

# Ozonaufnahme als Preis der Transpiration?

Neues Forschungsvorhaben untersucht das Leistungspotential der Buche bei vermehrten Trockenperioden und zunehmender Ozonbelastung

Manuela Baumgarten, Angelika Kühn, Hans-Peter Dietrich und Rainer Matyssek

**Die Wasserverfügbarkeit ist entscheidend für das Wachstum der Bäume. Regionale Klimaszenarien gehen neben einer Erhöhung der Temperatur zukünftig von einer verstärkten Umverteilung der Niederschläge vom Sommer auf den Winter aus. Für Mitteleuropa ist zudem mit einer jährlichen Zunahme der Hintergrundkonzentration des bodennahen Ozons zu rechnen. Auf Grund der zellschädigenden Wirkung von Ozon kommt es entweder direkt zur Senkung der Photosyntheseleistung oder zu Entgiftungsreaktionen, welche beide letztendlich zu Wachstumseinbußen führen. Beide Faktoren, Wassermangel und Ozonbelastung, mindern somit das Leistungspotential der Buche – einzeln oder in Kombination. Basis für die Bewertung ist die Ermittlung der Stresstoleranz der Buche gegenüber diesen Faktoren. Die Kernfrage lautet: Was wird zukünftig das Leistungsvermögen der Buche begrenzen?**

Auf zahlreichen Waldstandorten Bayerns ist unter dem Einfluss eines fortschreitenden Klimawandels mit einer zunehmenden, zunächst räumlich begrenzten temporären Wasserlimitierung bis hin zu ausgeprägtem Trockenstress zu rechnen (Geßler et al. 2007). Für Süd- und Mitteleuropa werden extreme Trockenphasen mit zunehmender Dauer und Häufigkeit erwartet (Ciais et al. 2005), und auch bei moderaten Niederschlagseinträgen werden auf Grund zunehmender Erwärmung während den Vegetationszeiten nachhaltig sinkende Bodenwasservorräte und somit eine zusätzliche potentiell chronische Wasserlimitierung für mitteleuropäische Wälder prognostiziert. Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland bestätigen diese Entwicklungsvoraussagen (AK KLIWA 2006) und machen für eine nachhaltige Forstwirtschaft mit trocken-

stresstoleranten Baumarten auf den entsprechenden Standorten eine vorausschauende waldbauliche Planung erforderlich (Ammer et al. 2005; Rennenberg et al. 2004). Hierfür werden derzeit GIS gestützte Planungsgrundlagen in Bayern erarbeitet (Kölling et al. 2007). Gleichzeitig wird der fortschreitende Klimawandel mit anhaltend hohen Emissionen von Vorläufersubstanzen zu einem weiteren Anstieg der troposphärischen Ozonbelastung beitragen (z.B. Coyle et al. 2003; Vingarzan 2004; Bytnerowicz et al. 2004; Rebetez et al. 2006). Eine zuwachsbeschränkende Wirkung durch Ozonbelastung bei Waldbäumen ist nachgewiesen (z.B. Matyssek et al. 2010; Pretzsch et al. 2010; Karnosky et al. 2005, 2007). Das aktuelle Ozonrisiko für bayerische Wälder ist gemäß verschiedener Bewertungs-Indices hoch (Baumgarten et al. 2010, 2009; Matyssek et al. 2007).



Foto: A. Kühn

Abbildung 1: Elektronisches Dendrometer zur Bestimmung des Radialzuwachses (DC2, Ecomatik)

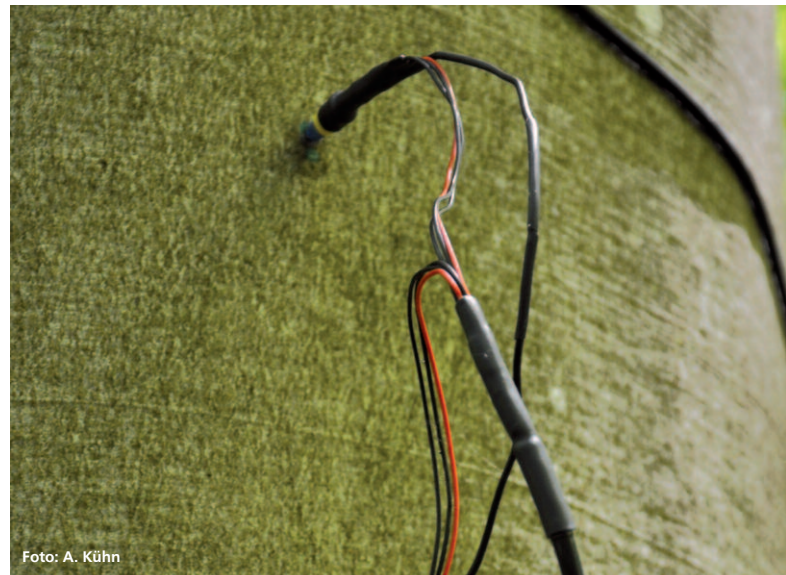


Foto: A. Kühn

Abbildung 2: Xylemsaftfluss-Sensor (heat balance-Methode nach Granier, UMS)

### Die Buche – der Baum der Zukunft zwischen Trockenstress und Ozonbelastung

Als Baumart der Zukunft wird der Buche hohe Bedeutung beigemessen. In Fachkreisen ist die Beurteilung deren Eignung im Klimawandel von großer Relevanz. In Mitteleuropa kann die Buche innerhalb eines relativ weiten standörtlichen Spektrums als Waldbaumart dominieren und durch waldbauliche Förderung zunehmende Produktionsleistung einbringen. Der Umbau von reinen Nadelwaldbeständen zu Gunsten naturnaher Laub- und Mischwaldbestände mit erhöhten Anteilen der Buche wird als eine wichtige Maßnahme zur Anpassung der Wälder an den Klimawandel angesehen. Unsicher sind noch immer die tatsächlichen Grenzen der Eignung einzelner Baumarten unter den prognostizierten Bedingungen des Klimawandels und seiner Extrema.

Das Projekt zur »Bewertung der Leistungspotentiale der Buche im Klimawandel im Hinblick auf die Risiken von Trockenheit und Ozonbelastung« widmet sich dieser Frage für die Baumart Buche. Das Gemeinschaftsprojekt der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) und der Technischen Universität München wird vom Bayerischen Staatsministerium im Rahmen des Bayerischen Klimaprogramms (KLIP 15) gefördert

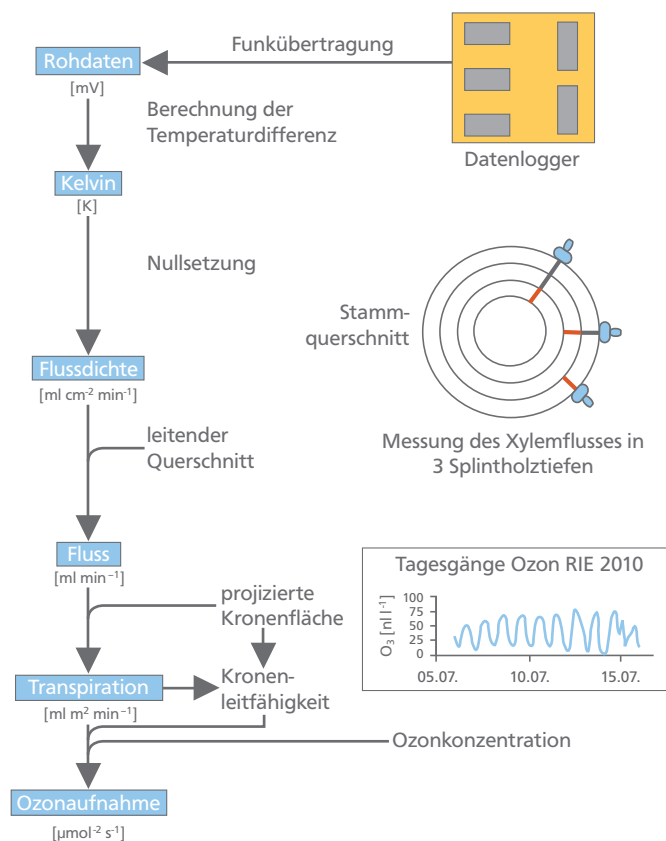


Abbildung 3: Ermittlung der Transpiration und der Ozonaufnahme aus der Messung des Xylemflusses am Einzelbaum

### Stresstoleranz im Klimawandel?

Wird sich die gegenwärtige Leistung der Buche in Bayern mit ihrer großen Anpassungsfähigkeit und ihrer hohen Plastizität auch im Klimawandel bestätigen? Als spezifische Belastung werden der Trockenstress auf wasserlimitierten Standorten sowie erhöhte Ozonaufnahme und damit phytotoxischer Stress bei guter Wasserversorgung angesehen. Im Vordergrund der Untersuchungen stehen somit die Bewertung der Stresstoleranz der Buche und potentielle Produktionseinbußen auf einem breiten Standortsspektrum für Bayern. Für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung ist entscheidend zu wissen, mit wie wenig Wasser und wie viel Ozonbelastung die Buche noch ökonomisch relevante Erträge produzieren kann.

### Verknüpfung von Wasserverbrauch und Ozonaufnahme

Die Basis für die Bewertung des Leistungspotentials der Buche ist die Ermittlung ihrer Stresstoleranz, in diesem Falle der standortsbezogenen Wassernutzungseffizienz, als Verhältnis der jährlichen Produktivität zum Wasserverbrauch, in Kombination mit der Ozonbelastung.

Um eine ausreichende Bandbreite der relevanten Stressbedingungen abzudecken, wurden in den Jahren 2010 und 2011 acht Bayerische Waldklimastationen (Level II Flächen) und zwei Forschungsstandorte der TU München (Kranzberger Forst) und des Nationalparks Bayerischer Wald (Forellenbach, UNECE Monitoring) analysiert. Die ausgewählten Flächen bieten mit ihrer umfassenden Instrumentierung und kontinuierlichen Datenerfassung ideale Voraussetzungen. Neben der Erfassung der relevanten klimatischen und edaphischen Faktoren sowie der Ozonkonzentrationen wurden auf allen Standorten Messungen des Xylemsaftflusses und des Stammickenwachstums in hoher zeitlicher Auflösung durchgeführt (Abbildungen 1 und 2).

Der Xylemsaftfluss (transportiertes Xylemwasser pro Baum und Zeiteinheit) wird als Abkühlung des beheizten gegenüber dem unbeheizten Sensor infolge der Fließgeschwindigkeit des Xylemwassers bestimmt. Aus der Temperaturdifferenz lässt sich die Flussdichte pro Flächeneinheit des Splintholzgewebes ermitteln. Durch die Bestimmung des Xylemsaftflusses in drei Splintholztiefen wird das Flussprofil erfasst und somit die gesamte Wassermenge abgeleitet, die schließlich von den Blättern transpiriert wird. Hieraus wird der Wasserverbrauch sowohl des Einzelbaumes als auch des Waldbestandes ermittelt.

In einem neuartigen Untersuchungsansatz wird die Kopplung zwischen Wasserhaushalt und Ozonfluss in die Blätter durch die Spaltöffnungsregulation ausgenutzt. So kann aus der Bestimmung der Transpiration die stomatare Ozonaufnahme und damit die phytotoxisch relevante Ozondosis abgeleitet werden (Abbildung 3).

Mithilfe der intra-annuellen Betrachtung des Stammdickenzuwachses in hoher zeitlicher Auflösung wird der kurzfristige Einfluss von eingeschränkter Wasserverfügbarkeit und Ozonbelastung auf das Stammwachstum an den verschiedenen Standorten ermittelt. Auf diese Weise kann das Ausmaß der Pufferung episodischer Klimaextreme auf den Zuwachs der Baumart auf unterschiedlichen Standorten geprüft werden.

Abbildung 4 (oben) zeigt exemplarisch Transpiration und Ozonaufnahme einer herrschenden adulten Buche an einem warmen, strahlungsreichen Tag nach 14tägiger Trockenheit sowie an einem ebenfalls warmen strahlungsreichen Tag während einer gut wasserversorgten Periode im Juli 2010 an der Waldklimastation Riedenburg. In der niederschlagsreichen Periode transpierte die Buche mit 39 Litern Wasser pro Tag etwa die Hälfte der Wassermenge, die sie während der Trockenperiode (79 Liter pro Tag) verdunstete.

Die Ozonaufnahme ist jedoch während der gut wasserversorgten Periode mit 54  $\mu\text{mol}$  Ozon pro Tag und pro Quadratmeter projizierter Blattfläche (PLA: projected leaf area) ( $\mu\text{mol}/\text{d} \cdot \text{m}^2$  PLA) mehr als doppelt so hoch als während der wasserlimitierten Zeitspanne mit 26  $\mu\text{mol}/\text{d} \cdot \text{m}^2$  PLA. Der vorgeschlagene Schwellenwert für die phytotoxische Ozondosis (POD) für Waldbäume (UNECE 2004) von täglich 4  $\text{mmol}/\text{d} \cdot \text{m}^2$  PLA, aufsummiert für die Dauer einer Vegetationszeit, wird somit an den beiden Beispieltagen zu 1,4 bzw. 0,6 Prozent erreicht. Für durchschnittliche Witterungsverhältnisse wird der vorgeschlagene Schwellenwert für die Ozonbelastung folglich während der Vegetationszeit (ca. 150 Tage) um mehr als die Hälfte überschritten. Die hoch aufgelösten Dendrometermessungen zeigen, dass bereits wenige Tage nach Ausbleiben von Niederschlägen eine deutliche Stagnation des Zuwachses zu beobachten ist, der nach Ende der Trockenheit ebenfalls nach wenigen Tagen wieder zunimmt (Abbildung 4, unten). Dies zeigt, dass mit diesem Untersuchungsansatz die Auswirkungen von kurzfristigen Änderungen der Umgebungsbedingungen auf das Wachstum sehr detailliert analysiert werden können.

**Welche neuen Erkenntnisse für die forstliche Praxis sind zu erwarten?**

Hauptziel ist die Klärung, ob die als sehr anpassungsfähig eingeschätzte Wirtschaftsbaumart Buche auf Grund der in Zukunft verstärkt auftretenden Trockenheit und Ozonbelastung besonders hohen Risiken ausgesetzt ist.

Erarbeitet werden Ableitungen zu einem standortsspezifischen ursache-wirkungsbezogenen Eignungsindex der Buche hinsichtlich ihrer Stresstoleranz an Standorten unterschiedlicher Trockenheit und Ozonbelastung, was für die forstliche Praxis von Bedeutung ist. Die Gesamtschau der Ergebnisse dient der verbesserten Prognose der Baumarteneignung für die waldbauliche Planung und für die Erarbeitung ökologischer und waldbaulicher Empfehlungen. Die prozessorientierten Erkenntnisse aus den Freilandstudien unterstützen bestehende empirische Erklärungsmodelle (Klimahüllenansatz, vgl. Kölling 2007) und einzelne Experimente (beispielsweise Forschungsverbund

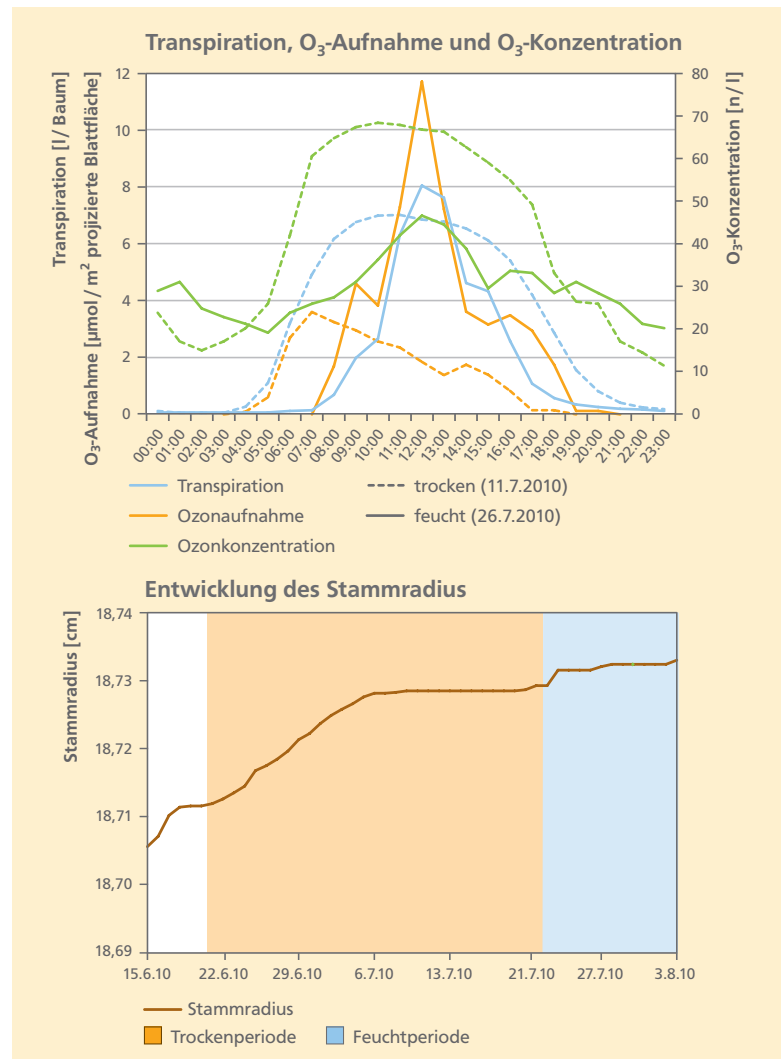


Abbildung 4, oben: Transpiration, Ozonaufnahme über die Spaltöffnungen und Ozonkonzentration im Tagesgang an einem warmen strahlungsreichen Tag (11.7.) während einer Trockenperiode und während einer gut wasserversorgten Periode im Juli 2010 (26.7.), exemplarisch für eine herrschende, adulte Buche an der Waldklimastation Riedenburg; unten: Entwicklung des Stammdurchmessers während der Vegetationszeit 2010, exemplarisch dargestellt für eine herrschende, adulte Buche an der Waldklimastation Riedenburg

BayFORCAST) zur Beurteilung der Baumarteneignung der Buche. Des Weiteren wird das Projekt KLIP 15 Wasserhaushaltsmodelle für Bayerns Waldstandorte sowie Modelle zur Ozonaufnahme für die standortsspezifische Einschätzung des Belastungsrisikos validieren und die Basis für Weiterentwicklungen schaffen. Ziel ist die Bereitstellung von Qualitätsmaßstäben für regionale forstliche Empfehlungen. Im Kontext des Kyoto-Protokolls und der landes- und bundesweiten Ziele zur Minderung von Treibhausgasen ist eine Bewertung von Produktionseinbußen durch Wasserlimitierung oder Ozonbelastung im Hinblick auf die Kohlenstoffsenkenfunktion der Wälder auch von ökonomischer und umweltpolitischer Bedeutung.

Endgültige Ergebnisse zum KLIP 15-Projekt werden im Herbst 2012 vorliegen.

## Literatur

- AK KLIMA (2006): *Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland*. Heft 9: Herausgeber: Landesanstalt für Umwelt, Messungen, und Naturschutz Baden-Württemberg, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Deutscher Wetterdienst
- Ammer, C.; Albrecht, L.; Borchert, H.; Brosinger, F.; Dittmar, C.; Elling, W.; Ewald, J.; Felbermeier, B.; Glisa v. H.; Huss, J.; Kenk, J.; Kölling, C.; Kohnle, U.; Mayer, P.; Moosandl, R.; Moosmayer, H.U.; Palmer, S.; Reif, A.; Rehfuess, K.-E.; Stimm, B. (2005): *Zur Zukunft der Buche (Fagus sylvatica L.) in Mitteleuropa*. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 176, S. 60–67
- Baumgarten, M.; Huber, C.; Dietrich, H.-P.; Büker, P.; Emberson, L.; Beudert, B.; Heerdt, C.; Matyssek, R. (2009): *Are Bavarian Forests (Southern Germany) at risk from ground-level ozone? Assessment using exposure and flux based ozone indices*. Environmental Pollution, 157, S. 2091–2107
- Baumgarten, M.; Huber, C.; Dietrich, H.P.; Matyssek, R. (2010): *Beurteilung des Ozonrisikos für die Waldregionen Bayerns am Beispiel des Jahres 2002 und des Extremtrockenjahres 2003 auf der Basis der externen Ozonexposition und der internen Ozonaufnahme*. Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung (UWSF) 2010, Band 22, Heft 5, S. 579–595
- Bytnerowicz, A.; Godzik, B.; Grodzinska, K.; Fraczek, W.; Messelmann, R.; Manning, W.; Badea, O.; Popescu, F.; Fleischer P. (2004): *Ambient ozone in forests of the Central and Eastern European mountains*. Environmental Pollution 130, S. 5–16
- Ciais, Ph.; Reichstein, M.; Viovy, N.; Granier, A.; Ogee, J.; Allard, V.; Aubinet, M.; Buchmann, N.; Bernhofer, Chr.; Carrara, A.; Chevallier, F.; De Noblet, N.; Friend, A.D.; Friedlingstein, P.; Grünwald, T.; Heinesch, B.; Keronen, P.; Knohl, A.; Krinner, G.; Loustau, D.; Manca, G.; Matteucci, G.; Miglietta, F.; Ourcival, J.M.; Papale, D.; Pilegaard, K.; Rambal, S.; Seufert, G.; Soussana, J.F.; Sanz, M.J.; Schulze, E.D.; Vesala, T.; Valentini, R. (2005): *Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003*. Nature 437 (7058), S. 529–534
- Coyle, M.; Fowler, D.; Ashmore, M.R. (2003): *Implication of increasing tropospheric background ozone concentrations for vegetation*. Atmospheric Environment 37, S. 153–154
- Geßler, A.; Keitel, C.; Kreuzwieser, J.; Matyssek, R.; Seiler, W.; Rennenberg H. (2007): *Potential risks for European beech (Fagus sylvatica L.) in a changing climate*. Trees 21: S. 1–11
- Karnosky, D.F.; Pregitzer, K.S.; Zak, D.R.; Kubisce, M.E.; Hendrey, G.R.; Weinstein, D.; Nosal, M.; Percy, K.E. (2005): *Scaling ozone responses of forest trees to the ecosystem level in a changing climate*. Plant, Cell and Environment 28, S. 965–981
- Karnosky, D.F.; Werner, H.; Holopainen, T.M.; Percy, K.E.; Oksanen, E.; Heerdt, C.; Fabian, W.; Nagy, J.; Heilmann, W.; Cox, R.; Nelson, N.; Matyssek, R. (2007): *Free-Air Exposure Systems to scale up Ozone Research to Mature Trees*. Plant Biology 9, S. 181–190
- Kölling, C. (2007): *Klimahüllen von 27 Waldbaumarten*. AFZ-Der Wald Jg. 62: S. 1242-1245
- Kölling, C., Zimmermann, L.; Walentowski, H. (2007): *Klimawandel: Was geschieht mit Buche und Fichte? Entscheidungshilfen für den klimagerechten Waldbau in Bayern*. AFZ-Der Wald Jg. 62: S. 584–588
- Matyssek, R.; Schaub, M.; Wieser, G. (2010): *Air pollution and climate change effects on forest ecosystems: new evidence*. European Journal of Forest Research 129: S. 417–419
- Matyssek, R.; Bytnerovic, A.; Karlsson, P.-E.; Paoletti, E.; Sanz, M.; Schaub, M.; Wieser, G. (2007): *Promoting the O<sub>3</sub> flux concept for European forest trees*. Environmental Pollution 146: S. 587–607
- Pretzsch, H.; Dieler, J.; Matyssek, R.; Wipfler P. (2009): *Tree and stand growth of mature Norway spruce and European beech under long-term ozone fumigation*. Environmental Pollution Spec. Issue 158 (4): S. 1061–1070
- Rebetez, M.; Mayer, H.; Dupont, O.; Schindler, D.; Gartner, K.; Kropp, J.; Menzel A. (2006): *Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis*. Annals of Forest Science 63, S. 569–577
- Rennenberg, H.; Seiler, W.; Matyssek, R.; Gessler, A.; Kreuzwieser, J. (2004): *Die Buche (Fagus sylvatica L.) – ein Waldbaum ohne Zukunft im südlichen Mitteleuropa?* Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 175: S. 210–224
- Retzlaff, W.A.; Arthur, M.A.; Grulke, N.E.; Weinstein, D.A. Gollands, B. (2000): *Use of a single-tree simulation model to predict effects on ozone and drought on growth of white fir tree*. Tree Physiology 20, S. 195–202
- UNECE (2004): *Mapping Manual 2004*. UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, ICP Modelling and Mapping. Manual on Methodologies and Criteria for Modelling and Mapping Critical Loads and Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends [http://icpmapping.org/cms/zeigeBereich/5/manual\\_and\\_downloads.html](http://icpmapping.org/cms/zeigeBereich/5/manual_and_downloads.html)
- Vingarzan, R. (2004): *A review of surface ozone background levels and trends*. Atmospheric Environment 38, S. 3431–3442

---

Dr. Manuela Baumgarten leitet das Projekt KLIP 15 »Risiken durch Trockenheit und Ozon für Bayerns Buchenbestände«, angestellt in der Abteilung »Boden und Klima« der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft und am Lehrstuhl »Ökophysiologie der Pflanzen« der Technischen Universität München.

[manuela.baumgarten@tum.de](mailto:manuela.baumgarten@tum.de)

Dipl. Forstwissenschaftlerin Angelika Kühn promoviert am Lehrstuhl »Ökophysiologie der Pflanzen« der Technischen Universität München zum Thema »Ozonaufnahme versus Transpiration - Produktivität der Buche im Spannungsfeld regionaler edaphischer Standortgradienten«.

[angelika.kuehn@mytum.de](mailto:angelika.kuehn@mytum.de)

Hans-Peter Dietrich ist Mitarbeiter in der Abteilung »Boden und Klima« der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft und koordiniert das forstliche Umweltmonitoring.

[Hans-Peter.Dietrich@lwf.bayern.de](mailto:Hans-Peter.Dietrich@lwf.bayern.de)

Prof. Dr. Rainer Matyssek leitet den Lehrstuhl »Ökophysiologie der Pflanzen« der Technischen Universität. [matyssek@wzw.tum.de](mailto:matyssek@wzw.tum.de)