen dieses Berichts liegen daher hauptsächlich in den kompletten Versuchsjahren 2020 und 2021 ermittelte Daten zu Grunde.

Abbildung 3: Experimentelles Setup

Übersicht über die acht verschiedenen Szenarien im valORTree Experiment. In weiß hervorgehoben ist jeweils die Kurzbezeichnung des Szenarios. Zusätzlich sind Jahresmittelwerte (Mittelwerte der Testreferenzjahre, ohne Anpassung an die technischen Voraussetzungen von TUMmesa) der troposphärischen Ozonkonzentration (O_3), der Lufttemperatur (t_a) und der CO_2 -Konzentration (CO_2) angegeben

Gegenwartsklima (1987 – 2016) PC-PI vorindustrielles O_3 $O_3 = 10$ ppb $t_a = 8,2$ °C $CO_2 = 375$ ppm	Gegenwartsklima (1987 – 2016) PC-PC gegenwärtiges O_3 $O_3 = 29$ ppb $t_a = 8,2$ °C $CO_2 = 375$ ppm	Gegenwartsklima (1987 – 2016) PC-MOD moderat erhöhtes O_3 $O_3 = 32$ ppb $t_a = 8,2$ °C $CO_2 = 375$ ppm	Gegenwartsklima (1987 – 2016) PC-HIGH erhöhtes O_3 $O_3 = 36$ ppb $t_a = 8,2$ °C $CO_2 = 375$ ppm
Zukunftsszenario I (2071 - 2100) RCP2.6 $O_3 = 34$ ppb $t_a = 9,3$ °C $CO_2 = 421$ ppm	Zukunftsszenario I (2071 - 2100) RCP2.6_DS Trockenphasen $O_3 = 34$ ppb $t_a = 9,3$ °C $CO_2 = 421$ ppm	Zukunftsszenario II (2071 - 2100) RCP8.5 $O_3 = 41$ ppb $t_a = 11,5$ °C $CO_2 = 936$ ppm	Zukunftsszenario II (2071 - 2100) RCP8.5_DS Trockenphasen $O_3 = 41$ ppb $t_a = 11,5$ °C $CO_2 = 936$ ppm

PC: *present climate*, Gegenwartsklima; DS: *drought stress*, Trockenstress

Quelle: eigene Darstellung, TUM

2.1.3 Vorarbeiten und Vorbereitung der Prohebäume

Ein Jahr vor Beginn des Experiments wurden im Frühjahr 2018 jeweils 100 junge Buchen und Fichten aus dem Kranzberger Forst zusammen mit einem 20-l-Bodenmonolithen entnommen. Der Standort auf 508 m üNN ist durch eine Jahresmitteltemperatur vom 8,3 °C und einer mittlere Niederschlagssumme von 844 mm gekennzeichnet (Daten der Waldklimastation Freising, Mittelwerte von 1998-2009). Die Bodenart wurde als Uls/Lu bestimmt. Die Bäume wurden mit dem Boden in 20-l-Pflanzgefäße überführt und unter guter Wasserversorgung zur Akklimatisierung ein Jahr im Außenbereich des Gewächshaus-Labor-Zentrums Dürnast der TU München belassen. Feldkapazität und permanenter Welkepunkt des getopften Bodens wurden unter experimentellen Bedingungen zu 41 vol. % bzw. 10 vol. % bestimmt. Im März 2019 wurde das Alter der Bäume durch Auszählen der Triebe bestimmt und Höhe sowie Stammumfang gemessen. Außerdem wurde für jeweils zehn Bäume pro Spezies die Spross- und Wurzeltrockenmasse destruktiv bestimmt. Zu Beginn des Experiments wurden die Bäume so auf die acht TUMmesa Klimakammern verteilt, dass für jede Kammer Mittelwerte und Standardabweichungen von Höhe und Stammdurchmesser statistisch gleich waren. Der Boden wurde vor Beginn des Experiments mit einer etwa 2-cm-mächtigen Schicht aus feinem Quarz-Kies bedeckt, um Evaporation von der Bodenoberfläche zu minimieren und das Auflaufen von krautiger Begleitvegetation zu verhindern.

2.1.4 Bewässerung, Düngung und Pflanzenschutz

Grundlegende Konzepte zu Bewässerung, Düngung und Pflanzenschutz

► <u>Bewässerung</u>	Tröpfchenbewässerung, täglich, Erhalt von 50 - 90 % des pflanzenverfügbaren Bodenwassers (abweichend davon zwei Trockenstressszenarien)		
► <u>Düngung</u>	vor Beginn der Vegetationsperiode:	NPK Granulat (1x) Fe-EDTA-Lösung (1x)	
	Während des Experiments:	Nährlösung (wöchentlich) KNO ₃ -Blattbehandlung (monatlich)	
► <u>Pflanzenschutz:</u>	vor Beginn der Vegetationsperiode:	Thiachlopid, angegossen (1x)	

Quelle: eigene Darstellung, TUM

2.1.4.1 Bewässerung

Die Pflanzen wurden mit einem zeitgesteuerten Tröpfchenbewässerungssystem bis zu dreimal täglich mit einer Rate von 150 ml min⁻¹ bewässert. In jeder Kammer wurden Buchen und Fichten separat bewässert. Dabei wurde der Erhalt von 50 – 90 % des pflanzenverfügbaren Bodenwassergehalts (*Plant Available Water content*, PAW (siehe Gleichung 20); entspricht 25,5 – 37,9 % VWC, *Volumetric Water Content*) im Substrat angestrebt. Um den VWC überwachen zu können, wurde zu Beginn der Vegetationsperioden 2020 und 2021 jeweils ein Time-Domain-Reflektometer (TDR, Eigenbau) pro Pflanzgefäß installiert. Das Signal der TDRs wurde dreimal wöchentlich ausgelesen und Dauer und Häufigkeit der Bewässerung auf Grundlage des mittleren VWC pro Kammer und Spezies an den pflanzlichen Bedarf angepasst. In Tabelle 3 sind Jahresdurchschnittswerte des mittels TDR-Messungen bestimmten volumetrischen Wassergehalts (VWC) dargestellt.

Tabelle 3: Jahresmittelwert der Bodenfeuchte

Angegeben ist der mittlere volumetrische Wassergehalt (VWC, *Volumetric Water Content*) des getopften Bodens für die Versuchsjahre 2020 und 2021. Zusätzlich ist für die Zukunftsszenarien der mittlere VWC der vier 12- bis 18-tägigen Trockenphasen (TP) im Vergleich zu den gut mit Wasser versorgten Varianten angegeben.

Art	Versuchs-jahr	PC-PI	PC-PC	PC-MOD	PC-HIGH	RCP2.6	RCP2.6_DS	RCP8.5	RCP8.5_DS
Buche	2020	0,27	0,30	0,29	0,29	0,29	0,28	0,32	0,30
	1. TP					0,26	0,20	0,26	0,22
	2. TP					0,29	0,20	0,33	0,26
	2021	0,37	0,35	0,36	0,35	0,38	0,35	0,38	0,37
	3. TP					0,36	0,26	0,40	0,34
Fichte	4. TP					0,38	0,24	0,39	0,33
	2020	0,28	0,28	0,28	0,29	0,28	0,27	0,28	0,27
	1. TP					0,26	0,16	0,25	0,16
	2. TP					0,28	0,18	0,28	0,24
	2021	0,40	0,36	0,35	0,34	0,35	0,31	0,36	0,29

Art	Versuchs-jahr	PC-PI	PC-PC	PC-MOD	PC-HIGH	RCP2.6	RCP2.6_DS	RCP8.5	RCP8.5_DS
	3. TP					0,35	0,26	0,35	0,23
	4. TP					0,37	0,22	0,39	0,28

Quelle: eigene Darstellung, TUM

2.1.4.2 Düngung

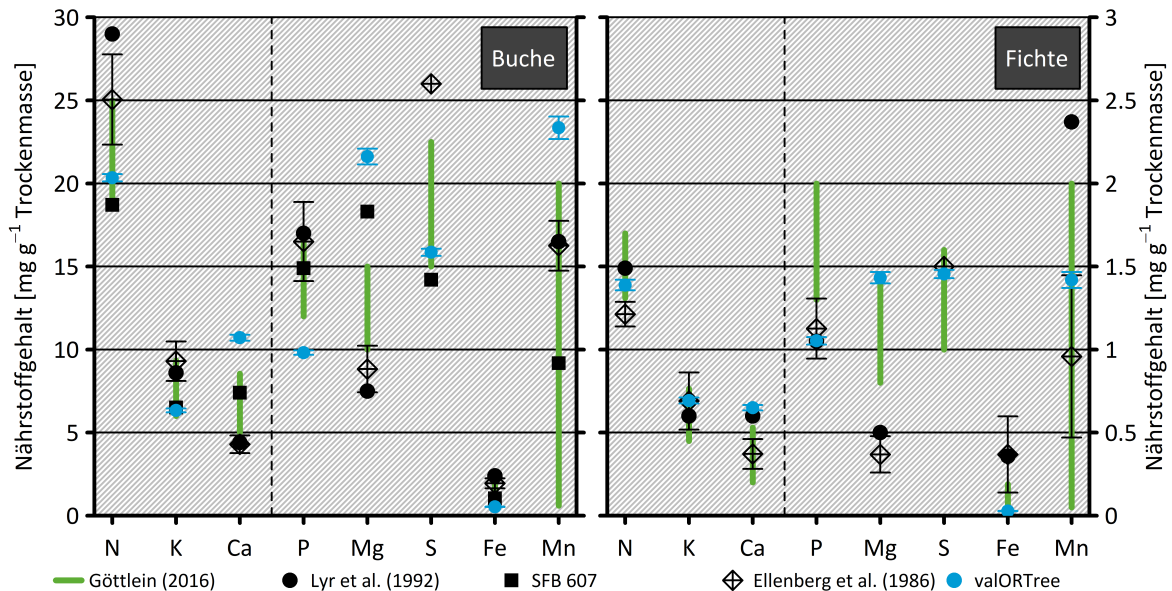
Für eine ausreichende Nährstoffversorgung wurden den Pflanzen essentielle Nährelemente zugeführt. Ziel war es, die Nährstoffgehalte der Blatt- bzw. Nadelbiomasse trotz des eingeschränkten Bodenvolumens im Wurzelraum der Pflanzen innerhalb des in Abbildung 4 dargestellten Optimalbereichs zu erhalten. Dazu wurden zu Beginn der Vegetationsperiode 30 g Topf⁻¹ NPK-Granulat (13 % N, 5 % P₂O₅, 17 % K₂O, 3 % MgO, 16 % SO₃, 0,15 % B, 0,20 % Mn, 0,2 % Zn) oberflächlich in das Substrat eingebracht. Zusätzlich erfolgte zu diesem Zeitpunkt eine Gabe von 200 ml Topf⁻¹ 1 mM Fe-EDTA. Im Verlauf des Experiments wurden wöchentlich 250 ml Topf⁻¹ einer Nährlösung mit folgender Zusammensetzung angegossen: 3,5 mM KH₄NO₃, 1,5 mM KNO₃, 3 mM Ca(NO₃)₂, 1,5 mM KH₂PO₄, 0,75 mM K₂SO₄, 0,9 mM MgSO₄, 61 µM Fe-EDTA. Der pH-Wert der Lösung wurde mit Calciumcarbonat stabilisiert. Zusätzlich erhielten alle Pflanzen monatlich eine Blattanwendung mit einer 1,5 % KNO₃-Lösung.

Zur Bestimmung des Ernährungszustands der Pflanzen wurden 2020 und 2021 im August jeweils 10 Buchenblätter pro Baum und zwischen November und Februar jeweils ca. 1 g Nadelfrischmasse geerntet, bei 65 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet, mit einer Kugelmühle gemahlen (Retsch, Haan, Deutschland) und die jeweiligen Nährstoffgehalte nach Aufschluss mit Salpetersäure mittels ICP-AES (Ciros Vision; Spectro, Kleve, Deutschland) bestimmt. Die Bestimmung von N erfolgte mittels eines an ein Massenspektrometer (IRMS Delta V Advantage; Thermo Fisher, Dreieich, Germany) gekoppelten Elementanalysators (Euro EA; Eurovector, Mailand, Italien).

Insgesamt waren alle Pflanzen gut mit Nährstoffen versorgt. Bei Buche war eine leichte Unterversorgung mit Phosphor festzustellen (Abbildung 4). Außerdem lag eine leichte, jedoch nicht kritische Überversorgung mit den bivalenten Kationen Ca²⁺, Mg²⁺ und Mn²⁺ vor. Die Nährstoffgehalte der Fichtennadeln lagen hingegen dauerhaft im theoretischen Optimum.

Abbildung 4: Nährstoffgehalte in der Trockenmasse von Buchenblättern bzw. Fichtennadeln

Dargestellt sind die im valORTree-Projekt in den Jahren 2020 und 2021 ermittelten Nährstoffgehalte (gemittelt über alle Szenarien und beide Jahre) von Buche und Fichte im Vergleich zu Literaturwerten. Für Göttlein (2016) ist ein optimaler Versorgungsbereich angegeben, für Lyr et al. (1992) und Daten aus dem Sonderforschungsbereich 607 (SFB 607, Matyssek et al., 2002; Göttlein, A., persönliche Kommunikation) jeweils ein Mittelwert und für Ellenberg et al. (1996) Mittelwert \pm Standardabweichung. Links der vertikalen gestrichelten Linie ist die y-Achse auf 0 bis 30 mg g^{-1} skaliert, rechts davon auf 0 bis 3 mg g^{-1} .



Quelle: eigene Darstellung, TUM

2.1.4.3 Pflanzenschutz

Für die Phytotronexperimente wurde ein biologisches Pflanzenschutzkonzept erarbeitet. Zur vorbeugenden Bekämpfung potentiell auftretender Schädlinge wurden über die Firma Katz Biotech AG (Baruth, Deutschland) entsprechende Nützlinge bezogen. An Buchen wurden insbesondere Buchenblattsauger (*Phyllaphis fagi*) und diverse Blattläuse erwartet, an Fichte Spinnmilben. Bodenbürtig wurden Thripse und Trauermückenlarven erwartet. Ziel war es, ein ökologisches Gleichgewicht zwischen Nützlingen und Schädlingen zu etablieren, ohne dass es zu einer Beeinträchtigung der Pflanzen kommen sollte. Das Konzept sah den Einsatz von Raubmilben (*Amblyseius swirskii*, *A. californicus*) gegen Thrips und Spinnmilben vor, Nematoden (*Steinernema feltiae*) gegen Trauermückenlarven und Florfliegenlarven (*Chrysoperla carnea*) gegen blattsaugende Insekten. Das Konzept wurde nur im ersten Versuchsjahr 2019 umgesetzt. Zwar stellt der Einsatz von Nützlingen zur präventiven und akuten Schädlingsbekämpfung in großen Gewächshäusern eine etablierte Methode dar, in vorliegendem Experiment erwies er sich jedoch – bis auf den Nematodeneinsatz im Boden – als nicht effektiv. Grund dafür waren vor allem die relativ niedrigen, fluktuierenden Tagesmitteltemperaturen der TRJ im Vergleich zu dem gleichmäßig warmen Klima eines zur kommerziellen Pflanzenproduktion genutzten Gewächshauses, da die meisten der eingebrachten Nützlinge eine Aktivitätsoptimum bei $>18^\circ\text{C}$ besitzen. Einem immer wieder starken Auftreten von Buchenblattsauger und, in geringerem Umfang, Blattlaus konnte nur mit chemischem Pflanzenschutz entgegnet werden. Dazu wurde der Einsatz des systemischen Pflanzenschutzmittels Calypso (Bayer CropScience, Wirkstoff Thiachloprid) bei der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) gemäß § 22 Abs. 2 PflSchG beantragt. Das Mittel wurde im Juli 2019 und in den Folgejahren vor Vegetationsbeginn mit einer Konzentration von $3,4 \text{ ml L}^{-1}$ und einer Aufwandmenge von 250 ml Topf^{-1} angegossen.

Gegen ein plötzliches, massives Auftreten von Spinnmilben an Fichten im Juni 2019 wurde Ordoval (Nisso Chemical Europe GmbH, Wirkstoff Hexythiazol) mit einer Aufwandmenge von 0,8 ml L⁻¹ im Freien gespritzt. In den folgenden Versuchsjahren 2020 und 2021 war kein Auftreten von Schädlingen festzustellen.

2.1.5 Charakterisierung von Blattmerkmalen

2.1.5.1 Bestimmung von Austriebsmerkmalen und -zeitpunkt

Für die Bestimmung der POD_y-Akkumulations-Periode muss der Beginn der Vegetationszeit erfasst werden. Für Zukunftsklimaszenarien mit erhöhten Temperaturen und CO₂-Gehalten ist von einer Verlängerung der Vegetationszeit, für erhöhte Ozonbelastung und temporäre Trockenphasen von vorzeitiger Seneszenz auszugehen.

Laub- und Nadelaustrieb bei Buchen und Fichten wurde jeweils etwa ab Mitte April bis zum vollständigen Austrieb für sechs bzw. fünf Austriebsstufen¹ bonitiert (Abbildung 5, Abbildung 6; angepasst nach Mall 2017), um Unterschiede bei Austriebsbeginn und -ende sowie dem Fortschreiten des Austriebs zwischen den Behandlungen feststellen zu können. Die Zeitabstände zwischen den Bonituren wurden an die Austriebsgeschwindigkeit angepasst. Eine Austriebsstufe war erreicht, wenn ca. 2/3 der Belaubung die Merkmale zeigten.

Erste Austriebsmerkmale (Knospen verdickt, gestreckt, aufgeplatzt) bei Buche wurden 2020 Mitte April und 2021 etwa Mitte-Ende April festgestellt, wobei jeweils die Zukunftsszenarien mit Trockenphasen 2021 (RCP2.6_DS, RCP8.5_DS) mindestens 10-14 Tage früher mit dem Austrieb begannen als die anderen Behandlungen. Tendenziell erreichten die Buchen in den RCP-Szenarien und PC-PC schneller die nächste Austriebsstufe als die restlichen Gegenwarts-szenarien. Der vollständige Austrieb war bei allen Behandlungen 2020 früher als 2021 zwischen 29.04. und 13.05. erreicht, wobei die Buchen in RCP8.5 und RCP2.6_DS als erstes vollständig ausgetrieben waren, PC-HIGH als letztes. 2021 war der Austrieb bei allen Behandlungen zwischen 14. und 20.05. abgeschlossen (Abbildung 7, Tabelle 4).

Bei den Fichten wurden in 2020 am 22.04. erste Austriebsmerkmale (sichtbarer Austrieb, beginnendes Längenwachstum des Triebs) bei RCP8.5 und RCP8.5_DS bonitiert, sieben Tage später bei Bäumen der restlichen Behandlungen. 2021 erfolgte der Austriebsbeginn bei allen Behandlungen am 11./12.04. Deutliche Unterschiede beim Erreichen der nächsten Austriebsstufe konnte für die Behandlungen nicht festgestellt werden. Der vollständige Austrieb aller Bäume wurde für alle Behandlungen 2020 zwischen 22.06. und 16.07., 2021 zwischen 21.06. und 10.07. erreicht (Abbildung 8, Tabelle 4).

Tabelle 4: Austriebsbeginn und -ende (Datum) der Buchen und Fichten in den Jahren 2020 und 2021

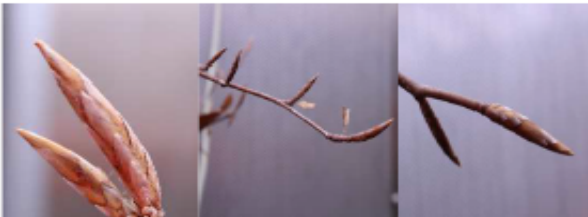





Austriebsmerkmale siehe Abbildungen 8 und 9; Beginn: Stufe 1; > 0 % der Bäume; Ende: Stufe 5 (Buche) Stufe 3 (Fichte) 100% der Bäume (Abbildung 5 und 6); *: Austriebsbeginn konnte 2020 erst ab 12.04. bonitiert werden

Behandlung	Beginn 2020 *	Ende 2020	Beginn 2021	Ende 2021	Beginn 2020	Ende 2020	Beginn 2021	Ende 2021
	Buche				Fichte			
RCP8.5	12.04.	29.04.	22.04.	20.05.	22.04.	16.07.	12.04.	10.07.
RCP8.5_DS	12.04.	29.04.	12.04.	20.05.	22.04.	16.07.	12.04.	21.06.

Behandlung	Beginn 2020 *	Ende 2020	Beginn 2021	Ende 2021	Beginn 2020	Ende 2020	Beginn 2021	Ende 2021
RCP2.6	12.04.	22.04.	22.04.	20.05.	29.04.	16.07.	11.04.	21.06.
RCP2.6_DS	12.04.	22.04.	12.04.	14.05.	29.04.	8.07.	12.04.	21.06.
PC-PC	12.04.	22.04.	20.04.	20.05.	29.04.	16.07.	12.04.	10.07.
PC-HIGH	12.04.	06.05.	22.04.	20.05.	29.04.	16.07.	12.04.	21.06.
PC-MOD	12.04.	29.04.	26.04.	20.05.	29.04.	08.07.	12.04.	21.06.
PC-PI	12.04.	22.04.	26.04.	20.05.	29.04.	22.06.	12.04.	10.07.






Quelle: eigene Darstellung, TUM

Abbildung 5: Austriebsmerkmale bei Buchen (angepasst nach Mall 2017)

Stufe	Zustand	Ausprägungsbeispiele
0	kein Austrieb: Knospen im Winterzustand	
1	Knospen verdickt & gestreckt (z.T. grüne Knospenspitzen sichtbar)	
2	Knospen aufgeplatzt, erste Blätter sichtbar, gefaltet	
3	Blätter entfaltet (größtenteils): weich, hell grün, hängend	
4	Blätter & Triebe noch nicht gestreckt: Blätter +- waagrecht, Langtrieb gestreckt aber hängend	
5	Blätter voll entwickelt: dunkelgrün, Blätter und Langtrieb steif abstehend	

Quelle: eigene Darstellung, TUM

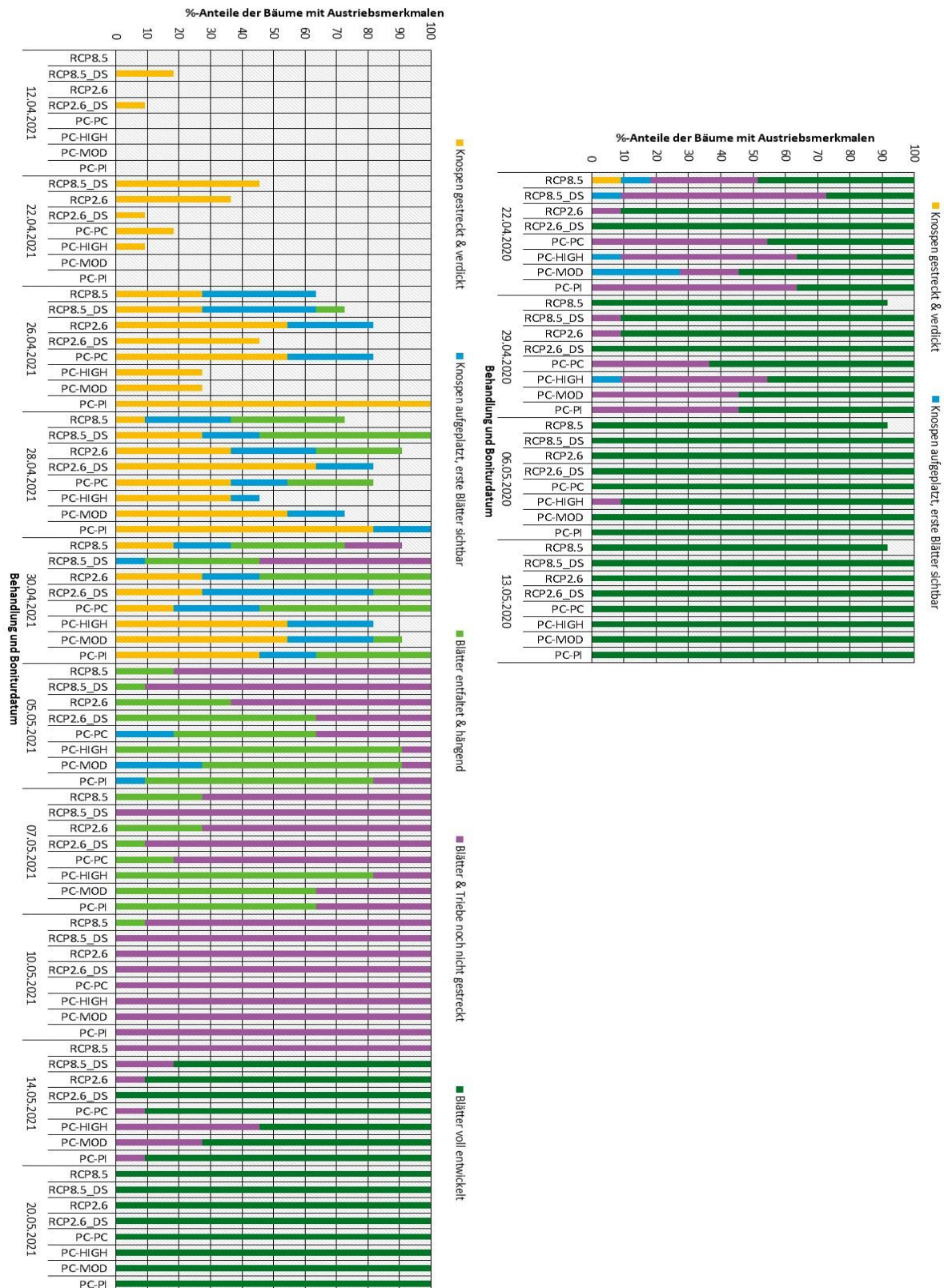
Abbildung 6: Austriebsmerkmale bei Fichten (angepasst nach Mall 2017)

Stufe	Zustand	Ausprägungsbeispiele
0	kein Austrieb: Knospen im Winterzustand	
1	Sprossastrieb sichtbar: Knospen aufgeplatzt & Knospenhaube abgeworfen; Trieb bis ~1 cm; Nadeln weich, sehr dicht	
2	Beginnendes Längenwachstum: Austrieb <2-3 cm, Nadeln noch dicht, Triebe +- hängend	
2,5	Fortgeschrittenes Längenwachstum: Triebe hängend und weniger dicht	
3	Austrieb beendet: Längenwachstum +- abgeschlossen, Nadeln nicht dicht; Trieb gestreckt, (neue Knospen am Spitzentrieb)	

Quelle: eigene Darstellung, TUM

Abbildung 7: Buchenaustrieb bei den unterschiedlichen Behandlungen in 2020 und 2021

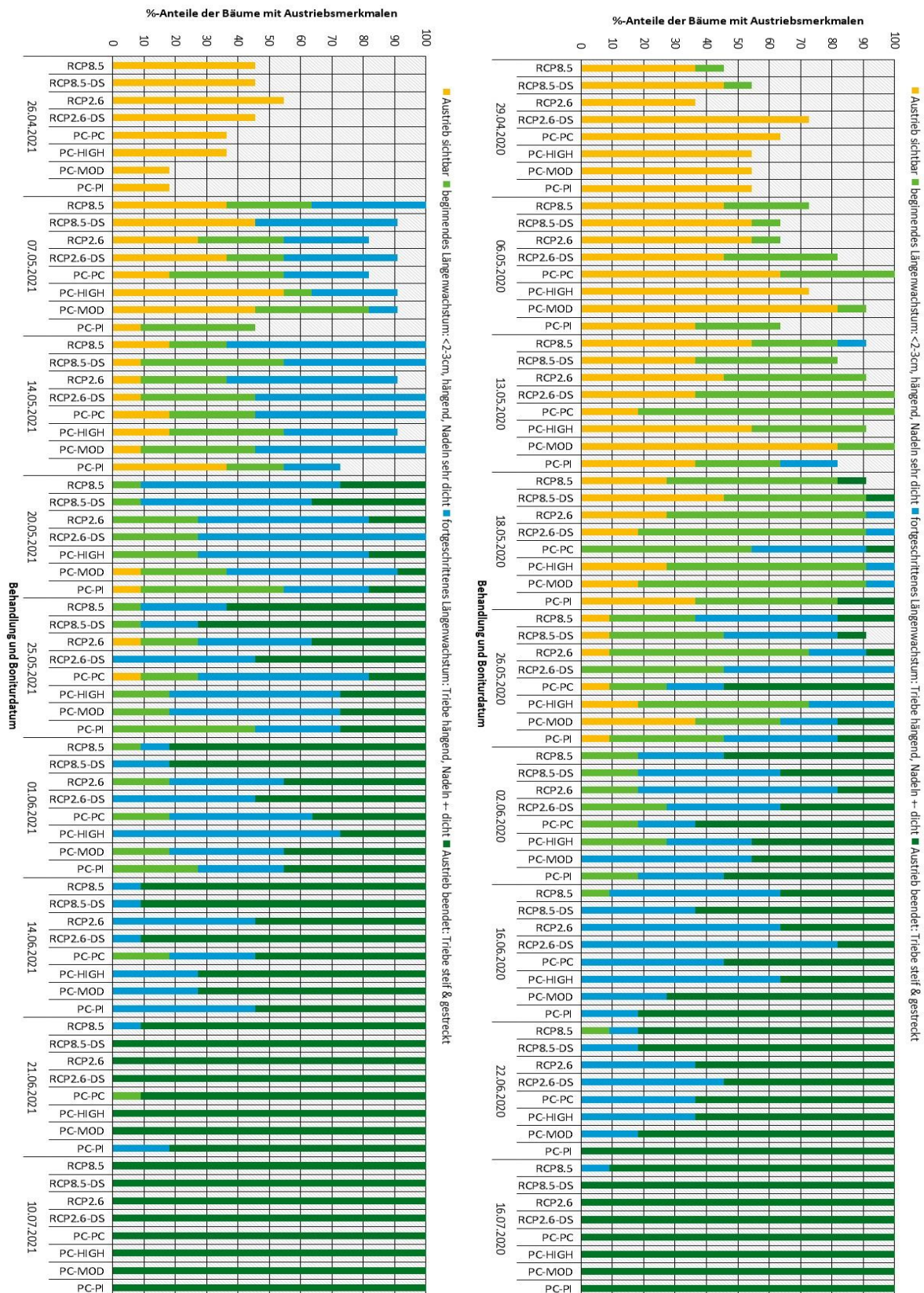
Dargestellt sind die prozentualen Anteile an Bäumen mit den jeweiligen Merkmalen, nicht alle Boniturzeiträume gezeigt



Quelle: eigene Darstellung, TUM

Abbildung 8: Fichtenaustrieb bei den unterschiedlichen Behandlungen in 2020 und 2021

Dargestellt sind die prozentualen Anteile an Bäumen mit dem jeweiligen Merkmalen, nicht alle Boniturzeiträume gezeigt



Quelle: eigene Darstellung, TUM

2.1.5.2 Charakterisierung von Blatt- und Nadelsymptomen

2.1.5.2.1 Visuell sichtbare ozonbedingte Blattsymptome

Visuell sichtbare ozonbedingte Symptome an der Belaubung können von Symptomen, die von anderen biotischen oder abiotischen Faktoren verursacht werden, unterschieden werden. Typische ozonbedingte Symptome an der Belaubung von Laub- und Nadelbäumen sind von zahlreichen Autoren beschrieben und kategorisiert worden (z.B.: Innes et al. 2001, Schaub et al. 2001, 2020; Günthardt-Goerg 2001, Soda et al. 2000, Kivimäenpää et al. 2010, Günthardt-Goerg und Vollenweider 2007, Ostluft 2013). In Anlehnung an die Fotodokumentation von Ozonsymptomen von M. Günthardt-Goerg und U. Heiz (Ostluft 2013) und die Leitlinien zur Ermittlung von Ozonsymptomen bei Pflanzen der ICP Arbeitsgruppe (Schaub et al. 2020) wurde ein Boniturschlüssel mit eigenen Fotos für visuell sichtbare ozonbedingte Symptome an der Belaubung von Fichten und Buchen erstellt (Abbildung 9, Abbildung 10). Die Bonitur erfolgte ab der Ausdifferenzierung der aktuellen Nadeltriebe bzw. der Blätter in zwei- bis vierwöchigen Intervallen. Eine Symptomstufe war erreicht, wenn mehr als 5 % der lichtexponierten Belaubung Symptome aufwiesen.

Ozonbedingte Symptome an Fichtennadeln finden sich auf der Oberseite von lichtexponierten Nadeln und Zweigen. Bei mehrjähriger Ozon-Exposition sind die Symptome an älteren Nadeln oft deutlicher ausgeprägt als an jungen Nadeln. Typischerweise zeigen sich bei deutlich erhöhter Ozonbelastung chlorotische hellgrüne bis gelbe Sprenkelungen, die unregelmäßig, punkt- bis mosaikartig über die Nadelfläche verteilt sind („*chlorotic mottling*“). Sukzessive kommt es zu großen zusammenhängenden Chlorosen, die schließlich verbräunen, vertrocknen und zu vorzeitigen Nadelfall führen können (Abbildung 9).

Die ozonbedingten Symptome an Laubblättern sind an ausdifferenzierten und älteren Blättern stärker ausgeprägt als an jüngeren Blättern. Typischerweise finden sich die Symptome auf der Blattoberseite in den Interkostalfeldern zwischen den Blattadern, wobei das Blattgewebe in der Regel nicht durchdrungen wird. Beschattete Blätter oder Blattbereiche sind symptomfrei. Charakteristische ozonbedingte Symptome bei Buchenblättern äußern sich als gelbliche punktuelle bis flächige, oft auch mosaikartige Verfärbung, Rötung oder Bräunung. Üblicherweise zeigen sich ozonbedingte Symptome als kleine braune unregelmäßige Flecken mit einem Durchmesser von ca. 2-4 mm („*stippling*“), oder als kleine hellbraune unregelmäßige Flecken mit einem Durchmesser von <1 mm („*flecking*“). Manchmal werden großflächige bronzefarbene, rötlich-braune Schattierungen beobachtet, die sich bei höherer Auflösung als eine Vielzahl von kleinen chlorotischen Zellbereichen erweisen („*bronzing*“). Diese Symptome können sukzessive in flächige Chlorosen oder Nekrosen übergehen, welche den normalen Seneszenzmerkmalen gleichen. Symptomatische Blätter zeigen oft verfrühte Seneszenzmerkmale wie Verfärbung, Welke und vorzeitigen Blattfall. Selten werden entfärbte, ausgebleichte Blattstellen beobachtet („*bleaching*“) (Abbildung 10).

Im Untersuchungszeitraum 2019-2021 wurden bei Fichten und Buchen ozonbedingte Symptome des „*chlorotic mottling*“ festgestellt. Erste, relativ schwache Symptomausprägungen zeigten sich bereits im Juni nach Austrieb der aktuellen Triebe, im August war die Symptomausprägung am weitesten fortgeschritten, daher werden die Ergebnisse dieser Monate beispielhaft dargestellt (Abbildung 11, Abbildung 12).

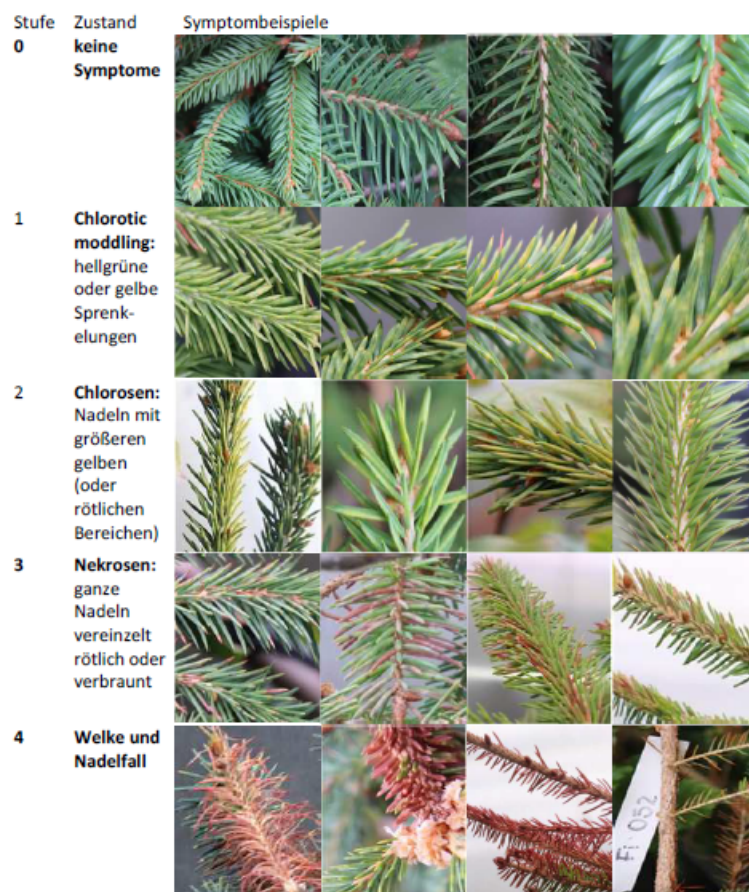
Bei Fichten fanden sich ozonbedingte Symptome des „*chlorotic mottling*“ (Abbildung 11). Im ersten Expositions-Jahr (2019) waren diese Symptome nur in geringem Ausmaß bei wenigen Probestäumen aus den RCP-Szenarien und bei PC-PC und PC-HIGH zu finden. In den Jahren 2020 und 2021 traten die Symptome deutlicher und häufiger auf. Im August 2020 waren bei RCP8.5 und RCP2.6/_DS ca. 60-80 %, bei RCP8.5_DS und PC-PC, PC-HIGH und PC-MOD ca. 10-30 % der

Probeebäume symptomatisch; bereits im Juni 2021 fanden sich bei RCP8.5 bei ca. 50 %, bei den anderen RCP-Szenarien, PC-PC und PC-HIGH bei zwischen 10 und 30 % der Probeebäume die Symptome, welche sich bis August 2021 kaum veränderten. Fichten aus der Behandlung PC-PI wiesen in keinem Jahr ozonbedingten Symptome auf.

Auch bei den Buchen waren ozonbedingte Symptome in 2019 nur schwach ausgeprägt (Abbildung 12). Am deutlichsten zeigten sich die Symptome im August des 2. Experimentjahrs 2020, mit „*bronzing*“- , „*flecking*“- und „*stippling*“-Symptomen bei den RCP-Szenarien (~ 80%, 20-60 % bzw. 20-80 % der Probeebäume) und der Behandlung mit erhöhtem Ozongehalt (PC-MOD, PC-HIGH: 60-70 %, 0 % bzw. 5-30 % der Probeebäume). Im August 2021 zeigten sich „*bronzing*“-Symptome fast nur bei den RCP-Szenarien (20-55 %), „*flecking*“ und „*stippling*“ waren bei nur 10 - 35 % der Probeebäume (RCP-Szenarien, PC-PC, PC-MOD, PC-HIGH) zu finden. „*Bronzing*“-Symptome wurden, in geringen Ausmaß, auch bei Bäumen aus der Behandlung mit vorindustriellen Ozongehalten gefunden, möglicherweise tritt dieses Symptom auch in Bereichen mit hoher Lichteinstrahlung (Nähe zur LED-beleuchtung) auf, in Kombination mit erhöhten Ozongehalten wird die Symptomausprägung verstärkt. Insgesamt wiesen die Buchen aus den Behandlungen PC-PI, PC-PC und PC-MOD am wenigstens Symptome auf.

Abbildung 9: Boniturschlüssel für visuell sichtbare ozonbedingte Symptome an der Belaubung von Fichten







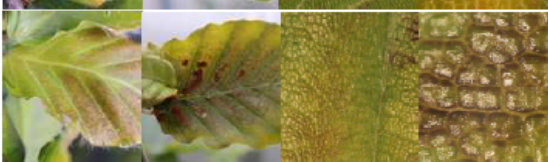



Fotographien von Symptomen an Fichtenzweigen- und Nadeln



Quelle: eigene Darstellung, TUM

Abbildung 10: Boniturschlüssel für visuell sichtbare ozonbedingte Symptome an der Belaubung von Buchen

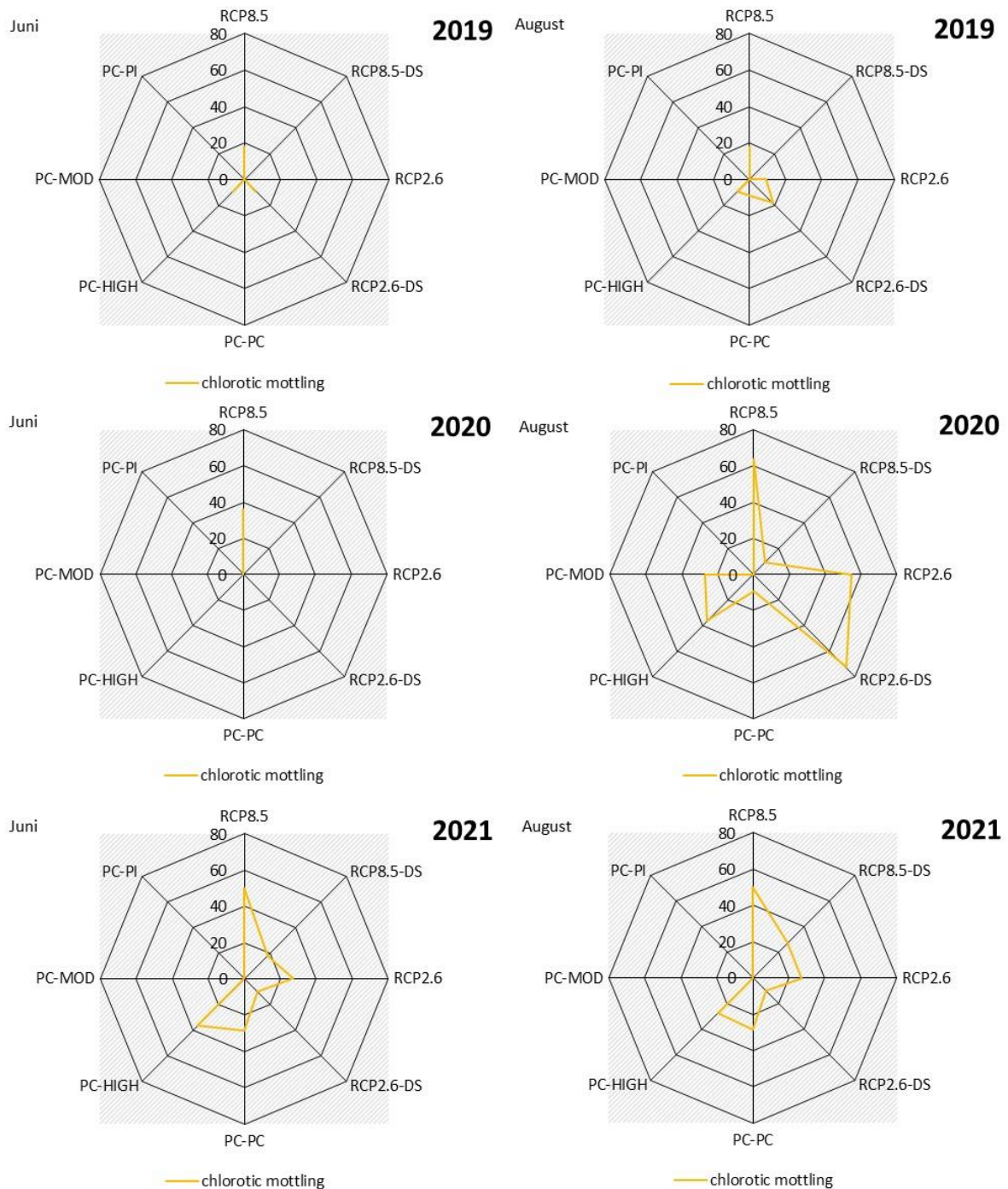
Fotographien von Symptomen an Einzelblättern (links) und stark vergrößerten Blattausschnitten (rechts)

Stufe	Zustand	Symptombespiele
0	keine Symptome	
1	gelb-grüne punkt- oder mosaikartige Chlorosen	
2	Bronzing: flächige bronzene oder bräunliche Verfärbungen	
3	Stippling: große dunkel pigmentierte Bereiche, ~ 2-4 mm Durchmesser	
4	Flecking: große hellbraune oder braune Bereiche, ~ 1 mm Durchmesser	
5	Chlorosen: große Chlorosen, z.T. übergehend zu Nekrosen > 5 mm Durchmesser	
6	Nekrosen: große flächige Nekrosen, > 5 mm Durchmesser	
7	Bleaching: entfärbte hellgelbe bis weiße Bereiche	
8	Welke, vorzeitiger Blattfall	
	beschattete symptomfreie, sattgrüne Bereiche an symptomatischen Blättern	

Quelle: eigene Darstellung, TUM

Abbildung 11: Ozonbedingte visuell sichtbare Blattsymptome (Chlorotic Mottling) an Fichten bei den unterschiedlichen Behandlungen in Juni und August 2019, 2020 und 2021

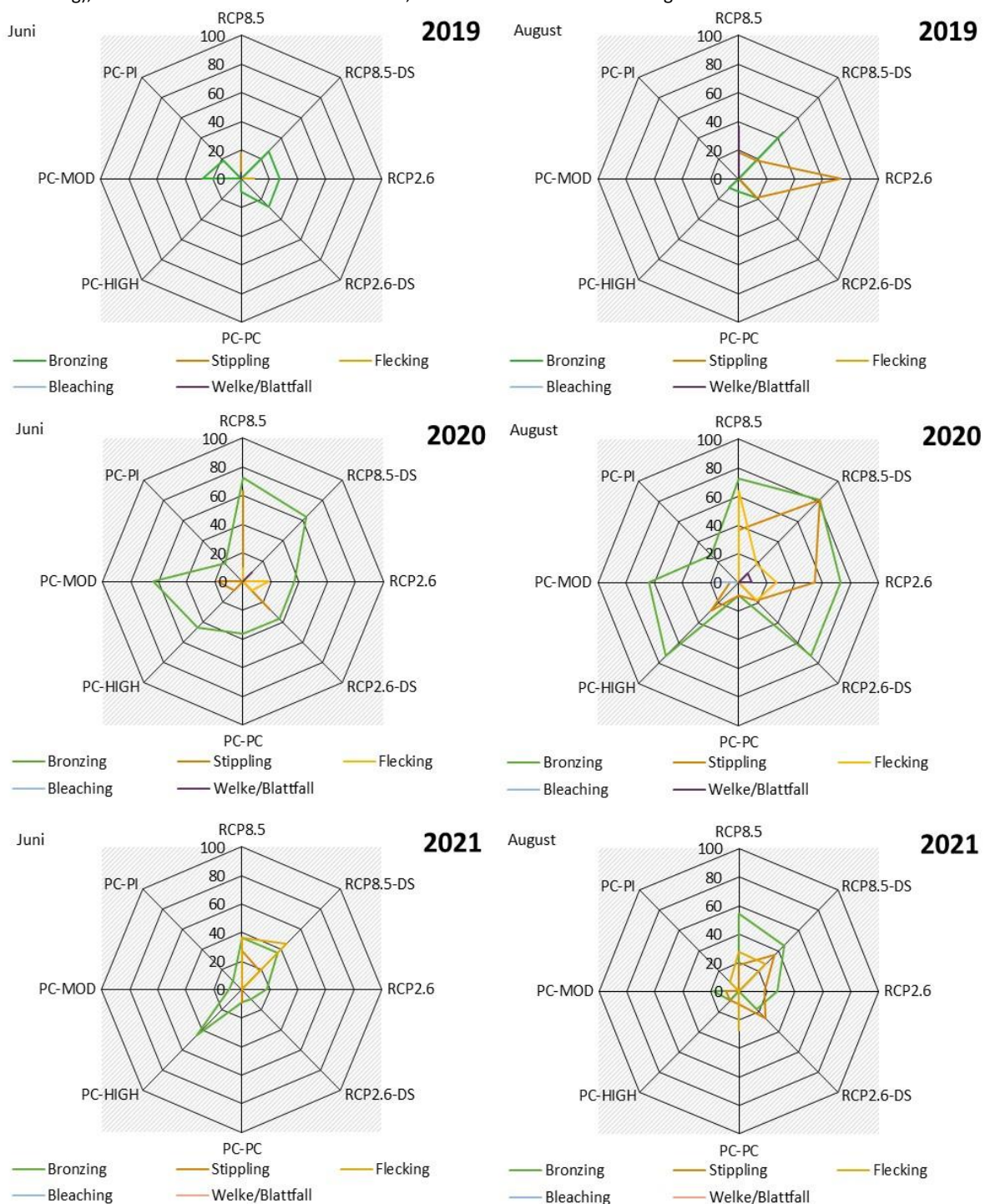
Prozentualer Anzahl an Fichten pro Behandlung mit Symptom „chlorotic mottling“ (bei > 5% der lichtexponierten Belaubung), links: Boniturdatum: 20.-26.Juni; rechts: Boniturdatum 1./2. August



Quelle: eigene Darstellung, TUM

Abbildung 12: Ozonbedingte visuell sichtbare Blattsymptome an Buchen bei den unterschiedlichen Behandlungen im Juni und August 2019, 2020 und 2021

Prozentualer Anzahl an Buchen pro Behandlung mit ozonbedingten Blattsymptomen (bei >5% der lichtexponierten Belaubung), links: Boniturdatum: Mitte 22.-26.Juni; rechts: Boniturdatum 1.-10.August



Quelle: eigene Darstellung, TUM

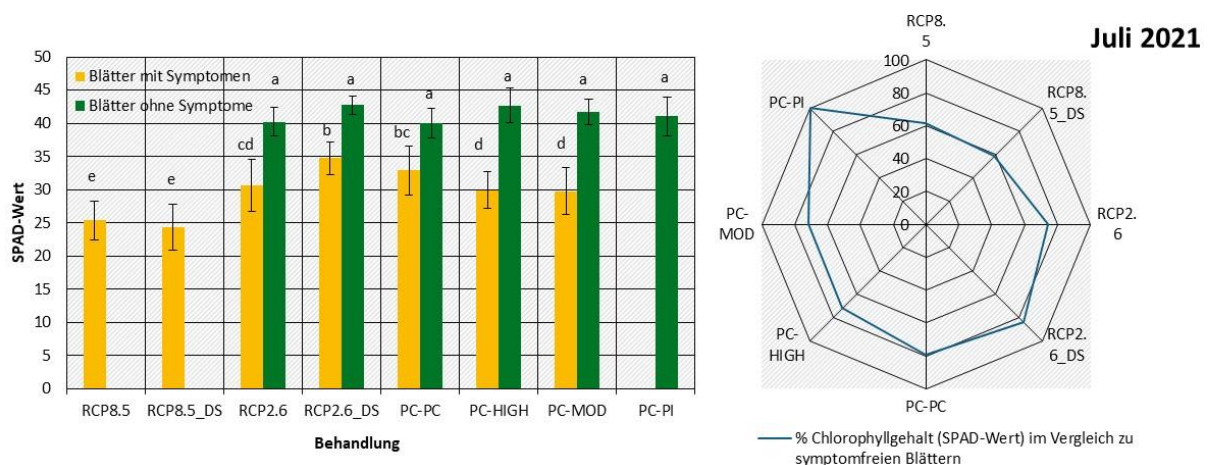
2.1.5.2.2 Chlorophyll-Gehalt von Buchenblättern

Die Bestimmung des Chlorophyllgehalts der Blätter ist ein diagnostischer Indikator zur Abschätzung von physiologischen Veränderungen als Reaktion auf verschiedene Umwelteinflüsse. Ursache ozonbedingter Blattsymptome ist oxidativer Stress, der oft im Zusammenhang mit dem Abbau von Chlorophyll in Blättern steht (Tenga et al. 1990, Neufeld et al. 2006). Der stressbedingte Chlorophyllabbau beginnt dabei schon bevor Symptome mit bloßem Auge sichtbar und somit eindeutig klassifizierbar werden. Ein Chlorophyll-Meter (SPAD502Plus Chlorophyllmeter, Konica Minolta) eignet sich zur schnellen und zerstörungsfreien Bestimmung des Chlorophyllgehalts. Das SPAD-Meter misst die Absorption des Blattes im roten und nah-infraroten Bereich und berechnet einen numerischen SPAD-Wert (SPAD: *Soil Plant Analysis Development*) der proportional zum Chlorophyllgehalt ist. Dadurch wird die Diagnostik von oxidativen Stress im Initialstadium ermöglicht.

Im Juli 2021 wurden symptomfreie Blätter und Blätter mit sichtbaren ozonbedingten Symptomen („bronzing“, „stippling“, „flecking“) aus dem oberen Kronendrittel der Buchen etwa zeitgleich untersucht. Es wurden jeweils zehn symptomfreie und zehn symptomatische Blätter pro Baum und Behandlung (3 Wiederholungen pro Blatt) analysiert. Ziel war es mit dem SPAD-Wert den relativen Chlorophyllabbau von symptomfreien gegenüber symptomatischen Blättern abzuschätzen.

Abbildung 13: Chlorophyllgehalte (als SPAD-Wert) von symptomfreien und symptomatischen Buchenblättern (links), prozentuale Chlorophyllgehalte im Vergleich zu symptomfreien Buchenblättern (rechts) bei den unterschiedlichen Behandlungen

Mittelwerte \pm Standardabweichung der SPAD-Werte symptomatischer und symptomfreier Buchenblättern (linke Grafik). Unterschiedliche Buchstaben oberhalb der Fehlerbalken bezeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten (ANOVA $p < 0,001$; $n = 6$). SPAD-Werte symptomatischer Blätter relativ [%] zu symptomfreien Blättern derselben Behandlung (rechte Grafik).



Symptomfreie Buchenblätter zeigten, unabhängig von der Behandlung, keine signifikanten Unterschiede im SPAD-Wert. Signifikante Unterschiede ($p < 0,001$) für den SPAD-Wert für symptomatische Blätter konnten jeweils zwischen den Zukunftsszenarien RCP8.5, RCP2.6, dem Gegenwartsszenario PC-PC, und den Ozonvarianten PC-HIGH und PC-MOD festgestellt werden (Abbildung 13). Der prozentuale Chlorophyllgehalt (SPAD) im Vergleich zu symptomfreien Blättern war bei den RCP8.5-Behandlungen mit ca. 60 % am niedrigsten und bei den Behandlungen RCP2.6_DS und PC-PC mit rund 80 % am höchsten, während PC-MOD, PC-HIGH und RCP2.6 mit rund 70 % einen Mittelplatz einnahmen (Abbildung 13). Diese Ergebnisse bestätigen zumeist die bonitierten ozonbedingten Blattsymptome (Abbildung 12), die bei den

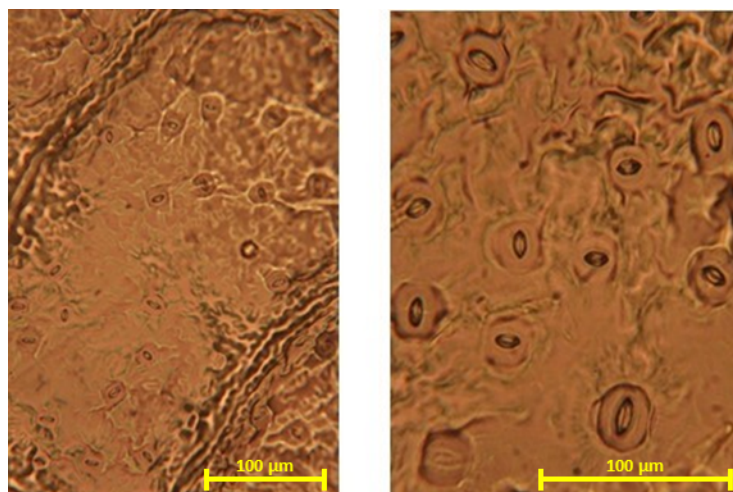
RCP8.5-Behandlungen am stärksten ausgeprägt waren, gefolgt von Behandlungen RCP2.6 und PC-PC, PC-HIGH und PC-MOD.

2.1.5.2.3 Veränderung von Stomatadichte und -größe

Die Stomatadichte und -größe können abhängig von Umwelteinflüssen variieren. Als Reaktion der Pflanzen auf erhöhte atmosphärische CO₂-Konzentrationen wird ein Rückgang der stomatären Leitfähigkeit beschrieben (z.B.: Medlyn et al. 2001, Ainsworth und Long 2005). Dieser Rückgang kann über eine reduzierte Stomataöffnung oder eine Abnahme der Stomatazahl erfolgen. Woodward (1987) konnte bei einer Erhöhung von vorindustrieller auf ambiente CO₂-Konzentration eine 67 %ige Reduktion der Stomatadichte bei verschiedenen Baumarten zeigen. Allerdings hatte eine weitere Erhöhung der CO₂-Konzentration keinen signifikanten Einfluss auf die Stomatadichte (Woodward und Bazzaz 1988), was durch zahlreiche Ergebnisse aus FACE – Experimenten (*Free Air CO₂ Enrichment*) bestätigt wird (siehe Ainsworth und Rogers 2007, Hirano et al 2012). Tricker et al. (2005) fanden bei Pappel eine Abnahme der Stomatadichte bei erhöhten CO₂-Konzentrationen nur in den ersten beiden Jahren, anschließend konnten, trotz weiterhin reduzierter stomatärer Leitfähigkeit, keine Effekte auf die Stomatadichte festgestellt werden. Es ist daher davon auszugehen, dass die Stomataöffnung und nicht die -dichte die Reaktion der stomatären Leitfähigkeit auf erhöhtes CO₂ bestimmen (Ainsworth und Rogers 2007).

Im Juli und August 2021 wurden die Stomatadichte und -größe an Buchenblättern bestimmt. Jeweils vier Blätter aus dem oberen Kronendrittel wurden von jeweils 6 Bäumen pro Behandlung untersucht. Zunächst wurde klarer Nagellack auf der Blattunterseite aufgetragen. Der getrocknete Lack bildet einen Negativabzug der Blattunterseite ab. Bei 25-facher Vergrößerung des Lackabdrucks wurde die Anzahl der Stomata für eine Referenzgröße unter dem Mikroskop ausgezählt und auf 1 mm² hochskaliert (drei Wiederholungen pro Blatt). Bei 40-facher Vergrößerung wurden jeweils drei Blattbereiche fotografiert. Die Fläche von jeweils ~ 10 Stomata (als Ellipsenfläche) wurde mit ImageJ (Open Source, z.B. Schindelin et al. 2015) bestimmt und gemittelt (Abbildung 14).

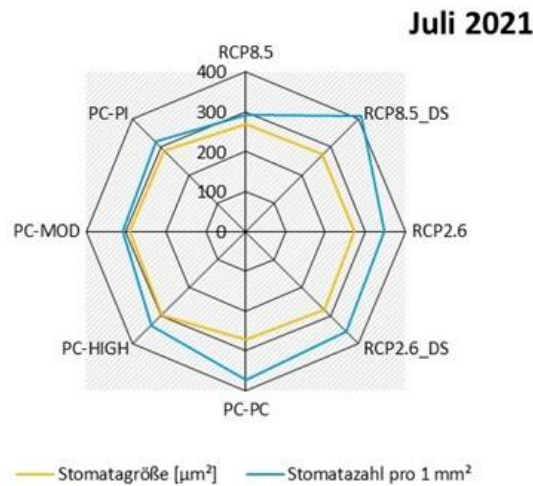
Abbildung 14: Negativabzug von der Blattunterseite eines Buchenblattes zur Bestimmung der Stomatazahl (25-fache Vergrößerung, links) und der Stomatafläche (40-fache Vergrößerung, rechts)



Quelle: eigene Darstellung, TUM

Abbildung 15: Stomatazahl und -größe von Buchenblättern bei den unterschiedlichen Behandlungen

Mittelwerte, n=6 Bäume pro Behandlung, keine signifikanten Unterschiede (ANOVA): Stomatagröße: $p = 0,889$, Stomatazahl $p = 0,195$



Quelle: eigene Darstellung, TUM

Die Stomatagröße und -zahl zeigte keine signifikanten behandlungsspezifischen Unterschiede (Abbildung 15, Stomatagröße $p = 0,889$, Stomatazahl $p = 0,195$). Tendenziell war die Stomatazahl bei den Behandlungen RCP8.5_DS, RCP2.6/_DS, PC-PC um etwa 20 % höher als bei den anderen Behandlungen.

Charakterisierung von Blatt-/Nadelmerkmalen

- ▶ Während des Untersuchungszeitraums wurden ozonbedingte Symptome an der Belaubung bei Buchen und Fichten beobachtet. Im 1. Untersuchungsjahr 2019 traten Symptome nur in geringen Umfang auf, 2020 waren die Symptome deutlicher, 2021 schwächer ausgeprägt. Die Symptomausprägung zeigte sich unter den Gegenwertszenarien (Ozongradient) bei selten mehr als 5 % der lichtexponierten Belaubung. Im 2. Untersuchungsjahr (2020) war der Anteil symptomatischer Blätter bei den Zukunftsszenarien RCP2.6 und RCP8.5 mit 30 % bzw. 50 % der lichtexponierten Belaubung deutlich höher.
- ▶ Bei den Zukunftsszenarien RCP2.6 und RCP8.5 traten bei Fichten am häufigsten das Symptom „chlorotic mottling“, bei Buchen die Symptome „bronzing“, „stippling“ und „flecking“ auf. „Bronzing“-Symptome fanden sich 2020 auch im Gegenwartsklima mit erhöhter Ozonbelastung an über der Hälfte der Buchen.
- ▶ Die Chlorophyllgehalte (als SPAD-Wert) waren bei symptomatischen gegenüber symptomfreien Buchenblättern erniedrigt. Unter RCP8.5 wurden die niedrigsten Gehalte gemessen.
- ▶ Für Stomatagröße und -zahl bei Buchenblättern konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden.
- ▶ Die gemessenen Ozonaufnahmen (POD_1) lagen im Phytotronexperiment bei allen Behandlungen unter dem Critical Level für die Ozonbelastung. Eine Korrelation von ozonbedingten Belaubungsschäden oder reduzierter Chlorophyllgehalte mit den gemessenen POD_1 -Werten ließ sich nicht herstellen.

2.2 Einführung einer neuen Methode zur kontinuierlichen Messung der stomatären Ozonflüsse für Buchen und Fichten

2.2.1 Kalibrierung des TransP-Sensors gegen Hochpräzisionswägung

Voraussetzung für die Berechnung des stomatären Ozonflusses (F_{O_3}) ist die Bestimmung der Blattleitfähigkeit (g_{t,H_2O} , *total conductance*) gegenüber Wasserdampf. Die Blattleitfähigkeit gegenüber Ozon (g_{t,O_3}) ergibt sich aus der Multiplikation von g_{t,H_2O} mit dem Diffusivitätsverhältnis 0,663 (siehe Kapitel 2.3.1). g_{t,H_2O} wird jedoch nicht direkt gemessen, sondern aus Messungen der Transpirationsrate einzelner Blätter nach dem Formelwerk von Farquhar und Sharkey (1982) berechnet:

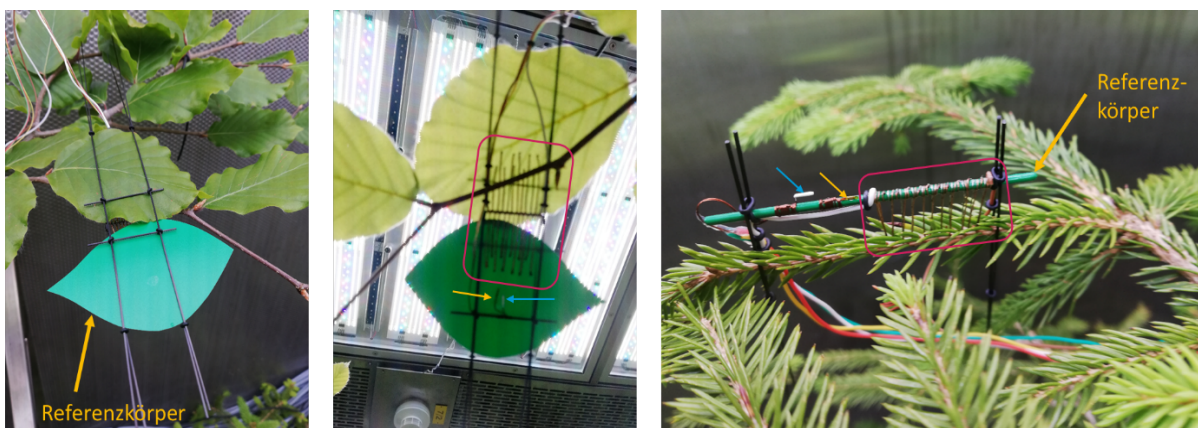
$$(2) \quad g_{t,H_2O} = \frac{E \cdot (P - \frac{e_i + e_a}{2})}{e_i - e_a} \quad [\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$$

wobei E die Transpiration und P der Luftdruck ist. e_i und e_a bezeichnen den Partialdruck von Wasserdampf innerhalb und außerhalb des Blattes.

Allerdings fehlen bisher technischen Möglichkeit zur kontinuierlichen Messung der Transpiration auf Einzelblattebene. Bisherige Ansätze zur Validierung des zur Risikobewertung genutzten Modells (CLRTAP 2017) basieren auf Messungen der Xylemflussdichte (z.B. Braun et al. 2010), aus der die Transpiration des gesamten Kronenraumes ermittelt und über die Berechnung der Kronenleitfähigkeit eine Ozonaufnahme abgeleitet werden kann (z.B. Wieser et al. 2003, Nunn et al. 2010). Zeit- und Blattflächenreferenzierung stellen bei diesem Ansatz häufig ein Problem dar. Im vorliegenden Projekt soll F_{O_3} erstmalig über eigens entwickelte Sensoren (TransP, Ecomatik GmbH, Dachau, Deutschland) kontinuierlich bestimmt werden (Abbildung 16). Die Sensoren erfassen mit einer zeitlichen Auflösung von wenigen Sekunden die Differenz (ΔT) zwischen der Temperatur eines Referenzkörpers (TR) und der Blatt- bzw.

Nadeltemperatur. Bei Buchen erfolgt die Temperaturmessung an der Blattunterseite, da fast der gesamte Blattgaswechsel über die sich an der Blattunterseite befindenden Stomata abläuft. Im Gegensatz dazu sind die Stomata der Fichte über die gesamte Nadeloberfläche verteilt, sodass die Messung an der Oberseite eines etwa 1 cm langen Zweigabschnitts erfolgt.

Abbildung 16: Aufbau des TransP-Sensors zur kontinuierlichen Messung der Transpiration



TR	Temperatur des Referenzkörpers
ΔT	$T_{\text{Blatt}} - TR$
TA	Temperatur in 1 mm Entfernung vom Referenzkörper (Lichtproxy)

Quelle: eigene Darstellung, TUM

Zusätzlich wird die Lufttemperatur in einer Distanz von ca. 1 mm zum Referenzkörper (TA) als Proxy der absorbierten Strahlungsenergie gemessen. Da die Temperatur eines Blattes im Wesentlichen von der Temperatur der Umgebungsluft, der absorbierten Strahlungsenergie und der Transpirationsrate abhängt (z.B. Jones 1999), lässt sich aus den gemessenen Größen eine empirische Beziehung zur gravimetrisch mittels Präzisionswaage bestimmten Transpirationsrate herstellen. Dazu wurde ein Buchenblatt bzw. ein etwa 10 cm langer Fichtenzweigabschnitt des vorjährigen Triebes von einem im Experiment verwendeten Baum geerntet und der Blattstiel bzw. ein Teil des Fichtenzweiges in ein mit Wasser gefülltes 50-ml-Zentrifugenröhrchen gegeben und mittels Dichtmasse (Terostat, Henkel, Deutschland) gasdicht verschlossen. Zum Druckausgleich zwischen Innerem und Äußerem des Röhrchens wurde eine Spritzenkanüle verwendet. Das Gefäß wurde auf einer Präzisionswaage (Secura 224-1S, Sartorius, Deutschland) platziert. Der Aufbau wurde gegen Erschütterung, Luftbewegung und rasche Temperaturschwankungen geschützt. Insgesamt wurde die Kalibrierung an 12 Buchenblättern und 10 Fichtenzweigabschnitten durchgeführt, jeweils über die Dauer von 10 Tagen. Allerdings wurden letztendlich nur Daten der jeweils ersten drei Tage verwendet, da die Vitalität der Probe über einen längeren Zeitraum nachließ. Es wurde jeweils eine Kalibrierfunktion für einzelne Buchenblätter und Fichtenzweigabschnitte abgeleitet:

$$(3) \quad E_{\text{Buche}} = 0,083 - 1,365 \cdot \Delta T - 0,023 \cdot (TR - TA) \quad [\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$$

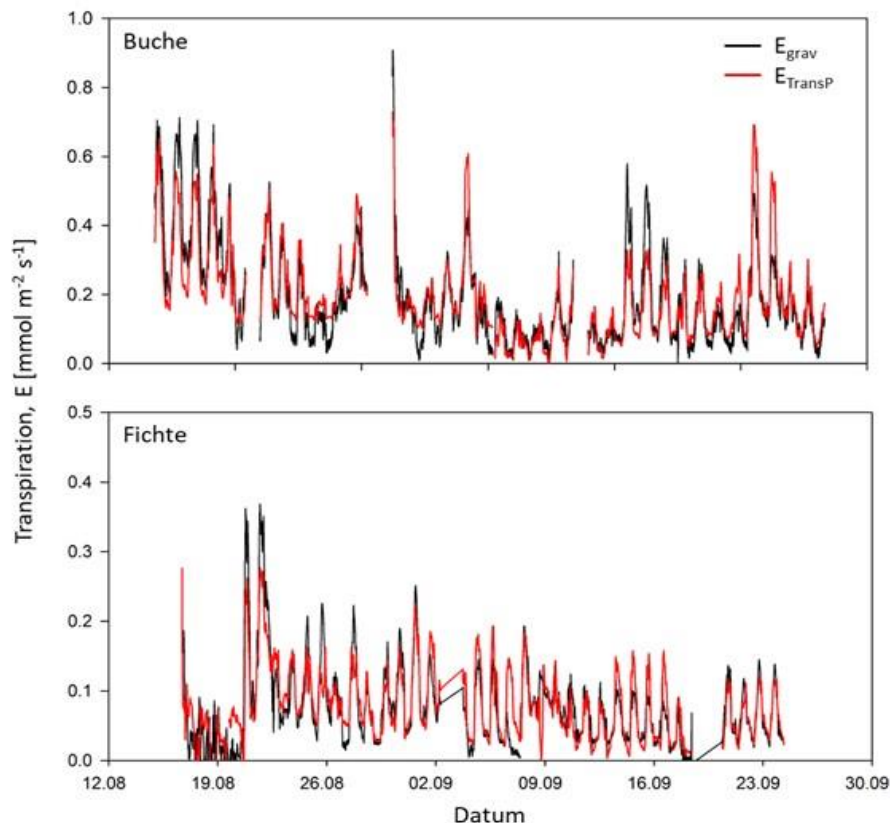
$$(4) \quad E_{\text{Fichte}} = 0,033 - 24,314 \cdot \frac{\Delta T}{(A_{\text{Nadel}}/L_{\text{Trieb}})^3} + 0,482 \cdot (TR - TA) \quad [\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}]$$

Bei Fichte war die Einführung eines die Nadeldichte repräsentierenden Terms notwendig, wobei A_{Nadel} [cm²] die Nadelfläche eines Triebes der Länge L_{Trieb} [cm] ist. Die Kalibrierung wurde 2019 und 2020 unter experimentellen Bedingungen in jeweils einer TUMmesa-Klimakammer durchgeführt. Abbildung 17 zeigt, dass Tagesgänge (stündliche Auflösung) der gravimetrisch gemessenen Transpiration (E_{grav}) sehr gut durch TransP-Messungen abgebildet werden konnten. Teilweise wurden Minima bzw. Maxima der Transpiration ober- oder unterschätzt. Im Mittel ließen sich aber 74 % (Buche, $r^2 = 0,74$) bzw. 84 % (Fichte, $r^2 = 0,84$) der Varianz in E_{grav} durch stündlich aufgelöste TransP-Messungen wiedergeben. Der mittlere relative Fehler stündlich gemittelter Werte relativ zu gravimetrisch gemessenen Werten liegt bei ± 32 % für Buche und ± 24 % für Fichte. Der relative Fehler ist somit höher als der von mittels Blattgaswechselsystemen durchgeführten Punktmessungen (mittlerer Fehler \pm Standardabweichung für g_s von etwa 2 ± 18 % für Li-6400 und 2 ± 8 % für Li-6800; Garen et al. 2022), und ist ungefähr vergleichbar mit der Genauigkeit von Eddy-Kovarianzmessungen der Evapotranspiration (Fehler von halbstündig gemittelten Werten ca. 20-30 %, (Moorhead et al. 2019). Allerdings lässt sich der Fehler durch die Vielzahl an parallel durchgeführten Messungen gut kompensieren, sodass über mehrere Sensoren gemittelte Werte eine hohe statistische Aussagekraft haben.

Aus der so bestimmten Transpiration lässt sich die Blattleitfähigkeit gegenüber Wasserdampf (g_{t,H_2O}) nach Gleichung 2 berechnen. Für P wurden Daten der hochpräzisen Luftdruckmessung des DWD am Flughafen München in etwa 6 km Entfernung verwendet.

Abbildung 17: Kalibrierung der TransP-Sensoren mittels Präzisionswägung

Auszug aus dem zur Kalibrierung der TransP-Sensoren herangezogenen Datensatz. Die schwarze Linie stellt den Verlauf der mittels Präzisionswaage gravimetrisch bestimmten Transpiration E_{grav} dar, die rote Linie die über die jeweilige Kalibrierfunktion aus den Messdaten der TransP-Sensoren abgeleitete Transpiration E_{TransP} .



Quelle: Ecomatik GmbH (2020)

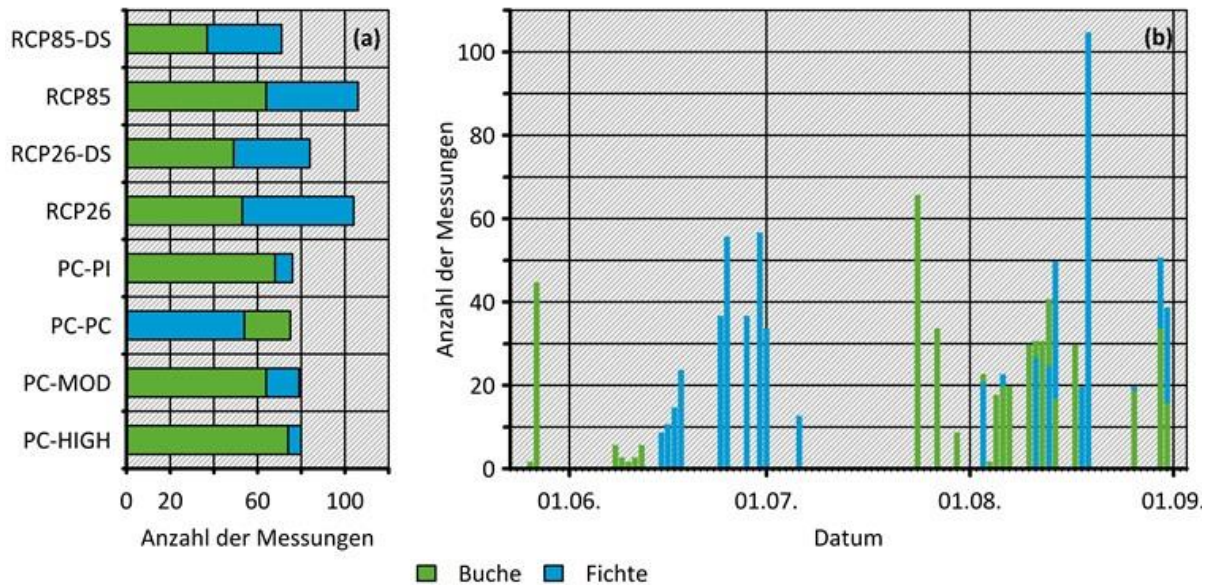
2.2.2 Referenzmessungen mit Li-6400/Li-6800 Gaswechselsystemen

Da es sich bei der Methode um eine Neuentwicklung handelt, war ein Vergleich mit bisherigen Referenzmethoden notwendig. Die blattflächenbezogene Transpirationsrate wird derzeit überwiegend mit mobilen Gaswechselsystemen über Infrarotgasanalysatoren gemessen (z.B. Li-6400/Li-6800, LI-COR Biosciences, Lincoln, USA). Diese Art der Messung erlaubt diskrete, sehr genaue Messungen der Blatttranspiration. Allerdings ist die angewandte Methode hochgradig invasiv, da hierzu ein Blatt in die künstliche Atmosphäre einer Messkuvette eingebracht werden muss und die Messung somit nicht unter ungestörten mikrometeorologischen Bedingungen stattfinden kann. Um eine genaue Messung gewährleisten zu können, ist zudem eine starke turbulente Durchmischung der Kuvettenluft notwendig, was eine Zerstörung der Grenzschichten an Blattober- und -unterseite zur Folge hat. Außerdem sind mit derartigen Systemen lediglich Punktmessungen möglich, nicht aber die kontinuierliche Erfassung der Transpiration. Hier liefern die TransP-Sensoren entscheidende Vorteile: sie sind nur minimal invasiv, da bei korrekter Installation nur wenige Berührungspunkte mit dem Messobjekt bestehen (siehe Abbildung 16). Weiterhin ermöglichen sie eine kontinuierliche und – bei der zeitgleichen Anwendung mehrerer Sensoren – parallele *in situ* Erfassung der Transpiration einer Vielzahl von Messobjekten unter ungestörten externen Bedingungen. Jedoch gehen diese offensichtlichen Vorteile zu Lasten der Genauigkeit ($\pm 32\%$ für Buche und $\pm 24\%$ relativer Fehler beim TransP), was sich allerdings durch die Vielzahl an parallel durchgeführten Messungen kompensieren lässt.

Um eine robuste Validierung der mittels TransP-Sensor erfassten Daten durchzuführen, erfolgten in den Jahren 2020 und 2021 aufwändige Referenzmessungen mit Li-6400 und Li-6800 Gaswechselsystemen. Insgesamt wurden 484 Messungen an Buche und 654 Messungen an Fichte durchgeführt (Abbildung 18). Die Referenzmessungen wurden an Blättern bzw.

Abbildung 18: Häufigkeit und zeitliche Verteilung der Transpirationsmessungen mittels Li-6400/Li-6800

Häufigkeit der Transpirationsmessungen 2020/2021 mittels Li-6400 an Buche und 2021 mittels Li-6800 an Fichte je nach Szenario (a) sowie zeitliche Verteilung der Messungen (b). Insgesamt wurden 484 Messungen an Buche und 654 Messungen an Fichte durchgeführt.

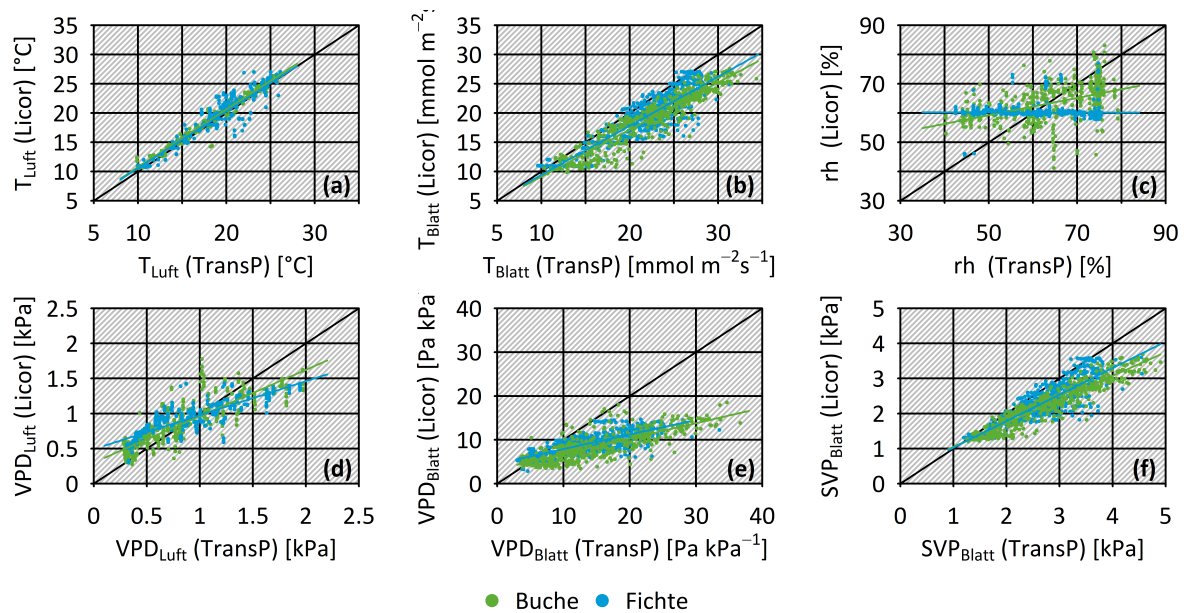


Quelle: eigene Darstellung, TUM

Zweigabschnitten durchgeführt, die in unmittelbarer Nähe zu den installierten TransP-Sensoren eine ähnliche Exposition und einen vergleichbaren Abstand zur Lichtquelle aufwiesen (für Fichte zusätzlich an Zweigabschnitten desselben Jahrgangs). Es wurde darauf geachtet, dass Abweichung in den mikroklimatischen Parametern zwischen Messküvette und Kammeratmosphäre so gering wie mögliche ausfielen (Abbildung 19). Die Lufttemperatur innerhalb der Licor-Messküvette wich kaum von der Temperatur der TUMmesa-Klimakammeratmosphäre ab (Abbildung 19a). Die Blatttemperatur des in der Licor-Küvette eingespannten Blattes lag generell unterhalb der mittels TransP gemessenen Temperatur (Abbildung 19b), was auf die starke Ventilation innerhalb der Messküvette zurückzuführen war. Die Luftfeuchte lässt sich im Li-6400 nicht automatisch regeln, wodurch sich deutliche Unterschiede zwischen relativer Luftfeuchte (Abbildung 19c) sowie dem Dampfdruckdefizit der Luft (Abbildung 19d) zur TUMmesa-Atmosphäre bei Messungen an Buche ergaben. Bei Fichte wurde die Luftfeuchte im Li-6800 auf konstante 60 % geregelt. Aus den Abweichungen der Blatttemperatur und der Luftfeuchte ergaben sich Abweichungen der Differenz im Dampfdruck zwischen Blatinnerem und -äußerem (Abbildung 19e) sowie des temperaturabhängigen Sättigungsdampfdrucks (Abbildung 19f). Da eine Licor-Messung jedoch nur etwa 3 Minuten in Anspruch nahm, die Anpassung der Stomata an veränderte Umweltbedingungen aber deutlich länger dauert, werden diese Unterschiede als für die Validierung unerheblich angesehen.

Abbildung 19: Korrelation mikrometeorologischer Größen bei parallelen Messungen mit Li-6400/Li-6800 und TransP

Dargestellt sind Lufttemperatur T_{Luft} (a), Blatttemperatur T_{Blatt} (b), relative Luftfeuchte rh (c), Dampfdruckdefizit der Luft VPD_{Luft} (Vapor Pressure Deficit) (d), das Dampfdruckdefizit zwischen Blattinnerem und der Atmosphäre VPD_{Blatt} (e) sowie der Sättigungsdampfdruck bei Blatttemperatur SVP_{Blatt} (Saturation Vapor Pressure) (f). $n = 484$ (Buche); $n = 654$ (Fichte).



Quelle: eigene Darstellung, TUM

2.2.3 Validierung des neuen Messverfahrens gegenüber Gaswechsellmessungen

10-Minuten-Mittelwerte der minütlich erfassten TransP-Daten wurden den entsprechenden Licor-Messungen zeitlich exakt zugeordnet (Abbildung 20a). Für Buche ergab sich eine signifikante lineare Korrelation ($p < 0,001$, $r^2 = 0,78$) zwischen der mittels TransP erfassten Transpiration (E_{TransP}) und der im Li-6400/Li-6800 gemessenen Transpiration (E_{Licor}); ähnliches ergab sich für Fichte ($p < 0,001$, $r^2 = 0,81$). Betrachtet man die Steigung der Korrelationsgeraden von 1,4 bzw. 2,9 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, so erscheint der dargestellte Zusammenhang zunächst nicht zufriedenstellend. Besonders auffällig sind die in der Regel höher gemessenen Transpirationsraten des Gaswechselsystems im Vergleich zum TransP. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass den mit Hilfe der unterschiedlichen Methoden bestimmten Transpirationsraten unterschiedliche Leitfähigkeiten zugrunde liegen. Die Leitfähigkeit eines Blattes gegenüber der Diffusion von Wasserdampf (g_t) ergibt sich aus der Summe der Leitfähigkeiten der Grenzschicht (*boundary layer conductance*, g_b) und der Stomata (g_s) (Martin et al. 1999). Dabei werden Leitfähigkeiten als deren Kehrwert (das entspricht jeweils dem Widerstand r) addiert

$$(5) \quad g_t^{-1} = g_b^{-1} + g_s^{-1}$$

(die kutikuläre Leitfähigkeit ist für die beschriebene Anwendung vernachlässigbar). g_b bezeichnet die Leitfähigkeit der Grenzschicht gegenüber Wasserdampf und hängt von der Mächtigkeit der Grenzschicht ab. Je mächtiger die Grenzschicht, desto geringer deren Leitfähigkeit. Dabei wird g_b neben Blattgröße und -geometrie maßgeblich durch die Windgeschwindigkeit bestimmt. Die hohe turbulente Ventilation innerhalb der Küvette des Li-6400/Li-6800 führt dazu, dass die Grenzschicht nahezu vollständig zerstört wird und g_b extrem hoch ist ($> 2 \text{ mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). In diesem Fall stellt die Grenzschicht einen vernachlässigbaren Teil des Diffusionspfades von Wasserdampf aus dem Blattinneren in die Atmosphäre dar, und die

Wasserdampfdiffusion wird fast ausschließlich durch g_s limitiert. Im Gegensatz dazu ist die Windgeschwindigkeit in den TUMmesa Klimakammern sehr gering ($<0,1 \text{ m s}^{-1}$ laut Hersteller), was die Ausbildung einer relativ mächtigen Grenzschicht und somit eine geringe g_b zur Folge hat. Um den Effekt von g_b auf die Differenz zwischen E_{TransP} und E_{Licor} (berechnet als $\Delta E = E_{\text{Licor}} - E_{\text{TransP}}$) zu untersuchen, wurde g_b nach entsprechend umgestellter Gleichung 5 berechnet, wobei g_s als die im Li-6400/Li-6800 gemessene und g_t als die zeitgleich mittels TransP bestimmte Leitfähigkeit angenommen wurde. Es zeigte sich, dass hohe positive Werte für ΔE bei $g_b < 0,1 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ auftraten (

Abbildung 20b). Ging g_b gegen 0, stieg ΔE weiter stark exponentiell an. Bei $g_b > 0,2 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ lag ΔE nahe 0, bzw. war leicht negativ. Es wird gefolgert, dass ab diesem Wert g_b die Wasserdampfdiffusion nicht mehr dominant limitierte. Aus diesen Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass mit abnehmendem g_b eine zunehmende Entkoppelung zwischen g_s und Transpiration stattfand und die Wasserdampfdiffusion in zunehmendem Maße durch g_b statt g_s limitiert wurde. Da g_b nur für den TransP-Sensor eine Rolle spielte, nicht aber für Licor-Messungen, kam es zu den dargestellten, teils großen Unterschieden zwischen E_{TransP} und E_{Licor} bei geringem g_b . Über den Entkoppelungsfaktor Ω (

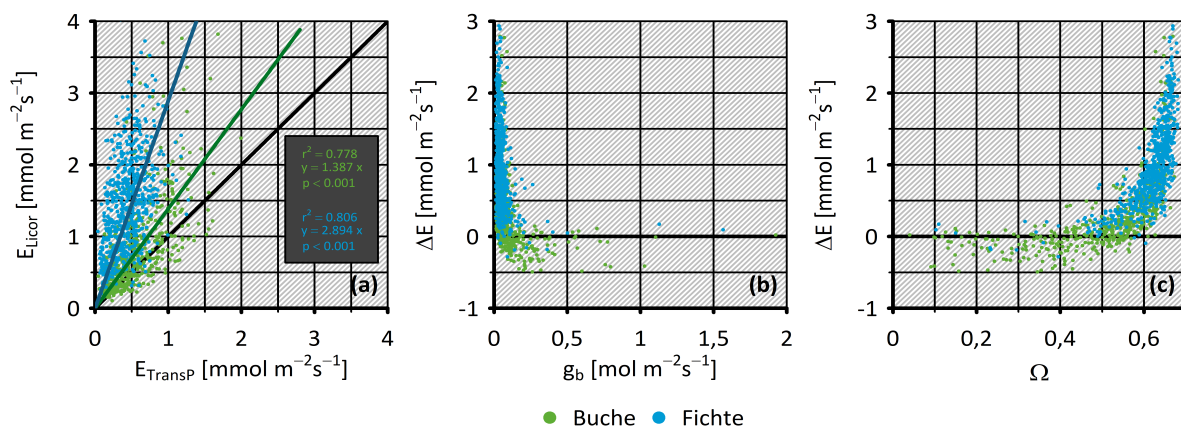
Abbildung 20c) lässt sich der Grad der Entkoppelung zwischen g_s und Transpiration quantifizieren (Martin et al. 1999, McNaughton und Jarvis 1983):

$$(6) \quad \Omega = \frac{s/\gamma + 2}{s/\gamma + 2 + g_b/g_s}$$

wobei s die Steigung der Kurve des gegen die Temperatur aufgetragenen Sättigungsdampfdrucks darstellt und γ die psychrometrische Konstante ist. Es zeigte sich, dass bei zunehmendem Ω – d.h. zunehmender Entkoppelung der mittels TransP gemessenen Transpiration von g_s (also zunehmendem Einfluss von g_b) – die Differenz zwischen E_{TransP} und E_{Licor} kurvilinear ansteigt. Ab einem Ω von etwa 0,6 wurde E maßgeblich durch g_b limitiert – E_{TransP} war also zu einem hohen Grad von g_s entkoppelt.

Abbildung 20: Zusammenhang zwischen mittels Licor und TransP gemessener Transpiration, Grenzschichtleitfähigkeit und Entkoppelungsfaktor Ω

(a) Vergleich von mittels TransP gemessener Transpiration (E_{TransP}) zur Gaswechselmessung mittels Li-6400/Li-6800 (E_{Licor}). (b) Differenz der mit unterschiedlichen Methoden bestimmten Transpiration $\Delta E (= E_{\text{Licor}} - E_{\text{TransP}})$ in Abhängigkeit von der Grenzschichtleitfähigkeit g_b . (c) Einfluss des Grades der Entkopplung zwischen E_{TransP} und g_s (dargestellt als Entkoppelungsfaktor Ω) auf ΔE . Bei niedrigem Ω ist der Einfluss von g_b auf E_{TransP} gering, d.h. E_{TransP} wird maßgeblich durch die stomatäre Öffnungsweite – also g_s – bestimmt (bei $\Omega < 0,4$). Bei zunehmendem Ω steigt der Einfluss von g_b , bis E_{TransP} ab einem Ω von $> 0,6$ dominant von g_b limitiert wird.



Quelle: eigene Darstellung, TUM

2.2.4 Geltungsbereich der TransP-Sensoren

Da die Temperatursensoren der TransP-Sensoren empirisch auf die Transpirationsrate kalibriert wurden (siehe 2.2.2), ist die Validität der Sensoren hinreichend gegeben, was in obiger Analyse belegt wurde (siehe 2.2.3).

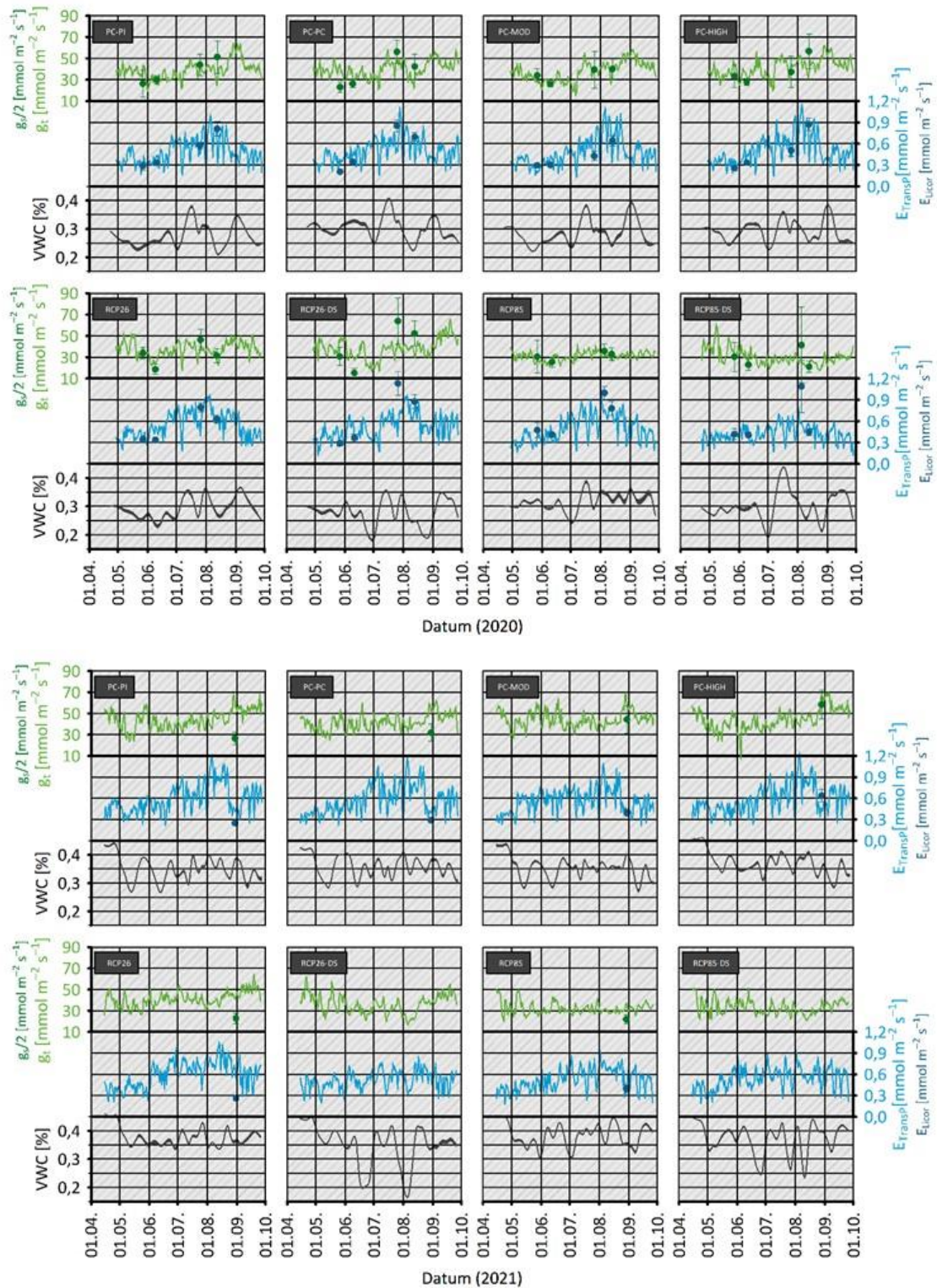
Es ergaben sich in der Praxis gewisse Einschränkungen der Gültigkeit des nach Gleichung 2 berechneten g_{t,H_2O} . Da ein enger exponentieller Zusammenhang zwischen nächtlichem g_t und VPD besteht, lassen geringfügige Messabweichungen und Ungenauigkeiten in der Berechnung g_t bei VPD $< 0,4$ kPa und gleichzeitigem PPFD $< 25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ überproportional ansteigen. Für das vorliegende Projekt ist dieser Sachverhalt unerheblich, da in folgende Auswertungen nur Werte bei PPFD $\geq 25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ eingehen.

2.2.5 Saisonaler Verlauf von Transpiration und Blattleitfähigkeit

Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen den kontinuierlich zeitlichen Verlauf von VWC, E_{TransP} und g_t der Versuchsjahre 2020 und 2021 für Buche bzw. Fichte. Die Reaktion der mittels TransP bestimmten Größen E_{TransP} und g_t auf verringerten VWC in den Behandlungen RCP2.6_DS und RCP8.5_DS ist nicht ganz eindeutig. Grund dafür ist die geringe Grenzschichtleitfähigkeit g_b , wodurch Stomatareaktionen auf verminderte Wasserverfügbarkeit teilweise maskiert werden. Aus den Abbildungen ist ersichtlich, dass der Trend des zeitlichen Verlaufs von E_{TransP} durch E_{Licor} bzw. g_t durch g_s bestätigt wird. g_s ist gegenüber g_t skaliert dargestellt, da g_s im Mittel um etwa das Zweifache (Buche) bzw. Vierfache (Fichte) größer war als g_t .

Abbildung 21: Saisonaler Verlauf von Bodenfeuchte, Transpiration und Leitfähigkeit von Buche

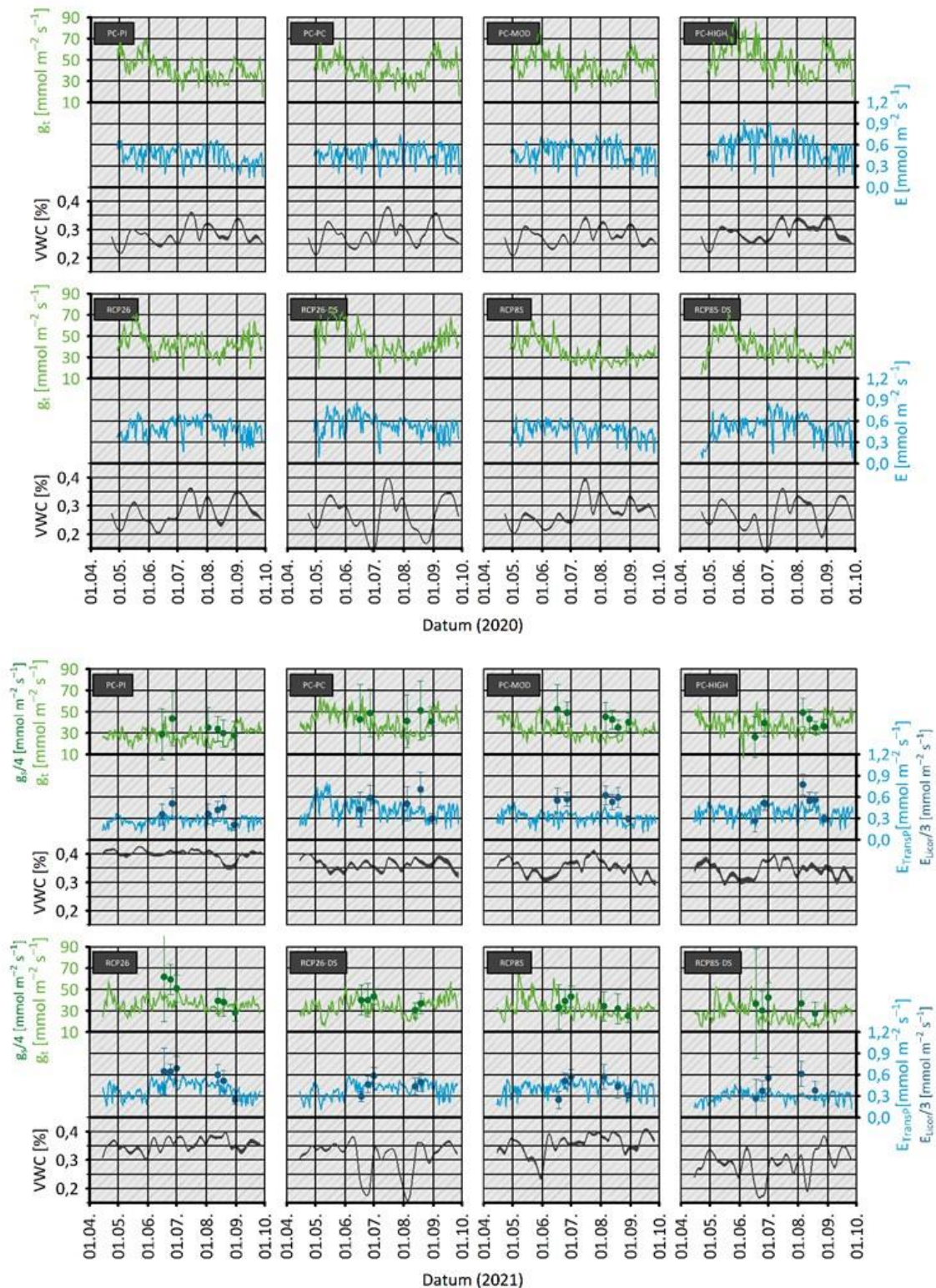
Verlauf von Tagesmittelwerten (bei $\text{PPFD} \geq 25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) von Bodenfeuchte (VWC, Volumetric Water Content) und mittels TransP gemessener Transpiration (E_{TransP}) und Blattleitfähigkeit (g_t) von Buche in den verschiedenen Szenarien über die Versuchsjahre 2020 (obere acht Grafiken) und 2021 (untere acht Grafiken). Zusätzlich sind mittels LI-6400 gemessene Transpiration (E_{Licor}) und stomatare Leitfähigkeit (g_s) abgebildet. g_s ist gegenüber g_t skaliert dargestellt, um einen visuellen Vergleich der zeitlichen Verläufe der beiden Größen zu ermöglichen. Licor-Daten sind jeweils über zwei bis vier Tage gemittelt dargestellt.



Quelle: eigene Abbildung, TUM

Abbildung 22: Saisonaler Verlauf von Bodenfeuchte, Transpiration und Leitfähigkeit von Fichte

Verlauf von Tagesmittelwerten von Bodenfeuchte (VWC, *Volumetric Water Content*) und mittels TransP gemessener Transpiration (E_{TransP}) und Blattleitfähigkeit (g_s) von Fichte in den verschiedenen Szenarien über die Versuchsjahre 2020 (obere acht Grafiken) und 2021 (untere acht Grafiken). Zusätzlich sind mittels LI-6400 gemessene Transpiration (E_{Licor}) und stomatare Leitfähigkeit (g_s) abgebildet. g_s ist gegenüber g_t skaliert dargestellt, um einen visuellen Vergleich der zeitlichen Verläufe der beiden Größen zu ermöglichen. Licor-Daten sind jeweils über zwei bis vier Tage gemittelt dargestellt.



Quelle: eigene Abbildung, TUM

TransP: ein neuer Sensor zur kontinuierlichen Erfassung der Transpiration auf Einzelblattebene

- Über artspezifische Kalibrierfunktionen kann die Transpiration aus im Blattraum gemessenen Temperaturen bestimmt werden.
- Aus der Transpiration lässt sich die Blattleitfähigkeit gegenüber Wasserdampf und Ozon berechnen.
- Bei Berücksichtigung der geringen Grenzschichtleitfähigkeiten in den TUMmesa Klimakammern ergibt sich ein hoher Grad an Übereinstimmung mit mittels Blattgaswechsellmessungen bestimmter stomatärer Leitfähigkeit.
- Der mittlere relative Fehler der TransP-Sensoren im Vergleich zu gravimetrisch bestimmter Transpiration beträgt ± 32 % für Buche und ± 24 % für Fichte, was im Fehlerbereich anderer Methoden zur Bestimmung der Transpiration liegt.
- Der TransP-Sensor bietet die bisher einzigartige Möglichkeit, die in-situ Transpiration von Buchenblättern und Fichtenzweigabschnitten kontinuierlich mit hinreichender Genauigkeit zu bestimmen.

2.3 Berechnung stomatärer Ozonflüsse

2.3.1 Kontinuierliche Bestimmung stomatärer Ozonflüsse mittels TransP-Sensor

Aus den Messsignalen der TransP-Sensoren wurde über die Kalibrierfunktionen (Gleichung 3 bzw. 4) eine Transpirationsrate E ermittelt. Aus dieser Größe wurde die Gesamtleitfähigkeit gegenüber Wasserdampf g_{t,H_2O} berechnet (Gleichung 2). Die stomatäre Leitfähigkeit gegenüber Ozon wurde berechnet zu:

$$(7) \quad g_{t,O_3} = g_{t,H_2O} \cdot 0,663 \quad [\text{nmol m}^{-2} \text{ PLA s}^{-1}]$$

Der Faktor 0,663 beschreibt die relative Diffusivität von Ozon im Vergleich zu Wasserdampf (Grünhage et al. 2012). Der stomatäre Ozonfluss F_{O_3} ergibt sich durch Multiplikation von g_{t,O_3} mit der externen Ozonkonzentration $[O_3]$ [$\text{ppb} = \text{nmol mol}^{-1}$].

$$(8) \quad F_{O_3} = g_{t,O_3} \cdot [O_3] \quad [\text{nmol m}^{-2} \text{ PLA s}^{-1}]$$

Zur Berechnung des POD_Y wurden stündlich gemittelte Tageslichtwerte von F_{O_3} oberhalb eines Schwellenwertes von $Y \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ über die Vegetationsperiode hinweg aufsummiert, wobei $F_{O_3} - Y < 0$ gleich 0 gesetzt wurden:

$$(9) \quad POD_Y = \sum (F_{O_3} - Y) \cdot 3600 \cdot 10^{-6} \quad [\text{mmol m}^{-2} \text{ PLA}]$$

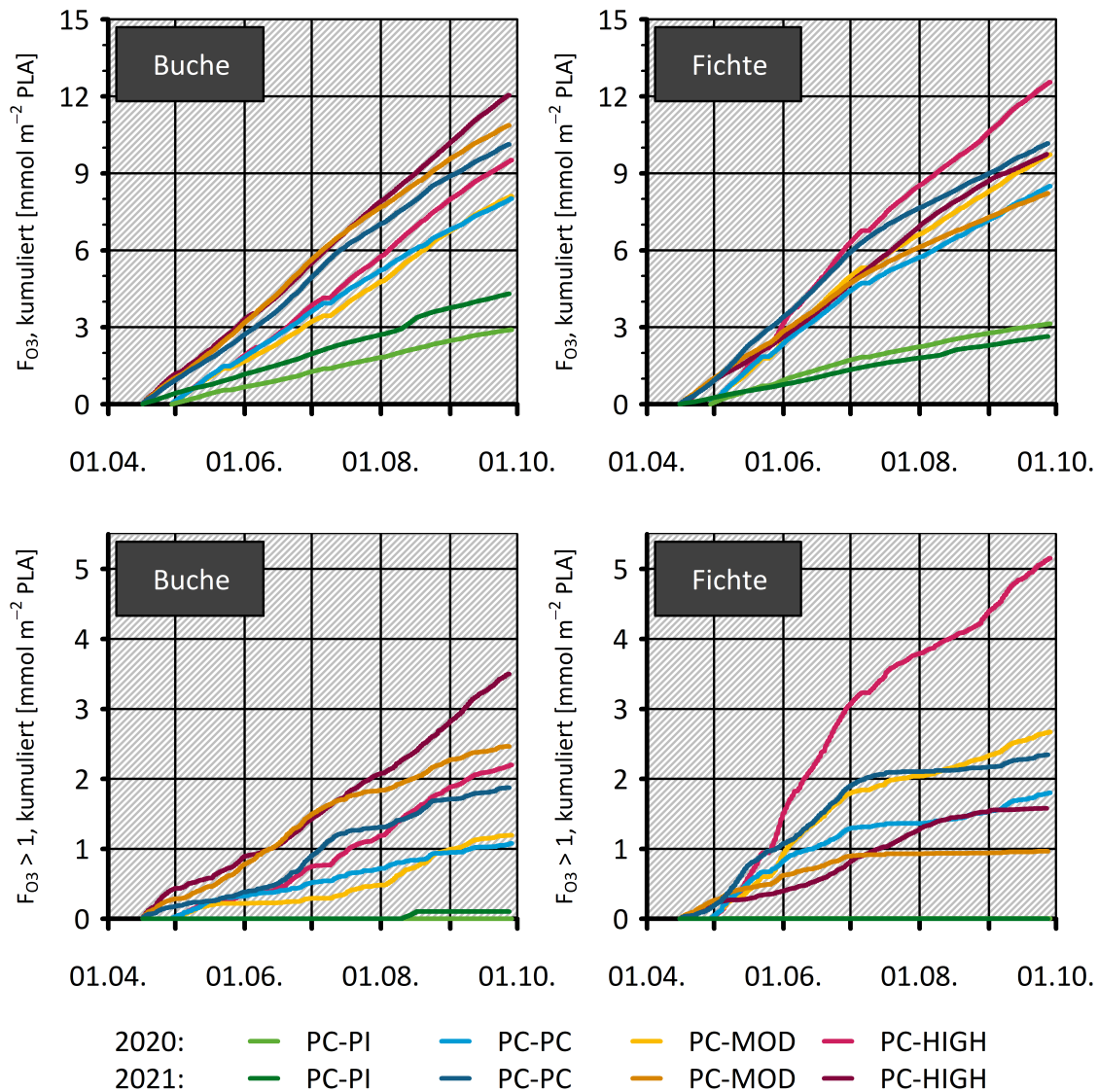
Dabei wurden nur Messwerte bei einer Lichtintensität von $PPFD \geq 25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ berücksichtigt, da zuverlässige Messungen der Lichtintensität nur ab einer LED-Anforderung von 3 % der Gesamtleistung (entspricht etwa $24 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ PPFD) möglich sind.

Abbildung 23 zeigt den Verlauf der kumulierten stomatären Ozonflüsse F_{O_3} von Buche und Fichte für die Jahre 2020 und 2021 des Ozongradienten. Generell wurden für Buche 2021 höhere POD_Y s erreicht (Tabelle 5), da bereits zwei Wochen früher in der Vegetationsperiode Messdaten aufgezeichnet werden konnten. 2020 erfolgte die Datenaufnahme zwischen dem 29.04. und dem 28.09., 2021 zwischen dem 15.04. und dem 27.09.. Für Fichte sind, trotz der längeren Messperiode, die 2021 gemessenen Werte eher geringer als die von 2020. Insgesamt wurde im letzten Versuchsjahr eine verminderte Vitalität der Fichten festgestellt, sodass die

über alle Szenarien gemittelte $g_{t,03}$ um signifikante 22,5 % geringer war als 2020. Bei Buche betrug der Unterschied zwischen den Jahren lediglich 7,1 %. Die errechneten POD_{YS} werden im Folgenden zur Validierung des auf dem im Mapping Manual (CLRTAP 2017) beschriebenen Ansatz beruhenden FO_3 REST-Models (VDI 2310 Blatt 6 2020; zur Bezugsquelle der Programmdateien siehe Kapitel 2.6) herangezogen.

Abbildung 23: Verlauf des mittels TransP bestimmten kumulierten stomatären Ozonflusses F_{O_3}

Zeitlicher Verlauf der zu POD_0 kumulierten Ozonflüsse F_{O_3} (oben) sowie der zu POD_1 kumulierten Ozonflüsse $F_{O_3>1}$ (unten) der Versuchsjahre 2020 und 2021 für Buche und Fichte im Ozongradienten. Werte wurden über alle Wiederholungen hinweg gemittelt.



Quelle: eigene Darstellung, TUM

Tabelle 5: Mittels TransP berechnete POD_{ys}

POD₀ und POD₁ der Jahre 2020 und 2021 für Buchen und Fichten im Ozongradienten. Werte wurden über alle Wiederholungen hinweg gemittelt.

Szenario	POD ₀ [mmol m ⁻² PLA]		POD ₁ [mmol m ⁻² PLA]	
	Buche			
	2020	2021	2020	2021
PC-PI	2,91	4,30	0,00	0,10
PC-PC	8,01	10,13	1,08	1,87
PC-MOD	8,11	10,87	1,20	2,47
PC-HIGH	9,51	12,05	2,20	3,50
	Fichte			
	2020	2021	2020	2021
PC-PI	3,14	2,64	0,00	0,00
PC-PC	8,50	10,16	1,80	2,34
PC-MOD	9,73	8,22	2,67	0,97
PC-HIGH	12,56	9,75	5,15	3,47

Quelle: eigene Darstellung, TUM

2.3.2 Modellierung stomatärer Ozonflüsse über das FO₃REST Modell

2.3.2.1 Berechnung von g_s

POD_YSPEC wurde über das FO₃REST-Modell (VDI 2310 Blatt 6 2020) auf Grundlage des in Kapitel 3 des Mapping Manual (CLRTAP 2017) ausführlich beschriebenen Ansatzes modelliert. Da der Versuch in den TUMmesa Klimakammern durchgeführt wurde, und daher von einer homogenen Verteilung aller relevanten mikrometeorologischen Größen ausgegangen wird, wird im Folgenden keine Höhenskalierung vorgenommen. Zunächst wird die Stomataleitfähigkeit g_s [nmol O₃ m⁻² PLA s⁻¹] auf Einzelblatt- bzw. Zweigabschnittebene im oberen Kronenbereich über eine angepasste Jarvis-Stewart-Funktion (Jarvis 1976, erweitert nach Emberson et al. 2000a,b, 2007, Büker et al. 2015) ermittelt.

$$(10) \quad g_{s,O_3} = g_{\max} \cdot [\min(f_{\text{phen}}, f_{O_3})] \cdot f_{\text{light}} \cdot \max\{f_{\min}, (f_{\text{temp}} \cdot f_{\text{VPD}} \cdot f_{\text{PAW}})\}$$

g_{s,O₃} ist die stomatäre Leitfähigkeit gegenüber Ozon. g_{max} ist die artspezifische maximale Stomataleitfähigkeit gegenüber Ozon. Die Parameter f_{phen}, f_{O₃}, f_{light}, f_{temp}, f_{VPD} und f_{PAW} werden relativ zu g_{max} ausgedrückt und können Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Mit diesen Parametern lässt sich der Einfluss externer Größen auf die stomatäre Leitfähigkeit abschätzen für Wachstumsstadien wie Blüte, Ruhephase oder Phänologie (f_{phen}), die O₃-Dosis (f_{O₃}, bisher nur für Getreide implementiert), sowie die Umweltgrößen Licht (f_{light}), Temperatur (f_{temp}), Dampfdruckdefizit der Luft (f_{VPD}) und pflanzenverfügbares Bodenwasser (f_{PAW}, kann auch über das Wasserpotential des Bodens als f_{sw} eingehen). f_{min} ist die minimale Stomataleitfähigkeit am Tag relativ zu g_{max}.

2.3.2.1.1 f_{phen}

Die Phänologiefunktion f_{phen} besteht aus Termen, die $g_{s,03}$ in Abhängigkeit von der Abfolge phänologischer Stadien relativ zu g_{max} skaliert:

Wenn $yd \leq A_{start_FD}$

$$(11) \quad f_{phen} = f_{phen_a}$$

wenn $A_{start_FD} \leq yd < (A_{start_FD} + f_{phen_1_FD})$

$$(12) \quad f_{phen} = (1 - f_{phen_a}) \cdot ((yd - A_{start_FD}) / f_{phen_1_FD}) + f_{phen_a}$$

wenn $(A_{start} + f_{phen_1_FD}) \leq yd \leq (A_{end_FD} - f_{phen_4_FD})$

$$f_{phen} = 1$$

wenn $(A_{end_FD} - f_{phen_4_FD}) < yd < A_{end_FD}$

$$(13) \quad f_{phen} = (1 - f_{phen_e}) \cdot ((A_{end_FD} - yd) / f_{phen_4_FD}) + f_{phen_e}$$

wenn $yd \geq A_{end_FD}$

$$(14) \quad f_{phen} = f_{phen_e}$$

yd ist der Tag des Jahres (*year day*, in diesem Bericht auch als Tag des Jahres, TdJ , bezeichnet); A_{start_FD} und A_{end_FD} stehen für Beginn und Ende der potentiellen Ozonakkumulation (ausgedrückt als Tage des Jahres; *FD: fixed number of days*); f_{phen_a} und f_{phen_e} skalieren g_{max} zu den Zeitpunkten A_{start_FD} und A_{end_FD} . $f_{phen_1_FD}$ und $f_{phen_4_FD}$ bezeichnen jeweils die Anzahl der Tage zwischen Beginn und Ende des Austriebs bzw. zwischen Beginn und Ende der Seneszenz.

Für Fichte gilt übergeordnet:

wenn die gemessene Lufttemperatur $t_a > 0$

$$f_{phen} = 1$$

2.3.2.1.2 f_{light}

f_{light} beschreibt die Lichtabhängigkeit von $g_{s,03}$:

$$(15) \quad f_{light} = 1 - \exp(-light_a \cdot PPFD)$$

wobei PPFD die photosynthetisch aktive Photonenflussdichte [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$] darstellt.

2.3.2.1.3 f_{temp}

Die Temperaturabhängigkeit von $g_{s,03}$ wird über die Parameter t_{min} und t_{max} (Minimum- und Maximumtemperatur, bei der Stomataschluss auftritt) sowie t_{opt} (Optimumtemperatur) beschrieben:

wenn $t_{min} < t_a < t_{max}$

$$(16) \quad f_{temp} = \max \{f_{min}, [(t_a - t_{min}) / (t_{opt} - t_{min})] \cdot [(t_{max} - t_a) / (t_{max} - t_{opt})]^{bt}\}$$

wenn $t_{min} > t_a > t_{max}$

$$(17) \quad f_{temp} = f_{min}$$

bt errechnet sich zu:

$$(18) \quad bt = (t_{max} - t_{opt}) / (t_{opt} - t_{min})$$

t_a bezeichnet die gemessene Lufttemperatur.

2.3.2.1.4 f_{VPD}

Die Reaktion von $g_{s,03}$ auf Änderungen des atmosphärischen Wassergehalts wird über dessen Abhängigkeit von VPD (berechnet nach Campbell & Norman 2000) dargestellt. Ab dem Schwellenwert VPD_{max} verringert sich $g_{s,03}$ mit zunehmenden VPD und erreicht f_{min} bei VPD_{min} :

$$(19) \quad f_{VPD} = \min\{1, \max[f_{min}, ((1-f_{min}) \cdot (VPD_{min} - VPD) / (VPD_{min} - VPD_{max})) + f_{min}]\}$$

2.3.2.1.5 f_{PAW}

PAW repräsentiert den pflanzenverfügbaren Teil der Bodenfeuchte und wird in Prozent [%] angegeben. Bei PAW = 100 % hat der Boden Feldkapazität (FK) und erreicht bei 0 % den permanenten Welkepunkt (WP). PAW errechnet sich zu:

$$(20) \quad PAW = (VWC - WP) / (FK - WP) \cdot 100 \quad [\%]$$

PAW kann nur Werte zwischen 0 und 100 annehmen. VWC bezeichnet den aktuellen volumetrischen Bodenwassergehalt. PAW_t ist der Parameter der Schwellenwertfunktion. Oberhalb von PAW_t ist $f_{PAW} = 1$, darunter nimmt $g_{s,03}$ in Abhängigkeit von PAW ab:

Wenn $PAW_t \leq PAW \leq 100 \%$

$$f_{PAW} = 1$$

Wenn $PAW < PAW_t$

$$(21) \quad f_{PAW} = 1 + \{(PAW - PAW_t) / PAW_t\}$$

2.3.2.2 Berechnung von F_{O_3}

Um den stomatären Ozonfluss analog zu Gleichung 8 zu berechnen, müssen zusätzlich zu $g_{s,03}$ der quasi-laminare Grenzschichtwiderstand $r_b (= g_b^{-1})$ und der Blattoberflächenwiderstand r_c berücksichtigt werden. Die notwendige Umrechnung von $g_{s,03}$ von der Einheit $mmol m^{-2} s^{-1}$ in $m s^{-1}$ erfolgt (bei angenommenen Standardbedingungen von $t_a = 20^\circ C$ und $P = 1013 hPa$) über eine Division mit 41000.

$$(22) \quad r_c = 1 / (g_{s,03} + g_{ext}) \quad [s m^{-1}]$$

mit der externen (kutikularen) Leitfähigkeit

$$(23) \quad g_{ext} = 1/2500 \quad [m s^{-1}]$$

r_b berechnet sich unter Berücksichtigung der artabhängigen, charakteristischen Blattlänge L [m] und der Windgeschwindigkeit u [$m s^{-1}$] zu:

$$(24) \quad r_b = 1,3 \cdot 150 \cdot \sqrt{L/u} \quad [s m^{-1}]$$

Für F_{O_3} ergibt sich analog zu Gleichung 8:

$$(25) \quad F_{O_3} = [O_3] \cdot g_{s,03} \cdot \frac{r_c}{r_b + r_c} \quad [nmol m^{-2} s^{-1}]$$

Abschließend wird POD_Y über Gleichung 9 berechnet, wobei nur Werte bei $PPFD \geq 25 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ eingehen.

2.3.2.3 Parametrisierung nach Mapping Manual

Um die Validität des aktuell im Mapping Manual vorgeschlagen Parametersatzes (Tabelle 6) zu überprüfen, wurden POD_0 und POD_1 für den Zeitraum der Vegetationsperioden 2020 und 2021

modelliert, für den mittels TransP-Sensor gemessene POD_y vorlagen (siehe 2.3.1). f_{PAW} wurde bisher nicht für Waldbäume parametrisiert, und der Parameter $PAW_t = 50 \%$ wurde von Weizen übernommen. Beginn und Ende der Vegetationsperiode (A_{start_FD} und A_{end_FD}) wurden über ein angepasstes Breitengradmodell (Grünhage & Bender 2017) für den Versuchsstandort ermittelt. Als Windgeschwindigkeit u wurde zunächst das für TUMmesa spezifizierte Maximum von $0,1 \text{ m s}^{-1}$ angenommen.

Tabelle 6: Parametersatz nach Mapping Manual (CLRTAP 2017)

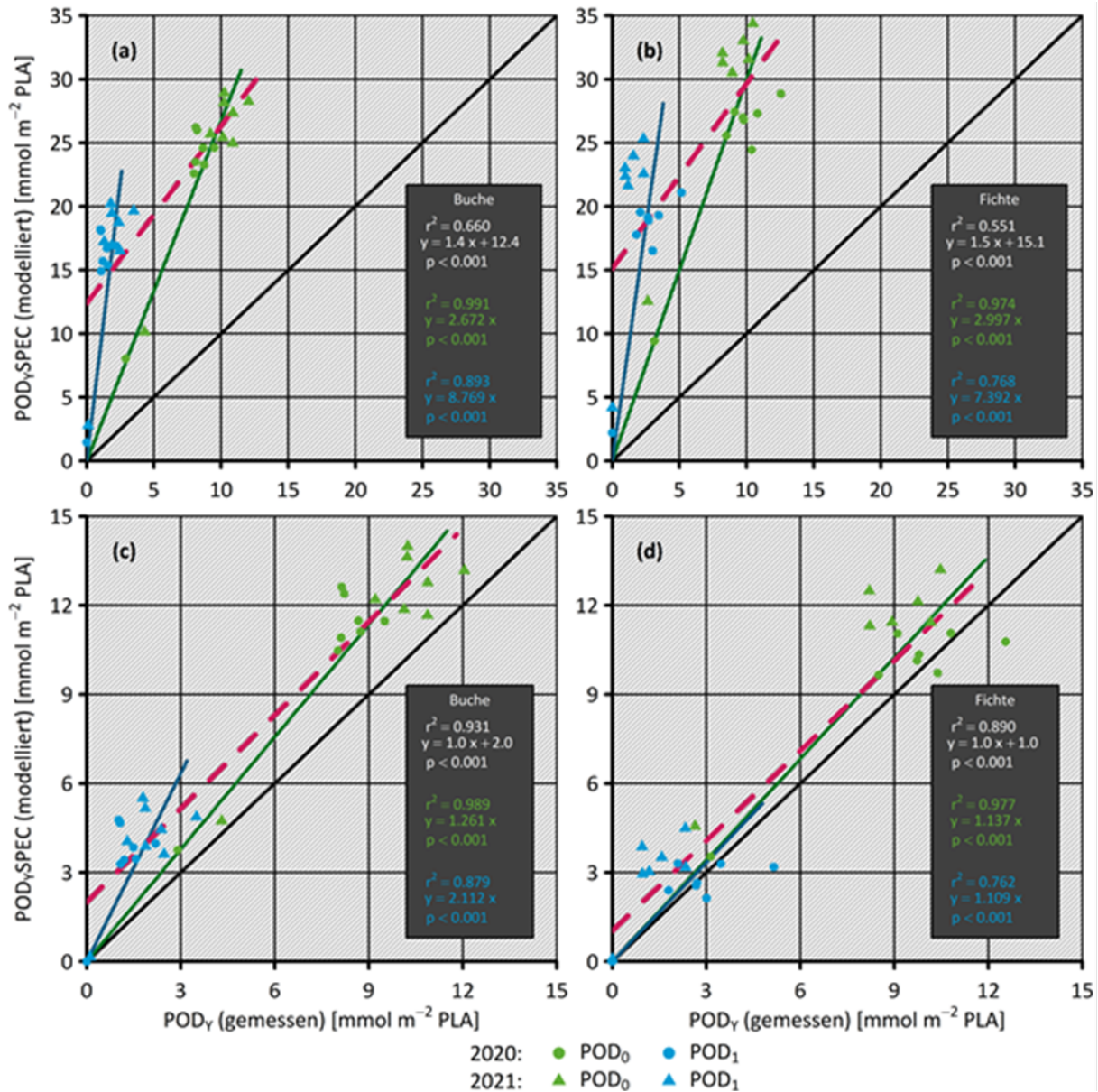
Erweitert um PAW_t ; Parameterwert übernommen von Weizen.

Parameter	Einheit	Artspezifische Parametrisierung	
Art		Buche	Fichte
g_{max}	$\text{mmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	155	130
f_{min}		0,13	0,16
$light_a$		-0.006	-0.01
T_{min}	°C	5	0
T_{opt}	°C	16	14
T_{max}	°C	33	35
VPD_{max}	kPa	1	0,5
VPD_{min}	kPa	3,1	3
PAW_t	%	50	50
A_{start_FD}	Tag des Jahres	109	109
A_{end_FD}	Tag des Jahres	304	304
Blattdimension	cm	7	0,8
f_{phen_a}		0	0
f_{phen_c}		1	1
f_{phen_e}		0,4	0
$f_{phen_1_FD}$	Tage	20	0
$f_{phen_4_FD}$	Tage	20	0

Quelle: eigene Darstellung, TUM

Abbildung 24: Korrelation zwischen gemessenem und modelliertem POD_Y

Abgebildet sind gemessene (TransP-Sensor) bzw. modellierte (FO_3REST) POD_0 - und POD_1 -Werte der Jahre 2020 und 2021 (für jede Behandlung über alle Wiederholungen gemittelt) für Buche (a, c) und Fichte (b, d). Die 1:1-Linie ist schwarz dargestellt. Die gestrichelte rote Linie zeigt die gemeinsame Korrelation für POD_0 und POD_1 (Parameter in weißer Schrift); die grüne und blaue Linie zeigen die Korrelationen separat für POD_0 und POD_1 (jeweils durch den Ursprung, Parameter in grüner bzw. blauer Schrift). (a, b) Parametrisierung nach Mapping Manual (Tabelle 6) mit $u = 0,1 \text{ m s}^{-1}$ (entspricht $r_b = 163 \text{ s m}^{-1}$ bei Buche und $r_b = 55 \text{ s m}^{-1}$ bei Fichte). (c, d) Parametrisierung nach Mapping Manual (Tabelle 6) mit $r_b = 722 \text{ s m}^{-1}$ (Buche) bzw. 749 s m^{-1} (Fichte).



Quelle: eigene Darstellung, TUM

Auf Grundlage dieser Eingangsgrößen wurden POD_0SPEC und POD_1SPEC sowohl für Buche (Abbildung 24a) als auch für Fichte (Abbildung 24b) im Modell deutlich höhere Werte berechnet – im Mittel um mehr als das 7-fache im Vergleich zu den gemessenen Werten. Als Ursache dafür wurde der über die Windgeschwindigkeit von $0,1 \text{ m s}^{-1}$ stark unterschätzte Grenzschichtwiderstand r_b von 163 s m^{-1} (Buche) bzw. 55 s m^{-1} (Fichte) identifiziert.

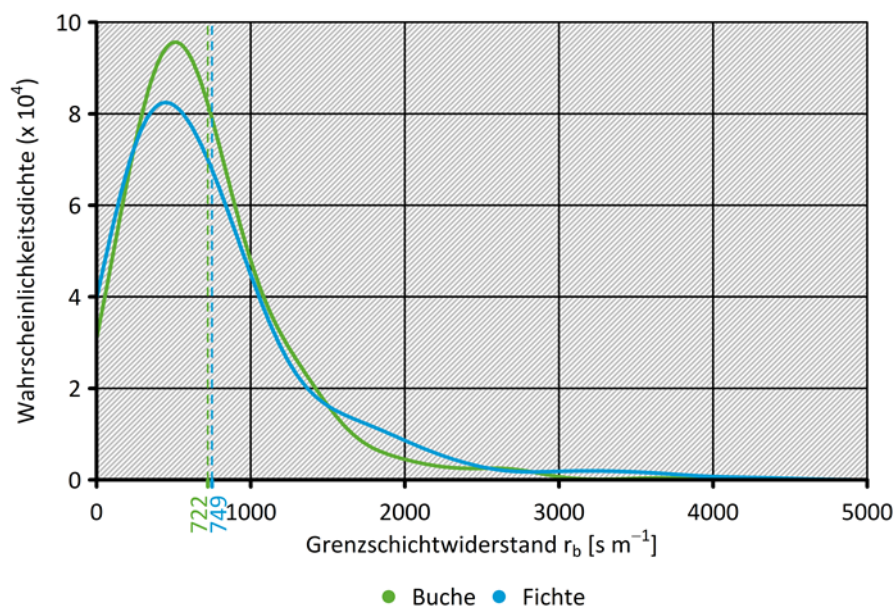
2.3.2.4 Einfluss des Grenzschichtwiderstandes r_b auf die modellierten POD_Y s

Die Blattleitfähigkeit g_t setzt sich aus der stomatären Leitfähigkeit g_s und der Grenzschichtleitfähigkeit g_b zusammen (Gleichung 5). Im Mapping Manual (CLRTAP 2017) wird g_b – dargestellt als dessen Kehrwert r_b – über Windgeschwindigkeit und Blattgeometrie berechnet (siehe Gleichung 24). Mittlere Windgeschwindigkeiten für beispielsweise den Kranzberger Forst wurden zu $0,39 \text{ m s}^{-1}$ bestimmt (Daten aus dem Kranzberger Forst, Nunn et al. 2007). Das entspricht einem mittleren r_b von 83 s m^{-1} für Buche und 28 s m^{-1} für Fichte. In diesem Bereich hat die Grenzschicht im Allgemeinen nur einen geringen Einfluss auf g_t , und g_t wird zum Großteil durch g_s dominiert. Das bedeutet, dass die Transpiration E stark mit g_s gekoppelt ist. In den TUMmesa Klimakammern ist die Windgeschwindigkeit jedoch um ein vielfaches geringer – sie liegt sogar unterhalb des mit gängigen Methoden messbaren Bereichs. Da also die Windgeschwindigkeit innerhalb der Kammern unbekannt ist, kommt eine Berechnung von g_b bzw. r_b über Gleichung 24 nicht in Frage. Daher wurde r_b wie in Kapitel 2.2.3 beschrieben aus parallel durchgeführten TransP- und Licor-Messungen nach Gleichung 5 berechnet. Die Verteilung des ermittelten r_b ist über die in Abbildung 25 dargestellten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen ersichtlich. Es ergab sich ein mittlerer r_b von 722 s m^{-1} (Buche) bzw. 749 s m^{-1} (Fichte). Die sich ergebenden Grenzschichten von bis zu 15 mm Mächtigkeit (bei Buchenblättern) stellen einen erheblichen Widerstand für die Diffusion gasförmiger Moleküle dar und beeinflussen die Quantität der stomatären Gasflüsse maßgeblich. Bei derart hohem r_b wird g_t nicht mehr von g_s , sondern stattdessen von g_b dominiert. Es findet somit eine Entkopplung der Transpiration E von g_s statt (siehe Abbildung 20c).

Statt der Berechnung von r_b über die Windgeschwindigkeit wurden also die berechneten fixen Mittelwerte in die folgenden Modellrechnungen übernommen. Gleichung 24 gilt weiterhin ohne Einschränkungen für Freilandbedingungen, in denen die Bestimmung von r_b ausschließlich über die Windgeschwindigkeit möglich ist.

Abbildung 25: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Grenzschichtwiderstandes r_b

Die vertikalen gestrichelten Linien bezeichnen den mittleren r_b für Buche (grün, $n = 484$) und Fichte (blau, $n = 541$)



Quelle: eigene Darstellung, TUM

Unter Berücksichtigung von $r_b = 722 \text{ s m}^{-1}$ ergab sich für Buche eine lineare Korrelation zwischen gemessenen und modellierten POD_Y (Abbildung 24c) mit einem Bestimmtheitsmaß

von $r^2 = 0,93$ und einer Steigung von 1,0. Allerdings betrug der Achsenabschnitt $2,0 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, sodass POD_Y im Mittel um $1,9 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ durch das Modell überschätzt wurden.

Mit $r_b = 749 \text{ s m}^{-1}$ ergibt sich für Fichte ein Bestimmtheitsmaß der Korrelation (Abbildung 24d) von $r^2 = 0,89$ bei einer Steigung von 1,0 sowie einem Achsenabschnitt von $1,0 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. POD_Y wurde im Mittel um $1,4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ vom Modell überschätzt.

Die Einführung eines fixen r_b führte somit zu einer signifikant verbesserten Übereinstimmung von gemessenen und modellierten POD_Y s (vgl. Abbildung 24 a,b mit Abbildung 24 c,d).

Implikationen des hohen Grenzschichtwiderstandes in TUMmesa

- ▶ Um einen hohen Grad an räumlicher Homogenität des Mikroklimas innerhalb der TUMmesa Klimakammern zu erreichen, ist die Luftbewegung durch sehr geringe Windgeschwindigkeiten gekennzeichnet ($< 0,1 \text{ m s}^{-1}$)
- ▶ Aufgrund der geringen Luftbewegung bilden sich mächtige Grenzschichten um die Blätter bzw. benadelten Zweige, die einen erheblichen Widerstand für den pflanzlichen Gasaustausch mit der Atmosphäre darstellen
- ▶ Dadurch sind die in TUMmesa bestimmten Ozonflüsse erheblich geringer, als unter Freilandbedingungen zu erwarten wäre
- ▶ Trockenstressbedingte Verringerung der stomatären Leitfähigkeit wurde durch den hohen Grenzschichtwiderstand maskiert, sodass keine signifikanten Auswirkungen der Trockenstressbehandlungen RCP2.6_DS und RCP8.5_DS auf den Blattgaswechsel, die gemessenen Ozonflüsse oder die Biomasseproduktion festgestellt wurden (siehe Kapitel 2.4.1)

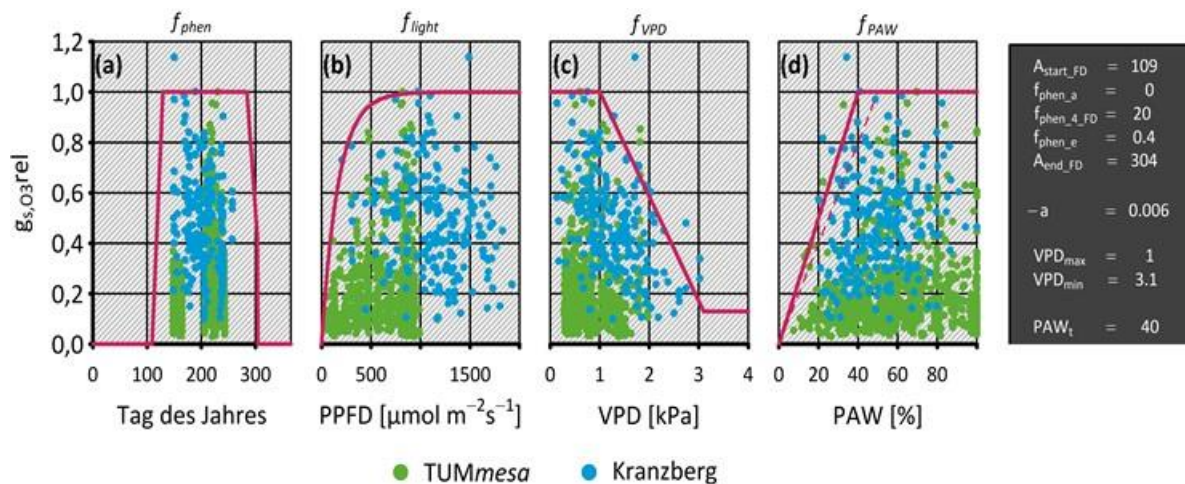
2.3.3 Anpassung und Erweiterung des Parametersatzes für Buche

Die oben beschriebene Anpassung des Grenzschichtwiderstandes lässt weiterhin eine offensichtliche Diskrepanz zwischen gemessenen und modellierten POD_Y , sodass weitere Anpassungen des Parametersatzes sowie des unter 2.3.2.1 beschriebenen Stomatamodells erforderlich sind. Zunächst wurden die derzeitige Parametrisierung der Funktionen f_{phen} , f_{light} , f_{temp} und f_{VPD} sowie die neu eingeführte Funktion f_{PAW} auf ihre Gültigkeit im valORTree Experiment überprüft. Dazu wurde die mittels Li-6400 gemessene stomatäre Leitfähigkeit (siehe 2.2.2) auf ihr absolutes Maximum von $g_{\text{max}}(\text{TUMmesa}) = 255 \text{ mmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ normiert. Die resultierende relative Leitfähigkeit $g_{\text{s,O}_3\text{rel}}$ wurde dann gegen die jeweiligen Umweltgrößen aufgetragen und die entsprechende Optimum- bzw. Schwellenwertfunktion als Grenzlinie dargestellt (Abbildung 26). Zusätzlich sollte die Übertragbarkeit des Parametersatzes auf Freilandbedingungen überprüft werden. Dazu wurden zwischen 2016 und 2020 an Buchen und Fichten im Kranzberger Forst mit einem LI-6400 bzw. LI-6800 gemessene g_s -Werte (z.B. Hikino et al. 2021) mit unmittelbar in Kronenhöhe aufgezeichneten Mikroklima-Daten (t_a , rh , PPFD, O_3 ; gemessen in 23 m Höhe) verknüpft. PAW wurde aus wöchentlichen TDR-Profilmessungen des VWC (0-7 cm, 10-30 cm, 30-50 cm und 50-70 cm Bodentiefe) abgeleitet, über die Tiefe integriert und über eine zweidimensionale Spline-Glättung zu täglich aufgelösten Werten interpoliert. Permanenter Welkepunkt und Feldkapazität wurden, wie im Experiment für den am gleichen Standort entnommenen Boden bestimmt (siehe 2.1.3), als 10 vol% und 41 vol% angenommen. Bei fehlendem PPFD wurde die in gleicher Höhe gemessene Globalstrahlung R_g über die von Grünhage & Haenel (2008) vorgeschlagene Transferfunktion in PPFD umgerechnet. $g_{\text{max}}(\text{Kranzberg})$ wurde zu $220 \text{ } \mu\text{mol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ bestimmt.

In Abbildung 26 ist ersichtlich, dass die bisherigen Parametrisierungen für f_{light} und f_{VPD} unter Berücksichtigung sowohl der TUMmesa- als auch der Kranzberger $g_{s,03}$ -Daten valide sind. Als mittleres Datum des Austriebsbeginns der Buchenblätter (siehe Tabelle 4) wurde 107 ± 1 TdJ bestimmt, bei einer mittleren Dauer des Austriebs von 22 ± 2 Tagen. Da dieses Ergebnis gut mit dem über das erweiterte Breitengradmodell bestimmten Austriebsbeginn $A_{\text{start_FD}} = 109$ TdJ und dem Parameter $f_{\text{phen_1_FD}} = 20$ Tage übereinstimmt, wurde auch $f_{\text{phen_1_FD}}$ nicht weiter angepasst.

Abbildung 26: Parametrisierung von f_{phen} , f_{light} , f_{VPD} und f_{PAW} für Buche

Grenzlinalanalyse der relativen Stomataleitfähigkeit ($g_{s,03\text{rel}}$) gegen die externen Einflussgrößen Tag des Jahres (a), PPFD (b), VPD (c) und PAW (d). $g_{s,03\text{rel}}$ wurde in den TUMmesa Klimakammern ($n = 798$) und im Kranzberger Forst ($n = 240$) bestimmt. Die Funktionen f_{phen} (a), f_{light} (b), f_{VPD} (c) und f_{PAW} sind als rote Linie dargestellt. Die gestrichelte rote Linie in (d) zeigt die nur für TUMmesa gültige Funktion f_{PAW} mit dem Parameter $\text{PAW}_t = 50$ %. Die Parametrisierung (schwarze Box) wurde, bis auf PAW_t , aus dem Mapping Manual übernommen.



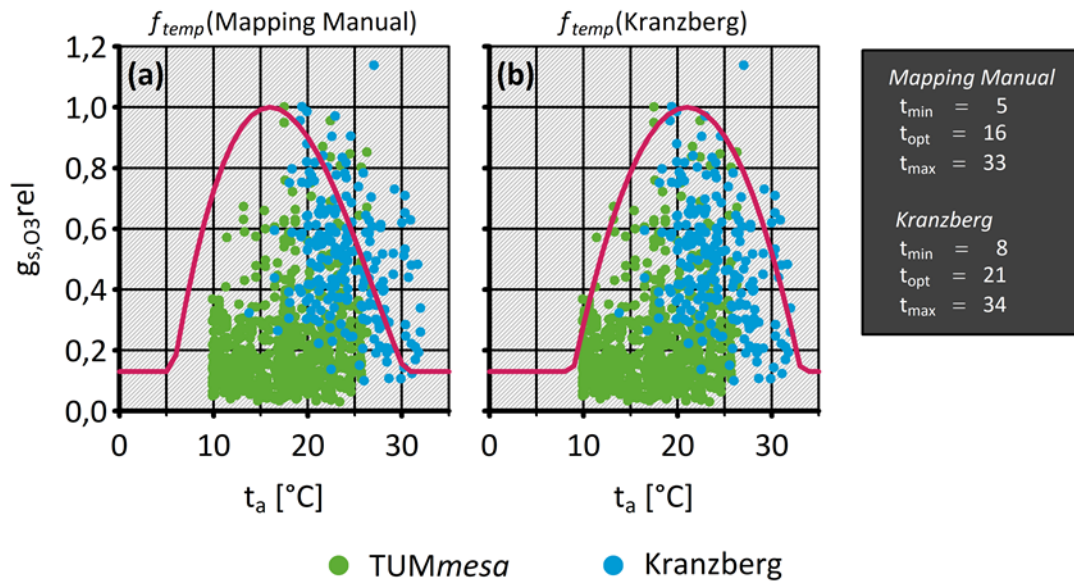
Quelle: eigene Darstellung, TUM

2.3.3.1 Angepasste Parametrisierung für f_{temp}

Der in den TUMmesa Klimakammern bestimmten Zusammenhang zwischen $g_{s,03\text{rel}}$ und t_a scheint zunächst ein Beibehalten der bisherigen Parametrisierung der f_{temp} -Funktion mit $t_{\text{min}} = 5$ °C, $t_{\text{opt}} = 16$ °C und $t_{\text{max}} = 33$ °C zu erlauben (Abbildung 27, grüne Punkte). Allerdings ist die Lufttemperatur in TUMmesa auf einen Bereich von 10 bis 30 °C beschränkt, sodass der Zusammenhang zwischen $g_{s,03\text{rel}}$ und t_a nur innerhalb dieser Grenzen untersucht werden konnte. Zudem beruht die Mapping-Manual-Parametrisierung auf Daten, die im Schweizer Alpenraum unter abweichenden ökologischen Bedingungen aufgenommen wurden (Braun et al. 1995, Karlsson et al. 2007).

Abbildung 27: Parametrisierung von f_{temp} für Buche

Grenzlinienanalyse der relativen Stomataleitfähigkeit ($g_{s,03rel}$) gegen die Lufttemperatur t_a . $g_{s,03rel}$ wurde in den TUMmesa Klimakammern ($n = 798$) und im Kranzberger Forst ($n = 240$) bestimmt. Die Funktion f_{temp} , berechnet über (a) die im Mapping Manual vorgeschlagene Parametrisierung und (b) die Kranzberger Parametrisierung von Nunn et al. (2007), ist als rote Linie dargestellt. Die jeweiligen Parameter sind in der schwarzen Box gelistet.



Quelle: eigene Darstellung, TUM

Daher schlugen Nunn et al. (2007) eine abweichende, aus Messungen an Buchen im Kranzberger Forst abgeleitete Parametrisierung von $t_{min} = 8$ °C, $t_{opt} = 21$ °C und $t_{max} = 34$ °C vor. Unter Einbeziehung der im Kranzberger Forst aufgenommenen Daten (Abbildung 27, blaue Punkte) schlagen wir für Deutschland diese Kranzberger Parametrisierung vor. Diese Parametrisierung wurde auch in der VDI-Richtlinie 2310 Blatt 6 (2020) übernommen.

2.3.3.2 Entwicklung einer CO_2 -Funktion f_{CO_2} für Buche

Die Notwendigkeit, eine CO_2 -Funktion f_{CO_2} in das Stomatamodell zu implementieren ergab sich aus folgenden zwei Gründen: (i) Trotz der Möglichkeit, CO_2 in den TUMmesa Klimakammern zu dosieren, kam es während der Photoperiode zu Schwankungen von CO_2 , da das Betreten der Kammern zu einer kurzfristigen Erhöhung von CO_2 durch die Atemluft führte. Erhöhtes CO_2 hat einen maßgeblichen Einfluss auf g_s , da eine hohe, den photosynthetischen Bedarf überschreitende blattinterne CO_2 -Konzentration ein partielles Schließen der Stomata und somit eine Verringerung von $g_{s,03}$ zur Folge hat. Dieser Prozess sollte zur genaueren Berechnung von $F_{03}(TUMmesa)$ berücksichtigt werden. (ii) Im Rahmen des valORTree-Experiments soll die Möglichkeit einer Ozon-Risikobewertung für zukünftige Klimaszenarien erarbeitet werden. Da diese Szenarien teilweise durch deutlich erhöhtes CO_2 charakterisiert sind, muss die langfristige CO_2 -Sensitivität von $g_{s,03}$ im Modell abgebildet werden. f_{CO_2} wurde auf Grundlage der von Medlyn et al. (2001) vorgeschlagenen Funktion berechnet:

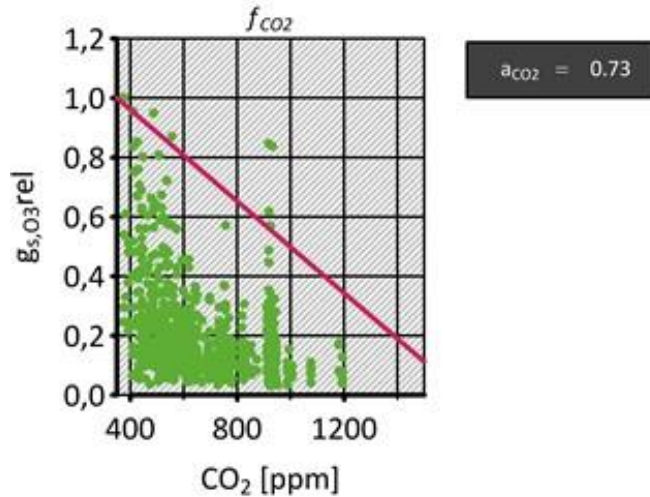
$$(26) \quad f_{CO_2} = 1 - (1 - a_{CO_2}) \left(\frac{[CO_2]}{350} - 1 \right)$$

wobei $[CO_2]$ die atmosphärische CO_2 -Konzentration ist und a_{CO_2} der Parameter der Funktion. a_{CO_2} wurde nach Angaben in Medlyn et al. (2001) für deutsche Buchen zu 0,76 bestimmt. Bei einer in vorliegender Studie durchgeführten Sensitivitätsanalyse ergaben sich für die Korrelation zwischen mittels TransP gemessenen und unter Berücksichtigung von f_{CO_2} modellierten POD_0 -

und POD_1 -Werten das höchste r^2 und die geringste Abweichung von der Steigung 1 für $a_{CO_2} = 0,73$, weshalb wir diesen Parameter vorschlagen (Abbildung 28).

Abbildung 28: Parametrisierung von f_{CO_2} für Buche

Grenzlinienanalyse der relativen Stomataleitfähigkeit ($g_{s,O_3,rel}$) gegen die atmosphärische CO_2 -Konzentration. $g_{s,O_3,rel}$ wurde in den TUMmesa Klimakammern ($n = 798$) bestimmt. Die Funktion f_{CO_2} ist als rote Linie dargestellt. Der Parameter der Funktion ist in der schwarzen Box gelistet.



Quelle: eigene Darstellung, TUM

2.3.3.3 Entwicklung einer Ozonfunktion f_{O_3} für Buche

Erhöhte stomatäre Ozonaufnahmen führen zu einem dauerhaft erhöhten Level an oxidativem Stress im Blattgewebe, was ab einer bestimmten kumulativen Aufnahme zu beschleunigter und verfrühter Seneszenz führen kann (Kitao et al. 2016). Analog zu Weizen und Kartoffel, für die eine Ozonfunktion f_{O_3} bereits implementiert ist (Pleijel 2007, CLRTAP 2017), schlagen wir basierend auf dem vorliegenden Datensatz eine Ozonfunktion für Buche vor. Dazu wurde der mittels TransP bestimmte stomatäre Ozonfluss F_{O_3} (siehe 2.3.1) jeweils bis zum Zeitpunkt einer Licor-Messung zu POD_0 kumuliert und gegen $g_{s,O_3,rel}$ aufgetragen (Abbildung 29). Die Funktion $f_{O_3}(TUMmesa)$ wurde als Optimumfunktion mit den Parametern $POD_{0,min} = 0$ mmol m⁻² PLA, $POD_{0,opt} = 5$ mmol m⁻² PLA, $POD_{0,max} = 200$ mmol m⁻² PLA und $f_{min,O_3} = 0,6$ angepasst:

wenn $POD_{0,min} < POD_0 < POD_{0,max}$

$$(27) \quad f_{O_3} = \max \left\{ f_{min,O_3}, \left[\frac{(POD_0 - POD_{0,min})}{(POD_{0,max} - POD_{0,min})} \right] \cdot \left[\frac{(POD_{0,max} - POD_0)}{(POD_{0,max} - POD_{0,opt})} \right]^{b_{POD}} \right\}$$

wenn $POD_{0,min} > POD_0 > POD_{0,max}$

$$(28) \quad f_{O_3} = f_{min,O_3}$$

b_{POD} errechnet sich zu:

$$(29) \quad b_{POD} = (POD_{0,max} - POD_{0,opt}) / (POD_{0,opt} - POD_{0,min})$$

Die resultierende Grenzlinie f_{O_3} zeigt einen limitierenden Einfluss von POD_0 auf $g_{s,O_3,rel}$ sowohl bei sehr niedrigem als auch bei relativ hohem POD_0 . Dieser Effekt ist als Hormesis bekannt (Jäger & Krupa 2009): geringfügig erhöhte Ozondosen stimulieren pflanzliche Prozesse,

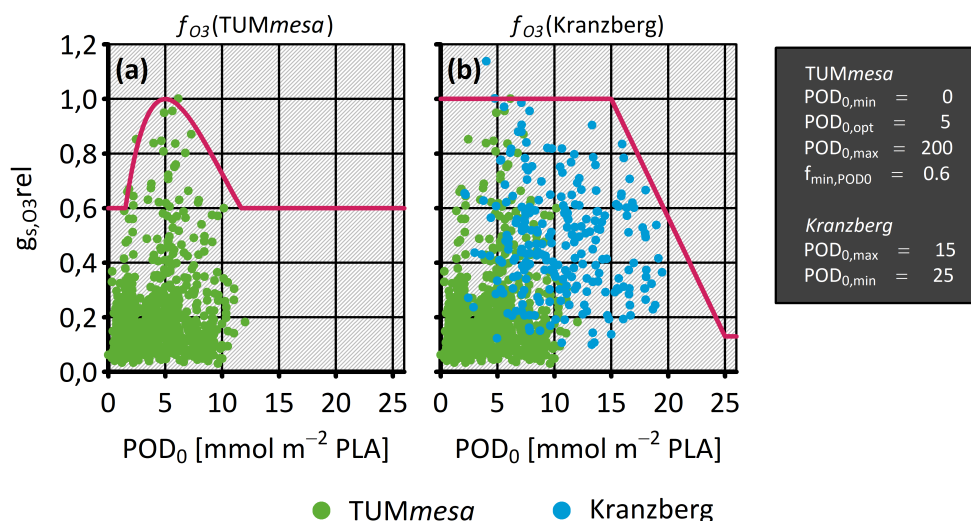
wohingegen sie in höheren Dosen hemmend bis toxisch wirken. Die niedrigen Werte wurden ausnahmslos im PC-PI Szenario ermittelt. Dieses ist durch ein $[O_3]$ von 10 ppb im Jahresmittel gekennzeichnet – also durch $[O_3]$, dass dauerhaft deutlich unterhalb der gegenwärtigen troposphärischen Konzentrationen liegt (vgl. PC-PC mit 27 ppb im Mittel). Außerdem sind – bedingt durch den hohen Grenzschichtwiderstand und das daraus resultierende geringe g_{t,O_3} – Ozonaufnahmen in *TUMmesa* deutlich geringer, als sie unter Freilandbedingungen zu erwarten wären. Aufgrund dieser Unsicherheiten ist die Übertragbarkeit der Optimumfunktion ins Freiland nicht gegeben. Um jedoch die Gültigkeit der f_{O_3} -Funktion auch unter Freilandbedingungen gewährleisten zu können, wurde der zur Parametrisierung herangezogene Datensatz um die im Kranzberger Forst aufgenommenen Daten erweitert. Dazu wurde POD_0 für jeden Zeitpunkt einer Licor-Messung unter Verwendung des in Tabelle 6 aufgeführten Parametersatzes (allerdings mit Kranzberger Parametrisierung für f_{temp} , siehe 2.3.3.1) modelliert und gegen $g_{s,O_3rel}(\text{Kranzberg})$ aufgetragen. Es zeigte sich eine Hemmung von $f_{s,O_3rel}(\text{Kranzberg})$ ab einem POD_0 von etwa 15 $\text{mmol m}^{-2} \text{PLA}$. Auf Grundlage dieser Daten schlagen wir eine Schwellenwertfunktion mit den Parametern $POD_{0,max} = 15 \text{ mmol m}^{-2} \text{PLA}$ und $POD_{0,min} = 25 \text{ mmol m}^{-2} \text{PLA}$ vor.

$$(30) \quad f_{O_3} = \min\{1, \max\{f_{min}, ((1-f_{min}) \cdot (POD_{0,min} - POD_0) / (POD_{0,min} - POD_{0,max})) + f_{min}\}\}$$

POD_0 in den Gleichungen 27 und 30 ist der mit $f_{O_3} = 1$ über Gleichungen (31, 25, 9) errechnete POD_0 -Wert. Sobald f_{O_3} errechnet wurde, erfolgt die Berechnung von g_{s,O_3rel} nach Gleichung 31, und F_{O_3} und POD_Y können nach den Gleichungen (25) und (9) bestimmt werden.

Abbildung 29: Parametrisierung von f_{O_3} für Buche

Grenzlinalanalyse der relativen Stomataleitfähigkeit (g_{s,O_3rel}) gegen die phytotoxische Ozondosis POD_0 . g_{s,O_3rel} wurde in den *TUMmesa* Klimakammern ($n = 798$) und im Kranzberger Forst ($n = 240$) bestimmt. Die Funktion f_{O_3} , berechnet (a) als nur für *TUMmesa* gültige Optimumfunktion und (b) als ins Freiland übertragbare Schwellenwertfunktion, ist als rote Linie dargestellt. Die jeweiligen Parameter sind in der schwarzen Box gelistet.



Quelle: eigene Darstellung, TUM

2.3.3.4 Zusammenfassung der Erweiterungen und Anpassungen des Modells für Buche

Tabelle 7: Angepasster und erweiterter Parametersatz für Buche

Empfohlener Parametersatz für die Berechnung von POD₇SPEC von Buche. Die Temperaturfunktion wurde entsprechend der Kranzberger Parametrisierung angepasst. Der Parametersatz wurde um die Parameter der Funktionen f_{O_3} (POD_{0,min}, POD_{0,max}), f_{CO_2} (a_{CO_2}) und f_{PAW} (PAW_t) erweitert. Angepasste und neue Parameter sind fett hervorgehoben.

Parameter	Einheit	Artspezifische Parametrisierung
Art		Buche
g_{max}	mmol O ₃ m ⁻² s ⁻¹	155
f_{min}		0,13
light _a		0,006
T_{min}	°C	8
T_{opt}	°C	21
T_{max}	°C	34
VPD _{max}	kPa	1
VPD _{min}	kPa	3,1
PAW_t	%	40
A _{start_FD}	Tag des Jahres	109
A _{end_FD}	Tag des Jahres	304
Blattdimension	cm	7
f_{phen_a}		0
f_{phen_c}		1
f_{phen_e}		0,4
$f_{phen_1_FD}$	Tage	20
$f_{phen_4_FD}$	Tage	20
POD_{0,max}	mmol m ⁻² PLA	15
POD_{0,min}	mmol m ⁻² PLA	25
a_{CO_2}		0,73

Quelle: eigene Darstellung, TUM

Die Parametrisierung der Funktionen f_{phen} , f_{light} und f_{VPD} können durch die in den Klimakammern von TUMmesa und unter Freilandbedingungen im Kranzberger Forst gewonnenen Daten bestätigt werden. Für f_{PAW} wird PAW_t = 40 % vorgeschlagen. Für f_{temp} wird die von Nunn et al. (2007) vorgeschlagene Kranzberger Parametrisierung übernommen. Die die Seneszenz beeinflussenden Funktionen f_{O_3} und f_{phen} werden im Modell miteinander verknüpft. Unter Berücksichtigung von f_{CO_2} schlagen wir folgende Funktion zur Berechnung von g_{s,O_3} für Buche vor:

$$(31) \quad g_{s,O_3} = g_{\max} \cdot [\min(f_{\text{phen}}, f_{O_3})] \cdot f_{CO_2} \cdot f_{\text{light}} \cdot \max\{f_{\min}, (f_{\text{temp}} \cdot f_{VPD} \cdot f_{PAW})\}$$

$g_{\max} = 155 \text{ mmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ und $f_{\min} = 0,13$ werden ohne Änderungen beibehalten.

Erweiterungen und Anpassungen des Modells zur Berechnung des stomatären Leitwerts und der Ozonaufnahme für Buche

Angepasste Parametrisierung:

- Kranzberger Parametrisierung von f_{temp} : höheres Temperaturoptimum der stomatären Leitfähigkeit
- Darstellung der Abhängigkeit der Stomataregulierung von der verfügbaren Bodenfeuchte über das Pflanzenverfügbare Bodenwasser als f_{PAW}

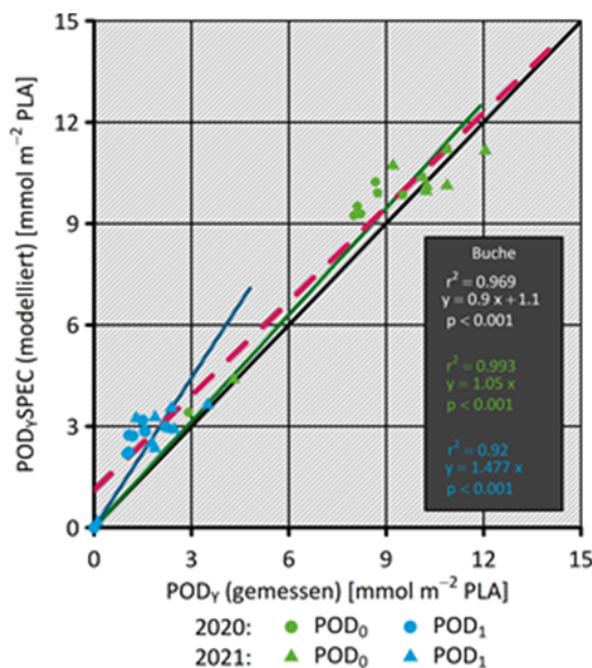
Modellerweiterungen:

- f_{O_3} : Sensitivität der stomatären Leitfähigkeit gegenüber POD_0
- f_{CO_2} : Sensitivität der stomatären Leitfähigkeit gegenüber kurz- und langfristig erhöhtem CO_2

Wird POD_Y mit den beschriebenen Anpassungen unter Verwendung der Optimumfunktion für f_{O_3} (Gleichungen 27-29) modelliert, ergibt sich eine gute Übereinstimmung von gemessenen und modellierten Werten (Abbildung 30) mit $r^2 = 0,97$ und einer Steigung von 0,9. Die Verwendung der für Freilandanwendungen optimierten Schwellenwertfunktion für f_{O_3} (Gleichung 30) ergibt ebenfalls $r^2 = 0,97$ bei einer Steigung von 0,97, allerdings mit einem Achsenabschnitt von $1,3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (nicht abgebildet), beinhaltet aber auch nicht den in der Optimumfunktion repräsentierten Hormesis-Effekt für niedrige O_3 -Konzentrationen, da mit dem PC-PI Szenario vergleichbare $[O_3]$ im Freiland nicht vorkommen.

Abbildung 30: Korrelation zwischen gemessenen und modellierten POD_Y für Buche

Dargestellt sind gemessene bzw. modellierte POD_0 - und POD_1 -Werte der Jahre 2020 und 2021 für Buche unter Verwendung der finalen Parametrisierung für Buche (Tabelle 6) mit Kranzberger f_{temp} -Funktion, f_{CO_2} und f_{O_3} . Die 1:1-Linie ist schwarz abgebildet. Die gestrichelte rote Linie zeigt die gemeinsame Korrelation für POD_0 und POD_1 (Parameter in weißer Schrift); die grüne und blaue Linie zeigen die Korrelationen separat für POD_0 und POD_1 (jeweils durch den Ursprung).



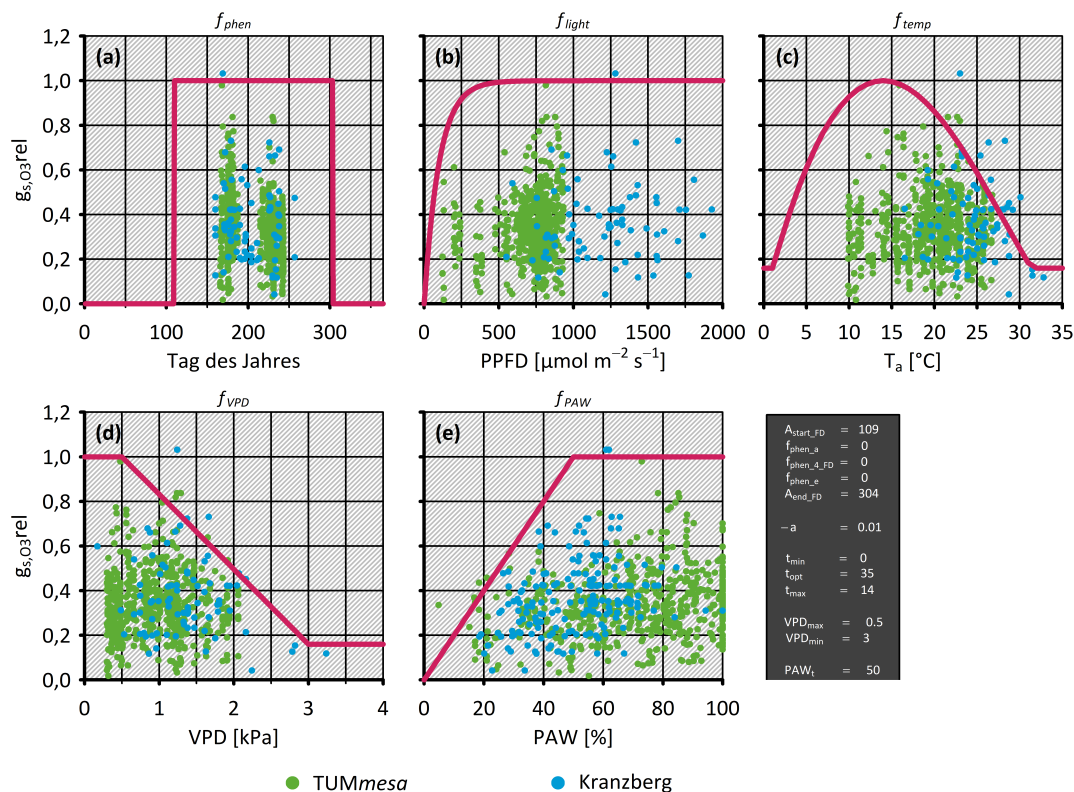
Quelle: eigene Darstellung, TUM

2.3.4 Anpassung und Erweiterung des Parametersatzes für Fichte

Aus Abbildung 24d lässt sich erkennen, dass bei Fichte lediglich die für 2021 modellierten Werte deutlich von der 1:1-Linie abweichen. 2021 zeigte Fichte eine stark verminderte Vitalität vieler Individuen gegenüber den Vorjahren. Grund hierfür können Spätfolgen des Spinnmilbenfalls von Juni 2019 sein, oder negative Auswirkungen des stark eingeschränkten Wurzelraums. Vergleicht man die mittlere Blattleitfähigkeit g_t von 2020 mit 2021, fällt für 2020 ein im Mittel um 29,1 % signifikant höheres g_t auf. Korrigiert man die stündlichen, jeweils über alle Sensoren einer Behandlung gemittelten g_t -Werte von 2021 um den „Vitalitätsfaktor“ 1,291, um den Einfluss der verminderten Vitalität auf g_t auszugleichen, ergibt sich eine sehr gute Korrelation zwischen gemessen und modellierten POD_{SPEC} (Abbildung 31). Zur Überprüfung der bisherigen Parametrisierung wurde die mittels Li-6800 nur an vitalen Individuen (die sich in jedem der Szenarien – trotz im Mittel verminderter Vitalität – finden ließen) gemessene stomatare Leitfähigkeit (siehe 2.2.2) auf ihr absolutes Maximum von $g_{max}(TUMmesa) = 110 \text{ mmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ normiert. Die resultierende relative Leitfähigkeit $g_{s,O3rel}$ wurde dann gegen die jeweiligen Umweltgrößen aufgetragen und die entsprechende Optimum- bzw. Schwellenwertfunktion als Grenzlinie dargestellt. Zusätzlich wurden im Kranzberger Forst unter Freilandbedingungen aufgenommene Daten (siehe Kapitel 2.3.3) mit $g_{max}(\text{Kranzberg}) = 110 \text{ mmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ einbezogen. Abbildung 31 bestätigt die bisherige Parametrisierung von f_{phen} , f_{light} , f_{temp} und f_{VPD} sowohl im Phytotronexperiment als auch im Freiland. Für f_{PAW} wurde der Parameter $PAW_t = 50$ % definiert. Die Notwendigkeit einer CO_2 - und Ozonfunktion wird im Folgenden überprüft.

Abbildung 31: Parametersatz für Fichte

Grenzlinienanalyse der relativen Stomataleitfähigkeit ($g_{s,O3rel}$) gegen die externen Einflussgrößen Tag des Jahres (a), PPFD (b), VPD (c) und PAW (d). $g_{s,O3rel}$ wurde in den TUMmesa Klimakammern ($n = 586$) und im Kranzberger Forst ($n = 180$) bestimmt. Die Funktionen f_{phen} (a), f_{light} (b), f_{temp} (c), f_{VPD} (d) und f_{PAW} (e) sind als rote Linie dargestellt. Die Parametrisierung (schwarze Box) wurde, bis auf PAW_t , aus dem Mapping Manual übernommen.



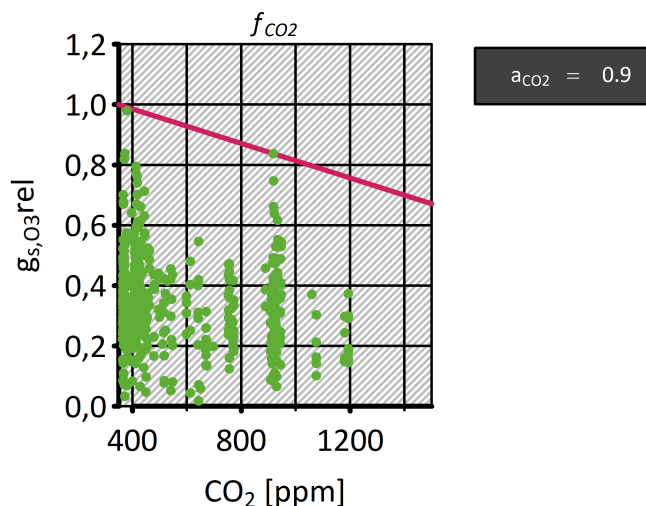
Quelle: eigene Darstellung, TUM

2.3.4.1 Entwicklung einer CO₂-Funktion f_{CO_2} für Fichte

Analog zu Buche (Kapitel 2.3.3.2) wurde die Beziehung zwischen g_{s,O_3rel} und CO₂ für Fichte auf Grundlage von Gleichung 26 überprüft. Im Vergleich mit Buche zeigte sich eine geringere Sensitivität der Fichte gegenüber erhöhtem CO₂ (vergleiche auch Roberntz & Stockfors 1998, Murray et al. 2000), und der Parameter der Funktion wurde mit $a_{CO_2} = 0,9$ von Medlyn et al. (2001) übernommen (Abbildung 32).

Abbildung 32: Parametrisierung von f_{CO_2} für Fichte

Grenzlinienanalyse der relativen Stomataleitfähigkeit (g_{s,O_3rel}) gegen die atmosphärische CO₂-Konzentration. g_{s,O_3rel} wurde in den TUMmesa Klimakammern (n = 586) bestimmt. Die Funktion f_{CO_2} ist als rote Linie dargestellt. Der Parameter der Funktion ist in der schwarzen Box gelistet.



Quelle: eigene Darstellung, TUM

2.3.4.2 Entwicklung einer Ozonfunktion f_{O_3} für Fichte

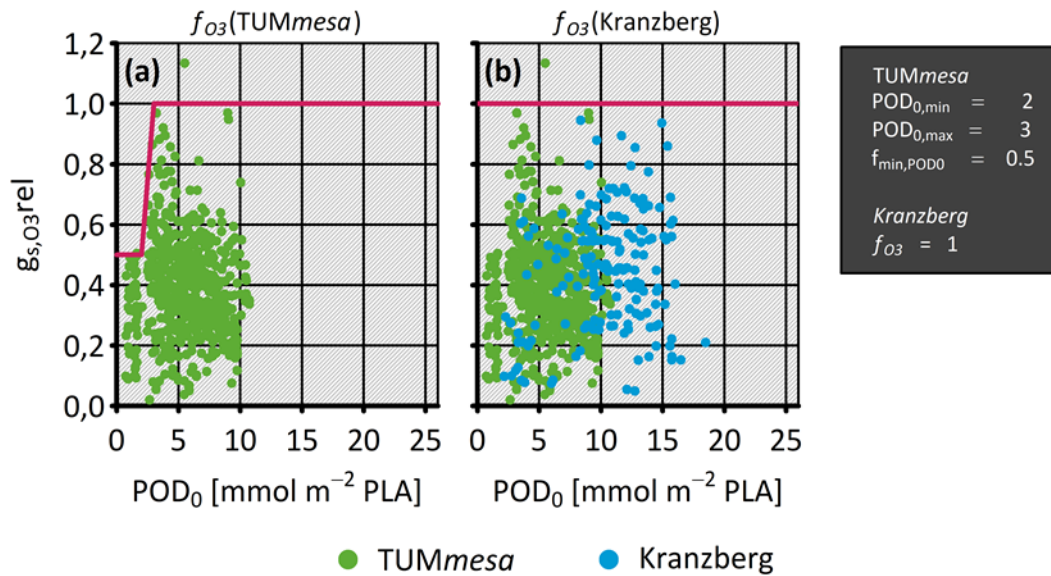
Analog zu Buche (Kapitel 2.3.3.3) wurde die Beziehung zwischen g_{s,O_3rel} und POD₀ (zum Zeitpunkt der Bestimmung von g_{s,O_3rel}) für Fichte überprüft. Auch hier zeigte sich ein gewisser Hormesis-Effekt – im Gegensatz zu Buche lag eine geringere stomatäre Leitfähigkeit jedoch nur bei dauerhaft niedrigem [O₃] im PC-PI-Szenario vor (Abbildung 33a). Daher wurde für die Modellierung der stomatären Ozonflüsse in TUMmesa folgende Schwellenwertfunktion mit den Parametern POD_{0,min} = 2 mmol m⁻² PLA, POD_{0,max} = 3 mmol m⁻² PLA und $f_{min,POD0} = 0,5$ angewandt:

$$(32) \quad f_{O_3} = \min\left\{1, \max\left[f_{min,POD0}, \left((1 - f_{min,POD0}) \cdot (POD_{0,min} - POD_0) / (POD_{0,min} - POD_{0,max})\right) + f_{min,POD0}\right]\right\}$$

Bezieht man die im Kranzberger Forst aufgenommenen Daten mit ein, ist aufgrund der geringen Sensitivität der Fichte gegenüber erhöhtem [O₃] (Wulff et al. 1996) kein Effekt der akkumulierten Ozondosis auf das Stomataverhalten erkennbar (Abbildung 33b). Da dauerhaft erniedrigtes [O₃] im Gegensatz zum Phytotronexperiment im Freiland nicht vorkommt, wird die Einführung einer Ozonfunktion für Fichte nicht empfohlen.

Abbildung 33: Parametrisierung von f_{O_3} für Fichte

Grenzlinalenanalyse der relativen Stomataleitfähigkeit ($g_{s,O_3,rel}$) gegen die phytotoxische Ozondosis POD_0 . $g_{s,O_3,rel}$ wurde in den TUMmesa Klimakammern ($n = 586$) und im Kranzberger Forst ($n = 180$) bestimmt. Die Funktion f_{O_3} , berechnet (a) als nur für TUMmesa gültige Optimumfunktion und (b) als ins Freiland übertragbare Schwellenwertfunktion, ist als rote Linie dargestellt. Die jeweiligen Parameter sind in der schwarzen Box gelistet.



Quelle: eigene Darstellung, TUM

2.3.4.3 Zusammenfassung der Erweiterungen und Anpassungen des Modells für Fichte

Tabelle 8: Erweiterter Parametersatz für Fichte

Empfohlener Parametersatz für die Berechnung von POD_{SPEC} von Fichte. Der Parametersatz wurde um die Parameter der f_{CO_2} -Funktion (a_{CO_2}) und f_{PAW} (PAW_t) erweitert. Neue Parameter sind fett hervorgehoben.

Parameter	Einheit	Artspezifische Parametrisierung
Art		Buche
g_{max}	$mmol\ O_3\ m^{-2}\ s^{-1}$	130
f_{min}		0,16
$light_a$		-0,01
T_{min}	°C	0
T_{opt}	°C	14
T_{max}	°C	35
VPD_{max}	kPa	0,5
VPD_{min}	kPa	3
PAW_t	%	50
A_{start_FD}	Tag des Jahres	109

Parameter	Einheit	Artspezifische Parametrisierung
$A_{\text{end_FD}}$	Tag des Jahres	304
Blattdimension	cm	0,8
$f_{\text{phen_a}}$		0
$f_{\text{phen_c}}$		1
$f_{\text{phen_e}}$		0
$f_{\text{phen_1_FD}}$	Tage	0
$f_{\text{phen_4_FD}}$	Tage	0
a_{CO_2}		0,9

Quelle: eigene Darstellung, TUM

Die im Mapping Manual (CLRTAP 2017) vorgeschlagene Parametrisierung der Funktionen f_{phen} , f_{light} , f_{temp} und f_{VPD} kann durch die in den Klimakammern von TUMmesa und unter Freilandbedingungen im Kranzberger Forst gewonnenen Daten bestätigt werden. Für f_{PAW} wird $\text{PAW}_t = 50 \%$ vorgeschlagen. Im Gegensatz zu Buche existiert keine Ozonfunktion, und für Gleichung 31 gilt $f_{\text{O}_3} = 1$. $g_{\text{max}} = 130 \text{ mmol O}_3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ und $f_{\text{min}} = 0,16$ werden ohne Änderungen beibehalten.

Erweiterungen und Anpassungen des Modells zur Berechnung des stomatären Leitwerts und der Ozonaufnahme für Fichte

Angepasste Parametrisierung:

- Darstellung der Abhängigkeit der Stomataregulierung von der verfügbaren Bodenfeuchte über das pflanzenverfügbare Bodenwasser als f_{PAW} mit dem Parameter $\text{PAW}_t = 50 \%$

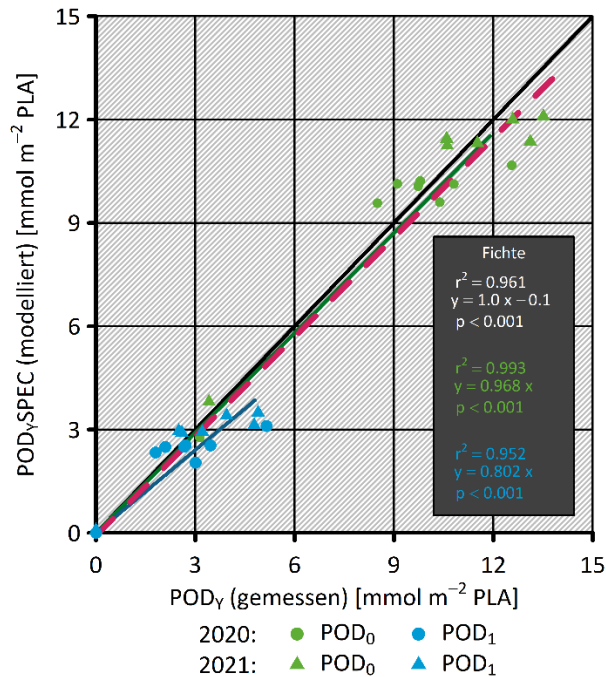
Modellerweiterungen:

- Sensitivität der stomatären Leitfähigkeit gegenüber kurz- und langfristig erhöhtem CO_2 über die Funktion f_{CO_2} mit dem Parameter $a_{\text{CO}_2} = 0,9$

Wird POD_Y mit den beschriebenen Anpassungen unter Verwendung der Schwellenwertfunktion für f_{O_3} (Gleichung 32) modelliert, ergibt sich eine gute Übereinstimmung von gemessenen und modellierten Werten (Abbildung 34) mit $r^2 = 0,96$ und einer Steigung von 1,0. Das derzeit für die Risikobewertung von Fichtenbeständen verwendete Modell konnte mit Bestätigung der im Mapping Manual vorgeschlagenen Parametrisierung und unter Berücksichtigung der neu eingeführten f_{CO_2} -Funktion für „continental spruce“ validiert werden.

Abbildung 34: Korrelation zwischen gemessenen und modellierten POD_Y für Fichte

Dargestellt sind gemessene bzw. modellierte POD_0 - und POD_1 -Werte der Jahre 2020 und 2021 für Fichte. Die Parametrisierung erfolgte nach Mapping Manual (erweitert, Tabelle 8). Die gemessene Blattleitfähigkeit $g_s(TransP)$ wurde für das Jahr 2021 mit dem „Vitalitätsfaktor“ 1,29 angepasst. Die 1:1-Linie ist schwarz abgebildet. Die gestrichelte rote Linie zeigt die gemeinsame Korrelation für POD_0 und POD_1 (Parameter in weißer Schrift); die grüne und blaue Linie zeigen die Korrelationen separat für POD_0 und POD_1 (jeweils durch den Ursprung).



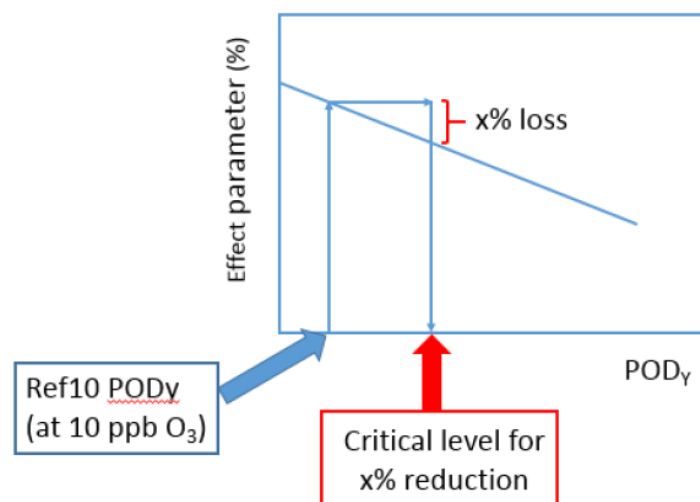
Quelle: eigene Darstellung, TUM

2.4 Überprüfung der Ozondosis-Wirkungsbeziehung für die Abschätzung von Biomasseverlusten bei Waldbäumen

Die Biomasseproduktion ist ein Indikator für das Baumwachstum unter unterschiedlichen Klima- und Emissionsbedingungen. Erhöhte Temperaturen und CO_2 -Konzentrationen führen in der Regel zu verstärktem, Ozonbelastung und Trockenheit zu verringertem Wachstum gegenüber einer Kontrollvariante. Unterschiede sind auch jeweils für das Verhältnis von ober- zu unterirdischer Biomasseproduktion zu erwarten.

Die Abschätzung des Ozonbelastungsrisikos für Vegetation erfolgt nach dem Critical Level-Konzept. Als Critical Level für die Ozonbelastung wird der kumulative stomatare Ozonfluss (als POD_YSPEC , siehe Kapitel 1.4) verwendet, bei dessen Überschreitung direkte schädliche Auswirkungen auf empfindliche Vegetation auftreten können (CLRTAP 2017). Für die Verwendung des POD_YSPEC wurde für alle Baumarten ein einheitlicher Ozonfluss-Schwellenwert von $Y = 1 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ PLA}$ festgelegt (Büker et al. 2015). Für Waldbäume wird als Wirkungs-Parameter die Biomasse gegenüber einer Referenz-Biomasse, die unter vorindustriellen Bedingungen bei mittleren Ozonkonzentration von 10 ppb (Ref10 POD_Y) produziert wurde, verwendet (Abbildung 35). Die Critical Levels für Waldbäume wurden auf Werte für einen vertretbaren Biomasseverlust festgelegt (CLRTAP 2017). Hierzu wurde für Fichten ein Critical Level für die Ozondosis (POD_1SPEC) von $9,2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ PLA}$ und für Buchen und Birken von $5,2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ PLA}$ bestimmt. Bei Überschreiten dieser Critical Levels wurde für Fichten ein 2 %-iger, für Buche und Birke ein 4 %-iger Biomasseverlust abgeleitet, basierend auf einer Verringerung des jährlichen Zuwachses (oberirdische, Wurzel- oder Gesamtbaum-Biomasse) bei jungen Bäumen von bis zu einem Alter von 10 Jahren (CLRTAP 2017).

Abbildung 35: Methode zur Verwendung des Ref10 POD_Y (d.h. POD_Y bei 10 ppb konstanten O_3) als Referenzpunkt für die Ableitung des kritischen O_3 -Wertes



Quelle: CLRTAP 2017

2.4.1 Biomasseproduktion bei Buchen und Fichten unter gegenwärtigen und zukünftigen Bedingungen im Phytotronexperiment

Biomasseveränderungen werden bei mehrjährigen Ozonexpositionsexperimenten aufgrund des exponentiellen Wachstums von Jungbäumen auf den jährlichen Zuwachs korrigiert, um die Biomasseeffekte aus Versuchen mit unterschiedlicher Dauer zu standardisieren (Büker et al. 2015, CLRTAP 2017). Zur Bestimmung einer mittleren jährlichen prozentualen Abnahme der Biomasse im Vergleich zu einer Kontrolle (RB_{annual}) wird die prozentuale Veränderung der Biomasse (Zuwachs basierend auf der Ausgangsbiomasse) einer Behandlung im Vergleich zur Kontrolle (vorindustrielle POD_Y) berechnet und mit dem Faktor $(1/\text{Anzahl der Vegetationszeiten})$ potenziert (Büker et al. 2015). Bei dieser Berechnung geht man von einer konstanten ozoninduzierten prozentualen Veränderung der Biomasseakkumulation über die Jahre in mehrjährigen Experimenten aus.

$$(33) \quad RB_{\text{annual}} = 100 \cdot \left(\frac{\text{Biomasse}_{\text{Behandlung}}}{\text{Biomasse}_{\text{Kontrolle}}} \right)^{(1/\text{Anzahl der Vegetationszeiten})}$$

Zur Bestimmung der Biomasseproduktion wurde nach Ende des dritten Experimentjahres 2021 eine Vollernte aller Bäume durchgeführt. Für die Bestimmung der oberirdischen Biomasse der Fichten und Buchen wurden die Triebe der Jahrgänge 2019, 2020 und 2021 einzeln (Fichten mit Nadeln, Buchen ohne Laub), die restlichen Triebe und der Stamm (ab Wurzelhals) als Ganzes für jeden Probestaum geerntet. Die Buchenblattmasse wurde jährlich im August durch Blattzählung und Trockengewichtsbestimmung (Teilproben) für jeden Baum ermittelt. Der Wurzelstock wurde grob vom Substrat befreit und anschließend mit möglichst geringem Verlust von Feinwurzeln gewaschen. Für die ober- und unterirdischen Biomassen wurden die Frisch- und Trockengewichte bestimmt (Trocknung bis Konstanz bei 65°C).

Die Ausgangsbiomasse wurde vor Beginn des Experiments im Februar/März 2019 bestimmt. Hierzu wurden zehn randomisiert ausgewählte Fichten und Buchen nach demselben Verfahren geerntet und getrocknet. Die Blattmasse der Buchen wurde anhand der Knospenzahlen, der mittleren Blattzahl pro Knospe und der mittleren Blattmasse (Daten von August 2019) bestimmt.

Der Zuwachs der ober- und unterirdischen Biomasse während des Experimentzeitraums wurde durch Subtraktion der jeweiligen Ausgangsbiomassen von der Biomasse nach Ende des Experiments (November 2021) für jeden Einzelbaum bestimmt. Statistisch signifikante Unterschiede wurden mittels ANOVA/ANCOVA in Kombination mit Duncan's Posthoc-Test (Duncan 1955) identifiziert. Da die Zukunftsszenarien mit temporärerer Trockenheit keine signifikanten Unterschiede gegenüber den Varianten mit unlimitierter Wasserversorgung aufweisen (Daten nicht gezeigt), werden im Folgenden jeweils Mittelwerte für die beiden Behandlungen RCP2.6 und RCP8.5, einschließlich der Varianten mit Dürrestress, gezeigt.

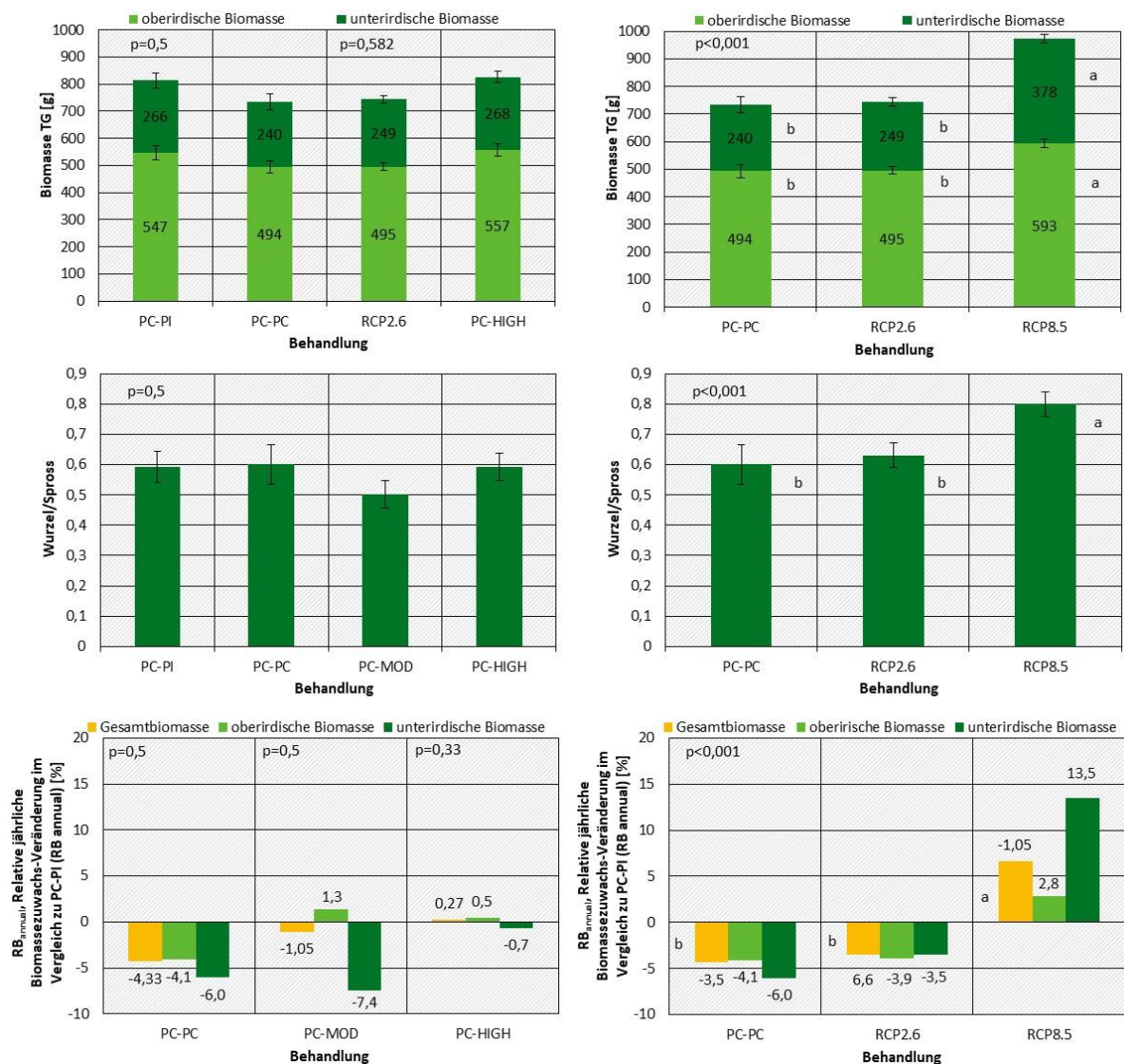
Für die Behandlungen im Gegenwartsklima (Ozongradient) waren sämtliche Biomasseparameter bei Buchen und Fichten nicht signifikant unterschiedlich (Abbildung 36, Abbildung 37). Bei RCP8.5 dagegen zeigten alle Biomasseparameter bei Buchen und Fichte eine signifikante Zunahme gegenüber PC-PC und RCP2.6 (Abbildung 36, Abbildung 37). Bei Buchen wiesen die Behandlungen PC-MOD und PC-HIGH trotz höherer Ozonbelastung tendenziell geringere Zuwachseinbußen gegenüber der Kontrolle auf als PC-PC und RCP2.6. Bei Fichten wurde sowohl bei den Behandlungen im Gegenwartsklima (Ozongradient) als auch bei RCP2.6 eine Zunahme der Zuwächse gegenüber der Kontrolle festgestellt (Hormesiseffekt, siehe 2.4.2).

- Für die Behandlungen im Gegenwartsklima (Ozongradient) und RCP2.6 wurden bei Buchen und Fichten keine signifikanten Unterschiede bei der Biomasseproduktion und den Zuwächsen im Experimentzeitraum festgestellt.

- Eine signifikante Zunahme der Biomassen und Zuwächse bei Buchen und Fichten gegenüber den anderen Behandlungen wurde für die Behandlung RCP8.5 nachgewiesen.

Abbildung 36: Biomassen, Wurzel-Spross-Verhältnis und prozentuale Zuwachsveränderung im Vergleich zur Kontrolle (PC-PI) für Buchen bei den Behandlungen im Phytotronexperiment

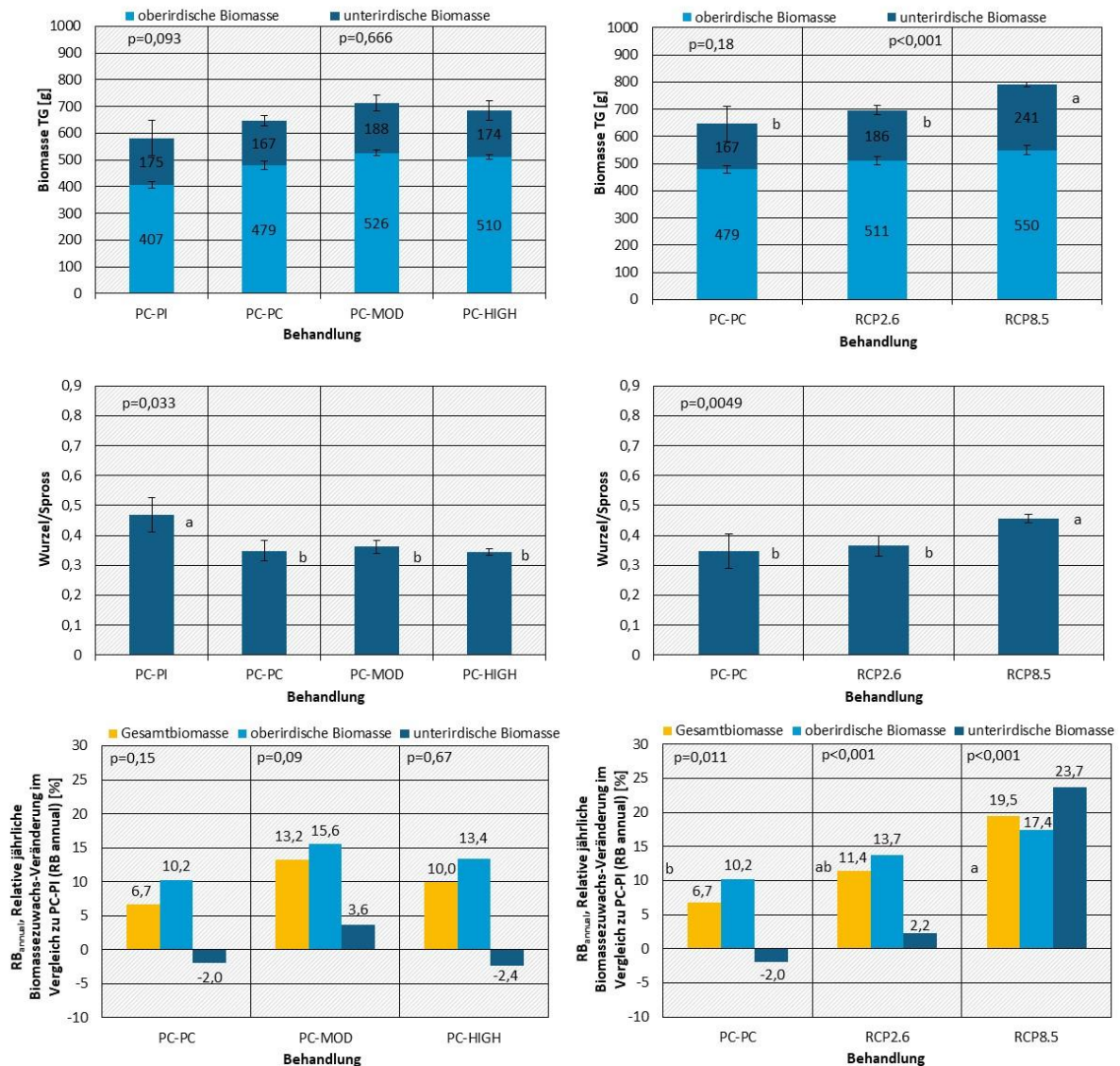
Mittelwerte und Standardfehler, prozentualer Zuwachs für den Experimentzeitraum (2019-2021) als RB_{annual} (mittlere jährliche prozentuale Abnahme der Biomasse im Vergleich zur Kontrolle PC-PI, Berechnung nach Bükér et al. (2015), siehe Kap. 2.4.1)



Quelle: eigene Darstellung, TUM

Abbildung 37: Biomassen, Wurzel-Spross-Verhältnis und prozentuale Zuwachsveränderung im Vergleich zur Kontrolle (PC-PI) für Fichten bei den Behandlungen im Phytotronexperiment

Mittelwerte und Standardfehler, prozentualer Zuwachs für den Experimentzeitraum (2019-2021) als RB_{annual} (mittlere jährliche prozentuale Abnahme der Biomasse im Vergleich zur Kontrolle PC-PI, Berechnung nach Büker et al. (2015), siehe Kap. 2.4.1)



Quelle: eigene Darstellung, TUM

Biomasseproduktion bei Buchen und Fichten unter gegenwärtigen und zukünftigen Bedingungen im Phytotronexperiment

- Für die Behandlungen im Gegenwartsklima (Ozongradient) und das Zukunftsszenario RCP2.6 wurden bei Buchen und Fichten keine signifikanten Unterschiede bei der Biomasseproduktion und den Zuwächsen im Experimentzeitraum festgestellt.
- Eine signifikante Zunahme der Biomassen und Zuwächse bei Buchen und Fichten gegenüber den anderen Behandlungen wurde nur für das Zukunftsszenario RCP8.5 nachgewiesen.

- Bei Fichten wurde für alle Behandlungen eine Zunahme der Zuwächse gegenüber der Kontrolle festgestellt. Bei Gegenwartsklima und erhöhten O_3 -Konzentrationen und bei RCP2.6 lässt sich diese Stimulation des Wachstums trotz mäßig erhöhter O_3 -Belastung mit dem toxikologischen Reaktionskonzept der Hormesis erklären (siehe Kap. 2.4.2).

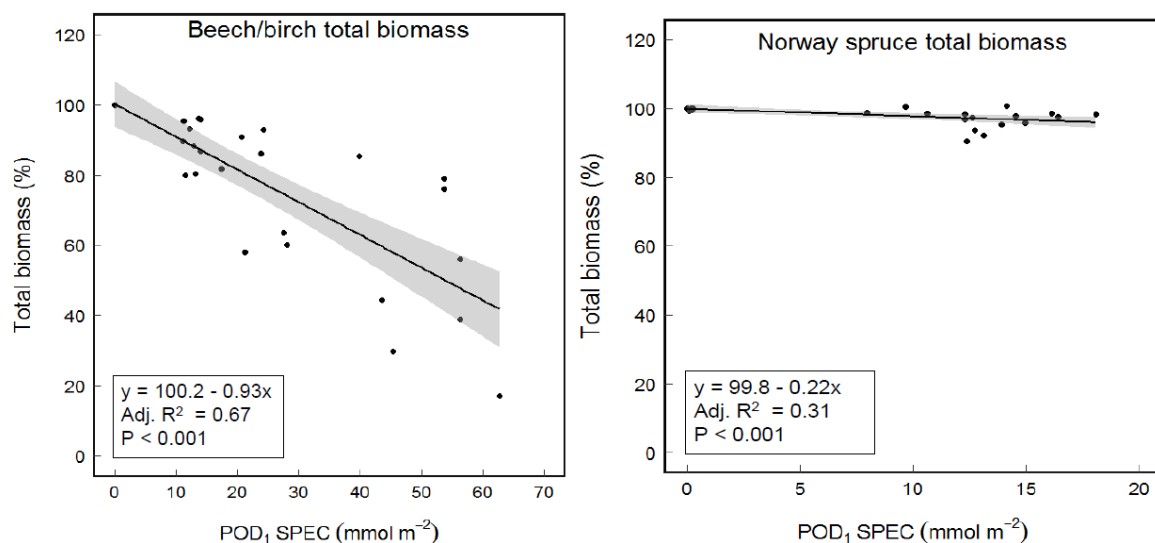
2.4.2 Ozondosis-Wirkungs-Beziehung und Ozonrisiko für Buchen und Fichten im Phytotronexperiment

Den Ozondosis-Wirkungs-Beziehungen für Waldbäume liegen artengruppen- oder artspezifische Ozonfluss-Modelle zugrunde. Die Modelle und die Critical Levels werden zur Quantifizierung der möglichen negativen Auswirkungen von Ozon auf die jährliche Biomasseproduktion von Bäumen auf lokaler und regionaler Ebene herangezogen. Ebenso können sie als Grundlage für die Berechnung der Auswirkungen der Ozonbelastung auf die Kohlenstoffspeicherung und Baumvielfalt dienen (aus CLRTAP 2017).

Die Datengrundlage für die Ozondosis-Wirkungs-Beziehungen für Buche/Birke und Fichte (Abbildung 38) stammt aus verschiedenen Experimenten mit jungen Bäumen in verschiedenen mittel- und nordeuropäischen Ländern (siehe Büker et al. 2015). Die Wichtungsfunktionen und die Parametrisierung der gängigen Ozonflussmodelle sowie die Critical Levels für die Ozondosis wurden aus dieser Datenbasis abgeleitet. Für Waldbäume wird das Risiko über den POD_1SPEC -Wert bestimmt (CLRTAP 2017). Wirkungsparameter bei Waldbäumen ist die Veränderung der Biomasse gegenüber einer Referenz-Biomasse, die unter vorindustriellen Bedingungen bei mittleren Ozonkonzentration von 10 ppb (Ref10 POD_y) produziert wurde.

Abbildung 38: Ozondosis-Wirkungsbeziehung für Buchen/ Birken und Fichten

Dargestellt ist die Beziehung zwischen dem prozentualen Anteil der Gesamtbiomasse und dem stomatären O_3 -Fluss (POD_1SPEC) für sonnenexponierte Blätter gegenüber einer Referenz-Biomasse, die unter vorindustriellen Bedingungen bei mittleren Ozonkonzentration von 10 ppb (Ref10 POD_y) produziert wurde. links: Buche (*Fagus sylvatica*) und Weißbirke (*Betula pendula*), basierend auf Daten aus Finnland, Schweden und der Schweiz (Büker et al. 2015); rechts: Fichte (*Picea abies*), basierend auf Daten aus Frankreich, Schweden und der Schweiz (Büker et al. 2015).



Quelle: CLRTAP 2017

Zur Überprüfung der Dosis-Wirkungs-Beziehungen wurden die im Phytotronexperiment gemessenen POD_1SPEC - und RB_{annual} -Werte für Buchen und Fichten zu den Datenpunkten der Ozondosis-Wirkungs-Beziehungen zugefügt (Abbildung 39, Abbildung 40). Zu beachten ist, dass

die prozentuale Biomasse bei PC-PI nicht 100 % (Kontrolle) beträgt, da nach der Zuwachsbestimmung (Subtraktion der Ausgangsbiomasse 2018 von der Biomasse pro Baum 2021) eine exponentielle Berechnung für RB_{annual} erforderlich ist, die zu dieser Abweichung führt. Dies ergibt für PC-PI eine RB_{annual} für Buche von $99,5 \pm 2,3$ % und für Fichte von $96,22 \pm 7,9$ %.

- Aufgrund der geringen Windgeschwindigkeiten und der daraus resultierenden hohen Grenzschichtwiderstände um die Blätter/Nadeln unter den Phytotronbedingungen (siehe Kap. 2.2.3) waren die gemessenen $POD_1\text{SPEC}$ -Werte deutlich niedriger als für Freilandbedingungen angenommen wird (siehe Abbildung 39, Abbildung 40, Abbildung 42, Abbildung 43). Zu Windgeschwindigkeiten in den Experimenten, die den DRF im Mapping Manual (siehe Abb. 38) zugrunde liegen, liegen keine Daten vor. Vermutlich sind sie aber höher als $0,5 \text{ m s}^{-1}$ und stellen somit keine Abweichung im Vergleich zu Freilandbedingungen dar.
- Alle gemessenen $POD_1\text{SPEC}$ für Buche und Fichte liegen unterhalb des Critical-Levels von 5,2 bzw. $9,2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ PLA}$. Für diesen Bereich der Ozondosis-Wirkungs-Funktion standen bisher keine Messdaten zur Verfügung.

Bei Buche (Abbildung 39) wies die Behandlung PC-HIGH mit $2,85 \pm 0,65 \text{ mmol m}^{-2} \text{ PLA}$ den höchsten $POD_1\text{SPEC}$ -Wert auf, gefolgt von PC-MOD mit $1,83 \pm 0,64 \text{ mmol m}^{-2} \text{ PLA}$, PC-PC mit $1,48 \pm 0,40 \text{ mmol m}^{-2} \text{ PLA}$ und PC-PI mit nur $0,05 \pm 0,05 \text{ mmol m}^{-2} \text{ PLA}$. Bei den Zukunftsszenarien wurden für RCP2.6/_DS $1,94 \pm 0,44$ bzw. $1,43 \pm 0,14 \text{ mmol m}^{-2} \text{ PLA}$ und für RCP8.5/_DS $1,43 \pm 0,36$ bzw. $1,44 \pm 0,42 \text{ mmol m}^{-2} \text{ PLA}$ gemessen. Die größte Reduktion der Biomasse im Vergleich zur Kontrolle (PC-PI) zeigten RCP2.6_DS, RCP2.6 und PC-PC (-5, -2,2 % bzw. -4,3 %), PC-MOD und PC-HIGH zeigten nur eine geringe Reduktion der Biomassen (1,1 bzw. 0,3 %). Für die Gegenwarts-Behandlungen und RCP2.6 konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden (siehe Kap. 2.4.1). Bei RCP8.5/_DS, mit deutlich erhöhten CO_2 -Konzentrationen, zeigte sich dagegen ein signifikanter Unterschied zu den anderen Behandlungen, mit einer Zunahme der Biomasse gegenüber der Kontrolle um +7,2 bzw. +6,1 %, wobei die POD_1 -Werte nicht weiter anstiegen. Diese Ergebnisse korrespondieren mit der gemessenen Blattleitfähigkeit bei Buchen (Abbildung 41). Bei geringfügig erhöhter CO_2 -Konzentration unter RCP2.6 war die Blattleitfähigkeit tendenziell um ca. 4,5 % erniedrigt, wobei die Werte signifikant unterschiedlich zu den Gegenwartsbehandlungen waren. Bei der deutlich erhöhten CO_2 -Konzentration unter RCP8.5 war die Blattleitfähigkeit um fast 24 % gegenüber PC-PC signifikant erniedrigt.

- Die gemessenen $POD_1\text{SPEC}$ für Buche für die Gegenwartsszenarien und RCP2.6/_DS befanden sich nahe der Trendlinie der DRF und bestätigen für diesen Bereich somit die bestehenden DRFs.
- Eine Einschränkung der Blattleitfähigkeit bei erhöhtem CO_2 (Abbildung 41, Ainsworth et al. 2007, Purcell et al. 2018) und die daraus resultierenden geringeren Ozonflüsse sind bisher nicht in der Ozondosis-Wirkungs-Funktion berücksichtigt. Besonders bei Buchen zeigte sich hier ein deutlicher Effekt der CO_2 -Wichtungsfunktion. Um Aussagen zum Ozonrisiko für zukünftige Szenarien mit erhöhten CO_2 -Konzentrationen treffen zu können, wird empfohlen die Datenpunkte der DRF mit der von uns vorgeschlagenen erweiterten Parametrisierung zu rekalkulieren (siehe Kap. 2.3.3).
- Insgesamt ist zu bemerken, dass in der Ozondosis-Wirkungs-Beziehung für Buche/Birke bisher für Buche nur sechs Datenpunkte für einen engen $POD_1\text{SPEC}$ -Bereich ($10 - 14 \text{ mmol m}^{-2} \text{ PLA}$) mit etwa 10 % Biomassereduktion berücksichtigt sind. Die Daten für höhere

Ozondosen und größere Biomassereduktionen stammen von Versuchen mit Birke. (siehe Grünhage et al. 2012, Karlsson et al. 2007, Braun et al. 1995). Birke, als Pionierbaumart, und Buche, als Klimaxbaumart, unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Wachstums- und Stressresilienz-Strategien (z.B. Kitao et al. 2021, Tobita et al. 2019). Es wird vorgeschlagen, Versuchsergebnisse für Buche, die einen Bereich mit höherer Ozonbelastung abdecken, mit in die DRF aufzunehmen (zum Beispiel: Free-Air O₃-Fumigation Experiment im Kranzberger Forst, siehe auch Grünhage et al. 2013, Pretzsch et al. 2010, Matyssek et al. 2010).

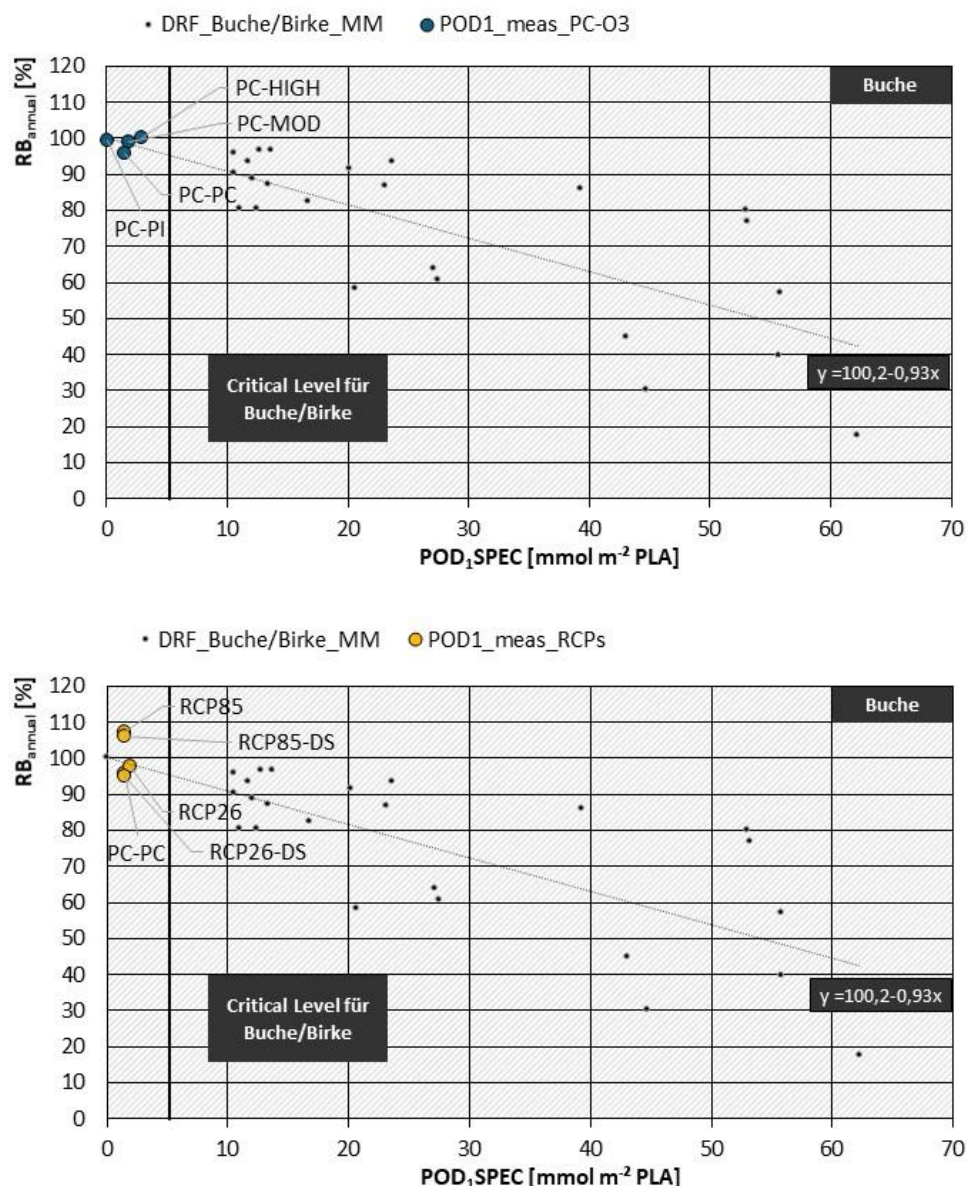
Bei Fichte (Abbildung 40) weist die Behandlung PC-HIGH mit $4,55 \pm 0,6$ mmol m⁻² PLA den höchsten POD₁SPEC auf, gefolgt von PC-MOD mit $2,63 \pm 0,04$ mmol m⁻² PLA, PC-PC mit $3,29 \pm 1,49$ mmol m⁻² PLA und PC-PI mit nur $0,0 \pm 0,0$ mmol m⁻² PLA. Bei den Zukunftsszenarien RCP2.6/_DS und RCP8.5/_DS unterschieden sich die POD₁-Werte kaum ($3,33 \pm 0,62$, $3,11 \pm 0,10$ bzw. $3,5 \pm 1,4$, $2,98 \pm 0,48$ mmol m⁻² PLA). Für alle Behandlungen konnte eine Zunahme der Biomasse gegenüber der Kontrolle (PC-PI) festgestellt werden. Wie auch bei den Messwerten für Buche zeigte RB_{annual} bei Fichte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Behandlungen im Gegenwartsklima (Ozongradient) und RB2.6/_DS (PC-PC +6,7, PC-MOD +13,2, PC-HIGH +10, RCP2.6 13,6, RCP2.6_DS 9,5 % RB_{annual} im Vergleich zu PC-PI). Bei RB8.5/_DS war RB_{annual} mit einer Zunahme gegenüber der Kontrolle von +18 % und +21 % nochmals deutlich erhöht und signifikant unterschiedlich zu den anderen Behandlungen.

- POD₁SPEC bei Fichte war in allen Behandlungen relativ ähnlich ($\sim 3,3$ mmol m⁻² PLA). Bei RCP8.5 wurde eine nur geringfügig niedrigere Ozonaufnahme als bei PC-HIGH gemessen, da Fichten (Koniferen) auf erhöhte CO₂-Konzentrationen mit einer deutlich geringeren Einschränkung der stomatären Leitfähigkeit reagieren als Buchen (Abbildung 41, Purcell et al. 2018, Ainsworth et al. 2007, Saxe et al. 1998). Bei moderat erhöhten Ozonkonzentrationen wird Fichte als deutlich weniger ozonsensitiv als Buche beschrieben (u.a. Grünhage et al. 2013, Ritter et al. 2011, Nunn et al. 2006, Landolt et al. 2000, Dixon et al. 1998, Wulff et al. 1996). Aus diesen Gründen wurde für Fichten nur die CO₂-Wichtungs-Funktion in die erweiterte Parametrisierung des Ozonrisikomodells aufgenommen.
- Für alle Behandlungen wurden Zunahmen der Fichten-Biomassen im Vergleich zur Kontrolle festgestellt. Die Zunahmen der Biomassen deuten auf eine Reaktion entsprechend dem toxikologischen Reaktionskonzept der Hormesis hin. Trotz erhöhter Ozonbelastung stieg die Biomasseproduktion tendenziell an (nicht signifikant). In der Pflanzentoxikologie versteht man unter Hormesis eine Stimulation des Pflanzenwachstums und/oder anderer biologische Prozesse durch einen Stressor, wobei es bei höherer Stressintensität zu einer Inhibition dieser Prozesse kommt (Jäger & Krupa 2009). Die metabolischen Kosten für die Stimulationsreaktion (z.B. für Entgiftungsreaktionen) können langfristig zu einem Nachteil auf Produktions-, Reproduktions- oder Konkurrenz-Ebene, aber auch zu einer dauerhaften biologischen Anpassung führen (Agathokleous et al. 2019a, Percy et al. 2009, Sugai et al. 2018). Das Hormesis-Konzept ist als grundlegendes Merkmal in der Biologie beschrieben (Calabrese & Blain 2009). Agathokleous et al. (2019b) zeigten in einer umfangreichen Studie, dass Pflanzen unterschiedlichster Arten und ökologischer Skalenebenen eine im Allgemeinen stimulierende hormetische Reaktion durch Ozon zeigen. Percy et al. (2009) beschreibt Hormesiseffekte bei moderater Ozonbelastung bei unterschiedlichen Pappelklonen und einer Birkenart. Mit der Kenntnis der Hormesis-Reaktion und ihren Mechanismen ließen sich induzierte Anpassungsreaktionen (z.B. Entgiftungsreaktionen) quantifizieren (Agathokleous et al. 2019b). Die Ozon-Risikobewertung könnte durch die Einbeziehung der Hormesis verbessert werden (Agathokleous et al. 2019a). Ein Übergang vom derzeitigen linearen Schwellenwert-Ansatz zu einem hormetischen nicht-linearen

Ozondosis-Wirkungs-Ansatz – mit zunächst einer Stimulationsreaktion trotz moderater Belastung und schließlich einer deutlich negativen Reaktion bei weiter steigender Belastung - könnte durch gezielte Zusatzuntersuchungen und eine Neubewertung von vorhandenem Datenmaterial für die relevanten Arten initialisiert werden (Agathokleous et al. 2019b).

Abbildung 39: Dosis-Wirkungs-Beziehung für Buche/Birke (nach Mapping Manual, CLRTAP 2017) mit den gemessenen POD₁SPEC-Werten bei Buche für die Behandlungen im Gegenwartsklima mit Ozongradient (oben) und für die Behandlungen im Zukunftsszenario (unten) im Phytotronexperiment

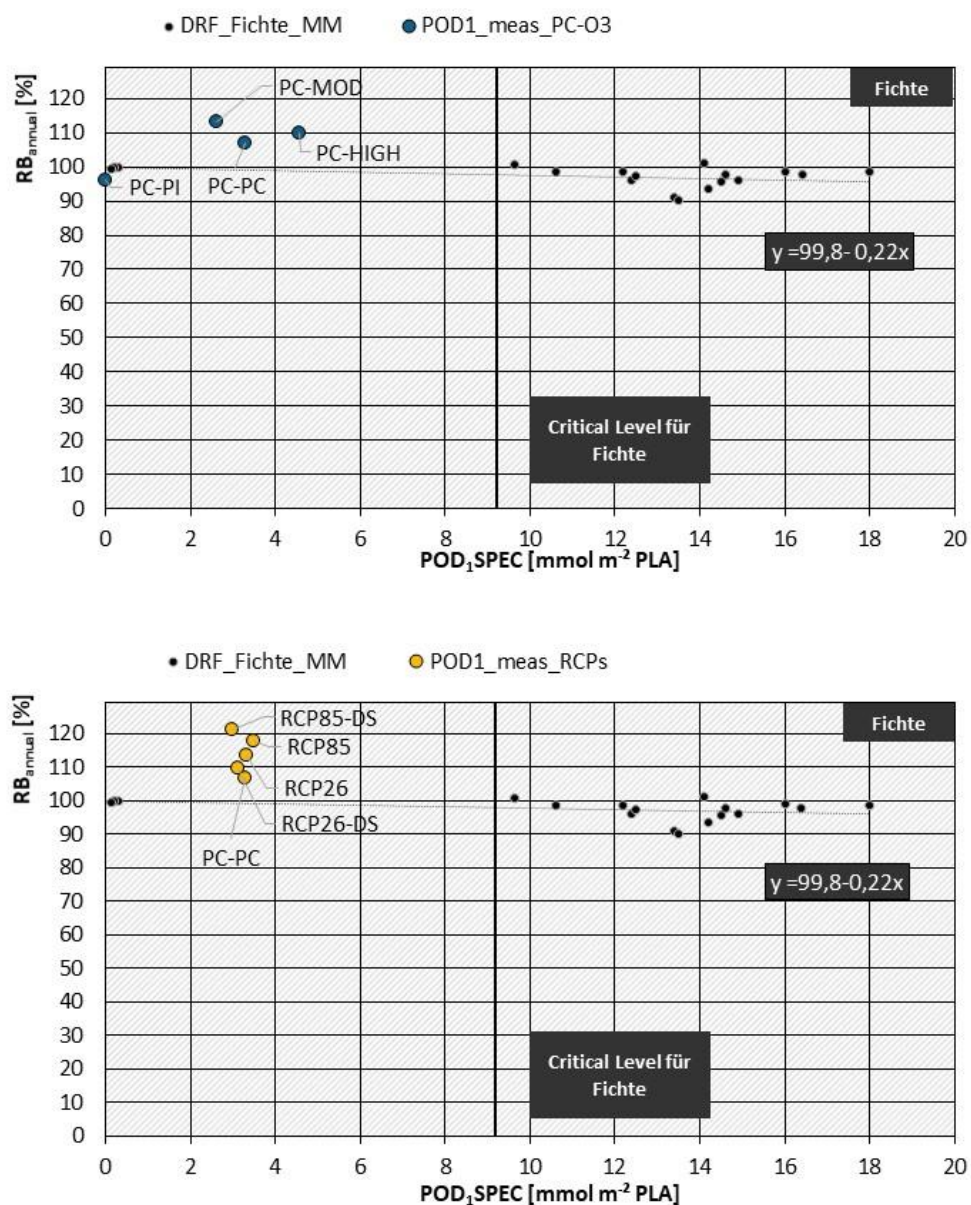
DRF_Buche/Birke_MM: POD₁SPEC-Werte aus der Dosis-Wirkungs-Beziehung für Buche/Birke (nach Mapping Manual, CLRTAP 2017). POD₁_meas_PC-O3: gemessene POD₁SPEC-Werte bei Buche für die Behandlungen im Gegenwartsklima mit verschiedenen O₃-Konzentrationen (= Ozongradient, PC-O3), Mittelwerte aus 2020 und 2021. POD₁_meas RCPs: gemessene POD₁SPEC-Werte bei Buche für die Behandlungen im Zukunftsszenario (= RCPs) und der Behandlung PC-PC (Gegenwartsklima mit Gegenwarts-O₃-Konzentrationen), Mittelwerte aus 2020 und 2021. RB_{annual}: Relative prozentuale jährliche Gesamtbiomasse im Vergleich zu PC-PI (Büker et al. 2015, CLRTAP 2017); Critical Level für Buche/Birke: ab POD₁SPEC >= 5,2 mmol m⁻² PLA potentielle Biomasseinbußen von 4 % bei Buche/Birke.



Quelle: eigene Darstellung, TUM

Abbildung 40: Dosis-Wirkungs-Beziehung für Fichte (nach Mapping Manual, CLRTAP 2017) mit den gemessenen POD_1 -Werten bei Fichte für die Behandlungen im Gegenwartsklima mit Ozongradient (oben) und für die Behandlungen im Zukunftsszenario (unten) im Phytotronexperiment

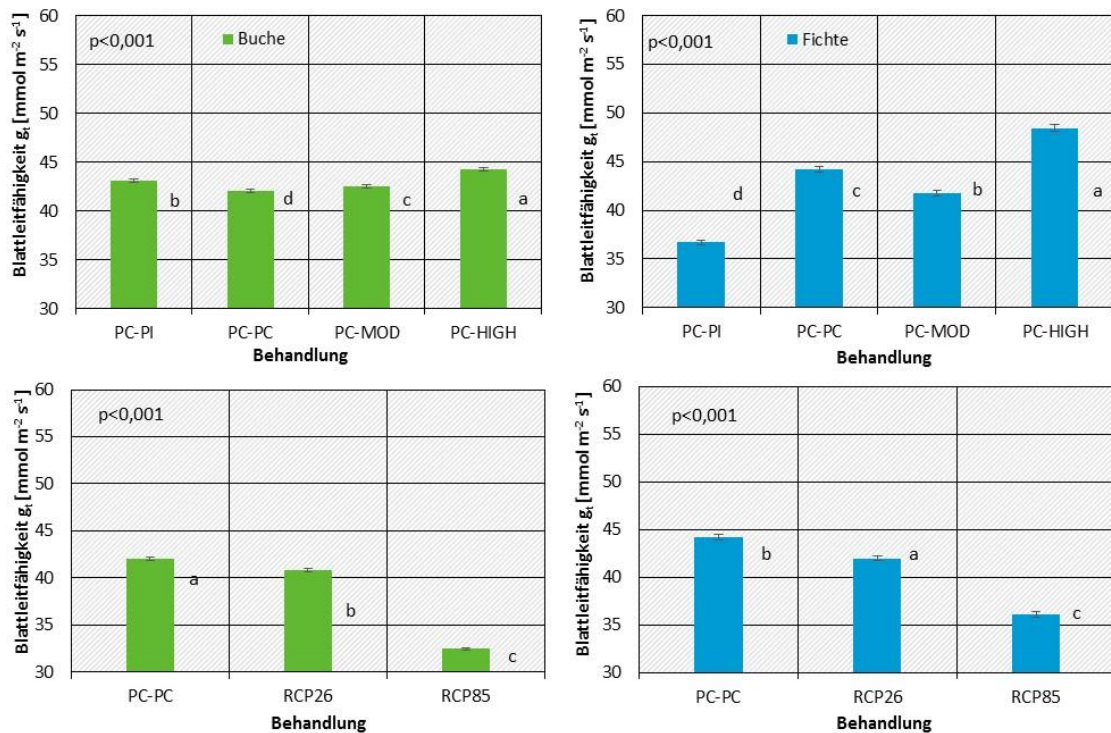
DRF_Fichte_MM: POD_1 SPEC-Werte aus der Dosis-Wirkungs-Beziehung für Fichte (nach Mapping Manual, CLRTAP 2017). POD_1 _meas_PC-O3: gemessene POD_1 SPEC-Werte bei Fichte für die Behandlungen im Gegenwartsklima mit verschiedenen O_3 -Konzentrationen (= Ozongradient, PC-O3), Mittelwerte aus 2020 und 2021. POD_1 _meas_RCPs: gemessene POD_1 SPEC-Werte bei Fichte für die Behandlungen im Zukunftsszenario (= RCPs) und der Behandlung PC-PC (Gegenwartsklima mit Gegenwarts- O_3 -Konzentrationen) Mittelwerte aus 2020 und 2021. RB_{annual} : Relative prozentuale jährliche Gesamtbiomasse im Vergleich zu PC-PI (Büker et al. 2015, CLRTAP 2017). Critical Level für Fichte: ab POD_1 SPEC $\geq 9,2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ PLA}$ potentielle Biomasseeinbußen von 2 % bei Fichte. Zu beachten ist, dass die prozentuale Biomasse bei PC-PI nicht 100 % (Kontrolle) beträgt, da nach der Zuwachsbestimmung (Subtraktion der der Ausgangsbiomasse 2018 von der Biomasse pro Baum 2021) eine exponentielle Berechnung für RB_{annual} erforderlich ist, die zu dieser Abweichung führt. Dies ergibt für PC-PI eine RB_{annual} für Buche von $99,5 \pm 2,3 \%$ und für Fichte von $96,2 \pm 7,9 \%$.



Quelle: eigene Darstellung, TUM

Abbildung 41: Gemessene Blattleitfähigkeit an Buchen und Fichten für die Behandlungen im Phytotronexperiment

Mittelwerte und Standardfehler (2020, 2021); PPFD > 100 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$



Quelle: eigene Darstellung, TUM

Ozondosis-Wirkungs-Beziehung und Ozonrisiko für Buche und Fichte im Phytotronexperiment

- Die gemessenen POD_1SPEC für Buche und Fichte lagen bei allen Behandlungen im Phytotronexperiment unterhalb der jeweiligen Critical Levels für die Ozonbelastung. Für diesen Bereich liegen damit erstmals Daten für die Ozondosis-Wirkungs-Funktion vor.
- Für die Behandlungen im Gegenwartsklima und RCP2.6 bestätigen die gemessenen POD_1 -Werte und die korrespondierenden Biomassen die Ozondosis-Wirkungsfunktion.
- Für das Zukunftsszenario RCP8.5 mit deutlich erhöhten CO_2 -Konzentrationen kann die Ozondosis-Wirkungsfunktion nicht bestätigt werden. Die Einschränkung der Blattleitfähigkeit bei erhöhtem CO_2 und die daraus resultierenden geringeren Ozonflüsse sowie die Zuwachssteigerungen durch erhöhtes CO_2 sind bisher nicht in der Ozondosis-Wirkungs-Funktion berücksichtigt.
- POD_1SPEC bei Fichte waren bei allen Behandlungen relativ ähnlich ($\sim 3,3 \text{ mmol m}^{-2} \text{ PLA}$). Bei RCP8.5 wurde eine nur geringfügig niedrigere Ozonaufnahme als bei den Ozonbelastungsvarianten unter Gegenwartsklima gemessen, da Fichte auf erhöhtes CO_2 mit einer deutlich geringeren Einschränkung der stomatären Leitfähigkeit reagiert als Buche.
- Bei Fichte wurde für alle Behandlungen eine höhere Zunahme der Biomasse im Vergleich zur Kontrolle festgestellt. Ein möglicher Erklärungsansatz für diese Reaktion ist das toxikologischen Reaktionskonzept der Hormesis, wonach es bei mäßig erhöhter Stressoren-Wirkung (Ozonbelastung) zunächst zu einer Stimulation des Wachstums kommen kann.

- Anmerkung: Im kontrollierten Phytotronexperiment wird ein möglichst homogenes Mikroklima durch eine geringe Luftbewegung mit sehr niedrigen Windgeschwindigkeiten in den Kammern garantiert. Der Zusammenhang zwischen der Windgeschwindigkeit und dem Grenzschichtwiderstand der Belaubung ist exponentiell: bei geringen Windgeschwindigkeiten steigen die Grenzschichtwiderstände stark an, bei steigenden Windgeschwindigkeiten nehmen die Grenzschichtwiderstände schnell ab und ändern sich ab einer Windgeschwindigkeit von ca. $0,5 \text{ m s}^{-1}$ nur noch wenig. Bei geringer Luftbewegungen bilden sich mächtige Grenzschichtwiderstände um die Blätter/Nadeln, was die Blattleitfähigkeit entsprechend herabsetzt. Daher wurden in den Phytotronen geringere Ozonflüsse und POD_1SPEC gemessen, als es am/über dem Kronendach unter Freilandbedingungen der Fall wäre.

2.4.3 Einfluss der CO_2 -Wichtungs-Funktion unter Freilandbedingungen auf das modellierte Ozonrisiko bei Buche und Fichte für Zukunftsszenarien (2100)

Die Modellierung des POD_1SPEC für Freilandbedingungen erfolgt mit den an oder über der Baumkrone herrschenden Windgeschwindigkeiten ($> 0,5 \text{ m s}^{-1}$). Somit ergeben sich deutlich höhere POD_1SPEC -Werte als im Phytotronexperiment (geringe Windbewegung, Kap. 2.2.3).

Um die Relevanz der CO_2 -Wichtungs-Funktion bei erhöhter CO_2 -Konzentration unter Freilandbedingungen zu zeigen, wurde das Ozonrisiko bei Buche und Fichte zusätzlich für unterschiedliche Annahmen zu realistisch erhöhten O_3 -Konzentrationen in Zukunftsszenarien (2100) modelliert (Abbildung 42, Abbildung 43). Für RCP2.6 und RCP8.5 wurden jeweils Ozonkonzentrationen verwendet, die aus den für den Mittelgebirgsstandort Spessart abgeleiteten Testreferenzjahren (TRJ) (siehe Kap. 2.1.2.1, Jákli et al. 2021, Gelhardt et al. 2021) abgeleitet wurden, sowie für Prognosen für Europa von Sicard et al. (2017). Sicard et al. (2017) haben mit sechs *global atmospheric chemical-transport*-Modellen für verschiedene RCP-Szenarien zukünftige (2100) O_3 -Konzentrationen modelliert und mit historischen O_3 -Konzentrationen (um 2000) verglichen, um potenzielle Auswirkungen von Ozon auf die Vegetation in der Zukunft zu untersuchen. Bis 2100 gehen Prognosen für Europa von einer Abnahme der O_3 -Konzentrationen um $-25,0 \pm 4,7 \%$ im RCP2.6- und einer Zunahme um $+11,5 \pm 7,3 \%$ im RCP8.5-Szenario aus (Sicard et al. 2017). Diese Annahmen wurden auf die Messdaten für den Spessart übertragen (siehe Jákli et al. 2021). Bei mittleren O_3 -Konzentrationen für PC von 29 ppb O_3 ergaben sich somit, bei RCP2.6 und RCP8.5 für das valortree TRY 34 bzw. 41 ppb O_3 und für Sicard et al (2017) 22 bzw. 33 ppb O_3 .

POD_1SPEC und Biomasseentwicklung bei Modellierung mit und ohne CO_2 -Wichtungsfunktion unter Freilandbedingungen

Für Buche und Fichte wurde POD_1SPEC mit den potentiellen zukünftigen Ozonkonzentrationen (nach TRJ, nach Sicard et al. 2017) für PC-PC, RCP2.6 und RCP8.5 mit und ohne Verwendung der CO_2 -Wichtungsfunktion für Freilandbedingungen modelliert und die jeweilige Biomassereduktion aus der linearen Gleichung der Ozondosis-Wirkungs-Funktion berechnet (Abbildung 42, Abbildung 43). Der modellierte POD_1SPEC erreichte bei Buche für die untersuchten Szenarien zwischen 13 und 15 mmol m^{-2} PLA bei Biomasseeinbußen von 10-14 %. Bei Fichte war der modellierte POD_1SPEC sowohl für PC-PC als auch für die beiden Zukunftsszenarien relativ hoch (zwischen 17 und 33 mmol m^{-2} PLA) bei Biomasseeinbußen zwischen 4 und 7 %.

Mit oder ohne Verwendung der CO_2 -Funktion ergaben sich für Buche und Fichte für PC-PC keine Unterschiede für POD_1SPEC und die Biomassereduktion. Für Buche bei RCP2.6 betrugen die modellierten POD_1SPEC -Werte (ohne CO_2 -Wichtungsfunktion) mit O_3 -Konzentrationen nach TRJ

(Abbildung 42, oben) und nach Sicard (2017, Abbildung 42, unten) 15,1 bzw. 13,2 mmol m⁻² PLA, für RCP8.5 15,4 bzw. 15,1 mmol m⁻² PLA. Für Fichte bei RCP2.6 betrugen die modellierten POD₁SPEC-Werte (ohne CO₂-Wichtungsfunktion) mit O₃-Konzentrationen nach TRJ (Abbildung 43, oben) und nach Sicard (2017, Abbildung 43, Abbildung 42, unten) 29 bzw. 17 mmol m⁻² PLA, für RCP8.5 32,5 bzw. 25,8 mmol m⁻² PLA.

Bei Modellierung mit der CO₂-Wichtungsfunktion nahm POD₁SPEC bei Buche und Fichte für RCP2.6 nur geringfügig ab (ca. 3 %), für RCP8.5 sank der POD₁SPEC jedoch um mehr als 25 % bei Buche und rund 20 % bei Fichte im Vergleich zur Modellierung ohne die CO₂-Funktion, wobei die modellierte Zuwachsreduktion um ca. 3 bzw. 4 % geringer ausfiel. Die Abnahme von POD₁SPEC (modelliert mit f_{CO2}) bei RCP2.6 und RCP8.5 entsprach in etwa der Abnahme der unter erhöhtem CO₂ gemessenen Blattleitfähigkeit (Abbildung 41, siehe auch Ainsworth et al. 2007, Purcell et al. 2018).

Die unterschiedlichen Annahmen zu zukünftigen Ozonkonzentrationen (valortree TRJ, nach Sicard et al. 2017) für RCP2.6 und RCP8.5 führten bei Fichte zu deutlich unterschiedlichen Ozonaufnahmen. Für eine Ozonbelastung nach TRJ war POD₁SPEC unter RCP2.6 um 70 % und für RCP8.5 um 25 % gegenüber den Ozonprognosen nach Sicard et al. (2017) erhöht, während bei Buche die Unterschiede bei 15 bzw. 5 % lagen. Da bei der Modellierung für Fichte aufgrund der geringeren O₃-Sensitivität bei Fichte keine Ozon-Wichtungsfunktion implementiert wurde entsprechen die POD₁SPEC etwa den prozentualen Unterschieden der jeweiligen mittleren O₃-Konzentrationen. Bei Buche dagegen wurde eine Ozon-Wichtungsfunktion implementiert, daher sind die POD₁SPEC-Unterschiede weniger ausgeprägt.

Zeitpunkt der ozondosisbedingten Einschränkung der stomatären Leitfähigkeit bzw. des Überschreitens der Critical Levels bei Modellierung mit und ohne CO₂-Wichtungsfunktion f_{CO2} unter Freilandbedingungen

Auswirkungen von f_{CO2} zeigten sich auch auf den Zeitpunkt des erstmaligen ozondosisbedingten Auftretens einer Einschränkung der stomatären Leitfähigkeit bzw. einer minimalen stomatären Leitfähigkeit (Tabelle 9): Bei Buche im RCP8.5-Szenario erfolgte die erstmalige Einschränkung der stomatären Leitfähigkeit mit Berücksichtigung von f_{CO2} rund 23 Tage später als für die restlichen Behandlungen, die minimale stomatäre Leitfähigkeit bei POD_{0,min} wurde innerhalb der Vegetationszeit gar nicht erreicht. Dagegen wurde die ozonbedingte Einschränkung der stomatären Leitfähigkeit ohne Verwendung von f_{CO2} deutlich früher erreicht, nämlich rund 35 Tage früher als für die restlichen Behandlungen, und POD_{0,min} wurde noch innerhalb der Vegetationszeit an TdJ 224 (2020) und TdJ210 (2021) überschritten.

Demensprechend zeigte sich die Relevanz der CO₂-Funktion bei der Modellierung auch für das Überschreiten des Critical Levels für Buche und Fichte (Tabelle 9). Bei Buche erfolgte die Überschreitung des Critical Levels nach Berücksichtigung von f_{CO2} bei RCP8.5 an TdJ 182 (2020) und TdJ176 (2021) und damit 13 bzw. 15 Tage später als für die anderen Behandlungen. Ohne f_{CO2} war der Critical Level an TdJ 154 (2020) und TdJ 149 (2021) und damit rund 27 Tage früher erreicht als mit Verwendung von f_{CO2}. Bei Fichte zeigte sich ein ähnliches Bild: Die Überschreitung des Critical Levels erfolgte bei RCP8.5 mit Verwendung von f_{CO2} an TdJ 191 (2020) und TdJ166 (2021) und damit 13 bzw. 6 Tage später als für die anderen Behandlungen. Ohne Verwendung von f_{CO2} war der Critical Level an TdJ 173 (2020) und TdJ 154 (2021) und damit 18 bzw. 11 Tage früher erreicht als mit Verwendung von f_{CO2}.

Zu bemerken ist, dass die Überschreitung der Critical Levels für Buche und Fichte bei den Gegenwarts- und Zukunftsszenarien schon kurz nach bzw. noch während des Austriebs (Austriebszeit Buche: 2020 TdJ 103- ca. 120, 2021 TdJ 113- ca. 140; Fichte: 2020 TdJ 120- ca.

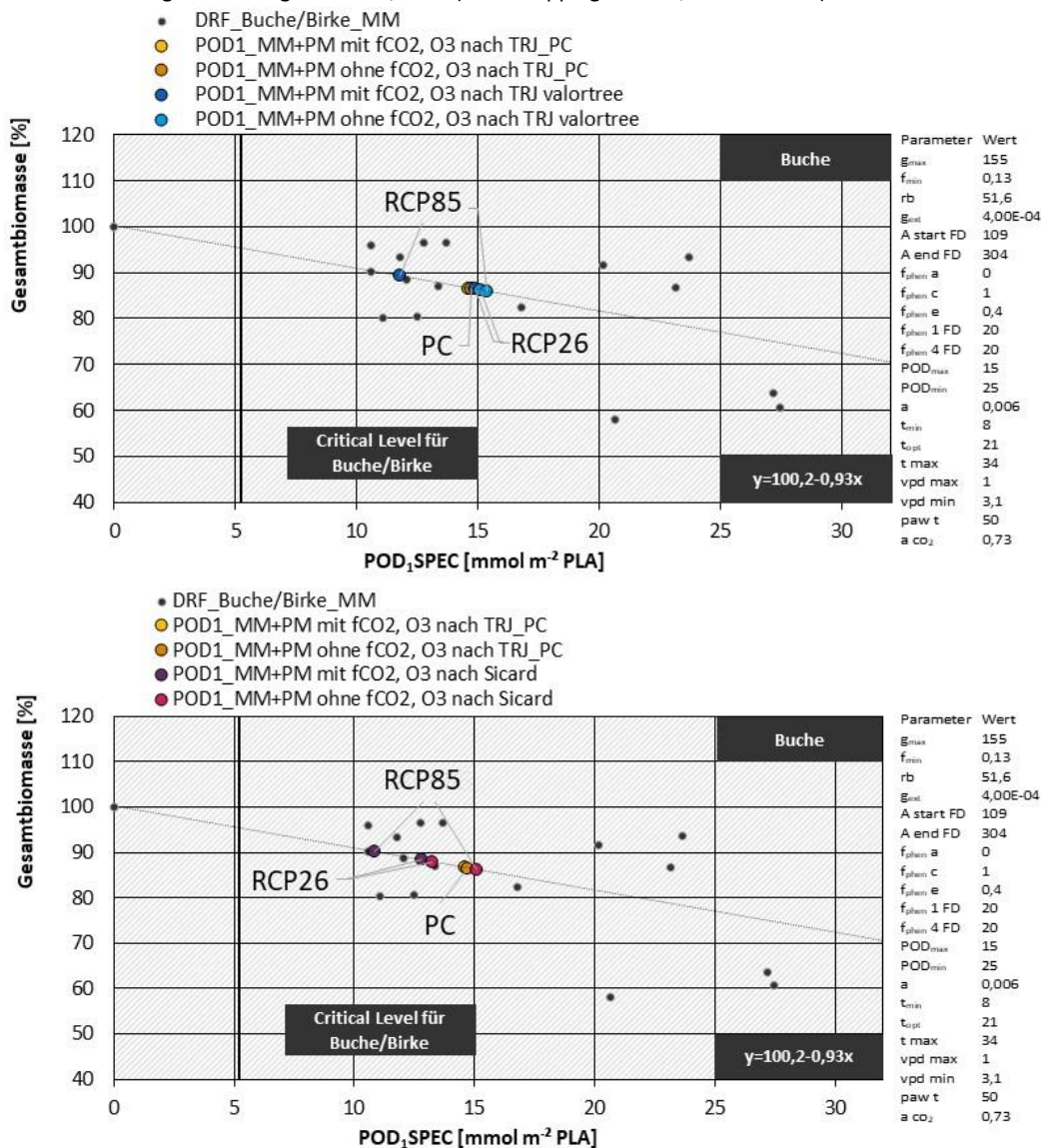
197, 2021 TdJ 103- ca. 180) erfolgte. Während dieser Ausdifferenzierungsphase ist die Belaubung besonders empfindlich gegenüber Stresseinwirkung.

- ▶ Die Relevanz der CO₂-Wichtungsfunktion bei der Modellierung des Ozonrisikos zeigt sich bei Buche und Fichte unter deutlich erhöhtem CO₂. Durch die unter deutlich erhöhtem CO₂ signifikant verringerte Blattleitfähigkeit wird POD₁SPEC im RCP8.5-Szenario ohne Implementierung von f_{CO_2} sowohl für Buche als auch für Fichte deutlich überschätzt. Auf Grund der höheren Sensitivität von Buche gegenüber erhöhtem CO₂ ist der Effekt bei Buche stärker ausgeprägt als bei Fichte. Im RCP2.6-Szenario zeigt sich dieser Effekt aufgrund des weniger stark erhöhten CO₂ in schwächerer Ausprägung.
- ▶ Insbesondere bei Buche führt die Verwendung von f_{CO_2} bei der Modellierung zu einer deutlichen Abnahme des POD₁SPEC (rund 27 %). Bei Fichte war der Einfluss von f_{CO_2} mit ca. 20 % geringeren POD₁SPEC etwas schwächer ausgeprägt.
- ▶ Der Critical Level wird bei Verwendung von f_{CO_2} aufgrund der geringeren stomatären Ozonflüsse bei Buche und Fichte deutlich später im Jahr erreicht als im Gegenwarts-klima und in RCP2.6.
- ▶ Die Überschreitung der Critical Levels für Buche und Fichte erfolgt bei den Gegenwarts- und Zukunftsszenarien schon kurz nach bzw. noch während des Austriebs. In dieser Wachstumsphase ist die neue Belaubung noch nicht vollständig ausdifferenziert und daher besonders sensitiv gegenüber Stresseinwirkung.
- ▶ Wird POD₁SPEC für durch erhöhtes CO₂ geprägte Zukunftsszenarien modelliert, so ist eine realistische Risikobewertung nur bei Implementierung der Wichtungsfunktion f_{CO_2} mit der jeweiligen Parametrisierung für Buche bzw. Fichte möglich. Ohne Verwendung der CO₂-Wichtungsfunktion bei der Modellierung wird POD₁SPEC somit bei zukünftig hohen CO₂-Konzentrationen überschätzt werden.

Abbildung 42: Ozonrisiko modelliert für Buche unter Freilandbedingungen bei erhöhten O₃-Konzentrationen in Zukunftsszenarien (RCP2.6, 8.5; O₃ nach valortree-Testreferenzjahren bzw. nach Sicard et al. 2017) & Einfluss der CO₂-Wichtungsfunktion (f_{CO_2} , erweiterte Parametrisierung) auf das Ozonrisiko bei Zukunftsszenarien mit erhöhtem CO₂

Dosis-Wirkungs-Beziehung für Buche/Birke mit für Freilandbedingungen modellierten POD₁SPEC-Werten für Buche (mit und ohne f_{CO_2}) für die RCP-Zukunftsszenarien: (oben) mit zukünftigen O₃-Konzentrationen für die valortree-RCP-Testreferenzjahre und (unten) mit zukünftigen O₃-Konzentrationen nach Sicard et al. (2017).

POD1_MM+PM: für Freilandbedingungen nach Mapping Manual (MM) mit erweiterter Parametrisierung modellierte (PM) POD₁SPEC (für Windgeschwindigkeit $u=1 \text{ m s}^{-1}$, Parametrisierung in Kasten rechts der Abbildung), für 2021; mit f_{CO_2} : mit Verwendung der CO₂-Funktion. ohne f_{CO_2} : ohne Verwendung der CO₂-Funktion; O₃ nach TRJ valortree: mit zukünftigen O₃-Konzentrationen modelliert für die valortree-Testreferenzjahre RCP2.6 und RCP8.5; O₃ nach TRJ_PC: mit O₃-Konzentrationen modelliert für das valortree-Testreferenzjahr für Gegenwarts-klima mit (PC-PC); O₃ nach Sicard et al. (2017): mit zukünftigen O₃-Konzentrationen modelliert nach Sicard et al. (2017). Critical Level für Buche/Birke: ab POD₁SPEC $\geq 5,2 \text{ mmol m}^{-2} \text{ PLA}$ potentielle Biomasse-einbußen von 4 % bei Buche/Birke; DRF_Buche/Birke_MM: POD₁SPEC-Werte aus der Dosis-Wirkungs-Beziehung für Buche/Birke (nach Mapping Manual, CLRTAP 2017).

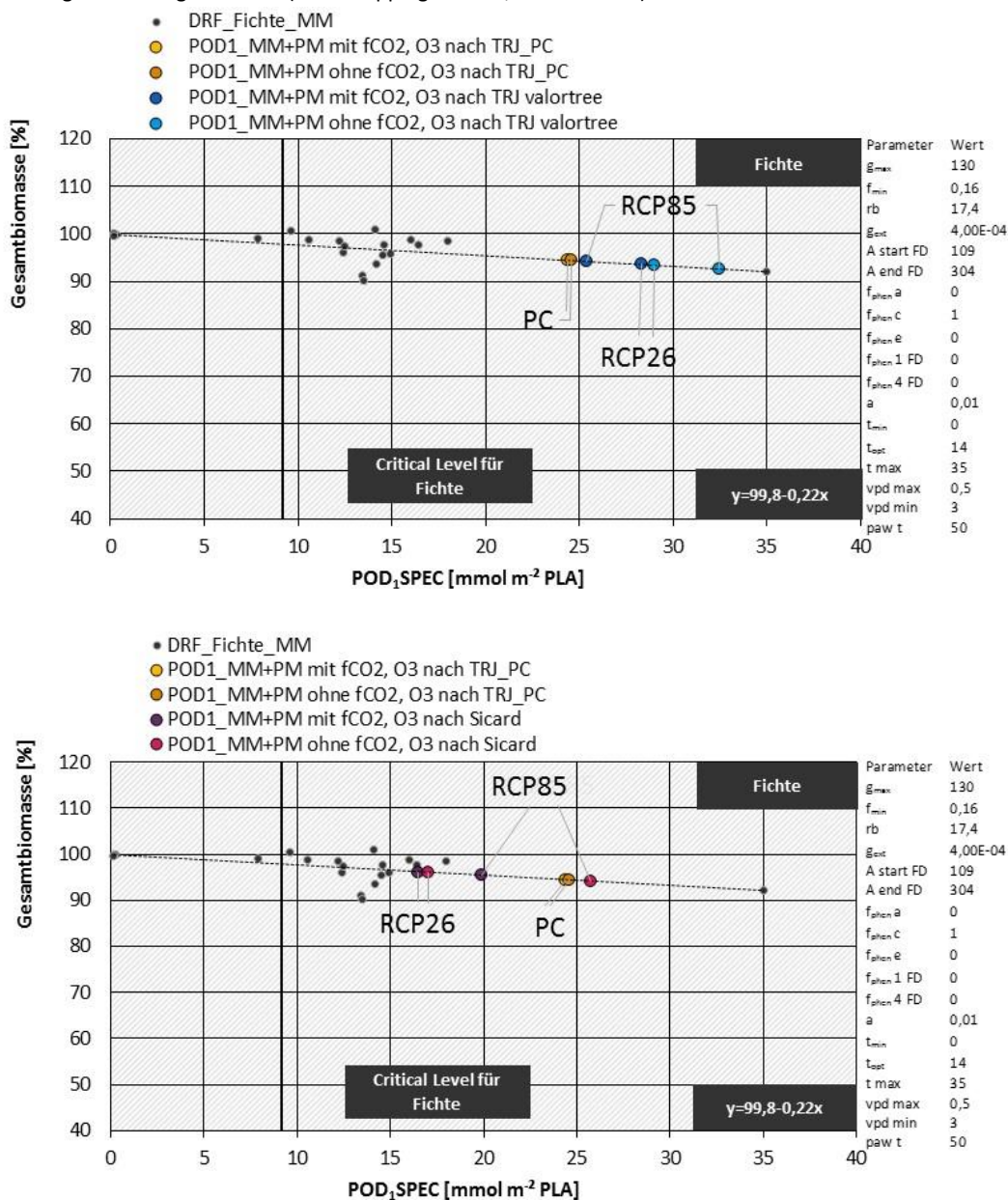


Quelle: eigene Darstellung, TUM

Abbildung 43: Ozonrisiko modelliert für Fichte unter Freilandbedingungen bei erhöhten O₃-Konzentrationen in Zukunftsszenarien (RCP2.6, 8.5; O₃ nach valortree-Testreferenzjahren bzw. nach Sicard et al. 2017) & Einfluss der CO₂-Wichtungsfunktion (f_{CO2}, erweiterte Parametrisierung) auf das Ozonrisiko bei Zukunftsszenarien mit erhöhtem CO₂

Dosis-Wirkungs-Beziehung für Fichte mit für Freilandbedingungen modellierten POD₁SPEC-Werten für Fichte (mit und ohne f_{CO2}) für die RCP-Zukunftsszenarien: (oben) mit zukünftigen O₃-Konzentrationen für die valortree-RCP-Testreferenzjahre und (unten) mit zukünftigen O₃-Konzentrationen nach Sicard et al. (2017).

POD1_MM+PM: für Freilandbedingungen nach Mapping Manual (MM) mit erweiterter Parametrisierung modellierte (PM) POD₁SPEC (für Windgeschwindigkeit u=1 m s⁻¹, Parametrisierung in Kasten rechts der Abbildung), für 2021; mit f_{CO2}: mit Verwendung der CO₂-Funktion. ohne f_{CO2}: ohne Verwendung der CO₂-Funktion; O₃ nach TRJ valortree: mit zukünftigen O₃-Konzentrationen modelliert für die valortree-Testreferenzjahre RCP2.6 und RCP8.5; O₃ nach TRJ_PC: mit O₃-Konzentrationen modelliert für das valortree-Testreferenzjahr für Gegenwarts-klima mit (PC-PC); O₃ nach Sicard et al. (2017): mit zukünftigen O₃-Konzentrationen modelliert nach Sicard et al. (2017). Critical Level für Fichte: ab POD₁SPEC >= 9,2 mmol m⁻² PLA potentielle Biomasse-einbußen von 2 % bei Fichte; DRF_Fichte_MM: POD₁SPEC-Werte aus der Dosis-Wirkungs-Beziehung für Fichte (nach Mapping Manual, CLRTAP 2017).



Quelle: eigene Darstellung, TUM

Tabelle 9: Auswirkung der CO₂-Wichtungsfunktion (f_{CO_2}) auf den Zeitpunkt des erstmaligen ozondosisbedingten Auftretens einer Einschränkung der stomatären Leitfähigkeit, einer minimalen stomatären Leitfähigkeit für Buchen, sowie der erstmaligen Überschreitung des Critical Levels für die Ozonbelastung (CL) für Buche/Birke und Fichte

Dargestellt ist jeweils der TdJ (Tag des Jahres) bei Modellierung (nach Mapping Manual (MM, CLRTAP 2017) mit der erweiterten Parametrisierung mit und ohne Nutzung der CO₂-Funktion (f_{CO_2}) ab dem

a) bzw. d) die stomatäre Leitfähigkeit der Buchen erstmalig aufgrund der akkumulierten stomatären Ozonaufnahme eingeschränkt wird ($POD_0 < 15$, $f_{O_3} < 1$),

b) bzw. e) die minimale stomatäre Leitfähigkeit der Buchen erstmalig aufgrund der Ozondosis erreicht wird ($POD_0 < 25$, $f_{O_3} = 0,13$),

c) bzw. f) der Critical Level für die Ozonbelastung bei Buche/Birke ($CL \geq 5,2$ mmol m⁻² PLA) überschritten wird,

g) bzw. h) der Critical Level für die Ozonbelastung bei Fichten ($CL \geq 9,2$ mmol m⁻² PLA) überschritten wird.

Jahr	Behandlung	a) TdJ $f_{O_3} < 1$ Buche	b) TdJ $f_{O_3} = 0.13$ Buche	c) TdJ $CL \geq 5,2$ Buche	d) TdJ $f_{O_3} < 1$ Buche	e) TdJ $f_{O_3} = 0.13$ Buche	f) TdJ $CL \geq 5,2$ Buche	g) TdJ $CL \geq 9,2$ Fichte	h) TdJ $CL \geq 9,2$ Fichte
		modelliert nach MM mit für Freilandbedingungen erweiterter Parametrisierung						modelliert nach MM	
		mit f_{CO_2}			ohne f_{CO_2}			mit f_{CO_2}	ohne f_{CO_2}
2020	PC_HIGH	201	256	167	198	250	164	168	167
2020	PC_MOD	202	262	168	199	255	167	173	172
2020	PC_PC	201	269	167	196	261	166	174	173
2020	PC_PI								
2020	RCP26_DS	206	256	171	202	245	168	191	186
2020	RCP26	202	243	172	198	236	169	182	180
2020	RCP85_DS	224		182	185	224	154	191	166
2020	RCP85	223		181	184	224	154	191	173
2021	PC_HIGH	183	226	154	182	223	154	161	159
2021	PC_MOD	188	238	161	187	234	159	159	158
2021	PC_PC	185	232	158	184	230	156	158	157
2021	PC_PI						265		
2021	RCP26_DS	193	236	160	190	230	158	163	162
2021	RCP26	189	226	159	186	221	157	161	159
2021	RCP85_DS	213		177	178	212	150	166	156
2021	RCP85	212		175	176	209	148	165	154

Quelle: eigene Darstellung, TUM

Einfluss der CO₂-Wirkungsfunktion auf das modellierte Ozonrisiko bei Buchen und Fichten für Zukunftsszenarien (2100) unter Freilandbedingungen

- ▶ Die modellierten POD₁SPEC-Werte für Freilandbedingungen (am/über Kronendach) für die verschiedenen Behandlungen mit erhöhter Ozonbelastung liegen für Buche und Fichte weit über den Critical Levels und auch über den vorgeschlagenen Zielwerten für die Ozonbelastung. Damit sind Wachstumseinschränkungen für gegenwärtige und zukünftige Bedingungen zu erwarten (siehe auch Kap. 2.6.2).
- ▶ Die Überschreitung der Critical Levels für Buche und Fichte erfolgt bei den Gegenwarts- und Zukunftsszenarien schon ein bis zwei Wochen nach bzw. noch während des Austriebs. In dieser Wachstumsphase ist die neue Belaubung noch nicht vollständig ausdifferenziert und daher besonders sensitiv gegenüber durch Stresseinwirkung. Die neu in die Parametrisierung aufgenommene CO₂-Wichtungsfunktion bei der Modellierung des POD₁SPEC für Buchen zeigt ihre Relevanz bei zukünftig stark erhöhten CO₂-Konzentrationen (RCP8.5). Entsprechend der eingeschränkten Blatt-Leitfähigkeit bei erhöhten CO₂-Konzentrationen sind die Ozonaufnahmen bei Buche unter RCP8.5 deutlich reduziert und der Critical Level wird somit etwas später erreicht als unter Gegenwartsbedingungen und RCP2.6.
- ▶ Fichten reagieren im Vergleich zu Buchen mit geringerer Sensitivität auf erhöhte CO₂-Konzentrationen. Die Einschränkung der stomatären Leitfähigkeit über den CO₂-Wichtungsfaktor fällt somit deutlich geringer aus als bei Buche. Analog zu Buche wurde eine Ozondosis-Wichtungsfunktion für die stomatäre Leitfähigkeit bei Fichte überprüft. Im Gegensatz zu Buche lag eine geringere stomatäre Leitfähigkeit jedoch nur bei dauerhaft niedrigen O₃-Konzentrationen im PC-PI-Szenario im Phytotronexperiment vor. Für Freilanddaten war aufgrund der geringen Sensitivität der Fichte gegenüber erhöhten Ozonkonzentrationen kein Effekt der akkumulierten Ozondosis auf das Stomataverhalten erkennbar. Da dauerhaft erniedrigte Ozonkonzentrationen (wie in PC-PI) im Gegensatz zum Phytotronexperiment im Freiland nicht vorkommen, wird die Einführung einer Ozonfunktion für Fichte nicht empfohlen. Unter RCP8.5 werden die Critical Levels zu einem ähnlichen Zeitpunkt wie unter gegenwärtigen Bedingungen erreicht, insgesamt steigt die Ozonaufnahme aber im weiteren Verlauf der Vegetationszeit noch deutlich an.
- ▶ Da die Prognosen für die Entwicklung der zukünftigen O₃-Konzentrationen abhängig von den Simulationsannahmen unterschiedlich ausfallen, sollte die Bewertung des Ozonrisikos mit verschiedenen, realistischen Annahmen zu möglichen Ozonkonzentrationen erfolgen.

2.5 Kritische Belastungswerte (*critical levels*) und Zielwerte (*target values*) als Grundlage für die Ozon-Risikobewertung für Waldbäume in Deutschland

Aus toxikologischer Sicht kann nur das Ozon, das über die Spaltöffnungen aufgenommen wird, im Stoffwechsel der Pflanzen eine Wirkung entfalten. Nach dem UNECE-CLRTAP Mapping Manual (CLRTAP 2017) erfolgt die Beurteilung des Ozon-Risikos für das receptorspezifische Schutzziel anhand der Berechnung speziesspezifischer Phytotoxischer Ozon-Dosen (POD_ySPEC) und deren Vergleich mit receptorspezifischen flussbasierten kritischen Belastungswerten (*flux-based critical levels*, CL). Diese beziehen sich auf das vorindustrielle O₃-Belastungsniveau und sind deshalb als Zielgrößen kaum umsetzbar.

In der VDI-Richtlinie 2310 Blatt 6 (2020) werden deshalb receptorspezifische Zielwerte (*target values*, TV) im Sinne von Artikel 2 der Richtlinie 2008/50/EG über Luftqualität und saubere Luft für Europa vom 21. Mai 2008 (RL 2008/50/EG) angeführt. Die Zielwerte spiegeln die Ozon-Belastungssituation vor den 1980er-Jahren wider und sind mit dem Ziel abgeleitet worden, größere schädliche Auswirkungen bezüglich der receptorspezifischen Schutzziele zu vermeiden. Sie werden als praktikable Zielgrößen verstanden, die in einem noch zu definierenden Zeitraum zu erreichen sind.

Die Beurteilung des Ozon-Risikos nach VDI 2310 Blatt 6 (2020) erfolgt nach dem Vorsorgeprinzip im Sinne einer *worst-case*-Risikobeurteilung, d.h. ein begrenzender Einfluss des Bodenwassergehalts auf die stomatare Ozon-Aufnahme wird ausgeschlossen. Steigende POD_ySPEC-Werte bedeuten steigendes Risiko. Wird der flussbasierte kritische Belastungswert CL unterschritten, ist nach VDI 2310 Blatt 6 (2020) maximal möglicher Schutz gegeben. Bei Überschreiten des receptorspezifischen Zielwertes (*target value*, TV) besteht ein hohes Risiko für das entsprechende Schutzziel. Bei POD_ySPEC-Werten zwischen kritischem Belastungswert CL und Zielwert TV besteht ein moderates Risiko für das entsprechende Schutzziel. Visualisiert wird das unterschiedliche Risiko durch die Ampelfarben Grün, Gelb und Rot.

Das Schutzziel für Buche und Fichte ist jeweils der jährliche Zuwachs an Gesamtbaumbiomasse. Der kritische Belastungswert CL für Buche nach CLRTAP (2017) ist 5,2 mmol m⁻² PLA und für Fichte 9,2 mmol m⁻² PLA. Der Zielwert nach VDI 2310 Blatt 6 (2020) beträgt 13 mmol m⁻² PLA für Buche und 15 mmol m⁻² PLA für Fichte.

2.6 Ozon-Risikobewertung für Waldbäume in Deutschland für verschiedene Zukunftsszenarien

Zur Beurteilung des Risikos durch Ozon-Belastungen der Vegetation stehen folgende Excel-Dateien für verschiedene Rezeptoren im Anhang der VDI-Richtlinie 2310 Blatt 6 (2020) zur Verfügung:

Winterweizen:	CRO3PS_wheat.xlsx
Buche:	FO3REST_beech.xlsx
Fichte:	FO3REST_spruce.xlsx
Kiefer:	FO3REST_pine.xlsx
artenreiches Grünland	GRASSLANDO3.xlsx

Das Programm für artenreiches Grünland beinhaltet eine Parametrisierung für Gräser und eine für Kräuter inkl. Leguminosen.

Die Programmdateien sind dabei im Wesentlichen gleich aufgebaut.

Arbeitsblatt "information":

Hier sind vom Nutzer spezifische Standortinformationen wie z.B. Stationshöhe und Längen-/Breitengrad anzugeben.

Arbeitsblatt "remarks":

Hier sind die einzelnen Schritte zur Berechnung der Phytotoxischen O₃-Dosis sowie zur Risikobeurteilung beschrieben.

Arbeitsblatt "input":

Hier sind die erforderlichen Input-Daten (Globalstrahlung, horizontale Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, relativer Luftfeuchte, O₃-Konzentration und im Rahmen dieses Projektes CO₂-Konzentration) auf Stundenbasis einzutragen. Sind die Datensätze nicht vollständig, müssen Datenlücken durch geeignete Fehlwertersetzungsprogramme aufgefüllt werden. Liegen keine Daten zur horizontalen Windgeschwindigkeit vor, kann diese zumindest in Deutschland durch einen konstanten Wert von 2,5 m s⁻¹ in 10 m Höhe approximiert werden. Wie in Bender et al. (2015) und VDI 2310 Blatt 6 (2020) gezeigt, resultieren daraus keine nennenswerten Qualitätseinbußen bezüglich der Aussagen zum O₃-Risiko für die Vegetation.

Arbeitsblatt "Jarvis functions":

Hier werden die Funktionen zur Berücksichtigung von Strahlung $f_{\text{Strahlung}}$, Lufttemperatur f_{Temp} , Wasserdampfsättigungsdefizit der Atmosphäre f_{VPD} , Bodenwassergehalt f_{PAW} , Entwicklungszustand f_{phen} , O₃-Belastung f_{O_3} und im Rahmen dieses Projektes CO₂-Konzentration f_{CO_2} auf das Stomataverhalten berechnet.

Bei der Beurteilung des O₃-Risikos nach dem Vorsorgeprinzip ist $f_{\text{PAW}} = 1$. Zur Berücksichtigung der "realen" Bodenwasserverhältnisse stellt VDI 2310 Blatt 6 (2020) die Modelle

- WinterWheat_plant_available_water_content.xlsx
- Beech_plant_available_water_content.xlsx
- Spruce_plant_available_water_content.xlsx

zur Abschätzung der f_{PAW} -Werte zur Verfügung. Für Kiefer kann in erster Näherung die Parametrisierung für Fichte herangezogen werden. Für Grünland empfiehlt VDI 2310 Blatt 6 (2020) die Werte für f_{PAW} auf 0,3 zu setzen, um den Einfluss von Bodentrockenheit auf das O₃-Risiko für Grünland beurteilen zu können.

Arbeitsblatt "POD_ySPEC calculation":

Hier werden auf der Grundlage der auf projizierte Blattfläche (PLA, *projected leaf area*) bezogene stomatäre O₃-Aufnahmen von Sonnenblättern $F_{\text{Sonnenblatt, stom, O}_3}$ für die jeweiligen rezeptorspezifischen Akkumulationszeiträume kalkuliert.

Arbeitsblätter "summary" und "Zusammenfassung":

Hier sind die Ergebnisse der O₃-Risikobewertung nach dem Konzept des Vorsorgeprinzips auf Grundlage der rezeptorspezifischen POD_ySPEC-Werte und kritischen Belastungswerte nach CLRTAP (2017) sowie der Zielwerte nach VDI 2310 Blatt 6 (2020) zusammengestellt.

Zur Berechnung der rezeptorspezifischen Akkumulationszeiträume beinhaltet das Modell CRO3PS_wheat das zusätzliche Arbeitsblatt "*canopy development*" und das Modell FO3REST_beech das Arbeitsblatt "*start_end of growing season*".

Die Modelle rCRO3PS_wheat.xlsx, rFO3REST_beech.xlsx, rFO3REST_spruce.xlsx, rFO3REST_pine.xlsx und rGRASSLANDO3.xlsx benötigen als Input-Größen lediglich die Lufttemperatur und die O₃-Konzentration. Die Approximation von aktueller Globalstrahlung und relativer Luftfeuchte erfolgt in den Arbeitsblättern "radiation model" und "global radiation & rH". Die horizontale Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe wird fest mit 2,5 m s⁻¹ angesetzt. Die

mit den r-Modellen berechneten POD_YSPEC -Werte werden als approximativ (aPOD_YSPEC) bezeichnet.

Alle Programmdateien können auch über das Umweltbundesamt (Fachgebiet II 4.3, Luftreinhaltung und terrestrische Ökosysteme, Wörlitzer Platz 1, Postfach 1406, 06813 Dessau-Roßlau) angefordert werden.

Die nachstehende Risikobeurteilung für Buche und Fichte beruht auf Daten der als repräsentativ für Mittelgebirgslagen angesehenen hessischen Luftmessstation Spessart der Jahre 1987 – 2016 sowie den darauf beruhenden Projektionsrechnungen der Fa. MeteoSolutions GmbH, Darmstadt (vgl. Kapitel 2.1.1, Gelhardt et al. 2021, Jákli et al. 2021).

2.6.1 Auswirkungen verschiedener Ozon-Belastungsszenarien auf die stomatäre O_3 -Aufnahme unter gegenwärtigen Klimaverhältnissen

Neben den Messdaten der Jahre 1987-2016 der hessischen Luftmessstation Spessart werden nachstehende O_3 -Szenarien für die Modellierung verwendet:

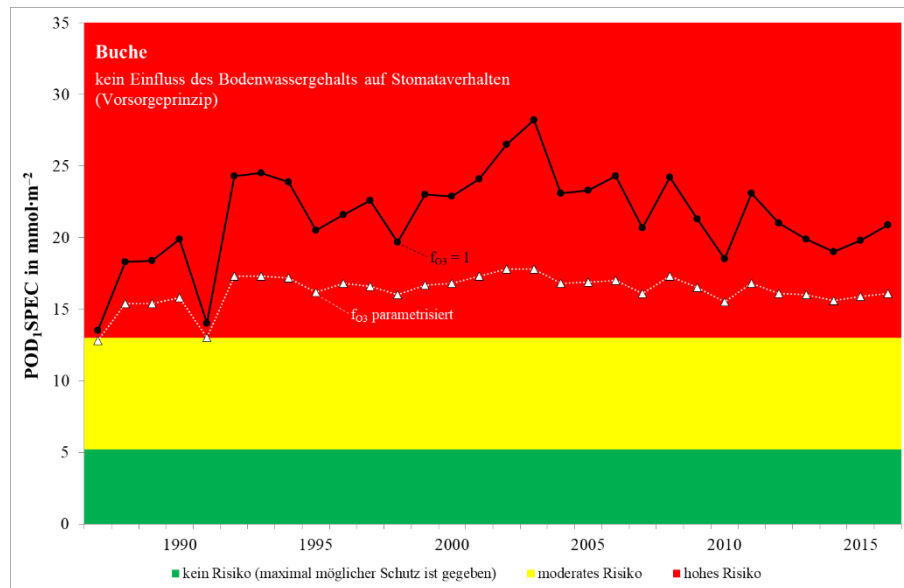
1. O_3 -Konzentrationen des Rekombinationsjahres Referenz
2. vorindustrielle O_3 -Konzentrationen
3. sinkende O_3 -Hintergrundkonzentrationen und Verringerung der Spitzenwerte um jeweils 5 ppb
=MAX(0; O_3 -Stundenwert-5); Achtung: negative Werte werden auf Null gesetzt
4. moderat erhöhte O_3 -Hintergrundkonzentration bei Verringerung der Spitzenwerte um 5 ppb
=WENN(O_3 -Stundenwert <40; O_3 -Stundenwert +5;WENN(O_3 -Stundenwert >45; O_3 -Stundenwert-5; O_3 -Stundenwert));
entspricht 2100 O_3 -Szenario für RCP6 nach Hayes et al. (2019) bei einem Temperaturanstieg um 2 K relativ zur Gegenwart
5. stark erhöhte O_3 -Hintergrundkonzentration bei Verringerung der Spitzenwerte um 5 ppb
=WENN(O_3 -Stundenwert <40; O_3 -Stundenwert+10;WENN(UND(O_3 -Stundenwert >=40; O_3 -Stundenwert <50); O_3 -Stundenwert+5; O_3 -Stundenwert-5))

Abbildung 44 illustriert die Ergebnisse der Risikoanalyse nach dem Vorsorgeprinzip für Buche auf Grundlage der Messdaten der Luftmessstation Spessart der Jahre 1987-2016, Abbildung 45 die Ergebnisse für Fichte. Die Rechnungen erfolgten nach VDI 2310 Blatt 6 (2020) bzw. CLRTAP (2017). Die Abschätzung von Beginn und Ende der Wachstumsperiode der Buche erfolgte mit dem angepassten Breitengradmodell von Grünhage & Bender (2017), die Abschätzung des Einflusses der Temperatur auf das Stomataverhalten erfolgte mit der an Hand der Kranzberger Daten von Nunn et al. (2005) angepassten Wichtungsfunktion (siehe Kapitel 2.3.3). Der Einfluss steigender atmosphärischer CO_2 -Konzentrationen auf das Stomataverhalten von Buche und Fichte wurde unter den gegenwärtigen Klimabedingungen nicht berücksichtigt, um im Einklang mit der Parametrisierung des Stomataverhaltens nach CLRTAP (2017) zu bleiben. Eine Wichtungsfunktion für Ozon f_{O_3} ist im Mapping Manual prinzipiell für alle Rezeptoren vorgesehen, aber nur für Weizen und Kartoffel enthalten (Danielsson et al. 2003, Pleijel et al. 2002). Für Buche und Fichte ist f_{O_3} gleich Eins gesetzt ist und somit wird der Einfluss von Ozon auf den stomatären Leitfähigkeit bisher bei Waldbäumen nicht berücksichtigt. Die in Abbildung 44 visualisierten POD_YSPEC -Werte für Buche wurden deshalb zum einen ohne Berücksichtigung des Einflusses der O_3 -Belastung gemäß CLRTAP (2017) und zum anderen mit der in dieser Studie abgeleiteten Parametrisierung zur Berücksichtigung des Einflusses der O_3 -Belastung berechnet.

Es wird deutlich, dass ein hohes Risiko für den jährlichen Zuwachs an Gesamtbaumbiomasse der Buche besteht. Dies ist unabhängig davon, ob der Einfluss der O_3 -Belastung auf die Öffnungsweite der Stomata berücksichtigt wird. Ohne Berücksichtigung des Einflusses der O_3 -Belastung auf das Stomataverhalten beträgt der potentielle Verlust am jährlichen Zuwachs im

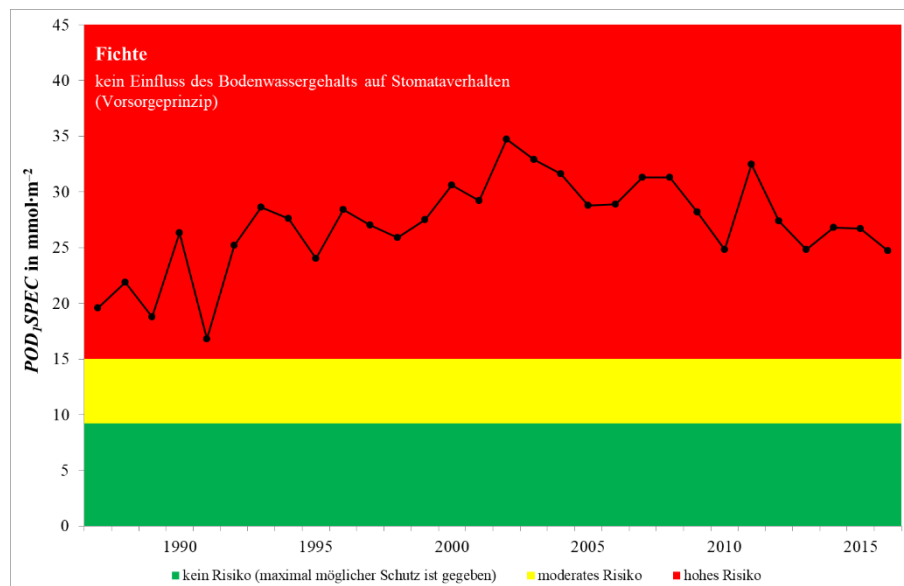
Mittel der Jahre 2012–2016 17,9 % (*worst-case*-Szenario, Vorsorgeprinzip); mit Berücksichtigung immer noch 14,0 %.

Abbildung 44: POD₁SPEC-Werte für Buche mit und ohne Berücksichtigung des Einflusses der O₃-Belastung auf das Stomataverhalten (Datenquelle: Luftmessstation Spessart, 1987 – 2016)



Quelle: eigene Darstellung, L. Grünhage

Abbildung 45: POD₁SPEC-Werte für Fichte (Datenquelle: Luftmessstation Spessart, 1987 – 2016)



Quelle: eigene Darstellung, L. Grünhage

Auch für Fichte besteht gegenwärtig ein hohes Risiko für Zuwachsverluste. Dieses liegt im Mittel der Jahre 2012–2016 bei 5,7 % (*worst-case*-Szenario, Vorsorgeprinzip). Ein Einfluss der O₃-Belastung auf das Stomataverhalten war im Gegensatz zu Buche bei Fichte für Freilandbedingungen nicht feststellbar (siehe Kapitel 2.3.4). Kenngrößen für die O₃-Exposition der verschiedenen O₃-Szenarien sind in Tabelle 10 zusammengestellt. Neben den mittleren O₃-Konzentrationen sind die AOT40-Werte als Maß für die Expositionsdosis angeführt.

Tabelle 10: Kenngrößen für die O₃-Exposition für verschiedene O₃-Szenarien in Messhöhe der lufthygienischen Messstation Spessart (z = 3,5 m) unter gegenwärtigen Klimaverhältnissen (Testreferenzjahr Gegenwart)

Klimaszenario und Ozonregime	O ₃ -Konzentration (Mittel) [ppb]		AOT40 [ppb.h]
Zeitraum: Tageszeit:	01.01. – 31.12. 24 Stunden	01.04. – 30.09. Tageslichtstunden	01.04. – 30.09 Tageslichtstunden
Klima des Testreferenzjahrs Gegenwart:			
[O ₃] des Testreferenzjahrs Gegenwart	28,6	41,9	15,494
vorindustrielle O ₃ -Belastungssituation	9,5	14,0	0
sinkende O ₃ -Hintergrundkonzentration	23,7	36,0	10,153
moderat erhöhte Hintergrund-[O ₃]	31,7	42,1	11,584
stark erhöhte Hintergrund-[O ₃]	36,4	46,3	17,885

Quelle: eigene Darstellung, L. Grünhage

In der Vegetationszeit April bis September liegt während der Tageslichtstunden die mittlere O₃-Konzentration im O₃-Szenario "moderat erhöhte Hintergrundkonzentration" in der gleichen Größenordnung wie die mittlere O₃-Konzentration im O₃-Szenario "Referenzjahr" bei einem gleichzeitig deutlich niedrigeren AOT40-Wert. Im O₃-Szenario "sinkende Hintergrundkonzentration" liegen die mittleren O₃-Konzentrationen deutlich unter denen des O₃-Szenarios "moderat erhöhte Hintergrundkonzentration" bei ähnlichen AOT40-Werten. Die höchsten mittleren O₃-Konzentrationen und der höchste AOT40-Wert finden sich im O₃-Szenario "stark erhöhte Hintergrundkonzentration".

Nachstehend sind die mit FO₃REST_beech bzw. FO₃REST_spruce abgeschätzten kumulierten stomatären O₃-Aufnahmen zusammengestellt (Abbildung 46, Abbildung 47, Tabelle 11)

Tabelle 11: POD₁SPEC-Werte für Buche und Fichte unter gegenwärtigen Klimaverhältnissen (Testreferenzjahr Gegenwart)

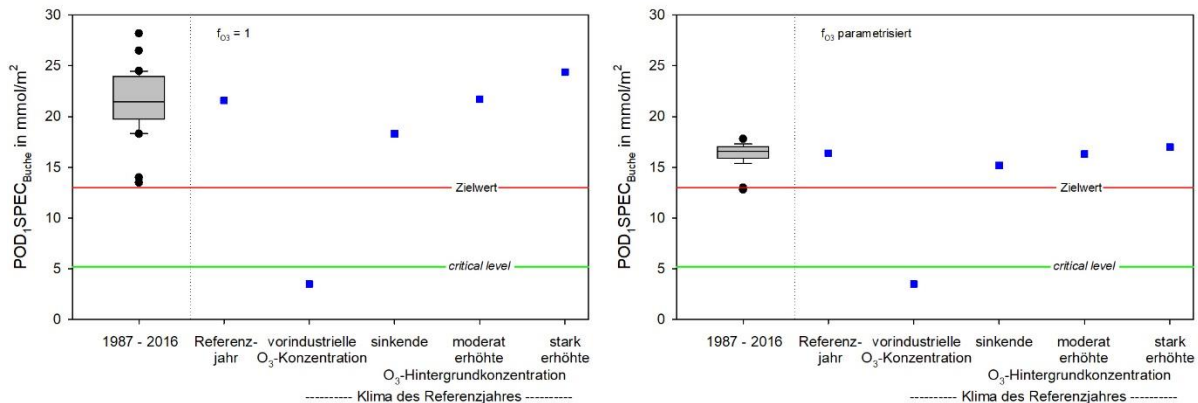
kein Einfluss des Bodenwassergehalts auf Stomataverhalten ($f_{PAW}=1$); Vorsorgeprinzip
 $f_{CO_2}=1$

Klimaszenario und Ozonregime	POD ₁ SPEC Buche [mmol m ⁻² PLA]		POD ₁ SPEC Fichte [mmol m ⁻² PLA]
	$f_{O_3} = 1$	f_{O_3} parametrisiert	
Klima des Testreferenzjahrs Gegenwart:			
[O ₃] des Testreferenzjahrs Gegenwart	21,6	16,4	26,8
vorindustrielle O ₃ -Belastungssituation	3,5	3,5	3,3
sinkende O ₃ -Hintergrundkonzentration	18,3	15,2	22,0
moderat erhöhte Hintergrund-[O ₃]	21,7	16,3	28,3
stark erhöhte Hintergrund-[O ₃]	24,4	17,0	32,9

Quelle: eigene Darstellung, L. Grünhage

Abbildung 46: POD₁SPEC-Werte für Buche mit $f_{O_3} = 1$ (links) und mit f_{O_3} parametrisiert (rechts) unter gegenwärtigen Klimaverhältnissen (Testreferenzjahr Gegenwart)

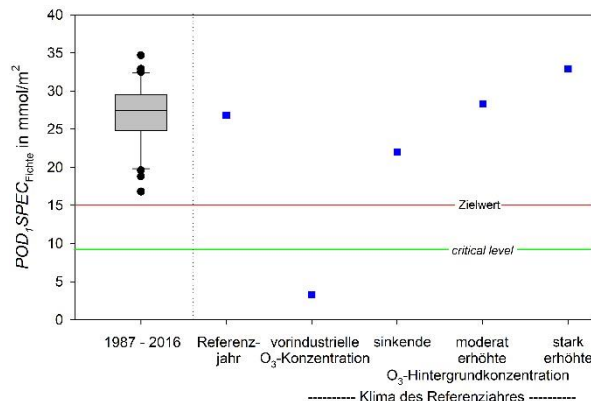
kein Einfluss des Bodenwassergehalts auf Stomataverhalten ($f_{PAW}=1$); Vorsorgeprinzip
 $f_{CO_2}=1$



Quelle: eigene Darstellung, L. Grünhage

Abbildung 47: POD₁SPEC-Werte für Fichte unter gegenwärtigen Klimaverhältnissen (Testreferenzjahr Gegenwart)

kein Einfluss des Bodenwassergehalts auf Stomataverhalten ($f_{PAW}=1$); Vorsorgeprinzip
 $f_{CO_2}=1$



Quelle: eigene Darstellung, L. Grünhage

Sowohl für Buche als auch für Fichte wird der jeweilige Zielwert in allen Jahren seit 1987 überschritten. Die POD₁SPEC-Werte für das Rekombinationsjahr Referenz spiegeln erwartungsgemäß die mittlere O₃-Belastungssituation des Zeitraums 1987-2016 wider. Für Buche ohne Berücksichtigung des Einflusses der O₃-Belastung auf das Stomataverhalten und für Fichte führen alle O₃-Szenarien mit sinkenden bzw. steigenden O₃-Hintergrundkonzentrationen bei gleichzeitig sinkenden Spitzenwerten weiterhin zu deutlichen Überschreitungen des jeweiligen Zielwertes. Für Buche mit Berücksichtigung des Einflusses der O₃-Belastung auf das Stomataverhalten führen die O₃-Szenarien mit sinkenden bzw. steigenden O₃-Hintergrundkonzentrationen bei gleichzeitig sinkenden Spitzenwerten nur zu sich geringfügig ändernden POD₁SPEC-Werten. Lediglich bei vorindustrieller O₃-Belastungssituation werden die jeweiligen kritischen Belastungswerte (*critical level*) erwartungsgemäß unterschritten.

Der Vergleich der in Tabelle 11 angeführten POD₁SPEC-Werte für die O₃-Szenarien "[O₃] des Testreferenzjahrs Gegenwart" und "moderat erhöhte Hintergrund-[O₃]" mit den in Tabelle 10

angeführten AOT40-Werten für die zwei O₃-Szenarien verdeutlicht anschaulich, dass O₃-Exposition und stomatäre O₃-Aufnahme nicht zwangsläufig korrelieren.

Auswirkungen verschiedener Ozon-Belastungsszenarien auf die stomatäre O₃-Aufnahme unter gegenwärtigen Klimaverhältnissen

- Für unterschiedlich erhöhte Ozonkonzentrationen im Gegenwarts-klima (1987-2016) zeigen Modellierungen von POD₁SPEC (bisherige und erweiterte Parametrisierung f_{O₃} bei Buche) für den Referenzstandort Spessart eine deutliche Überschreitung der Critical Level und der vorgeschlagenen Zielwerte für die Ozonbelastung für Buche und Fichte. Es wird deutlich, dass ein hohes Risiko für den jährlichen Zuwachs an Gesamtbaumbiomasse besteht (für Buche jährlicher Zuwachsrückgang im Mittel der Jahre 2012-2016 14,0 bzw. 17,9 %.; für Fichte 5,7 %).
- Nur bei vorindustrieller O₃-Belastungssituation werden die jeweiligen Belastungswerte unterschritten.

Wirkung der erweiterten Parametrisierung für Buche bei der POD₁SPEC-Modellierung:

- Bei Berücksichtigung des Einflusses der O₃-Belastung auf das Stomataverhalten bei Buche führen die Gegenwartsszenarien mit sinkenden bzw. steigenden O₃-Hintergrundkonzentrationen bei gleichzeitig sinkenden Spitzenwerten zu sich geringfügig ändernden POD₁SPEC-Werten. Ohne Berücksichtigung des Einflusses der O₃-Belastung auf das Stomataverhalten beträgt der potentielle Verlust am jährlichen Zuwachs im Mittel der Jahre 2012-2016 17,9 % (*worst-case*-Szenario, Vorsorgeprinzip); mit Berücksichtigung immer noch 14,0 %.

2.6.2 Auswirkungen verschiedener O₃-Belastungsszenarien auf die stomatäre O₃-Aufnahme unter zukünftigen Klimaverhältnissen

2.6.2.1 Kenngrößen der Lufttemperatur

Nachstehend sind einige Kenngrößen für die Lufttemperatur für Gegenwarts- und Zukunftsszenarien in Messhöhe der lufthygienischen Messstation Spessart tabelliert (Tabelle 12).

Tabelle 12: Kenngrößen für die Lufttemperatur in Messhöhe der lufthygienischen Messstation Spessart für Gegenwarts- und Zukunftsszenarien (Messhöhe z = 3,5 m)

	Gegenwart	RCP2.6	RCP8.5
Zeitraum: 01.01. – 31.12.			
Mittelwert in °C	8,2	9,3	11,5
Änderungssignal in K		1,1	3,3
Proxy für Wachstumsphase Fichte			
Mittelwert in °C	12,9	13,8	15,4
Änderungssignal in K		0,9	2,5
Proxy für Wachstumsphase Buche			
Mittelwert in °C	15,6	16,7	18,6
Änderungssignal in K		1,1	3,0

Proxy für die Wachstumsphase von Fichte: Zeitraum 1. Januar bis 31. Dezember; Lufttemperaturwerte >0 °C; Globalstrahlung >50 W/m², Proxy für die Wachstumsphase von Buche: Zeitraum 1. April bis 30. September; Lufttemperaturwerte >0 °C; Globalstrahlung >50 W/m²

Quelle: eigene Darstellung, L. Grünhage

Die mittlere Lufttemperatur steigt im Jahresmittel im Szenario RCP2.6 um 1,1 K und im Szenario RCP8.5 um 3,3 K. In der Wachstumsphase der Fichte steigt die mittlere Lufttemperatur im Szenario RCP2.6 um 0,9 K und im Szenario RCP8.5 um 2,5 K, während die mittlere Temperatur in der Wachstumsphase der Buche im Szenario RCP2.6 um 1,1 K und im Szenario RCP8.5 um 3,0 K steigt. Dies liegt erwartungsgemäß in der Spannweite der Ergebnisse des ReKliEs-Projekts (<http://reklies.hlnug.de/home/>).

2.6.2.2 Kenngrößen der O₃-Belastungssituation

Für das Klima des Testreferenzjahrs RCP2.6 werden die O₃-Szenarien (siehe Kap. 2.6.1)

- O₃-Konzentration des Testreferenzjahres RCP2.6
- sinkende O₃-Hintergrundkonzentration und Verringerung der Spitzenwerte des Testreferenzjahres RCP2.6 um jeweils 5 ppb
- moderat erhöhte O₃-Hintergrundkonzentration des Testreferenzjahres RCP2.6 bei Verringerung der Spitzenwerte um 5 ppb

angesetzt.

Für das Klima des Testreferenzjahrs RCP8.5 wird mit den O₃-Szenarien

- O₃-Konzentration des Testreferenzjahres RCP8.5
- moderat erhöhte O₃-Hintergrundkonzentration des Testreferenzjahres RCP8.5 bei Verringerung der Spitzenwerte um 5 ppb

- stark erhöhte O₃-Hintergrundkonzentration des Testreferenzjahres RCP8.5 bei Verringerung der Spitzenwerte um 5 ppb

gerechnet.

Wie aus Tabelle 13 ersichtlich, unterscheiden sich die mittleren O₃-Konzentrationen und AOT40-Werte für die jeweiligen Testreferenzjahre in den drei Klimaszenarien. Dies ist darauf zurückzuführen, dass für die drei Klimaszenarien unterschiedliche Witterungsabschnitte rekombiniert wurden, die unterschiedliche O₃-Konzentrationen aufweisen.

Tabelle 13: Kenngrößen für die O₃-Exposition für verschiedene O₃-Szenarien in Messhöhe der lufthygienischen Messstation Spessart

Klimaszenario und Ozonregime	O ₃ -Konzentration [ppb]		AOT40 [ppb.h]
Zeitraum: Tageszeit:	01.01. – 31.12. 24 Stunden	01.04. – 30.09. Tageslichtstunden	01.04. – 30.09 Tageslichtstunden
Klima des Testreferenzjahrs Gegenwart:			
[O ₃] des Testreferenzjahrs Gegenwart	28,6	41,9	15,494
Klima des Testreferenzjahrs RCP2.6:			
[O ₃] des Testreferenzjahrs RCP2.6	31,4	44,0	18,385
sinkende Hintergrund-[O ₃]	26,5	39,0	12,340
moderat erhöhte Hintergrund-[O ₃]	34,0	43,7	13,726
Klima des Testreferenzjahrs RCP8.5:			
[O ₃] des Testreferenzjahrs RCP8.5	34,9	48,6	25,969
moderat erhöhte Hintergrund-[O ₃]	37,0	47,2	19,989
stark erhöhte Hintergrund-[O ₃]	41,3	50,5	25,661

Quelle: eigene Darstellung, L. Grünhage

Im Ozon-Szenario "stark erhöhte Hintergrundkonzentration" sind die mittleren O₃-Konzentrationen gegenüber den anderen Ozon-Szenarien erhöht. Der AOT40-Wert liegt allerdings in der Größenordnung des Wertes des Testreferenzjahres RCP8.5. Die AOT40-Werte für die Szenarien "moderat erhöhte Hintergrundkonzentrationen" liegen stets unterhalb der Werte für die Testreferenzjahre. Risikoanalyse für Buche und Fichte unter zukünftigen Klimaverhältnissen

Nach CLRTAP (2017) wird der Beginn der Wachstumsperiode der Buche nach einem Breitengradmodell abgeschätzt. Nachteil dieser Vorgehensweise ist es, dass der Einfluss der Witterung im jeweiligen Jahr und der Einfluss steigender Temperaturen als Folge des Klimawandels auf den Wachstumsbeginn der Buche nicht berücksichtigt werden. Ohne Berücksichtigung des Einflusses der erhöhten Temperaturen in den Zukunftsszenarien sind Abschätzungen über die Auswirkungen sich ändernder O₃-Belastungen nicht realistisch. Für derartige Studien finden sich die nachstehend angeführten Ansätze im Scientific Background Document B (2017) als supplement zu CLRTAP (2017). Die Abschätzung des Beginns der Wachstumsperiode der Buche erfolgt deshalb hier nach dem *sequential-i*-Modell von Kramer (1994) in der von Braun et al. (2017) angepassten Version. Da derzeit kein adäquates Phänologiemodell zur Abschätzung des Endes der Buchenwachstumszeit existiert, wird dieses

durch das angepasste Breitengradmodell nach Grünhage & Bender (2017) berechnet. In Tabelle 14 sind Beginn, Ende und Dauer der Buchenwachstumsperiode zusammengestellt.

Tabelle 14: Beginn, Ende und Dauer der Wachstumszeit der Buche unter sich ändernden Klimabedingungen

Klimaszenario	Buchenwachstumszeit		
	Beginn [TdJ]	Ende [TdJ]	Dauer [in Tagen]
Testreferenzjahr Gegenwart	120	302	182
Testreferenzjahr RCP2.6	116	302	186
Testreferenzjahr RCP8.5	111	302	191

Quelle: eigene Darstellung, L. Grünhage

Die Dauer der Buchenwachstumszeit und damit die Zeit potentieller stomatärer O₃-Aufnahme verlängert sich deutlich. Nach CLRTAP (2017) wird für Fichte in Deutschland angenommen, dass eine physiologische Aktivität und damit Bedingungen für stomatäre O₃-Aufnahmen ab Temperaturen oberhalb von 0 °C gegeben sind. Höhere Temperaturen bedeuten auch hier eine längere physiologische Aktivität.

Während im TUMmesa-Phytotronexperiment Buche sowohl sensitiv auf steigende O₃-Belastung als auch auf steigende atmosphärische CO₂-Konzentrationen reagierte, war eine solche Reaktion auf steigende O₃-Belastung für Fichte nicht zu beobachten; die Sensitivität auf steigende atmosphärische CO₂-Konzentrationen ist bei Fichte etwas geringer im Vergleich zu Buche. In Tabelle 15 und den Abbildung 48 sind die akkumulierten stomatären O₃-Aufnahmen für Buche und Fichte angeführt.

Tabelle 15: POD₁SPEC-Werte für Buche und Fichte unter gegenwärtigen und zukünftigen Klimaverhältnissen unter Berücksichtigung des Einflusses der atmosphärischen CO₂-Konzentration auf das Stomataverhalten

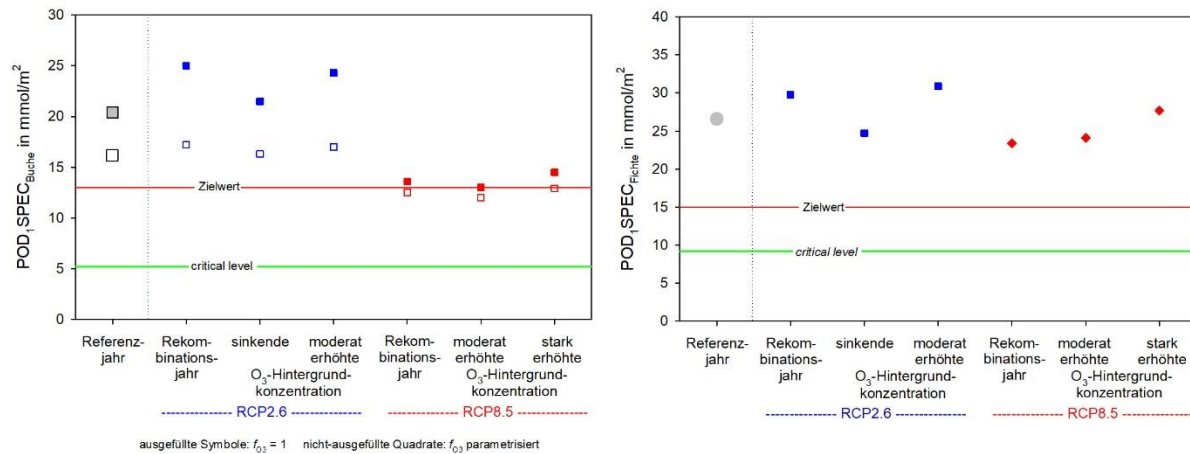
kein Einfluss des Bodenwassergehalts auf Stomataverhalten ($f_{PAW}=1$); Vorsorgeprinzip
 f_{CO_2} parametrisiert

Klimaszenario und Ozonregime	POD ₁ SPEC Buche [mmol m ⁻² PLA]		POD ₁ SPEC Fichte [mmol m ⁻² PLA]
Klima des Testreferenzjahrs Gegenwart	$f_{O_3} = 1$	f_{O_3} parametrisiert	
[O ₃] des Testreferenzjahrs Gegenwart	20,4	16,1	26,6
Klima des Testreferenzjahrs RCP2.6			
[O ₃] des Testreferenzjahrs RCP2.6	25,0	17,2	29,8
sinkende Hintergrund-[O ₃]	21,5	16,3	24,7
moderat erhöhte Hintergrund-[O ₃]	24,3	17,0	30,9
Klima des Testreferenzjahrs RCP8.5			
[O ₃] des Testreferenzjahrs RCP8.5	13,6	12,5	23,4
moderat erhöhte Hintergrund-[O ₃]	13,0	12,0	24,1
stark erhöhte Hintergrund-[O ₃]	14,5	12,9	27,7

Quelle: eigene Darstellung, L. Grünhage

Abbildung 48: POD₁SPEC-Werte für Buche (links) und Fichte (rechts) für verschiedene O₃-Belastungsszenarien unter zukünftigen Klimaverhältnissen unter Berücksichtigung des Einflusses der atmosphärischen CO₂-Konzentration auf das Stomataverhalten

kein Einfluss des Bodenwassergehalts auf Stomataverhalten ($f_{PAW}=1$); Vorsorgeprinzip
 f_{CO_2} parametrisiert



Quelle: eigene Darstellung, L. Grünhage

Der Vergleich der POD₁SPEC-Werte für Buche und Fichte des Testreferenzjahres Gegenwart in Tabelle 15 (f_{CO_2} parametrisiert) mit denen in Tabelle 11 ($f_{CO_2}=1$) zeigt nur geringe Unterschiede. Dies kann als Bestätigung für die Nicht-Berücksichtigung des CO₂-Einflusses auf das stomatäre Verhalten in CLRTAP (2017) unter den gegenwärtigen Klimaverhältnissen zumindest bis Ende der 2010er Jahre gelten. Die Unterschiede in den POD₁SPEC-Werten weisen allerdings insbesondere für Buche darauf hin, dass bei den derzeit stark steigenden atmosphärischen CO₂-Konzentrationen die Implementierung einer CO₂-Wichtungsfunktion in die Gleichung zur Parametrisierung des Stomataverhaltens in CLRTAP (2017) anzuraten ist.

Im Zukunftsszenario RCP2.6 liegen die stomatären O₃-Aufnahmen für das Testreferenzjahr RCP2.6 bei Buche und Fichte über denen des Referenzjahres Gegenwart. Dies ist zumindest z.T. auf die höheren O₃-Konzentrationen in den Testreferenzjahren zurückzuführen (siehe Tabelle 13). Sinkende O₃-Hintergrundkonzentrationen führen im Szenario RCP2.6 zu geringeren POD₁SPEC-Werten; moderat erhöhte O₃-Hintergrundkonzentrationen haben nur einen geringen Einfluss auf die akkumulierten stomatären O₃-Aufnahmen. Die Berücksichtigung der O₃-Belastung auf die Stomataöffnungsweite bei Buche im Szenario RCP2.6 reduziert das Ozon-Risiko deutlich. Bei Fichte führen im Zukunftsszenario RCP8.5 stark erhöhte O₃-Hintergrundkonzentrationen zu einer deutlichen Erhöhung der O₃-Aufnahme. Der Einfluss steigender CO₂-Konzentrationen auf das Stomataverhalten bei Buche wird erst im Szenario RCP8.5 deutlich: Die POD₁SPEC-Werte sinken auf die Größenordnung des Zielwertes ab. Fichte reagiert deutlich weniger sensitiv bezüglich des Stomataverhaltens auf steigende atmosphärische CO₂-Konzentrationen; der Zielwert wird deutlich überschritten.

Damit wird der kritische Belastungswert (Critical Level) auch zukünftig sowohl bei Buche als auch bei Fichte deutlich überschritten. POD₁SPEC-Werte in der Höhe des Zielwertes (Target Value, TV) bedeuten jährliche Zuwachsverluste in der Größenordnung von 11 % bei Buche und 3 % bei Fichte im Vergleich zur "vorindustriellen" Ozon-Belastungssituation.

Anmerkung: Das reale Risiko für Biomasseverluste durch O₃ in einem speziellen Jahr hängt zusätzlich stark vom Bodentyp des Standortes und den Niederschlagsverhältnissen im jeweiligen Jahr ab. Generell führt Bodentrockenheit zu geringeren stomatären O₃-Aufnahmen

und damit zu einer sinkenden Gefährdung für Biomasseverluste durch O₃ bei gleichzeitig steigendem Risiko für Biomasseverluste durch Trockenstress.

Auswirkungen verschiedener O₃-Belastungsszenarien auf die stomatäre O₃-Aufnahme unter zukünftigen Klimaverhältnissen unter Berücksichtigung des Einflusses der atmosphärischen CO₂-Konzentration auf das Stomataverhalten und unter Annahme ausreichender Bodenfeuchte

Für unterschiedlich erhöhte Ozonkonzentrationen bei den zukünftigen Klimaszenarien (für 2100) zeigen POD₁SPEC-Modellierungen für den Referenzstandort Spessart:

Fichte

- ▶ für RCP2.6 und RCP8.5: Der Critical Level und der vorgeschlagene Zielwert für die Ozonbelastung werden deutlich überschritten.
- ▶ für RCP8.5: Die POD₁SPEC-Werte liegen auf Grund der geringeren Sensitivität des Stomataverhaltens der Fichte auf steigende atmosphärische CO₂-Konzentrationen weiterhin deutlich über dem Zielwert.

Buche

- ▶ für RCP2.6: Der Critical Level und der vorgeschlagene Zielwert für die Ozonbelastung (bisherige und erweiterte Parametrisierung mit f_{O3}) werden deutlich überschritten.
- ▶ für RCP8.5: Die POD₁SPEC-Werte liegen auf Grund der hohen Sensitivität des Stomataverhaltens der Buche auf steigende atmosphärische CO₂-Konzentrationen im Bereich der vorgeschlagenen Zielwerte; der Critical Level für die Ozonbelastung (bisherige und erweiterte Parametrisierung f_{O3}) wird deutlich überschritten.

Biomasseverluste

- ▶ Bei POD₁SPEC-Werten in der Höhe des Zielwertes kann von jährlichen Zuwachsverluste in der Größenordnung von 11 % bei Buche und 3 % bei Fichte im Vergleich zur "vorindustriellen" Ozon-Belastungssituation ausgegangen werden.

Wirkung der erweiterten Parametrisierung für Fichte bei der POD₁SPEC-Modellierung:

- ▶ Auf die Berücksichtigung der O₃-Belastung auf die Stomataöffnungsweite bei Fichte wurde verzichtet, da kein übertragbarer Effekt der O₃-Belastung auf die Stomataöffnungsweite gefunden wurde. Ein Effekt zeigte sich nur im Vergleich mit dem Szenario PC-PI mit vorindustrieller Ozonbelastung (Hormesis).
- ▶ Der Einfluss erhöhter CO₂-Konzentrationen auf das Stomataverhalten ist bei Fichte vergleichsweise geringer ausgeprägt als bei Buche. Dennoch wird angesichts der stark steigenden atmosphärischen CO₂-Konzentrationen die Implementierung einer CO₂-Wichtungsfunktion in die Gleichung zur Parametrisierung des Stomataverhaltens in CLRTAP (2017) ausdrücklich empfohlen. Unter historischen bzw. gegenwärtigen Klimaverhältnissen bis Ende der 2010er Jahre ist eine Implementierung von f_{CO2} nicht notwendig (f_{CO2}=1).

Wirkung der erweiterten Parametrisierung für Buche bei der POD₁SPEC-Modellierung:

- ▶ Die Berücksichtigung der O₃-Belastung auf die Stomataöffnungsweite bei Buche reduziert das Ozon-Risiko im Szenario RCP2.6 deutlich.

- Der Einfluss erhöhter CO₂-Konzentrationen auf das Stomataverhalten bei Buche wird erst im Szenario RCP8.5 deutlich. Die Implementierung einer CO₂-Wichtungsfunktion in die Gleichung zur Parametrisierung des Stomataverhaltens in CLRTAP (2017) wird ausdrücklich empfohlen. Allerdings ist eine Implementierung von f_{CO_2} unter historischen bzw. gegenwärtigen Klimaverhältnissen bis Ende der 2010er Jahre nicht notwendig ($f_{CO_2}=1$).

3 Skalierung von Ozondosen bei adulten Buchen mit unterschiedlichem Belaubungsbezug (sonnenexponierte Belaubung, Gesamtblaubung) – Ermittlung einer Transferfunktion für die Bestimmung von POD_YSPEC aus gemessenen POD_YSF

3.1 Vorbemerkung - Skalierung der Ozonaufnahme von sonnenexponierter zu Gesamtbaum-Belaubung bei adulten Buchen

Zur empirischen Bestimmung der Ozonaufnahme an adulten Bäumen im Waldbestand werden Feldmessungen mit Xylemsaftfluss-Sensoren durchgeführt. Der Xylemsaftfluss stellt einen integrierten Wert der Transpiration bezogen auf den Gesamtbaum dar. Über eine Blattflächennäherung kann die mittlere Transpirationsrate pro PLA ermittelt werden. Aus der z.B. nach Farquhar und Sharkey (1982, Gleichung 2) ermittelten stomatären Leitfähigkeit ergibt sich durch Multiplikation mit dem Diffusivitätsverhältnis 0,663 (Grünhage et al. 2012, siehe z.B. Gleichung 7) die stomatäre Ozonaufnahme (siehe z.B. Wieser et al. 2003, Nunn et al. 2010) für die Gesamtblaubung des Einzelbaums bzw. für den Waldbestand (als POD_{YSF} : *Phytotoxic Ozone Dose above a threshold of Y nmol m^{-2} PLA for the growing season* für die Gesamtblaubung aus Xylemsaftfluss-Messungen (*sapflow*, SF). Dagegen werden modellierte stomatäre Ozonaufnahmen auf Blatt-/Nadelebene für die sonnenexponierte Belaubung als Bezugsgröße berechnet (POD_{YSPEC} für sonnenexponierte Belaubung nach Mapping Manual, CLRTAP 2017; Modell FO₃REST). Dementsprechend basieren auch die Ozondosis-Wirkungs-Funktion und die Critical Levels für die Ozondosis zur Abschätzung von Biomasseverlusten auf der sonnenexponierten Belaubung (Mapping Manual, CLRTAP, 2017). Zur Nutzung der POD_{YSF} für die Ozon-Risikoabschätzung und für einen Vergleich von modellierten mit an Einzelbäumen gemessenen Daten müssen die Ergebnisse von Messung und Modellierung auf die gleiche Bezugsgröße hinsichtlich der Belaubungsfläche skaliert werden.

Der Ansatz, die ermittelte Transpiration bzw. die Ozonaufnahme der Einzelbäume nach Sonnen- oder Schattenlaub zu differenzieren, ist mit großen Unsicherheiten behaftet (Anteile von Sonnen- und Schattenbelaubung bei adulten Bäumen im Waldbestand, stomatäre Leitfähigkeit für Wasserdampf von Sonnen- bzw. Schattenlaub, Photosyntheseleistung von Sonnen- bzw. Schattenlaub, vertikale Verteilung der Ozonkonzentration, Albedo über Bestand, unterschiedliche Grenzschichtwiderstände innerhalb der Kronenbereiche, u.a.). Aus einer eigenen Literaturstudie (unveröffentlicht) geht hervor, dass die notwendigen Informationen nur als Annäherungen zur Verfügung stehen. Übersichtsweise Berechnungen ergaben einen näherungsweisen Faktor von 2-4 für die Skalierung der stomatären Ozondosis für den Gesamtbaum auf die Ebene der modellierten stomatären Ozondosis für die sonnenexponierte Belaubung. Für eine Risikobewertung ist eine derartige Skalierung zu ungenau und daher nur als grobe Näherung zu betrachten (siehe Bender et al. 2015).

Eine Studie von Braun et al. (2010) bestätigt prinzipiell die Ozonfluss-Parametrisierung für Buche, die im DO₃SE-Modell verwendet wird (Büker et al. 2012; Emberson et al. 2000 a,b, 2001, 2007; empfohlen im Mapping Manual CLRTAP 2017). Die modellierten POD_0 - und POD_1 -Werte waren allerdings um 10 % bzw. 39 % größer als die über Xylemsaftflussmessungen berechneten Werte (Braun et al. 2010). Eine eigene Studie zu über Xylemsaftflussmessungen ermittelten und modellierten POD_Y an adulten Buchen (neun Standorte, davon drei Trockenstandorte) konnte die Ergebnisse von Braun et al. (2010) nicht bestätigen. Im Vergleich zu den für die

Gesamtbelaubung gemessenen POD_Y lieferte das Modell, dessen Bezugsgröße die sonnenexponierte Belaubung ist, um ein Vielfaches höhere Werte (Faktor 5 ± 2). Wegen der unterschiedlichen Bezugsgrößen für die Belaubung bei Messung und Modellierung müsste folglich die Parametrisierung des Modells entsprechend angepasst werden. Die Datengrundlage für eine Differenzierung nach Sonnen- und Schattenblättern (siehe oben) ist jedoch derzeit nicht ausreichend für eine entsprechende Parametrisierung von stomatären Flussmodellen für Waldbäume.

Um dennoch mit Xylemsaftflussmessungen an Buchen ermittelte POD_Y für die Ozonrisikoabschätzung (nach Mapping Manual, CLRTAP 2017) nutzen zu können, wurde eine rechnerische Skalierung der unterschiedlichen Belaubungsbezüge vorgenommen (Gesamtbelaubung, sonnenexponierte Belaubung). Für die Skalierung wurden Transferfunktionen aus Korrelation von mit Xylemsaftfluss gemessenen Ozonaufnahmewerten auf Ebene der Gesamtbaumbelaubung (POD_{Y_SF}) und Ozonaufnahmewerten aus Modellierungen für die sonnenexponierte Belaubung (POD_{Y_SPEC} , mit FO₃REST-beech) abgeleitet. Das Projekt KLIP 15 lieferte das hierzu nötige empirische Datenmaterial.

3.1.1 Kurze Beschreibung des Projekts KLIP15

Das Projekt KLIP15 „Bewertung der Leistungspotentiale der Buche im Klimawandel im Hinblick auf die Risiken von Trockenheit und Ozonbelastung“ wurde als Gemeinschaftsprojekt des Lehrstuhls Ökophysiologie der Pflanzen (TUM) und der Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft Bayern (LWF) durchgeführt (Details siehe Baumgarten und Kühn (2014), Abschlussbericht, Finanzierung durch Bay. Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten).

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, die Leistungsfähigkeit der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) hinsichtlich der prognostizierten Bedingungen des Klimawandels zu bewerten. Insbesondere wurden die Risiken von Trockenheit und Ozonbelastung für die waldbaulich bedeutsame Baumart Buche, auf zehn edaphisch und klimatisch unterschiedlichen und gut dokumentierten Referenzstandorten in Bayern vergleichend untersucht. Die Baumart Buche wird als sehr anpassungsfähig für die Bedingungen des Klimawandels eingeschätzt und in Waldumbauprogramme auf den meisten Standorten als Laubbaumart empfohlen. In Zukunft werden die Bäume aufgrund der Kombinationswirkung aus Trockenheit und Ozonbelastung besonders hohen Risiken ausgesetzt sein. Als spezifische Belastung werden der Trockenstress auf wasserlimitierten Standorten sowie erhöhte Ozonaufnahme und damit Belastung bei guter Wasserversorgung angesehen. Im Vordergrund stehen die Bewertung der Stresstoleranz der Buche und potentieller Produktionseinbußen auf einem breiten Standortsspektrum für Bayern. Die gemessenen Einfluss- und Wirkungsgrößen an den untersuchten Standorten werden um einen zentralen physiologischen Messparameter ergänzt - die Baumtranspiration, ermittelt durch Xylemsaftflussmessung. In einem neuartigen Ansatz wird die Koppelung zwischen Wasserhaushalt und Ozonaufnahme genutzt, sodass sich mit den Messdaten der Transpiration sowohl der Wasserverbrauch, als auch die von der Krone aufgenommene Ozondosis (POD_{Y_SF}) ermitteln lassen. Aus der Beziehung zwischen Wasserverbrauch bzw. aufgenommener Ozondosis und dem Stammdickenzuwachs können Rückschlüsse auf die standortsspezifische Regulationsfähigkeit des Baumes bei Trockenheit gewonnen und das Risiko von Produktionseinbußen durch Trockenstress und Ozon abgeschätzt werden. Mit dieser Vorgehensweise kann das Ausmaß der Anpassungsfähigkeit und die Begrenzung des Leistungspotentials der Buche definiert werden, was insbesondere für künftige Grenzstandorte eine neue, prozessgestützte Qualität der Risikoeinschätzung im Klimawandel bietet.

3.1.2 Lage der Untersuchungsflächen

Die Untersuchung wurde in den Jahren 2010-2012 an neun Waldstandorten (mit Hauptbaumart Buche) in Bayern durchgeführt, darunter acht Untersuchungsstandorte an den Bayerischen Waldklimastationen Bad Brückenau, Freising, Höglwald, Kreuth, Mitterfels, Riedenburg, Würzburg, ein Monitoring Standort des Integrated Monitorings (UNECE) im Nationalpark Bayerischer Wald (Forellenbach) sowie der Waldforschungsstandort der TUM im Kranzberger Forst (Tabelle 16, Tabelle 17).

Tabelle 16: Lage und Bestandsscharakteristik der Untersuchungsflächen des KLIP15-Projekts (aus Baumgarten und Kühn 2014)

Bu: Buche, Hbu: Hainbuche, Fi: Fichte, TrEi: Traubeneiche; ü NN: über Normalnull

Waldstandort	Plot	Höhe m üNN	Haupt- baum- art	Anteil Buche %	Alter Buche 2013	Potentielle natürliche Vegetation	Position
Bad Brückenau	BBR	812	Bu	100	136	Hordelymo- Fagetum	9°90'E, 50°37'N
Forellenbach	FOR	820	Bu	100	108	Dryopteris- Fagetum	13°25'22"E, 48°56'54"N
Freising	FRE	508	Bu	64.9	119	Galio odorati- Fagetum	11°39'E, 48°24'N
Kranzberg	KRB	485	Bu	100	91	Galio odorati- Fagetum	11°39'41"E, 45°25'08"N
Kreuth	KRE	1075	Fi	30	117	Galio odorati- Fagetum	11°49'E, 47°44'N
Mitterfels	MIT	1025	Bu	93.3	135	Dryopteris- Fagetum	12°53'E, 48°59'N
Riedenburg	RIE	475	TrEi	14.5	122	Galio odorati- Fagetum	11°44' 44"E, 48° 55' 03"N
Riedenburg_1	RIZ	480	Bu	100	86	Galio odorati- Fagetum	11°46' 39"E, 48° 54' 41"N
Würzburg	WUE	330	Bu, Hbu	11,3	115	Luzulo- Fagetum	9°52'09"E, 49°43'41"N

Quelle: eigene Darstellung, TUM

Tabelle 17: Bodeneigenschaften an den Untersuchungsplots des KLIP15-Projekts (aus Baumgarten und Kühn 2014)

nFK: nutzbare Feldkapazität, BS: Basensättigung

Plot	Bodentyp	Ausgangs-substrat	Bodenart	Humus-form	Wurzel-tiefe (cm)	nFK gesamt 100%	nFK (-100/-45 cm)	BS
BBR	Braunerde	Basalt	schluffiger Ton/Lehm, sandiger Lehm	Moder	80	118	mittel	mittel
FOR	podsolige Braunerde	Grob-körniger Granit	lehmiger Sand	Moder	110	292	hoch-mittel	basen-arm
KRB	Parabraunerde-Braunerde	obere Süßwasser molasse	schluffiger /sandiger Lehm	Mull	120	539	mittel schwach	mittel-basen-reich
KRE	Braunerde-Hanggley	Flysch, Unterkreide	toniger Lehm	Mull	68	140	mittel	basen-reich
MIT	Braunerde-Podsol	Perlgneis	sandig-lehmiger Schluff	Moder	120	314	hoch-mittel	basen-arm
RIE	Parabraunerde-Terra fusca	Alblehm über Malmkalk	schluffiger /toniger Lehm	Mull	100	163	mittel-schwach	basen-reich
RIE_1	Parabraunerde-Terra fusca	Alblehm über Malmkalk	schluffiger /toniger Ton	Mull	20	106	mittel-schwach	basen-reich
WUE	Parabraunerde-Pelosol	Unterer Keuper	schluffiger Lehm/ Ton	Mull	110	200	mittel-schwach	mittel-basen-reich

Quelle: eigene Darstellung, TUM

3.1.3 Xylemsaftflussmessungen zur Bestimmung der Baumtranspiration

Die Transpiration einzelner Bäume kann empirisch aus Saftflussmessungen im Stammxylem abgeleitet werden. Solche Messungen werden zunehmend häufig in der ökophysiologischen Forschung an Waldstandorten zur Abschätzung von klimawandelbedingten Dürrierisiken oder für die Bewertung von phytotoxischen Ozondosen eingesetzt (Wieser et al. 2003, 2008; Nunn et al. 2007; Matyssek et al. 2007, 2014; Köstner et al. 2008, Baumgarten et al. 2014, Kühn et al. 2015).

Im KLIP15-Projekt wurden Xylemsaftflussmessungen entsprechend der „*heat balance*“-Methode nach Granier (1985) (Sensoren: Typ SFS2 M, UP Germany) durchgeführt und dienten zur Bestimmung der Baumtranspiration. Dabei werden vertikal übereinander zwei Sensoren (Durchmesser: 2 mm) je 2 cm tief im Xylem der Bäume angebracht. Eine zwischen den Sensoren erzeugte thermoelektrische Spannung wird als Messsignal an den Datenlogger ausgegeben. Zur Xylemsaftflussmessung wird der oben installierte Sensor mit konstanter Stromzufuhr beheizt

und gleichzeitig durch den vorbei fließenden Xylemsaftfluss abgekühlt. Somit ergeben sich maximale Temperaturdifferenzen bei Abwesenheit von Xylemsaftfluss, z.B. nachts, und vor allem bei feuchter Witterung.

Entsprechende Messungen für die äußeren 2 cm des Splintholzes wurden kontinuierlich an allen Versuchsbäumen durchgeführt. An zwei Bäumen je Standort wurde zusätzlich exemplarisch der Xylemsaftfluss in den Xylemtiefen 2 bis 4 cm, sowie 4 bis 6 cm des Stammes erfasst, um die Abnahme des Xylemsaftflusses mit der Splinttiefe zu erfassen. Der daraus bestimmte Gesamt-Xylemsaftfluss durch den Stammquerschnitt entsprach der durch den Baum transpirierten Wassermenge.

Xylemsaftflussmessungen zur Bestimmung der stomatären Ozonaufnahme (für Gesamtbelaubungsebene) wurden an allen zehn Standorten an je fünf Messbäumen durchgeführt. Als Messbäume wurden herrschende bzw. mit-herrschende Buchen (BHD über 50 % des jeweiligen Grundflächenperzentils) instrumentiert. Bei der Auswahl der Untersuchungsbestände wurden Buchenaltbestände mit einer Altersspanne von 86 bis 136 Jahren ausgewählt (Ausnahme: Jungbuchenbestand an der WKS HOE; hier nicht berücksichtigt). Für das Jahr 2012 wurden die Untersuchungen an den drei edaphisch trockensten Standorten der Waldklimastationen in Riedenburg (Riedenburg, Riedenburg_1) und Würzburg, sowie dem Referenzstandort Kranzberger Forst der TUM fortgeführt.

3.1.4 Ermittlung der stomatären Ozonaufnahme

Die projizierte Kronenbelaubungsfläche der Messbäume wurde nach Burger (1950) über eine allometrische Beziehung aus dem BHD errechnet. Der nach der „*heat balance*“-Methode bestimmte Xylemfluss entspricht der Transpiration (E_c , *crown transpiration*) des jeweiligen Baumes. Die Transpiration wird pro Baum, bzw. pro m^2 projizierter Blattfläche (PLA) angegeben.

Unter Einbezug der Belaubungsoberfläche, der relativen Luftfeuchte und des Wasserdampfdruckdefizits der Luft (VPD) wurde aus E_c die Kronenleitfähigkeit (G_c) berechnet, die den Öffnungszustand der Stomata widerspiegelt. Anhand des Parameters G_c konnte mit der Ozonkonzentration der Luft in Kronenhöhe der stomatäre Ozonfluss in die Blätter berechnet werden (Nunn et al. 2007, Matyssek et al. 2015, Kühn et al. 2015). Auf dieser Grundlage wurde die kumulative stomatäre Ozondosis (POD_{0_SF} , und POD_{1_SF}) berechnet. Da bei dem verwendeten Ansatz der Ermittlung der stomatären Ozondosis über die Xylemsaftflussmessung keine Möglichkeit besteht, die ermittelte Transpiration nach Sonnen- oder Schattenlaub zu differenzieren, beziehen sich POD_{v_SF} -Werte auf die Belaubungsfläche des Gesamtbaums.

3.2 Skalierung der Ozonaufnahme von der Gesamtbaumebene auf die sonnenexponierte Belaubung für Buchen mittels einer Transferfunktion

Für die Skalierung der Ozonaufnahme von der Gesamtbaumebene auf die sonnenexponierte Belaubung für Buchen wurde eine Transferfunktion ermittelt. Hierzu wurden Modellergebnisse zur stomatären Ozonaufnahme (FO_3REST_beech) und gemessene Daten vom Waldstandort korreliert.

3.2.1 Modellierung von POD_{v_SPEC} mit FO_3REST_beech und Rekalkulierung der POD_{v_SF} für Einzelbäume an verschiedenen Waldstandorten für die Jahre 2010-2012

Mit dem Ozonaufnahme- und Risiko-Modell FO_3REST_beech wurde POD_{v_SPEC} (für sonnenexponierte Belaubung) für Einzelbäume mit den Klima-/Standort- und Ozondaten der jeweiligen KLIP15-Waldstandorte als Eingangsdaten für die Messjahre 2010-2012 modelliert.

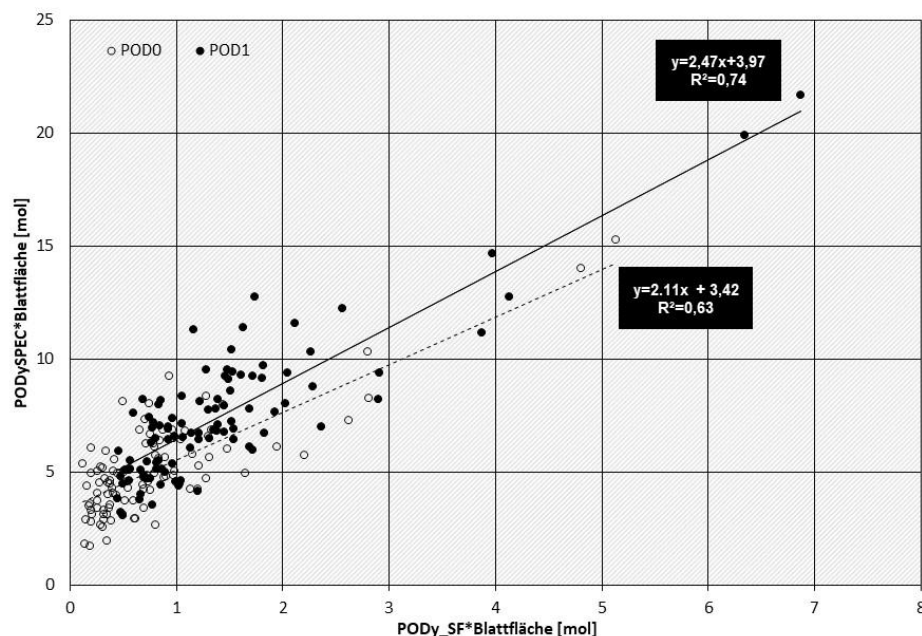
Die Modellierung wurde mit der Parametrisierung nach Mapping Manual (CLRTAP 2017) sowie mit der in Kapitel 2.3.3 vorgeschlagenen erweiterten Parametrisierung (inklusive f_{O_3} , aber ohne f_{CO_2} , da diese nur bei erhöhter atmosphärischer CO_2 -Konzentration zum Einsatz kommt) durchgeführt. Die POD_{Y_SF} -Werte für die Einzelbäume der jeweiligen Standorte wurden mit denselben Daten und Phänologiezeiträumen rekalkuliert. Anschließend wurden zur Referenzierung die POD_{Y_SPEC} - und POD_{Y_SF} -Werte jeweils mit den Blattflächen der einzelnen Bäume gewichtet.

3.2.2 Ableitung einer Transferfunktion für die Skalierung von POD_{Y_SF} zu POD_{Y_SPEC}

Für die Ableitung von Transferfunktionen für die Skalierung wurden die blattflächengewichteten POD_{Y_SF} -Werte mit modellierten POD_{Y_SPEC} -Werte für alle Einzelbäume korreliert (siehe Abbildungen 49, 50). Die daraus resultierenden linearen Gleichungen liefern Transferfunktionen für die Skalierung des POD_{0_SPEC} und POD_{1_SPEC} .

Abbildung 49: Beziehung der gemessenen blattflächen-gewichteten stomatären Ozonaufnahmen von adulten Buchen (POD_{Y_SF}) und der nach Mapping Manual (CLRTAP 2017) modellierten blattflächen-gewichteten POD_{Y_SPEC} -Werte auf Basis aller Einzelbaummessungen

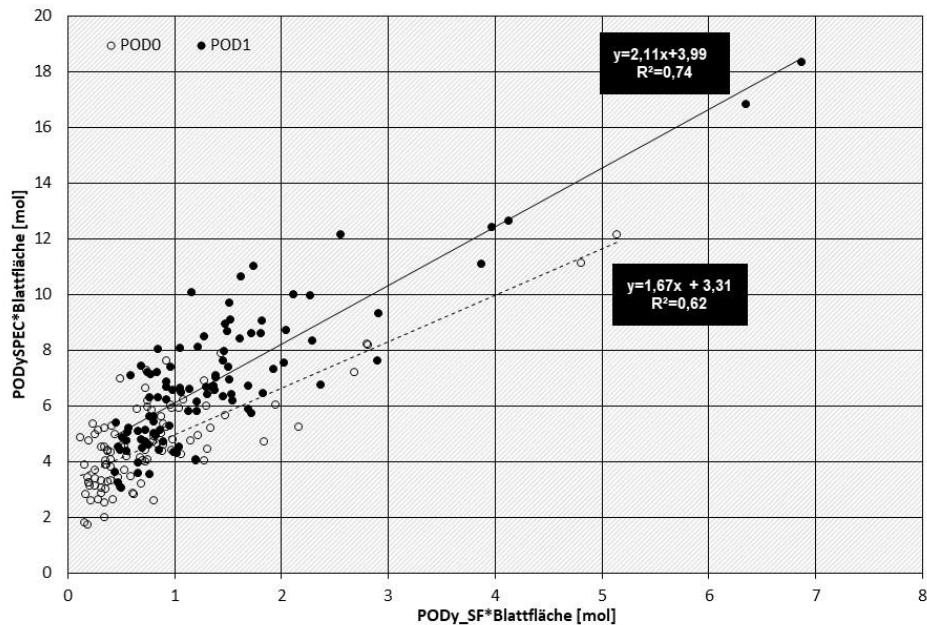
POD_{Y_SF} : *phytotoxic ozone dose above a threshold of Y nmol m⁻² PLA for the growing season* für die Gesamtbelaubung ermittelt aus Xylemsaftfluss-Messungen, POD_{Y_SPEC} : *species-specific phytotoxic ozone dose above a threshold of Y nmol m⁻² PLA for sun-exposed leaves* aus Modellierung mit FO_3REST_beech ; SF: *sapflow*; bfw: blattflächengewichtet; PLA: projizierte Blattfläche); POD_0 : n=100; POD_1 : n=100; jeweils ohne 2010: WUE B3, FRE B1; 2011: FRE B4,B5, WUE B3



Quelle: eigene Darstellung, TUM

Abbildung 50: Beziehung der gemessenen blattflächen-gewichteten stomatären Ozonaufnahmen von adulten Buchen (POD_y_SF) und der mit der erweiterten Parametrisierung für Mapping Manual, CLRTAP, 2017) modellierten blattflächen-gewichteten POD_ySPEC-Werte auf Basis aller Einzelbaummessungen

POD_y_SF: *phytotoxic ozone dose above a threshold of Y nmol m⁻² PLA for the growing season* für die Gesamtbelaubung ermittelt aus Xylemsaftfluss-Messungen, POD_ySPEC: *species-specific phytotoxic ozone dose above a threshold of Y nmol m⁻² PLA for sun-exposed leaves* aus Modellierung mit FO₃REST_beech; SF: *sapflow*; bfw: blattflächengewichtet; PLA: projizierte Blattfläche); POD₀: n=100; POD₁: n= 100; jeweils ohne 2010: WUE B3, FRE B1; 2011: FRE B4,B5, WUE B3



Quelle: eigene Darstellung, TUM

Aus den Beziehungen, die sich aus Abbildung 49 ergeben, leiten sich folgende Transferfunktionen für POD₀SPEC und POD₁SPEC für die Modellierung nach Mapping Manual (CLRTAP 2017) ab:

$$(34) \quad \text{POD}_0\text{SPEC} = \frac{2,4708 \cdot \text{POD}_0\text{SF} \cdot \text{Blattfläche} + 3,9675}{\text{Blattfläche}}$$

$$(35) \quad \text{POD}_1\text{SPEC} = \frac{2,1047 \cdot \text{POD}_1\text{SF} \cdot \text{Blattfläche} + 3,4193}{\text{Blattfläche}}$$

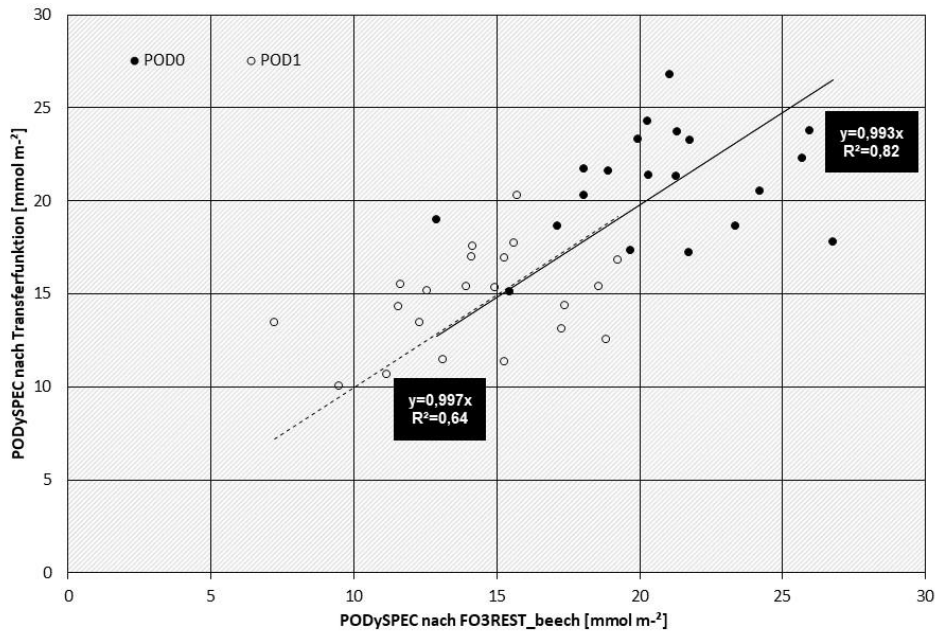
Aus den Beziehungen, die sich aus Abbildung 50 ergeben, leiten sich folgende Transferfunktionen für POD₀SPEC und POD₁SPEC für die Modellierung nach Mapping Manual, CLRTAP 2017) mit der erweiterten Parametrisierung (Kapitel 2.3.3) ab:

$$(36) \quad \text{POD}_0\text{SPEC} = \frac{2,1094 \cdot \text{POD}_0\text{SF} \cdot \text{Blattfläche} + 3,9889}{\text{Blattfläche}}$$

$$(37) \quad \text{POD}_1\text{SPEC} = \frac{1,6647 \cdot \text{POD}_1\text{SF} \cdot \text{Blattfläche} + 3,3135}{\text{Blattfläche}}$$

Abbildung 51: Korrelation der nach Mapping Manual (CLRTAP 2017) modellierten POD_{ySPEC} -Werte mit den mittels der Transferfunktion aus POD_{y_SF} errechneten POD_{ySPEC} -Werten für adulte Buchen

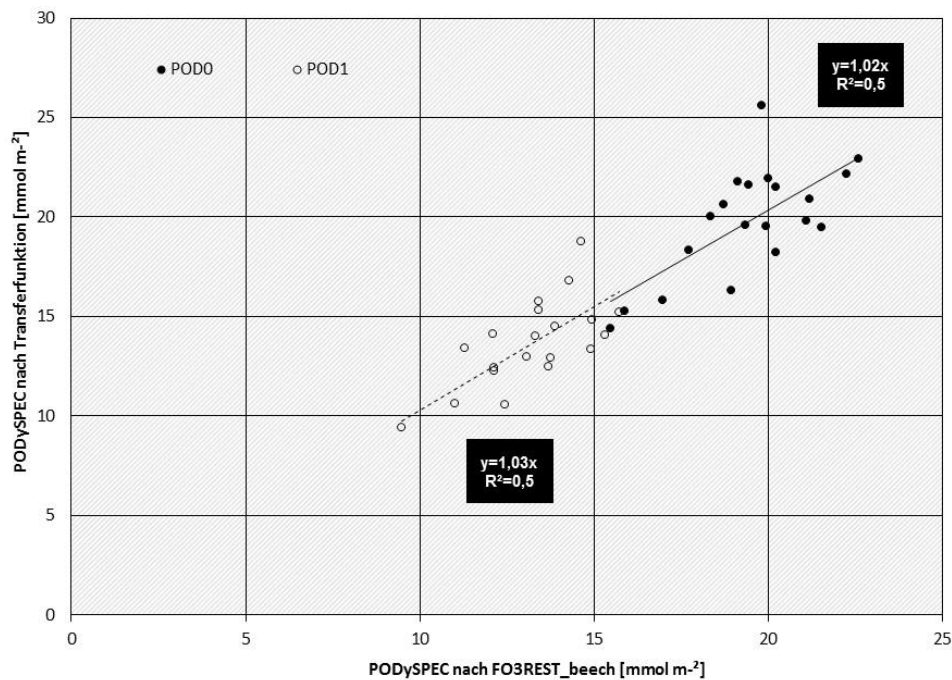
Mittelwerte auf Basis der Einzelbaumwerte



Quelle: eigene Darstellung, TUM

Abbildung 52: Korrelation der mit der erweiterten Parametrisierung (für Mapping Manual (CLRTAP, 2017) modellierten POD_{ySPEC} -Werte mit den mittels der Transferfunktion aus POD_{y_SF} errechneten POD_{ySPEC} -Werten für adulte Buchen

Mittelwerte auf Basis der Einzelbaumwerte



Quelle: eigene Darstellung, TUM

Die modellierten und mittels Transferfunktion skalierten gemessenen POD_1SPEC und POD_0SPEC korrelierten mit einem r^2 von $\sim 0,6$ und $0,8$ bzw. $\sim 0,5$ (Abbildung 51, Abbildung 52). Die Skalierung von POD_{Y_SF} auf potentielle POD_{Y_SPEC} ermöglicht somit prinzipiell die Nutzung von über Xylemsaftfluss-Messung ermittelten Ozondosen für die rechnerische Abschätzung von Biomasseverlusten nach dem Critical-Level-Konzept zumindest für Buchen in Deutschland.

Skalierung von Ozondosen bei adulten Buchen mit unterschiedlichem Belaubungsbezug (sonnenexponierte Belaubung, Gesamtblaubung) – Ermittlung einer Transferfunktion

Problematisierung: Die Ozondosis-Wirkungs-Funktion und die Critical Levels zur Abschätzung von Biomasseverlusten bei Waldbäumen (nach Mapping Manual, CLRTAP 2017) basieren auf modellierten Ozondosen (POD_{Y_SPEC}), die für die sonnenexponierte Belaubung im oberen Baumkronenbereich abgeschätzt werden. Auf Xylemsaftflussmessungen basierende Ozondosen (POD_{Y_SF}) beziehen sich auf die Gesamtblaubung eines Einzelbaums. Für die Nutzung von POD_{Y_SF} für die Ozon-Risikoabschätzung müssen die Ergebnisse auf die gleiche Bezugsgröße „sonnenexponierte Belaubungsfläche“ skaliert werden.

- ▶ Mit einer Transferfunktion können POD_{Y_SF} -Werte auf potentielle POD_{Y_SPEC} -Werte skaliert werden.
- ▶ Transferfunktionen für die Skalierung der Belaubungsfläche stehen jetzt für eine Modellierung nach Mapping Manual (CLRTAP 2017) sowie für die erweiterte Parametrisierung (Kap. 2.3) für POD_0SPEC und POD_1SPEC zur Verfügung.
- ▶ Die Nutzung von über Xylemsaftfluss-Messung ermittelten Ozondosen (POD_{Y_SF}) bei Buchen ist somit erstmals für die Ozon-Risikoabschätzung und die Abschätzung von Biomasseverlusten nach dem auf POD_{Y_SPEC} flussbasierten Critical-Level-Konzept möglich.

4 Folgerungen und Empfehlungen

Simulation realistischer Klima- und Emissionsszenarien für die Gegenwart und die Zukunft (RCP2.6 und PCP8.5, 2100) im kontrollierten Klimakammerexperiment für Buchen und Fichten für einen deutschen Muster-Waldstandort.

- Für den Waldstandort Spessart wurden Simulationsdatenreihen für das Gegenwartsklima und die beiden Zukunftsszenarien RCP2.6 und RCP8.5 (meteorologische Parameter, CO₂- und Ozonkonzentration, stündliche Auflösung) generiert, die für die Nutzung zur Klimafolgenforschung zur Verfügung stehen.

Etablierung und Validierung einer Methode zur kontinuierlichen Messung der stomatären Ozonflüsse bei Buchen und Fichten, als Voraussetzung für die Validierung modellierter Ozonaufnahmen.

- Der TransP-Sensor bietet die bisher einzigartige Möglichkeit, die *in-situ* Transpiration und daraus die Ozonaufnahme von Buchenblättern und Fichtenzweigabschnitten kontinuierlich mit hinreichender Genauigkeit zu bestimmen.

Erweiterung der Parametrisierung der Ozonaufnahmemodellierung (nach Mapping Manual, CLRTAP 2017) für gegenwärtige und zukünftige Klima- und Emissionsbedingungen.

- Die Parametrisierung der Funktionen f_{phen} , f_{light} und f_{VPD} können durch die in den Klimakammern von TUMmesa und unter Freilandbedingungen im Kranzberger Forst gewonnenen Daten bestätigt werden. Für f_{PAW} wird $\text{PAW}_t = 40 \%$ für Buche und $\text{PAW}_t = 50 \%$ für Fichte vorgeschlagen.
- Die Parametrisierung für f_{temp} im Mapping-Manual (CLRTAP 2017) beruht auf Daten, die im Schweizer Alpenraum unter von Deutschland abweichenden ökologischen Bedingungen aufgenommen wurden (Braun et al. 1995, Karlsson et al. 2007). Daher schlugen Nunn et al. (2007) eine andere, aus Messungen an Buchen im Kranzberger Forst abgeleitete Parametrisierung von $T_{\text{min}} = 8 \text{ °C}$, $T_{\text{opt}} = 21 \text{ °C}$ und $T_{\text{max}} = 34 \text{ °C}$ vor. Unter Einbeziehung von weiteren, im Kranzberger Forst aufgenommenen Daten schlagen wir für Deutschland diese Kranzberger Parametrisierung für Buchen vor. Diese Parametrisierung wurde auch in der VDI-Richtlinie 2310 Blatt 6 (2020) übernommen.
- Eine Einschränkung der Blattleitfähigkeit bei erhöhten Ozonaufnahmen und ebenso bei erhöhten CO₂-Konzentrationen und die daraus resultierenden veränderten Ozonflüsse sind bisher nicht in Ozonaufnahmemodellen und der Ozondosis-Wirkungs-Beziehung für Waldbäume berücksichtigt.
Im Mapping Manual (CLRTAP 2017) sind prinzipiell für alle Rezeptoren Wichtungsfunktion für Ozon vorgesehen, für Buche und Fichte jedoch aufgrund fehlender Untersuchungen bisher nicht einbezogen. Der Einfluss steigender atmosphärischer CO₂-Konzentrationen auf das Stomataverhalten ist bislang für keinen Rezeptortyp bei der Parametrisierung bedacht (Mapping Manual, CLRTAP 2017).
 - Für Buche konnte im Phytotronexperiment eine CO₂- und O₃-Wichtungsfunktion ermittelt werden, welche die Sensitivität der stomatären Leitfähigkeit gegenüber langfristig erhöhten CO₂-Konzentrationen bzw. die Sensitivität der stomatären Leitfähigkeit gegenüber POD₀ abbildet. Die Modellierungen mit der erweiterten Parametrisierung zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit gemessenen Werten. Eine

Implementierung der O_3 -Wichtungsfunktion in Ozonaufnahmemodelle wird für Buche als erforderlich empfohlen. Die Verwendung einer CO_2 -Wichtungsfunktion wird für Buche ausdrücklich empfohlen. Allerdings ist eine Implementierung von f_{CO_2} unter historischen bzw. gegenwärtigen Klimaverhältnissen bis Ende der 2010er Jahre nicht notwendig ($f_{CO_2}=1$).

- Analog zu Buche wurde eine O_3 -Wichtungsfunktion für die stomatäre Leitfähigkeit bei Fichte überprüft. Im Gegensatz zu Buche lag eine geringere stomatäre Leitfähigkeit jedoch nur bei dauerhaft niedrigen O_3 -Konzentrationen im PC-PI-Szenario im Phytotronexperiment vor. Für Freilanddaten war aufgrund der geringen Sensitivität der Fichte gegenüber erhöhten Ozonkonzentrationen kein Effekt der akkumulierten Ozondosis auf das Stomataverhalten erkennbar. Da dauerhaft erniedrigte Ozonkonzentrationen (wie in PC-PI, Hormesis) im Gegensatz zum Phytotronexperiment im Freiland nicht vorkommen, wird die Einführung einer Ozonfunktion für Fichte nicht empfohlen. Auch für Fichte konnte im Phytotronexperiment eine CO_2 -Wichtungsfunktion ermittelt werden. Fichten reagieren jedoch im Vergleich zu Buchen mit geringerer Sensitivität auf erhöhte CO_2 -Konzentrationen. Die Einschränkung der stomatären Leitfähigkeit über die CO_2 -Wichtungsfunktion fällt somit deutlich geringer aus als bei Buche. Dennoch wird die Verwendung einer CO_2 -Wichtungsfunktion für Fichte ausdrücklich empfohlen. Allerdings ist eine Implementierung von f_{CO_2} unter historischen bzw. gegenwärtigen Klimaverhältnissen bis Ende der 2010er Jahre nicht notwendig ($f_{CO_2}=1$).

Validierung der modellierten stomatären Ozonflüsse für Buchen und Fichten unter kontrollierten Bedingungen.

- Die modellierten Ozonaufnahmen konnten gegen die gemessenen Daten im Phytotronexperiment für Buche und Fichte validiert werden (mit erweiterter Parametrisierung).

Überprüfung der bestehenden Ozondosis-Wirkungs-Beziehung für Buchen und Fichten (nach Mapping Manual, CLRTAP 2017).

- Die im Phytotronexperiment gemessenen Ozonaufnahmen (POD_1) und Biomassen bestätigen die Ozondosis-Wirkungs-Funktion für das Gegenwartsklima und RCP2.6.
- Für das Zukunftsszenario RCP8.5 mit stark erhöhter CO_2 -Konzentration können Biomasseverluste mit der gültigen Ozondosis-Wirkungs-Funktion nicht abgeschätzt werden, da Zuwachssteigerungen durch erhöhte Temperaturen und CO_2 -Konzentrationen und verlängerte Vegetationszeiten u.a. nicht berücksichtigt sind.
 - Um Aussagen zum Ozonrisiko für zukünftige Szenarien mit erhöhten CO_2 -Konzentrationen treffen zu können, wird empfohlen die Datenpunkte der Ozondosis-Wirkungs-Funktionen mit der von uns vorgeschlagenen erweiterten Parametrisierung (insbesondere mit den Wichtungsfunktionen f_{CO_2} und f_{O_3}) zu rekalkulieren.
 - In einem weiteren Schritt sollte die Ozondosis-Wirkungs-Funktion durch Ergebnisse zur Ozonaufnahme und Biomasseentwicklung aus weiteren Experimenten mit moderat erhöhter Ozonbelastung und CO_2 -Konzentrationen ergänzt werden.
- Die Ozondosis-Wirkungs-Beziehung für Buche/Birke beinhaltet bisher für Buche nur sechs Datenpunkte für einen engen POD_1 -Bereich (10-14 mmol m⁻² PLA, Biomassereduktion um 10 %). Für höhere Ozonbelastungen stammen die Daten von Birke. Birke, als Pionierbaumart,

und Buche, als Klimaxbaumart, unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Wachstums- und Stressresilienz-Strategien.

- Mit dem Phytotronexperiment konnte der Bereich niedriger POD_1SPEC -Werte bestätigt werden, für den bisher keine Daten vorliegen.
 - Der Bereich der Ozondosis-Wirkungs-Beziehung für höherer Ozondosen sollte durch entsprechende experimentelle Daten für Buche (z.B. aus dem Free Air- O_3 -Fumigation Experiment im Kranzberger Forst) ergänzt werden.
- Bei Fichte wurde für alle Behandlungen im Phytotronexperiment eine höhere Zunahme der Biomasse im Vergleich zur Kontrolle festgestellt. Ein möglicher Erklärungsansatz für diese Reaktion ist das toxikologischen Reaktionskonzept der Hormesis, wonach es bei mäßig erhöhter Stressorenwirkung (Ozonbelastung) zunächst zu einer Stimulation des Wachstums kommen kann.

Abschätzung der potentiellen ozonbedingten Biomasse-Einbußen unter gegenwärtigen und zukünftigen Bedingungen.

- Die modellierten Ozonaufnahmen unter realen Freilandbedingungen für die in valORTree verwendeten Gegenwarts- und Zukunftsszenarien überschreiten die Critical Levels und die vorgeschlagenen Zielwerte für Buche und Fichte deutlich. Somit ist von Wachstumseinbußen aufgrund der Ozonbelastung auszugehen.
- Die Überschreitung der Critical Levels für Buchen und Fichten erfolgt bei den Gegenwarts- und Zukunftsszenarien schon kurz nach bzw. noch während des Austriebs. In dieser Wachstumsphase ist die neue Belaubung noch nicht vollständig ausdifferenziert und daher besonders angreifbar durch Stressfaktoren.
- Die Relevanz der CO_2 -Wichtungs-Funktion bei der Modellierung des Ozonrisikos zeigt sich bei der deutlich erhöhten CO_2 -Konzentration im RCP8.5-Szenario insbesondere bei Buche. Hier sind die Ozonaufnahmen aufgrund der deutlichen Einschränkungen der Blattleitfähigkeit gegenüber RCP2.6 und den Gegenwartsszenarien reduziert. Für Fichte ist die Einschränkung wesentlich geringer und die Ozonaufnahmen bei RCP8.5 fallen wesentlich höher.
- Biomasseverluste für Szenarien mit erhöhtem CO_2 sind aus derzeitigen Ozondosis-Wirkungsfunktionen nicht abschätzbar.
 - Kompensationsmaßnahmen auf biochemischer, metabolischer und alloikatorischer Ebene können die bei erhöhtem CO_2 prognostizierte Erhöhung der Biomasseproduktion und somit der Kohlenstoffsenkenstärke von Forstökosystemen in unbekanntem Ausmaß mindern.
 - Für Bilanzierungen der CO_2 -Senkestärke von Forstökosystemen müssen diese Aspekte berücksichtigt werden.

Ozonrisiko-Bewertung für Waldbäume in Deutschland für die Gegenwart und für verschiedene Zukunftsszenarien.

- Die Prognosen zur Entwicklung der zukünftigen O_3 -Konzentrationen fallen abhängig von den Annahmen für die Modell-Szenarien und abhängig von der Region unterschiedlich aus. Zur Abschätzung des Ozonrisikos für Wälder in der Zukunft ist die Modellierung mit verschiedenen, realistischen Ozonkonzentrationen sinnvoll.

- Für unterschiedlich erhöhte Ozonkonzentrationen im Gegenwarts-klima (1987-2016) zeigen Modellierungen von POD_1SPEC (bisherige und erweiterte Parametrisierung inklusive f_{O_3} für Buche) für den Referenzstandort Spessart eine deutliche Überschreitung der Critical Levels und der vorgeschlagenen Zielwerte für die Ozonbelastung für Buche und Fichte.
- Für unterschiedlich erhöhte Ozonkonzentrationen bei den zukünftigen Klimaszenarien (für 2100) zeigen POD_1SPEC -Modellierungen (bisherige und erweiterte Parametrisierung) für den Referenzstandort Spessart bei Fichte für RCP2.6 und RCP8.5 und bei Buche für RCP2.6 eine deutliche Erhöhung der O_3 -Aufnahme und somit deutliche Überschreitungen der Critical Level und der vorgeschlagenen Zielwerte für die Ozonbelastung. Bei Buche unter RCP8.5 Bedingungen liegt POD_1SPEC etwas unterhalb des Wertes für das Gegenwartsreferenzjahr und damit zwar auch über dem Critical Level, aber unter dem vorgeschlagenen Zielwert.
- Bei POD_1SPEC in der Höhe des Zielwertes kann von jährlichen Zuwachsverlusten in der Größenordnung von 11 % bei Buche und 3 % bei Fichte im Vergleich zur "vorindustriellen" Ozon-Belastungssituation ausgegangen werden.

Skalierung von Ozonaufnahmedosen bei adulten Buchen mit unterschiedlichem Belaubungsbezug zur Nutzung von über Xylemsaftfluss-Messung ermittelten Ozondosen für die Ozon-Risikoabschätzung und die Abschätzung von Biomasseverlusten nach dem Critical-Level-Konzept.

- Für aus Xylemsaftflussmessungen für die gesamte Belaubung abgeleitete POD_{Y-SF} konnte eine Transferfunktion zur Umrechnung in POD_{Y-SPEC} für sonnenexponierte Belaubung (Modellierung nach Mapping Manual, CLRTAP 2017) abgeleitet werden.
- Die Nutzung von über Xylemsaftfluss-Messung ermittelten Ozondosen bei Buchen ist nun erstmals für die Ozon-Risikoabschätzung und die Abschätzung von Biomasseverlusten nach dem Critical-Level-Konzept möglich.

5 Quellenverzeichnis

- Agathokleous, E., Araminiene, V., Belz, R. G., Calatayud, V., de Marco, A., Domingos, M., Feng, Z. Z., Hoshika, Y., Kitao, M., Koike, T., Paoletti, E., Saitanis, C. J., Sicard, P., Calabrese, E. J. (2019b): A quantitative assessment of hormetic responses of plants to ozone. *Environmental Research* 176, 108527. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108527>
- Agathokleous, E., Belz, R. G., Calatayud, V., de Marco, A., Hoshika, Y., Kitao, M., Saitanis, C. J., Sicard, P., Paoletti, E., Calabrese, E. J. (2019a): Predicting the effect of ozone on vegetation via linear non-threshold (LNT), threshold and hormetic dose-response models. *Science of the Total Environment* 649, 61-74. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.264>
- Ainsworth, E.A., & Rogers, A. (2007): The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: mechanisms and environmental interactions. *Plant, Cell and Environment* 30, 258-270.
- Ainsworth, E.A., Long, S.P. (2005): What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist* 165, 351-372 <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01224.x>
- Ainsworth, E. A., Yendrek, C. R., Sitch, S., Collins, W. J., & Emberson, L. D. (2012): The effects of tropospheric ozone on net primary productivity and implications for climate change. *Annual Review of Plant Biology* 63, 637–661). <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103829>
- Baumgarten, M., Huber, C., Büker, P., Emberson, L., Dietrich, H. P., Nunn, A. J., Heerdt, C., Beudert, B., Matyssek, R. (2009): Are Bavarian Forests (southern Germany) at risk from ground-level ozone? Assessment using exposure and flux based ozone indices. *Environmental Pollution* 157(7), 2091-2107. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.02.012>
- Baumgarten, M., Kühn, A. (2014): Leistungspotentiale der Buche im Klimawandel (KLIP15) - Abschlussbericht. Bay. Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten.
- Baumgarten, M., Weis, W., Kühn, A., May, K., Matyssek, R. (2014): Forest transpiration - targeted through xylem sap flux assessment versus hydrological modeling. *European Journal of Forest Research* 133, 677-690.
- Bender, J., Muntifering, R.B., Lin, J.C. & Weigel, H.J. (2006): Growth and nutritive quality of *Poa pratensis* as influenced by ozone and competition. *Environmental Pollution* 142, 109-115.
- Bender, J., Bergmann, E., Weigel, Grünhage, L., Schröder, M., Builtjes, P., Schaap, M., Kranenburg, R., Wichink Kruit, R., Stern, R., Baumgarten, M., Matyssek, R. (2015): Anwendung und Überprüfung neuer Methoden zur flächenhaften Bewertung der Auswirkung von bodennahem Ozon auf die Biodiversität terrestrischer Ökosysteme. UBA (2015): UBA Texte Flächenhaften Bewertung der Auswirkung von bodennahem Ozon auf die Biodiversität – Teil I, UBA Texte / 08.2015 / 285 Seiten
- Braun, S., Flückiger, W. (1995): Effects of ambient ozone on seedlings of *Fagus sylvatica* (L.) and *Picea abies* (L.) Karst. *New Phytologist* 129(1), 33-44. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1995.tb03007.x>
- Braun, S., Müller, S., Karlsson, P.E. (2017): Budbreak of beech and birch in a changing climate. In: ICP Vegetation (2017). Scientific Background Document B of Chapter 3 of 'Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels of air pollution effects, risks and trends', UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. Assessed on 18.05.2018 on Web at www.icpvegetation.ceh.ac.uk/get-involved/manuals/mapping-manual
- Braun, S., Schindler, C., Leuzinger, S. (2010): Use of sap flow measurements to validate stomatal functions for mature beech (*Fagus sylvatica*) in view of ozone uptake calculations. *Environmental Pollution* 158(9), 2954-2963. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.05.028>

- Braun, S., Rihm, B., & Schindler, C. (2022). Epidemiological Estimate of Growth Reduction by Ozone in *Fagus sylvatica* L. and *Picea abies* Karst.: Sensitivity Analysis and Comparison with Experimental Results. *Plants* 11(6), 777. <https://doi.org/10.3390/plants11060777>
- Büker, P., Feng, Z., Uddling, J., Briolat, A., Alonso, R., Braun, S., Elvira, S., Gerosa, G., Karlsson, P. E., le Thiec, D., Marzuoli, R., Mills, G., Oksanen, E., Wieser, G., Wilkinson, M., & Emberson, L. D. (2015): New flux based dose-response relationships for ozone for European forest tree species. *Environmental Pollution* 206, 163-174. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.06.033>
- Büker, P., Morrissey, T., Briolat, A., Falk, R., Simpson, D., Tuovinen, J.-P., Alonso, R., Barth, S., Baumgarten, M., Grulke, N., Karlsson, P.E., King, J., Lagergren, F., Matyssek, R., Nunn, A., Ogaya, R., Peñuelas, J., Rhea, L., Schaub, M., Uddling, J., Werner, W., Emberson, L.D. (2012): DO3SE modelling of soil moisture to determine ozone flux to forest trees. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12, 5537-5562.
- Burger, H. (1950): Holz, Blattmenge und Zuwachs - Die Buche. In: Burger H (Hrsg.) Mitteilungen der schweizerischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen. Kommissionsverlag von Beer & CIE, Zürich; Band 26, 2. Heft, pp 419-468
- Cailleret, M., Ferretti, M., Gessler, A., Rigling, A., & Schaub, M. (2018): Ozone effects on European forest growth - Towards an integrative approach. *Journal of Ecology* 106(4), 1377-1389. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12941>
- Calabrese, E.J., Blain, R.B. (2009): Hormesis and plant biology. *Environ.Pollut.* 157, 42-48. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2008.07.028>
- Campbell, G. S. and Norman, J. M. (2000): An Introduction to Environmental Biophysics. 2nd edn. New York: Springer Science & Business Media. doi: 10.2134/jeq1977.00472425000600040036x.
- CLRTAP (2017): Mapping critical levels for vegetation. Chapter 3 of manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads & levels and air pollution effects, risk and trends. UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. Assessed on 18.05.2018 on Web at www.icpvegetation.ceh.ac.uk/get-involved/manuals/mapping-manual
- Danielsson, H., Karlsson, G. P., Karlsson, P. E., Pleijel, H. (2003): Ozone uptake modelling and flux-response relationships – assessments of ozone-induced yield loss in spring wheat. *Atmospheric Environment* 37, 475-485.
- Derwent, R. G., Stevenson, D. S., Collins, W. J., & Johnson, C. E. (2004): Intercontinental transport and the origins of the ozone observed at surface sites in Europe. *Atmospheric Environment* 38(13), 1891-1901. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.01.008>
- Dixon, M., le Thiec, D., Garrec, J. P. (1998): Reactions of Norway spruce and beech trees to 2 years of ozone exposure and episodic drought. *Environmental and Experimental Botany* 40(1), 77-91.
- Dixon, R.K., Brown, S., Houghton, R.A., Solomon, A.M., Trexler, M.C., Wisniewski, J. (1994): Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science* 263(5144), 185-190
- Duncan, D. B. (1955): Multiple range and multiple F tests. *Biometrics*, 11(1), 1-42.
- DWD (2017). Handbuch Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse. Deutscher Wetterdienst, Offenbach.
- Eghdami, H., Werner, W., Büker, P. (2020): Spatio-temporal variation of ozone concentrations and ozone uptake conditions in forests in western Germany. *Atmosphere* 11(11), 1261. <https://doi.org/10.3390/atmos11111261>
- Eghdami, H., Werner, W., Büker, P., Sicard, P. (2022): Assessment of ozone risk to Central European forests: Time series indicates perennial exceedance of ozone critical levels. *Environmental Research* 203, 111798. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111798>

- Ehhalt, D. (2001): Tropospheric ozone, chemistry and man-induced trends. *Ozone Science and Engineering* 23(6), 445-453.
- Ellenberg, H. (1996): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen: In ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. Ulmer Verlag, Stuttgart
- Emberson, L.D., Ashmore, M.R., Cambridge, H.M., Simpson, D., Tuovinen, J.-P. (2000a): Modelling stomatal ozone flux across Europe. *Environmental Pollution* 109, 403-413.
- Emberson, L.D., Ashmore, M.R., Simpson, D., Tuovinen, J.-P., Cambridge, H.M. (2001): Modelling and mapping ozone deposition in Europe. *Water, Air and Soil Pollution* 130, 577-582.
- Emberson, L.D., Büker, P., Ashmore, M.R. (2007): Assessing the risk caused by ground level ozone to European forest trees: A case study in pine, beech and oak across different climate regions. *Environmental Pollution* 147, 454-466.
- Emberson, L. D., Büker, P., Ashmore, M.R., Mills, G., Jackson, L.S., Agrawal, M., Atikuzzaman, M.D., Cinderby, S., Enghardt, M., Jamir, C., Kobayashi, K., Oanh, T.T.K., Quadir, Q.F., Wahid, A., 2009. A comparison of North American and Asian exposure–response data for ozone effects on crop yields. *Atmospheric Environment* 43, 1945-1953.
- Emberson, L.D., Wieser, G., Ashmore, M.R. (2000b): Modelling of stomatal conductance and ozone flux of Norway spruce: comparison with field data. *Environmental Pollution* 109, 393-402.
- Fares, S., Loreto, F., Kleist, E., Wildt, J. (2007): Stomatal uptake and stomatal deposition of ozone in isoprene and monoterpene emitting plants. *Plant Biology* 9, e69-e78. <https://doi.org/10.1055/s-2007-965257>
- Farquhar, G. D., & Sharkey, T. D. (1982): Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology* 33, 317-345. doi:10.1146/annurev.pp.33.060182.001533
- Feng, Z., Tang, H., Uddling, J., Plejel, H., Zhu, J., Oue, H., Guo, W. (2012): A stomatal ozone flux response relationship to assess ozone-induced yield loss, of winter wheat in subtropical China. *Environmental Pollution* 164, 16-23.
- Feng, Z., Shang, B., Li, Z., Calatayud, V., Agathokleous, E. (2019): Ozone will remain a threat for plants independently of nitrogen load. *Functional Ecology* 33(10), 1854-1870. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13422>
- Ferretti, M., Bacaro, G., Brunialti, G., Confalonieri, M., Cristofolini, F., Cristofori, A., Frati, L., Finco, A., Gerosa, G., Maccherini, S., Gottardini, E. (2018): Scarce evidence of ozone effect on recent health and productivity of alpine forests—a case study in Trentino, N. Italy. *Environmental Science and Pollution Research* 25(9), 8217-8232. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1195-z>
- Field, C.B., Jackson, R.B., Mooney, H.A. (1995): Stomatal responses to increased CO₂: implications from the plant to the global scale. *Plant, Cell & Environment* 18, 1214-1225.
- Fowler, D., Amann, M., Anderson, R., Ashmore, M., Cox, P., Depledge, M., Derwent, D., Grennfelt, P., Hewitt, N., Hov, O., Jenkin, M., Kelly, F., Liss, P., Pilling, M., Pyle, J., Slingo, J. & Stefenson, D. (2008): Ground-level ozone in the 21st century: future trends, impacts and policy implications. The Royal Society Policy Document. p. 132.
- Fowler, D., Flechard, C., Cape, J.N., Storeton-West, R.L. & Coyle, M. (2001): Measurements of ozone deposition to vegetation quantifying the flux, the stomatal and non-stomatal components. *Water, Air and Soil Pollution* 130, 63-74.
- Fowler, D., Pilegaard, K., Sutton, M.A., Ambus, P., Raivonen, M., Duyzer, J., Simpson, D., Fagerli, H., Fuzzi, S., Schjoerring, J.K., Granier, C., Neftel, A., Isaksen, I.S.A., Laj, P., Maione, M., Monks, P.S., Burkhardt, J., Daemmgen, U., Neirynck, J., Personne, E., Wichink-Kruit, R., Butterbach-Bahl, K., Flechard, C., Tuovinen, J.P., Coyle, M., Gerosa, G., Loubet, B., Altimir, N., Gruenhage, L., Ammann, C., Cieslik, S., Paoletti, E., Mikkelsen, T.N.,

Ro-Poulsen, H., Cellier, P., Cape, J.N., Horváth, L., Loreto, F., Niinemets, Ü., Palmer, P.I., Rinne, J., Misztal, P., Nemitz, E., Nilsson, D., Pryor, S., Gallagher, M.W., Vesala, T., Skiba, U., Brüggemann, N., Zechmeister-Boltenstern, S., Williams, J., O'Dowd, C., Facchini, M.C., de Leeuw, G., Flossman, A., Chaumerliac, N. & Erisman, J.W. (2009): Atmospheric composition change: ecosystem-atmosphere interactions. *Atmospheric Environment* 43, 5193-5267.

Garen, J. C., Branch, H. A., Borrego, I., Blonder, B., Stinziano, J. R., & Michaletz, S. T. (2022): Gas exchange analyzers exhibit large measurement error driven by internal thermal gradients. *New Phytologist*. in press. <https://doi.org/10.1111/nph.18347>

Gelhardt, U., Kittler, F., Lang, J., Grünhage, L., Baumgarten, M. (2021): Erstellung von Testreferenzjahren für phytotoxische Klimakammerexperimente. *Promet* 104, 31-36.

Göttlein, A. (2016): Ableitung von Nährelementrelationen für die mitteleuropäischen Hauptbaumarten aus dem Wertebereich normaler Ernährung im Vergleich zu verfügbaren Literaturdaten. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.* 187, 237-246.

Granier, A. (1985): Une nouvelle methode pour la mesure du flux de seve brute dans le tronc des arbres. *Ann Sci For* 42, 81-88

Grünhage, L., Bender, J. (2017): Phenology, accumulation period and climate change: case-study in Germany. In: ICP Vegetation (2017). Scientific Background Document B of Chapter 3 of 'Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels of air pollution effects, risks and trends', UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. Assessed on 18.05.2018 on Web at www.icpvegetation.ceh.ac.uk/get-involved/manuals/mapping-manual

Grünhage, L., Jäger, H.-J. (1994): Influence of the atmospheric conductivity on the ozone exposure of plants under ambient conditions: considerations for establishing ozone standards to protect vegetation. *Environmental Pollution* 85, 125-129.

Grünhage, L., Jäger, H.-J. (2003): From critical levels to critical loads for ozone: a discussion of a new experimental and modelling approach for establishing flux-response relationships for agricultural crops and native plant species. *Environmental Pollution* 125, 99-110.

Grünhage, L., Jäger, H.-J., Haenel, H.-D., Löpmeier, F.-J. & Hanewald, K. (1999): The European critical levels for ozone: improving their usage. *Environmental Pollution* 105, 163-173.

Grünhage, L. & Haenel, H. D. (2008): Detailed documentation of the PLATIN (PLant-ATmosphere INteraction) model. *VTI Agriculture and Forestry Research* 319.

Grünhage, L., Matyssek, R., Häberle, K. H., Wieser, G., Metzger, U., Leuchner, M., Menzel, A., Dieler, J., Pretzsch, H., Grimmeisen, W., Zimmermann, L., & Raspe, S. (2012): Flux-based ozone risk assessment for adult beech forests. *Trees - Structure and Function* 26(6), 1713–1721. <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0716-5>

Grünhage, L., Matyssek, R., Wieser, G., Häberle, K.-H., Leuchner, M., Menzel, A., Dieler, J., Pretzsch, H., Grimmeisen, W., Zimmermann, L., Raspe, S. & Schröder, M., (2013): Flux-based ozone risk assessment for adult beech and spruce forests. In: Matyssek R, N. Clarke, P. Cudlin, T.N. Mikkelsen, J.-P. Tuovinen G. Wieser, & E. Paoletti (eds.): Climate change, air pollution and global challenges: Understanding and perspectives from forest research. *Developments in Environmental Science*, Vol. 13. Amsterdam: Elsevier, pp. 251-266.

Günthardt-Goerg, M., Vollenweider, P. (2007): Linking stress with macroscopic and microscopic leaf response in trees: New diagnostic perspectives. *Environmental Pollution* 147, 467-488.

Günthardt-Goerg, M.S. (2001): Erkennen von Ozonsymptomen an Waldbaumarten. *Wald und Holz* 10, 30-33.

Hayes, F., Jones, M.L.M., Mills, G., Ashmore, M. (2007b): Meta-analysis of the relative sensitivity of semi-natural vegetation species to ozone. *Environmental Pollution* 146, 754-762.

- Hayes, F., Mills, G., Harmens, H., Norri, D. (2007a): Evidence of widespread ozone damage to vegetation in Europe (1990-2006). Centre for Ecology and Hydrology, Natural Environment Research Council, Bangor, Wales, UK, pp. 1-58.
- Hayes, F., Mills, G., Alonso, R., González-Fernández, I., Coyle, M., Grünhage, L., Gerosa, G., Karlsson, P.E., Marzuoli, R. (2019): A site-specific analysis of the implications of a changing ozone profile and climate for stomatal ozone fluxes in Europe. *Water, Air, & Soil Pollution* 230,4. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-4057-x>.
- Hikino, K., Danzberger, J., Riedel, V. P., Rehschuh, R., Ruehr, N. K., Hesse, B. D., Lehmann, M. M., Buegger, F., Weikl, F., Pritsch, K., & Grams, T. E. E. (2021): High resilience of carbon transport in long-term drought-stressed mature Norway spruce trees within 2 weeks after drought release. *Global Change Biology*, 28, 2095–2110.
- Hirano, A., Hongo, I., Koike, T. (2012): Morphological and physiological responses of Siebold's beech (*Fagus crenata*) seedlings grown under CO₂ concentrations ranging from pre-industrial to expected future levels. *Landscape and Ecological Engineering* 8 (1), 59-67.
- Hübener, H., Bülow, K., Fooker, C., Früh, B., Hoffmann, P., Höpp, S., Woldt, M. (2017): ReKliEs-De Ergebnisbericht. BMBF. Hohenheim: BMBF. doi:10.2312/WDCC/ReKliEsDe
- Hübener, H., Keuler, K., Bülow, K., Mohr, V., Spekat, A., & Menz, C. (2018): The Project ReKliEs-De : Complementing EURO-CORDEX with high-resolution dynamical and statistical simulations. In EGU General Assembly Conference Abstracts (p. 13111).
- ICP Vegetation (2017): Scientific Background Document A of chapter 3 of 'Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads and levels and air pollution effects, risk and trends'. Accessed on 18.05.2018 on Web at www.icpvegetation.ceh.ac.uk/get-involved/manuals/mapping-manual
- Innes, J., Skelly, J.M., Schaub, M. (2001): Ozone and broadleaved species. A guide to the identification of ozone-induced foliar injury. Ozon, Laubholz- und Krautpflanzen. Ein Führer zum Bestimmen von Ozonsymptomen. Birmensdorf. Eidgenössische Forschungsanstalt. Bern.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., Yiou, P. (2014): EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14(2), 563-578. doi:10.1007/s10113-013-0499-2
- Jacob, D., Teichmann, C., Sobolowski, S., Katragkou, E., Anders, I., Belda, M., Wulfmeyer, V. (2020): Regional climate downscaling over Europe: perspectives from the EURO-CORDEX community. *Regional Environmental Change*, 20(2), 1-20. doi:10.1007/s10113-020-01606-9
- Jäger, H. J., Krupa, S. V. (2009): Hormesis-its relevance in phytotoxicology. *Developments in Environmental Science* 9, 137-152. [https://doi.org/10.1016/S1474-8177\(08\)00206-4](https://doi.org/10.1016/S1474-8177(08)00206-4)
- Jákli, B., Meier, R., Gelhardt, U., Bliss, M., Grünhage, L. & Baumgarten, M. (2021): Regionalized dynamic climate series for ecological climate impact research in modern controlled environment facilities. *Ecology and Evolution* 11, 17364-17380. <https://doi.org/10.1002/ece3.8371>
- Jarvis, P. G. (1976): The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences* 273(927), 593-610. doi:10.1098/rstb.1976.0035
- Jones, H. G. (1999): Use of thermography for quantitative studies of spatial and temporal variation of stomatal conductance over leaf surfaces. *Plant, Cell and Environment*, 22(9), 1043-1055. doi:10.1046/j.1365-3040.1999.00468.x
- Karlsson, P. E., Braun, S., Broadmeadow, M., Elvira, S., Emberson, L., Gimeno, B. S., le Thiec, D., Novak, K., Oksanen, E., Schaub, M., Uddling, J., Wilkinson, M. (2007): Risk assessments for forest trees: The performance

of the ozone flux versus the AOT concepts. *Environmental Pollution* 146(3), 608-616.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.012>

Karlsson, P. E., Uddling, J., Braun, S., Broadmeadow, M., Elvira, S., Gimeno, B. S., le Thiec, D., Oksanen, E., Vandermeiren, K., Wilkinson, M., & Emberson, L. (2004): New critical levels for ozone effects on young trees based on AOT40 and simulated cumulative leaf uptake of ozone. *Atmospheric Environment* 38(15), 2283-2294. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.01.027>

King, J. S., Liu, L., Aspinwall, M. (2013): Tree and forest responses to interacting elevated atmospheric CO₂ and tropospheric O₃: A synthesis of experimental evidence. *Developments in Environmental Science* 13, 197-208.

King, J. S., Pregitzer, K.S., Kubiske, M.E., Hendrey, G.R., Giardina, C.P., McDonald, E.P., Karnosky, D.F. (2005): Tropospheric O₃ compromises net primary production in young stands of trembling aspen, paper birch, and sugar maple in response to elevated atmospheric CO₂. *New Phytologist* 168, 623-636.

Kitao, M., Yasuda, Y., Kominami, Y., Yamanoi, K., Komatsu, M., Miyama, T., Izuta, T. (2016): Increased phytotoxic O₃ dose accelerates autumn senescence in an O₃-sensitive beech forest even under the present-level O₃. *Scientific Reports* 6, 1-9. doi:10.1038/srep32549

Kitao, M., Agathokleous, E., Yazaki, K., Komatsu, M., Kitaoka, S., & Tobita, H. (2021): Growth and photosynthetic responses of seedlings of Japanese white birch, a fast-growing pioneer species, to free-air elevated O₃ and CO₂. *Forests* 12(6), 675. <https://doi.org/10.3390/f12060675>

Kivimäenpää, M., Sutinen, S., Calatayud, V., Sanz, M. J. (2010): Visible and microscopic needle alterations of mature Aleppo pine (*Pinus halepensis*) trees growing on an ozone gradient in eastern Spain. *Tree Physiology* 30, 541-554.

Köstner, B., Matyssek, R., Heilmeyer, H., Clausnitzer, F., Nunn, A.J., Wieser, G. (2008): Sap flow measurements as a basis for assessing tracegas exchange of trees. *Flora* 203, 14-33.

Kramer, K. (1994): Selecting a model to predict the onset of growth of *Fagus sylvatica*. *Journal of Applied Ecology* 31, 172-181.

Krupa, S.V., Kickert, R.N. (1997): Considerations for establishing relationships between ambient ozone (O₃) and adverse crop response. *Environmental Review* 5, 55-77.

Kühn, A. R., Grill, S., Baumgarten, M., Ankerst, D.P., Matyssek, R. (2015): Daily growth of European beech *Fagus sylvatica* L. on moist sites is affected by short-term drought rather than ozone uptake. *Trees* 29, 1501-1519.

Landolt, W., Bühlmann, U., Bleuler, P., Bucher, J. B. (2000): Ozone exposure-response relationships for biomass and root/shoot ratio of beech (*Fagus sylvatica*), ash (*Fraxinus excelsior*), Norway spruce (*Picea abies*) and Scots pine (*Pinus sylvestris*). *Environmental Pollution* 109(3), 473-478. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00050-6](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00050-6)

Luyssaert, S., Schulze, E.D., Börner, A., Knohl, A., Hessenmöller, D., Law, B.E., Ciais, P. & Grace, J. (2008): Old-growth forests as global carbon sinks. *Nature* 455, 213-215.

Lyr, H.; Fiedler, H.-J.; Tranquillini, W. (1992): Physiologie und Ökologie der Gehölze. Gustav-Fischer-Verlag Jena und Stuttgart, 619 p.

Mall, M. (2017): Zeitliche Abfolge von Austrieb und sekundärem Dickenwachstum bei Buche und Fichte in einem Trockenstressexperiment. Bachelor Thesis am Lehrstuhl für Ökophysiologie der Pflanzen der TU München.

Martin, T. A., Hinckley, T. M., Meinzer, F. C., & Sprugel, D. G. (1999): Boundary layer conductance, leaf temperature and transpiration of *Abies amabilis* branches. *Tree Physiology* 19(7), 435-443. doi:10.1093/treephys/19.7.435

Matyssek, R., Schnyder, H., Elstner, E.-F., Munch, J.-C., Pretzsch, H., Sandemann, H. (2002): Growth and parasite defence in plants; the balance between resource sequestration and retention: In lieu of a guest editorial. *Plant Biology* 4(2), 133-136. doi: 10.1055/s-2002-25742.

Matyssek, R., Baumgarten, M., Hummel, U., Häberle, K.-H., Kitao, M., Wieser, G. (2015): Canopy-level stomatal narrowing in adult *Fagus sylvatica* under O₃ stress – means of preventing enhanced O₃ uptake under high O₃ exposure? *Environmental Pollution* 196, 518-526. DOI: 10.1016/j.envpol.2014.06.029

Matyssek, R., Bytnerowicz, A., Karlsson, P.E., Paoletti, E., Sanz, M., Schaub, M. & Wieser, G. (2007): Promoting the O₃ flux concept for European forest trees. *Environmental Pollution* 146, 587-607.

Matyssek, R., Knoke, T., Clarke, N., Cudlin, P., Mikkelsen, T. N., Tuovinen, J.-P., Wieser, G. & Paoletti, E. (2013b): Conclusions and perspectives. In: Matyssek R., Clarke N., Cudlin P., Mikkelsen T.N., Tuovinen J.-P., Wieser G., Paoletti E. (eds). *Climate Change, Air Pollution and Global Challenges: Understanding and Perspectives from Forest Research. Developments in Environmental Science* 13, Elsevier, pp. 591-607.

Matyssek, R., Clarke, N., Cudlin, P., Mikkelsen, T.N., Tuovinen, J.-P., Wieser, G., Paoletti, E. (2013a): Climate Change, Air Pollution and Global Challenges: Understanding and Perspectives from Forest Research. In: R. Matyssek, N. Clarke, P. Cudlin, T.N. Mikkelsen, J.-P. Tuovinen, G. Wieser, E. Paoletti (eds.), *Developments in Environmental Science* 13, Elsevier, pp. 3-16.

Matyssek, R., Kozovits, A.R., Schnitzler, J., Pretzsch, H., Dieler, J., Wieser, G. (2014): Forest trees under air pollution as a factor of climate change. In: Tausz M, Grulke N. (Eds.) *Trees in a Changing Environment*. Springer, *Plant Ecophysiology* 9, pp. 117-163.

Matyssek, R., Sandermann, H. (2003): Impact of ozone on trees: An ecophysiological perspective. In: *Progress in Botany*, Vol. 64. Springer Verlag, Heidelberg, pp. 49–404.

Matyssek, R., Wieser, G., Ceulemans, R., Rennenberg, H., Pretzsch, H., Haberer, K., Löw, M., Nunn, A. J., Werner, H., Wipfler, P., Oßwald, W., Nikolova, P., Hanke, D. E., Kragher, H., Tausz, M., Bahnweg, G., Kitao, M., Dieler, J., Sandermann, H., Häberle, K. H. (2010): Enhanced ozone strongly reduces carbon sink strength of adult beech (*Fagus sylvatica*)—resume from the free-air fumigation study at Kranzberg Forest. *Environ. Pollut.* 158, 2527-32

McNaughton, K. G., Jarvis, P. G. (1983). Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation. In T. T. Kozlowski (Ed.), *Water deficits and plant growth* (pp. 1–47). Academic Press.

Medlyn, B. E., Barton, C. V. M., Broadmeadow, J., Ceulemans, R., de Angelis, P., Forstreuter, M., Freeman, M., Jackson, S. B., Kellomäki, S., Laitat, E., Rey, A., Roberntz, P., Sigurdsson, B. D., Strassmeyer, J., Wang, K., Curtis, P. S., Jarvis, P. G. (2001): Stomatal conductance of forest species after long-term exposure to elevated CO₂ concentration: A synthesis. *New Phytologist* 149, 247-264

Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L. T., Lamarque, J., Matsumoto, K., Montzka, S. A., Raper, S. C. B., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G. J. M., & van Vuuren, D. P. P. (2011): The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change* 109(1), 213-241. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>

Mills, G., Hayes, F., Simpson, D., Emberson, L., Norris, D., Harmens, H., Büker, P. (2011a): Evidence of widespread effects of ozone on crops and (semi-)natural vegetation in Europe (1990 - 2006) in relation to AOT40- and flux-based risk maps. *Global Change Biology* 17, 592-613.

Mills, G., Pleijel, H., Braun S., Büker P., Bermejo V., Calvo, E., Danielsson H., Emberson L., González Fernández I., Grünhage L., Harmens H., Hayes F., Karlsson P.-E., Simpson D. (2011b): New stomatal flux-based critical levels for ozone effects on vegetation. *Atmospheric Environment* 45, 5064-5068.

Moorhead, J. E., Marek, G. W., Gowda, P. H., Lin, X., Colaizzi, P. D., Evett, S. R., & Kutikoff, S. (2019): Evaluation of evapotranspiration from eddy covariance using large weighing lysimeters. *Agronomy* 9(2), 1–17. <https://doi.org/10.3390/agronomy9020099>

Murray, M. B., Smith, R. I., Friend, A., & Jarvis, P. G. (2000): Effect of elevated [CO₂] and varying nutrient application rates on physiology and biomass accumulation of Sitka spruce (*Picea sitchensis*). *Tree Physiology* 20(7), 421–434. doi:10.1093/treephys/20.7.421

Musselman, R.C., Hale, B.A. (1997): Methods for controlled and field ozone exposures of forest tree species in North America. In: Sandermann Jr., H., Wellburn, A.R., Heath, R.L. (Eds.), forest decline and ozone: A *Comparison of Controlled Chamber and Field Experiments*. Ecological Studies, Vol.127, Springer, Berlin, pp. 277–315.

Musselman, R.C., Lefohn, A.S., Massman, W.J. & Heath, R.L. (2006): A critical review and analysis of the use of exposure- and flux-based ozone indices for predicting vegetation effects. *Atmospheric Environment* 40, 1869–1888.

NCAR, National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). Last modified 14 Oct 2013. "The Climate Data Guide: AIRS and AMSU: Trace Gases (CO₂, CO, CH₄, O₃...); Level 3." <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/airs-and-amsu-trace-gases-co2-co-ch4-o3-level-3>, aufgerufen am 29.06.2022

Neufeld, H.S., Chappelka, A.H., Somers, G L., Burkey, K.O., Davison, A.W., Finkelstein, P.L. (2006): Visible foliar injury caused by ozone alters the relationship between SPAD meter readings and chlorophyll concentrations in cutleaf coneflower. *Photosynthesis Research* 87(3), 281–286. <https://doi.org/10.1007/s11120-005-9008-x>

Nunn, A. J., Kozovits, A. R., Reiter, I. M., Heerdt, C., Leuchner, M., Lütz, C., Liu, X., Löw, M., Winkler, J. B., Grams, T. E. E., Häberle, K. H., Werner, H., Fabian, P., Rennenberg, H., & Matyssek, R. (2005): Comparison of ozone uptake and sensitivity between a phytotron study with young beech and a field experiment with adult beech (*Fagus sylvatica*). *Environmental Pollution* 137(3), 494–506. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.01.036>

Nunn, A. J., Wieser, G., Reiter, I. M., Häberle, K. H., Grote, R., Havranek, W. M., & Matyssek, R. (2006): Testing the unifying theory of ozone sensitivity with mature trees of *Fagus sylvatica* and *Picea abies*. *Tree Physiology* 26(11), 1391–1403. <https://doi.org/10.1093/treephys/26.11.1391>

Nunn, A.J., Wieser, G., Metzger, U., Löw, M., Wipfler, P., Häberle, K.-H., Matyssek, R. (2007): Exemplifying whole-plant ozone uptake in adult forest trees of contrasting species and site conditions. *Environmental Pollution* 146, 629–639.

Nunn, A. J., Cieslik, S., Metzger, U., Wieser, G., Matyssek, R. (2010). Combining sap flow and eddy covariance approaches to derive stomatal and non-stomatal O₃ fluxes in a forest stand. *Environmental Pollution* 158(6), 2014–2022.

Oksanen, E. (2003): Responses of selected birch (*Betula pendula* Roth) clones to ozone change over time. *Plant, Cell and Environment* 26(6), 875–886.

Ostluft [Hrsg.] (2013): Ozonsymptome an Laubbäumen an ausgewählten Standorten in der Ostschweiz 2008 / 2009 / 2011. Bericht von Ostluft, der Luftqualitätsüberwachung der Ostschweizer Kantone und des Fürstentums Liechtenstein. www.ostluft.ch

Ottosson, S., Wallin, G., Skärby, L., Karlsson, P. E., Medin, E. L., Räntfors, M., Pleijel, H., & Selldén, G. (2003): Four years of ozone exposure at high or low phosphorus reduced biomass in Norway spruce. *Trees - Structure and Function* 17(4), 299–307. <https://doi.org/10.1007/s00468-002-0239-6>

Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, Kauppi, P.E., Kurz, W.A., Phillips, O.L., Shvidenko, A., Lewis S.L., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Pacala, S.W., McGuire, A.D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S. & Hayes, D. (2011): A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333(6045), 988–993, DOI: 10.1126/science.1201609.

- Paoletti, E., De Marco, A., Anav, A., Gasparini, P., Pompei, E. (2017): Five-year volume growth of European beech does not respond to ozone pollution in Italy. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25, 8233-8239.
- Parrish, D. D., Law, K. S., Staehelin, J., Derwent, R., Cooper, O. R., Tanimoto, H., Volz-Thomas, A., Gilge, S., Scheel, H. E., Steinbacher, M., & Chan, E. (2012): Long-term changes in lower tropospheric baseline ozone concentrations at northern mid-latitudes. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12(23), 11485-11504. <https://doi.org/10.5194/acp-12-11485-2012>
- Percy, K. E., Nosal, M., Heilman, W., Sober, J., Dann, T., Karnosky, D. F. (2009): Chapter 11 Ozone exposure-based growth response models for trembling aspen and white birch. *Developments in Environmental Science* 9, 269-293. [https://doi.org/10.1016/S1474-8177\(08\)00211-8](https://doi.org/10.1016/S1474-8177(08)00211-8)
- Piao, S., P. Ciais, Y. Huang, Z. Shen, S. Peng, J. Li, L. Zhou, H. Liu, Y. Ma, Y. Ding, P. Friedlingstein, C. Liu, K. Tan, Y. Yu, T. Zhang, Fang, J. (2010): The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature* 467, 43-51.
- Pierre, S. (2021): Ground-level ozone over time: An observation-based global overview. *Current Opinion in Environmental Science and Health* 19. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2020.100226>
- Pleijel, H., Danielsson, H., Vandermeiren, K., Blum, C., Colls, J., Ojanperä, K. (2002): Stomatal conductance and ozone exposure in relation to potato tuber yield – results from the European CHIP programme. *European Journal of Agronomy* 17, 303-317.
- Pleijel, H., Danielsson, H., Emberson, L., Ashmore, M.R., Mills, G. (2007): Ozone risk assessment for agricultural crops in Europe: further development of stomatal flux and flux–response relationships for European wheat and potato. *Atmospheric Environment* 41, 3022-3040.
- Pretzsch, H., Biber, P., Schütze, G., Uhl, E., Rötzer T. (2014): Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. *Nature com* 5(1), 1-10. DOI: 10.1038/ncomms5967.
- Pretzsch, H., Dieler, J., Matyssek, R., & Wipfler, P. (2010): Tree and stand growth of mature Norway spruce and European beech under long-term ozone fumigation. *Environmental Pollution* 158(4), 1061-1070. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.07.035>
- Proietti, C., Fornasier, M. F., Sicard, P., Anav, A., Paoletti, E., & de Marco, A. (2021): Trends in tropospheric ozone concentrations and forest impact metrics in Europe over the time period 2000–2014. *Journal of Forestry Research* 32(2), 543-558. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01226-3>
- 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 CO₂. *Annals of Botany* 121(6), 1137-1149. <https://doi.org/10.1093/aob/mcx208>
- R. Soc. (The Royal Society) (2008): Ground-level ozone in the 21st century: future trends, impacts and policy implications. Science Policy Series Report 15/08, London, 132 pp.
- Reich, P.B., Lassoie, J.P. (1984): Effects of low-level O₃ exposure on leaf diffusive conductance and water-use efficiency in hybrid poplar. *Plant, Cell & Environment* 7, 661-668.
- Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N., & Rafaj, P. (2011): RCP 8.5 - A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change* 109, 33-57. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>
- Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa (2008): Amtsblatt der Europäischen Union, L 152, S. 1-44.
- Ritter, W., Andersen, C. P., Matyssek, R., Grams, T. E. E. (2011): Carbon flux to woody tissues in a beech/spruce forest during summer and in response to chronic O₃ exposure. *Biogeosciences* 8(11), 3127-3138. <https://doi.org/10.5194/bg-8-3127-2011>

- Roberntz, P., & Stockfors, J. (1998). Effects of elevated CO₂ concentration and nutrition on net photosynthesis, stomatal conductance and needle respiration of field-grown Norway spruce trees. *Tree Physiology* 18(4), 233-241. doi:10.1093/treephys/18.4.233
- Rötzer, T., Liao, Y., Goergen, K., Schüle, G. & Pretzsch, H. (2013a): Modelling the impact of climate change on the productivity and water-use efficiency of a central European beech forest. *Climate Research* 58(1), 81-95, doi:10.3354/cr01179.
- Rötzer, T., Liao, Y., Klein, D., Zimmermann, L., Schulz, C. (2013b): Modellierung des Biomassezuwachses an bayerischen Waldklimastationen unter gegebenen und möglichen zukünftigen Klimabedingungen. *AFJZ* 184-11/12, 263-277.
- Roy, J., Rineau, F., De Boeck, H. J., Nijs, I., Pütz, T., Abvien, S., Milcu, A. (2020): Ecotrons: Powerful and versatile ecosystem analysers for ecology, agronomy and environmental science. *Global Change Biology* 27(7), 1387-1407. doi:10.1111/gcb.15471
- Saxe, H., Ellsworth, D. S., Heath, J. (1998): Tree and forest functioning in an enriched CO₂ atmosphere. *New Phytologist* 139(3), 395-436. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.1998.00221.x>
- Schaub, M.; Cherubini, P.; Kräuchi, N. (2001): Ozon - Auswirkungen auf den Wald. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. 11 p.
- Schaub, M., Calatayud, V., Ferretti, M., Brunialti, G., Lövblad, G., Krause, G., Sanz, M.J., Pitar, D., Gottardini, E. (2020): Part VIII: Monitoring of Ozone Injury. Version 2020-1. In: UNECE ICP Forests Programme Coordinating Centre (ed.): Manual on methods and criteria for harmonized sampling, assessment, monitoring and analysis of the effects of air pollution on forests. Thünen Institute of Forest Ecosystems, Eberswalde, Germany, 15 p. + Annex [<http://www.icp-forests.org/manual.htm>]
- Schindelin, J., Rueden, C. T., Hiner, M. C. et al. (2015): The ImageJ ecosystem: An open platform for biomedical image analysis. *Molecular Reproduction and Development* 82(7-8), 518-529.
- Scholes, R., Settele, J., Betts, R. & et al. (2014): Terrestrial and water inland systems. in Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Sicard, P., Anav, A., de Marco, A., & Paoletti, E. (2017): Projected global tropospheric ozone impacts on vegetation under different emission and climate scenarios. *Atmospheric Chemistry and Physics* 17(19), 1–34. <https://doi.org/10.5194/acp-2017-74>
- Sitch, S., Cox, P.M., Collins, W.J., Huntingford, C. (2007): Indirect radiative forcing of climate change through ozone effects on the land-carbon sink. *Nature* 448, 791-95.
- Soda, C., Bussotti, F., Grossoni, P., Barnes, J., Mori, B., Tani, C. (2000): Impacts of urban levels of ozone on *Pinus halepensis* foliage. *Environmental and Experimental Botany* 44, 69-82.
- Soussana, J., Graux, A. & Tubiello, F.N. (2010): Improving the use of modelling for projections of climate change impacts on crops and pastures. *Journal of Experimental Botany* 61, 2217-2228.
- Stevenson, D. S., Young, P. J., Naik, V., Lamarque, J. F., Shindell, D. T., Voulgarakis, A., Skeie, R. B., Dalsoren, S. B., Myhre, G., Berntsen, T. K., Folberth, G. A., Rumbold, S. T., Collins, W. J., MacKenzie, I. A., Doherty, R. M., Zeng, G., van Noije, T. P. C., Strunk, A., Bergmann, D., Archibald, A. (2013): Tropospheric ozone changes, radiative forcing and attribution to emissions in the Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP). *Atmospheric Chemistry and Physics* 13(6), 3063-3085. <https://doi.org/10.5194/acp-13-3063-2013>

- Sugai, T., Kam, D. G., Agathokleous, E., Watanabe, M., Kita, K., & Koike, T. (2018): Growth and photosynthetic response of two larches exposed to O₃ mixing ratios ranging from preindustrial to near future. *Photosynthetica*, 56(3). <https://doi.org/10.1007/s11099-017-0747-7>
- Tobita, H., Komatsu, M., Harayama, H., Yazaki, K., Kitaoka, S., & Kitao, M. (2019): Effects of Combined CO₂ and O₃ Exposures on Net CO₂ Assimilation and Biomass Allocation in Seedlings of the Late-Successional *Fagus Crenata*. *Climate* 201, 7, 117. doi:10.3390/cli7100117 www.mdpi.com/journal/climate
- Tenga, A.Z., Ormrod, D.P. (1990): Diminished greenness of tomato leaves exposed to ozone and post-exposure recovery of greenness. *Environ Pollut* 64: 29–42
- Tricker, P.J., Trewin, H., Olevi, A. E., Graham, K., Clarkson, J. J., Eve, A. E., Matthew, E., Ae, J. T., Colella, A., Doncaster, C.P., Maurizio, A. E., Taylor, G. (2005): Stomatal conductance and not stomatal density determines the long-term reduction in leaf transpiration of poplar in elevated CO₂. *Oecologia* (2005) 143: 652–660, DOI 10.1007/s00442-005-0025-4
- Uddling, J., Günthardt-Goerg, M.S., Matyssek, R., Oksanen, E., Plejdel, H., Sellden, G., Karlsson, P.E. (2004): Biomass reduction of juvenile birch is more strongly related to stomatal uptake of ozone than to indices based on external exposure. *Atmospheric Environment* 38, 4709–4719
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., Kram, T., Edmonds, J., Thomson, A., ... Hibbard, K. (2011): The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109, 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- VDI 2310 Blatt 6 (2020): Maximale Immissions-Werte zum Schutz der Vegetation. Kritische Dosis-Kenngröße für Ozon. Beuth Verlag, Berlin, S. 1-75.
- Volz, A., Kley, D. (1988): Evaluation of the Montsouris series of ozone measurements made in the nineteenth century, *Nature* 332, 240–242, doi:10.1038/332240a0.
- Weigel, H.J., Bergmann, E., Bender, J. (2015): Plant-mediated Ecosystem Effects of Tropospheric Ozone. in: Lüttge, U. & Beyschlag, W. (eds.), *Progress in Botany* 76, 395–443.
- Wieser, G., Matyssek, R., Cieslek, S. (2008): Upscaling ozone flux in forests from leaf to landscape. *Zeitschrift Ital J Agron* 1:35–41
- Wieser, G., Matyssek, R., Köstner, B., Oberhuber, W. (2003): Quantifying ozone uptake at the canopy level of spruce, pine and larch trees at the alpine timberline: an approach based on sap flow measurements. *Environmental Pollution* 126, 5–8.
- Wittig, V.E., Ainsworth, E.A., Naidu, S.L., Karnosky, D.F., Long, S.P. (2009): Quantifying the impact of current and future tropospheric ozone on tree biomass, growth, physiology and biochemistry: a quantitative meta-analysis. *Glob. Change Biol.* 15:396–424
- Wittig, V.E., Ainsworth, E.A., Long, S.P. (2007): To what extent do current and projected increases in surface ozone affect photosynthesis and stomatal conductance of trees? A meta-analytic review of the last 3 decades of experiments. *Plant Cell Environ.* 30:1150–62
- Woodward, F.I. (1987): Stomatal numbers are sensitive to increases in CO₂ from pre-industrial levels. *Nature* 327:617–618
- Woodward, F.I., Bazzaz, F.A. (1988): The responses of stomatal density to CO₂ partial pressure. *J Exp Bot* 39:1771–1781
- Wulff, A., Anttonen, S., Heller, W., Sandermann, H., & Kärenlampi, L. (1996): Ozone-sensitivity of Scots pine and Norway spruce from northern and local origin to long-term open-field fumigation in central Finland. *Environmental and Experimental Botany*, 36(2), 209–221. doi:10.1016/0098-8472(96)01001-5

Xing, J., Mathur, R., Pleim, J., Hogrefe, C., Gan, C.-M., Wong, D. C., Wei, C., Gilliam, R., and Pouliot, G. (2015): Observations and modeling of air quality trends over 1990–2010 across the Northern Hemisphere: China, the United States and Europe, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 2723–2747, <https://doi.org/10.5194/acp-15-2723-2015>.

von Willert, D.J., Matyssek, R., Herppich, W. (1995): Experimentelle Pflanzenökologie, Stuttgart, New York, Thieme Verlag

Zhu, X., Feng, Z., Sun, T., Liu, X., Tang, H., Zhu, J., Guo, W., & Kobayashi, K. (2011): Effects of elevated ozone concentration on yield of four Chinese cultivars of winter wheat under fully open-air field conditions. *Global Change Biology*, 17(8), 2697–2706. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02400.x>