

Ozonbelastung von Waldbäumen in der Schweiz und damit verbundene Wachstumseinbussen

Sabine Braun Institut für Angewandte Pflanzenbiologie (CH)*
Beat Rihm Meteotest (CH)

Ozone impact on forest trees in Switzerland and resulting growth reductions

Ozone (O₃) is highly phytotoxic. Basing on dose-effect relationships resulting from fumigation experiments, the United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) has set critical levels for protection of the vegetation. The present article compares the AOT40 (accumulated ozone over a threshold of 40 ppb) summing up hourly ozone concentrations with a flux-based risk assessment taking into account stomatal ozone uptake. Both ozone quantifications were calculated for rural monitoring stations in Switzerland, mapped and compared to the corresponding critical levels. The data suggest that the ozone load in Switzerland is high enough to provoke clear reductions in forest growth.

Keywords: ozone, critical level, DO3SE, forest, *Fagus sylvatica*, *Picea abies*, growth
doi: 10.3188/szf.2012.0383

* Sandgrubenstrasse 25, CH-4124 Schönenbuch, E-Mail sabine.braun@iap.ch

Ozon (O₃) ist ein starkes Pflanzengift. Die Wirkungen umfassen sichtbare Schäden an den Blättern (Hicks 1978, Günthardt-Goerg et al 1993, Van der Heyden et al 2001), Wachstumsreduktionen (Karlsson et al 2006a, Wittig et al 2009, UNECE 2010), einen gehemmten Transport von Fotosyntheseprodukten in die Wurzeln (Coleman et al 1995, Samuelson & Kelly 1996, Lux et al 1997), eine veränderte Anfälligkeit gegenüber abiotischen und biotischen Stressfaktoren (Wellburn & Wellburn 1994, Braun & Flückiger 1989, Braun & Flückiger 1995, Karnosky et al 2007) und eine verminderte Regulationsfähigkeit des stomatären Gasaustausches bei Trockenheit (Pearson & Mansfield 1993, Maier-Maercker & Koch 1991, Paoletti 2005, Barth et al 2011).

In der Schweiz wurden sichtbare Ozonschäden an Waldbäumen vor allem im Tessin beobachtet (Skelly et al 1999, Novak et al 2003). Epidemiologische Auswertungen von Daten aus Buchenbeobachtungsflächen legten eine Wachstumsreduktion durch Ozon nahe, die auch für die Alpennordseite gilt (Braun et al 1999, Braun et al 2007, Braun et al 2012). Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den aktuellen Kenntnisstand bezüglich Ozonbelastung darzustellen und eine Risikoabschätzung vorzunehmen.

In Arbeitsgruppen der UNO-Wirtschaftskommission für Europa (UNECE) wurden zum Schutz

der Vegetation Ozongrenzwerte (Critical Levels) festgelegt. Ein Critical Level ist definiert als *Konzentration eines gasförmigen Luftschadstoffs, oberhalb deren aufgrund des aktuellen Kenntnisstandes negative Effekte auf Rezeptoren wie Menschen, Pflanzen, Ökosysteme oder Materialien eintreten können* (UNECE 1996a).

Basierend auf zahlreichen Ozonbegasungsversuchen wurde für Waldbäume ein Critical Level von 5 ppm h AOT40 festgelegt (UNECE 1993, 1996b, 2004¹, 2010). AOT40 steht für Accumulated Ozone over a Threshold of 40 ppb, das heisst für die bei Tageslicht aufsummierten stündlichen Ozonkonzentrationen über 40 ppb, wobei eine feste Zeitperiode zwischen dem 1. April und dem 30. September berücksichtigt wird. In Experimenten mit jungen Bäumen wurde bei dieser Ozonbelastung eine Wachstumsreduktion von etwa 5% gegenüber den Kontrollen beobachtet (UNECE 1996b). Dieser Critical Level wird in weiten Gebieten der Schweiz überschritten.

Für eine schädliche Wirkung muss Ozon in die Pflanze eindringen, d.h., über die Spaltöffnungen aufgenommen werden (Reich 1987). Um diese Ozonaufnahme abzuschätzen, entwickelten Emberson (2000, 2001) und Büker et al (2007, 2011) deshalb

¹ Mapping critical levels for vegetation. Frühere Fassung von UNECE (2010).



Abb 1 Begasungsanlage in Schönenbuch (Open-Top-Kammern mit gefilterter und nicht gefilterter Luft).

das DO3SE-Modell. In der vorliegenden Arbeit wird dieses neue Flusskonzept erläutert. Die aus Dosis-Wirkungs-Kurven hergeleiteten flussbasierten Critical Levels werden vorgestellt und mit der aktuellen Belastung in der Schweiz verglichen.

Methoden

Anhand der Ergebnisse von Ozonbegasungsversuchen (Abbildung 1) verschiedener Autoren wurden in einer Arbeitsgruppe des International Cooperative Programme on effects of air pollution on natural vegetation and crops (ICP Vegetation) unter Mitwirkung der Erstautorin die Dosis-Wirkungs-Beziehungen für verschiedene Baumarten zusammengefasst. Datengrundlage und Methodik sind bei Mills et al (2011) beschrieben. Diese Dosis-Wirkungs-Beziehungen waren Grundlage zur Festlegung von Critical Levels, mit denen eine als akzeptierbar eingestufte maximale Wachstumsreduktion zugelassen wird.

Für die Abschätzung des Ozonrisikos für den Schweizer Wald wurde der Ozonfluss für 23 ländliche Ozonmessstationen zwischen 1991 und 2006 berechnet. Die Ozondaten stammten aus dem nationalen Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (Nabel), kantonalen Stationen und eigenen Messungen.

Für Buchen (*Fagus sylvatica*) wurden die Ozonflüsse als Summen über die Vegetationsperiode, für Fichten (*Picea abies*) über das ganze Jahr mit dem Modell DO3SE berechnet (Büker et al 2007). Dieses empirische Modell multipliziert die baumartspezifische maximale stomatare Leitfähigkeit (ein Mass für den Gasaustausch an den Spaltöffnungen) mit

modifizierenden Faktoren zwischen 0 und 1, die den Einfluss des Lichts, des Wasserdampfdruckdefizits, der Temperatur, des Bodenwassergehalts und der Phänologie auf die Spaltöffnungsweite repräsentieren (Gleichung 1).

$$g_{sto} = g_{max} \times f_{phen} \times f_{light} \times \max \{f_{min}, (f_{temp} \times f_{VPD} \times f_{SWP})\} \quad (1)$$

wobei g_{sto} die aktuelle stomatare Leitfähigkeit ist und g_{max} eine artspezifische maximale Leitfähigkeit. f_{phen} , f_{light} , f_{temp} , f_{VPD} und f_{SWP} sind Faktoren zwischen 0 und 1, welche den Einfluss der Phänologie (phen), der Strahlung (light), der Lufttemperatur (temp), des Wasserdampfdruckdefizits (VPD) und des Bodenwassergehalts (SWP) beschreiben. Diese Funktionen sind ebenfalls artspezifisch. f_{min} ist eine minimale Leitfähigkeit, die nicht unterschritten wird, auch wenn alle anderen Faktoren 0 sind.

Die auf diese Weise stündlich ermittelte stomatare Leitfähigkeit wird anschliessend mit der ebenfalls stündlich vorliegenden Ozonkonzentration multipliziert. Dies ergibt den Wert des stündlichen Ozonflusses (UNECE 2010). Als Eingangsgrößen werden Stundenmittelwerte von Temperatur, Strahlung, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Ozonkonzentration benötigt, bei Berücksichtigung der Bodenfeuchte auch Niederschlag und eine grobe Einstufung der Bodenart. Um der Entgiftungsmöglichkeit durch Pflanzen Rechnung zu tragen, wird von den Stundenmittelwerten jeweils ein Schwellenwert abgezogen, bevor sie über die Vegetationsperiode (Laubbäume) beziehungsweise das ganze Jahr (Fichten) aufsummiert werden. Dieses Vorgehen ist ähnlich wie beim AOT40, bei dem ebenfalls nur Konzentrationen über 40 ppb berücksich-

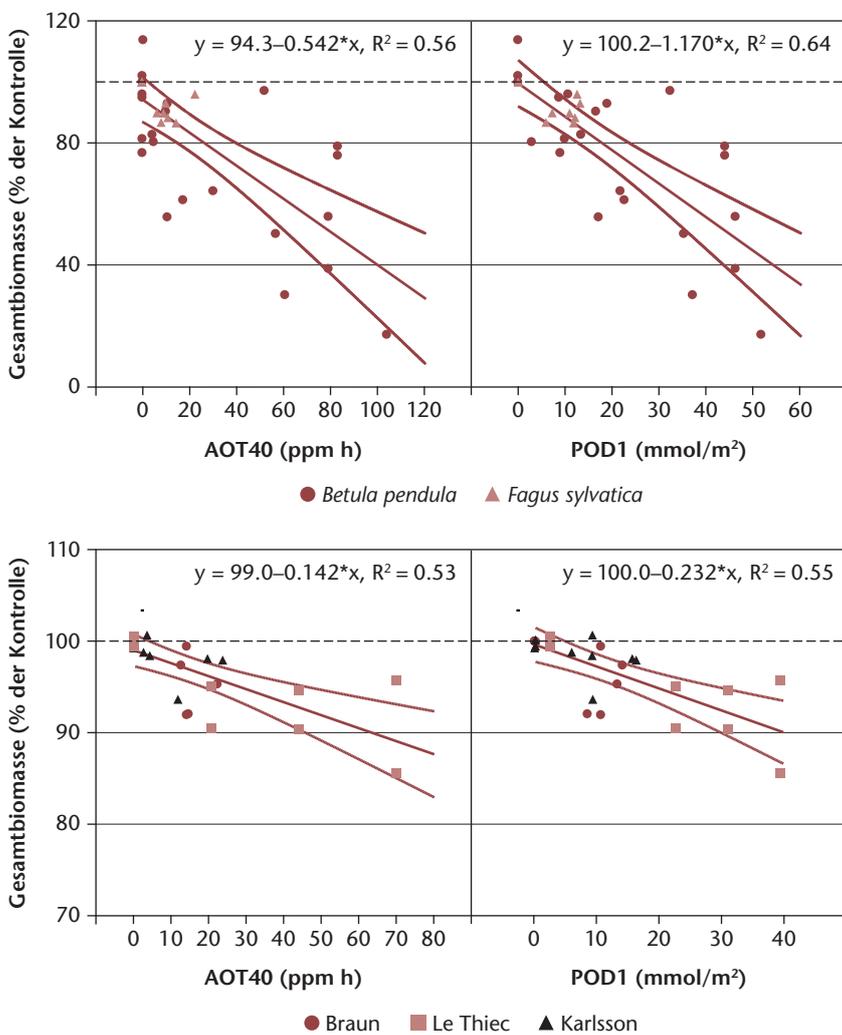


Abb 2 Dosis-Wirkungs-Kurven für Ozonbegasungsexperimente mit *Betula pendula* und *Fagus sylvatica* (oben) und mit *Picea abies* (unten). Links: Beziehung mit AOT40, rechts: Ozonaufnahme gemäss Mapping Manual (UNECE 2010) und Schwellenwert 1 (POD1). Datenquellen: Braun & Flückiger 1995, Karlsson et al 2004, Uddling et al 2004 (oben), Le Thiec et al 1995 (unten).

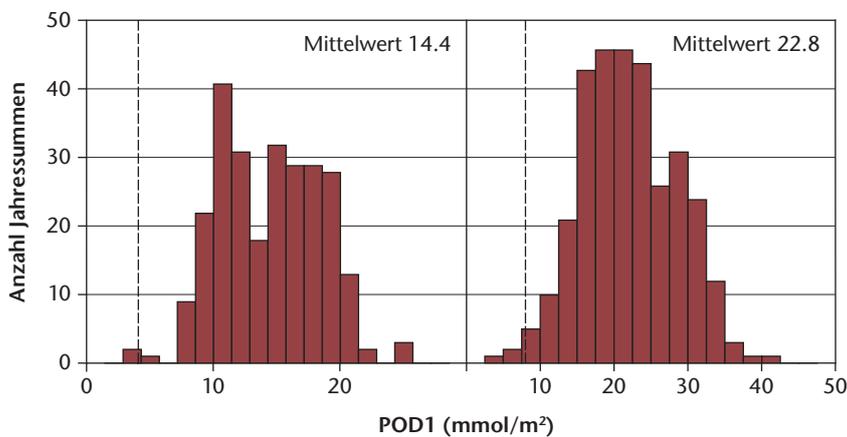


Abb 3 Häufigkeitsverteilung der Ozonaufnahme (POD1) für *Betula pendula* und *Fagus sylvatica* bei 19 Ozonmessstationen (links) sowie für *Picea abies* bei 23 Messstationen (rechts) über einen Zeitraum von 9 bis 17 Jahren. Gestrichelte Linie: Critical Level.

Baumart	Buche und Birke	Fichte
Critical Level POD1 (mmol/m²)	4	8
Jährliche Wachstumsreduktion	4%	2%

Tab 1 Flussbasierte Critical Levels POD1 für die Ozonaufnahme von Waldbäumen (UNECE 2010) und jährliche Wachstumsreduktion (Gesamtbiomasse) beim Critical Level.

tigt werden. Abgekürzt wird dieser kumulative Ozonfluss mit PODX, was für phytotoxic ozone dose with a threshold of X nmol/(m² × s) steht.

Für die Erstellung von Karten wurde der mittlere Ozonfluss pro Station mit verschiedenen Prädiktoren korreliert. Eine direkte räumliche Interpolation der Stationen (z.B. Kriging) war wegen zu geringer Anzahl der Messstationen und des komplexen Terrains nicht möglich.

Ergebnisse

Flussbasierte Critical Levels

Werden die alten Begasungsexperimente, welche für die Festlegung des AOT40-Critical-Level verwendet worden sind, mit dem Ozonflussmodell DO3SE neu ausgewertet, so ergibt sich für Birken (*Betula pendula*) und Buchen eine deutliche Verbesserung der Dosis-Wirkungs-Beziehung (Abbildung 2, oben). Die erklärte Varianz, angegeben durch den Regressionskoeffizienten R², steigt von 56% auf 64%. Bei der Fichte ist die Erhöhung des R² dagegen marginal (Abbildung 2, unten), d.h., das Flusskonzept bringt, zumindest mit der jetzigen Parametrisierung, keine Verbesserung. Aufgrund dieser Dosis-Wirkungs-Beziehungen wurden am Workshop des ICP Vegetation in Tervuren (Belgien) im Jahr 2010 neue flussbasierte Critical Levels definiert (Tabelle 1). Es wurde ein Schwellenwert von 1 nmol/(m² × s) gewählt. Der resultierende Critical Level für Buche und Birke (POD1) beträgt 4 mmol/m², was einer jährlichen Wachstumsreduktion von etwa 4% entspricht. Für Fichte wurde der Critical Level auf 8 mmol/m² festgelegt, was im Versuch etwa 2% Wachstumsreduktion verursachte.

Belastung in der Schweiz

Die Häufigkeitsverteilung der jährlichen Ozonflüsse in 23 ländlichen Messstationen zeigt, dass der Critical Level sowohl für die beiden Baumarten Birke und Buche als auch für die Fichte deutlich überschritten wird (Abbildung 3). Eine Sensitivitätsanalyse zeigte bei den analysierten Messstationen einen geringen Einfluss der Bodentrockenheit auf den Ozonfluss. Das heisst, dass die Spaltöffnungen bereits wegen des hohen Dampfdruckdefizits der Luft geschlossen waren, wenn Bodentrockenheit limitierend wurde.

Wie die Umstellung vom AOT40 auf den flussbasierten Grenzwert POD1 die Beurteilung der Verteilung des Ozonrisikos in der Schweiz verändert, wird in den Abbildungen 4 bis 6 illustriert. Während für die Buche die regionale Verteilung des Ozonrisikos mit dem AOT40 und dem Flussmodell ähnlich beurteilt wird, verschiebt sich das Risiko für die Fichte mit dem Flussmodell generell in die höheren Lagen. Vergleicht man die mittleren Belastungswerte

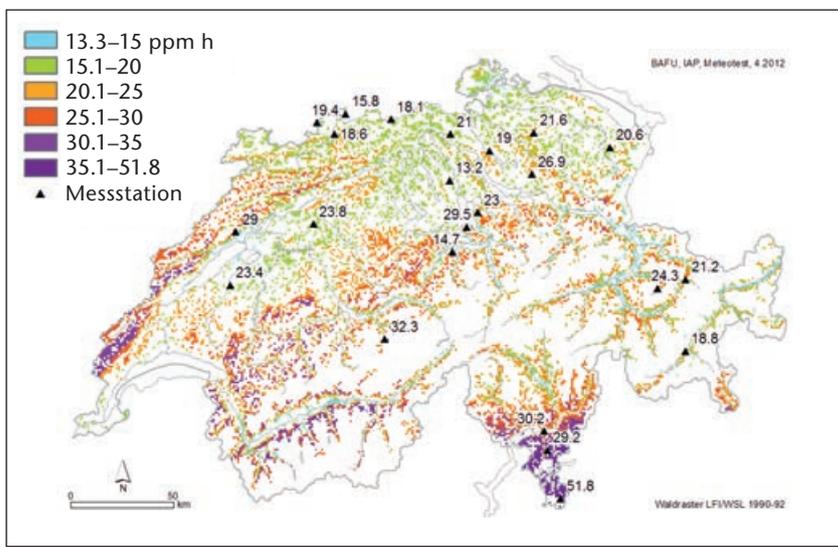


Abb 4 Verteilung des AOT40 in Schweizer Waldflächen gemäss dem Schweizerischen Landesforstinventar (Datenbankauszüge vom 30. Mai 1990 und vom 8. Dezember 1992 der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL in Birmensdorf). Für den Wald beträgt der AOT40-Grenzwert 5 ppm h.

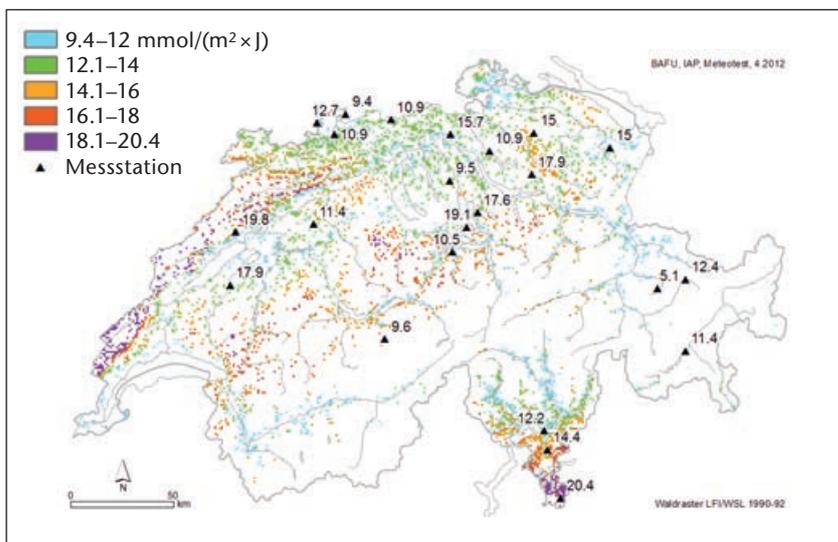


Abb 5 Ozonaufnahme (Ozonfluss) von Buchen in Schweizer Waldflächen mit einem Laubholzanteil von mindestens 10%. Die kartierten Flusswerte wurden ohne Berücksichtigung des Bodenwassers berechnet. Der Critical Level für Birke und Buche beträgt 4 mmol/m².

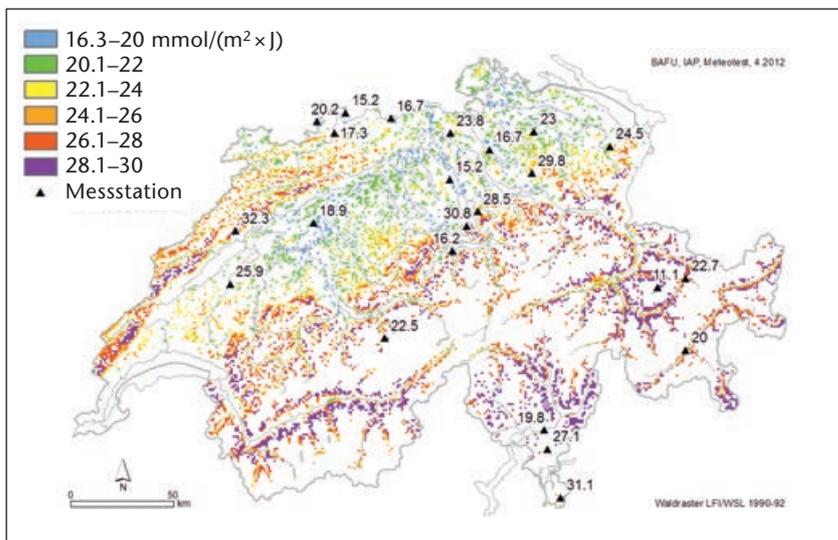


Abb 6 Ozonaufnahme (Ozonfluss) von Fichten in Schweizer Waldflächen mit einem Nadelholzanteil von mindestens 10%. Die kartierten Flusswerte wurden ohne Berücksichtigung des Bodenwassers berechnet. Der Critical Level für Fichte beträgt 8 mmol/m².

mit den entsprechenden Dosis-Wirkungs-Kurven, so wird das Ozonrisiko mit dem Flussmodell geringer eingeschätzt als mit AOT40 (Tabelle 2). Die in dieser Tabelle angegebenen erwarteten Wachstumsreduktionen konnten für die Buche mittels epidemiologischer Auswertungen bestätigt werden (Braun et al 2012), für die Fichte ist die Angabe noch hypothetisch.

Diskussion und Schlussfolgerung

Beim Vergleich von Risikokarten mit einem Critical Level, der auf Experimenten mit jungen Bäumen basiert (AOT40), muss zunächst abgeklärt werden, ob die Reaktion erwachsener Bäume mit derjenigen von Jungpflanzen vergleichbar ist. Was die Ausbildung von sichtbaren Ozonschäden anbelangt (Abbildung 7), sind Keimlinge oft empfindlicher als erwachsene Bäume (Kolb et al 1997). Dies gilt jedoch nicht unbedingt für das Wachstum. Ozoneffekte wurden auch in Experimenten mit grösseren Bäumen (Karnosky et al 2007, Matyssek et al 2010) sowie bei epidemiologischer Auswertung von Wachstumsdaten beobachtet (Karlsson et al 2006b, Braun et al 1999, Braun et al 2007, Braun et al 2012). Sowohl im Freilandbegasungsversuch als auch in der epidemiologischen Auswertung war die beobachtete Wachstumsreduktion erwachsener Bäume durch Ozon vergleichbar mit der aus Experimenten ermittelten Dosis-Wirkungs-Kurve. Damit legt die gemessene Ozonbelastung nahe, dass Ozon ein erhebliches Potenzial besitzt, das Waldwachstum in der Schweiz zu vermindern.

Von der Pflanzenphysiologie und den Wirkungsmechanismen her ist eine flussbasierte Risikobewertung, wie sie das DO3SE-Modell erlaubt, klar besser einzustufen. Sie eignet sich damit besser zur quantitativen Abschätzung von Wachstumsverlusten im Wald. Allerdings ist der Berechnungsaufwand wesentlich grösser als beim AOT40, und die Dosis-Wirkungs-Beziehungen werden mit AOT40 auch nicht schlecht abgebildet. Klare Vorteile hat die flussbasierte Berechnung im mediterranen Raum, wo sehr hohe AOT40-Werte einer stark verminderten Ozonaufnahme infolge geringer Luftfeuchtigkeit und infolge Bodentrockenheit gegenüberstehen. Da Ozon die Regulation der Spaltöffnungen verschlechtern kann (Pearson & Mansfield 1993, Maier-Maercker 1998, Paoletti 2005), ist es aber möglich, dass die Ozonaufnahme unter Trockenheit mit dem Flussmodell unterschätzt wird. Bei der UNECE werden vorerst beide Bewertungsarten weitergeführt.

Obwohl die vorgestellten Daten eine Wachstumsverminderung im Schweizer Wald durch Ozon nahelegen, ist eine solche schwierig nachzuweisen. Dies vor allem deshalb, weil die Stickstoffeinträge in entgegengesetzter Richtung wirken, zumindest so-

Ozonquantifizierung	Bezugsfläche	Mittelwert	Erwartete mittlere Wachstumsreduktion
AOT40	ganze Waldfläche	22.3 ppm h	22%*
POD1 Buchen	Waldfläche mit $\geq 10\%$ Laubholzanteil	13.5 mmol/m ²	13.5%
POD1 Fichten	Waldfläche mit $\geq 10\%$ Nadelholzanteil	25.0 mmol/m ²	6.3%**

Tab 2 Ozonmittelwerte über die in Abbildung 4 bis 6 dargestellten Waldflächen und von Abbildung 2 und 3 hergeleitete erwartete Wachstumsreduktionen. * Die Dosis-Wirkungs-Beziehung für AOT40 gilt nur für empfindliche Laubbaumarten und ist nicht geeignet zur quantitativen Abschätzung von Wachstumsverlusten. ** Hypothetischer Wert.



Abb 7 Ozonschaden an Buchenlaub.

lange Phosphor nicht limitierend ist (Braun et al 1999). Dies bedeutet aber nicht, dass die Ozonwirkung nicht ernst genommen werden sollte. Die Stickstoffwirkung kann mit der Zeit auch zu Wachstums-minderungen führen, wenn als Folge der hohen Einträge andere Nährstoffe limitierend werden (Aber et al 1989, Boxman et al 1998, Nellemann & Thomsen 2001).

Eingereicht: 26. September 2011, akzeptiert (mit Review): 4. Mai 2012

Dank

Die Arbeiten in der UNECE-Arbeitsgruppe wurden von der Abteilung Luftreinhaltung des Bundesamtes für Umwelt gefördert. Die Autoren danken Beat Achermann für sein Interesse und seine Unterstützung. Zur Berechnung der Ozonbelastung in der Schweiz wurden Daten aus dem Nabel sowie aus kantonalen Messstationen beigezogen. Die Neuberechnung der Dosis-Wirkungs-Kurve erfolgte im Rahmen einer Arbeitsgruppe von ICP Vegetation in enger Zusammenarbeit mit C. Schindler und P. Büker unter Verwendung von Daten von P.E. Karlsson, D. Le Thiec, M. Günthardt-Goerg und E. Oksanen.

Literatur

- ABER JD, NADELHOFFER KJ, STEUDLER P, MELILLO JM (1989) Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *BioScience* 39: 378–386.
- BARTH S ET AL (2011) Ozone flux-response relationships for aspen and aspen-birch communities in the aspen FACE experiment. In: Proc International Conference Ozone, climate change and forests, Prague, 14–16 June 2011. <http://cost-fp0903.ipp.cnr.it/Downloads/Prague/BookAbstracts.pdf> (13.8.2012)
- BOXMAN AW, VAN DER VEN PJM, ROELOFS JGM (1998) Ecosystem recovery after a decrease in nitrogen input to a Scots pine stand at Ysselsteyn, The Netherlands. *For Ecol Manage* 101: 155–163.
- BRAUN S, FLÜCKIGER W (1989) Effect of ambient ozone and acid mist on aphid development. *Environ Pollut* 56: 177–187.
- BRAUN S, FLÜCKIGER W (1995) Effects of ambient ozone on seedlings of *Fagus sylvatica* L. and *Picea abies* (L.) Karst. *New Phytol* 129: 33–44.
- BRAUN S, RIHM B, SCHINDLER C (2012) Flux-response relationship of *Fagus sylvatica*: what does the epidemiological data analysis tell us. In: ICP Vegetation. Proc Meeting & Workshop, Brescia, 31 January–2 February 2012. http://icpvegetation.ceh.ac.uk/events/documents/Book_of_abstracts_and_programme.pdf (24.8.2012)
- BRAUN S, RIHM B, SCHINDLER C, FLÜCKIGER W (1999) Growth of mature beech in relation to ozone and nitrogen deposition: an epidemiological approach. *Water Air Soil Pollut* 116: 357–364.
- BRAUN S, SCHINDLER C, RIHM B, FLÜCKIGER W (2007) Shoot growth of mature *Fagus sylvatica* and *Picea abies* in relation to ozone. *Environ Pollut* 146: 624–628.
- BÜKER P ET AL (2007) Comparison of different stomatal conductance algorithms for ozone flux modelling. *Environ Pollut* 146: 726–735.
- BÜKER P ET AL (2011) DO3SE modelling of soil moisture to determine ozone flux to European forest trees. *Atmos Chem Phys* 11: 33583–33650.
- COLEMAN MD, DICKSON RE, ISEBRANDS JG, KARNOSKY DF (1995) Carbon allocation and partitioning in aspen clones varying in sensitivity to tropospheric ozone. *Tree Physiol* 15: 593–604.
- EMBERSON LD, ASHMORE MR, CAMBRIDGE HM, SIMPSON D, TUOVINEN JP (2000) Modelling stomatal ozone flux across Europe. *Environ Pollut* 109: 403–414.
- EMBERSON LD, SIMPSON D, TUOVINEN JP, ASHMORE MR, CAMBRIDGE HM (2001) Modelling and mapping ozone deposition in Europe. *Water Air Soil Pollut* 130: 577–582.
- GÜNTHARDT-GOERG M, MATYSSEK R, SCHEIDEGGER C, KELLER T (1993) Differentiation and structural decline in the leaves and bark of birch (*Betula pendula*) under low ozone concentrations. *Trees* 7: 104–114.
- HICKS DA (1978) Diagnosing vegetation injury caused by air pollution. Springfield: US Department Commerce, National Technical Information Center. 306 p.
- KARLSSON PE ET AL (2004) Dose-response relationships for ozone impact on the biomass accumulation of young trees of different European species based on AOT40 and cumulative leaf uptake of ozone. *Atmos Environ* 38: 2283–2294.
- KARLSSON PE ET AL (2006A) Risk assessments for forest trees – the performance of ozone flux versus the AOT concepts. In: Wieser G, Tausz G, editors. Critical levels of ozone: further applying and developing the flux-based concept. Proc Workshop, Obergurgl, 15–19 Nov 2005. Vienna: Federal Research and Training Centre for Forests, Natural Hazards and Landscape.
- KARLSSON PE ET AL (2006B) Negative impact of ozone on the stem basal area increment of Norway spruce in south Sweden. *For Ecol Manage* 232: 146–151.

- KARNOSKY DF ET AL (2007)** Free-air exposure systems to scale up ozone research to mature trees. *Plant Biol* 9: 181–190.
- KOLB TE, FREDERICKSEN TW, STEINER KC, SKELLY JM (1997)** Issues in scaling tree size and age responses to ozone: A review. *Environ Pollut* 98: 195–208.
- LE THIEC D, DIXON M, GARREC JP (1995)** The effects of slightly elevated ozone concentrations and mild drought stress on the physiology and growth of Norway spruce, *Picea abies* (L.) Karst. and beech, *Fagus sylvatica* (L.), in open-top chambers. *New Phytol* 129: 265–273.
- LUX D, LEONARDI S, MÜLLER J, WIEMKEN A, FLÜCKIGER W (1997)** Effects of ambient ozone concentration on contents of non-structural carbohydrates in young *Picea abies* (L.) Karst. and *Fagus sylvatica* L. *New Phytol* 137: 399–409.
- MAIER-MAERCKER U (1998)** Dynamics of change in stomatal response and water status of *Picea abies* during a persistent drought period: a contribution to the traditional view of plant water relations. *Tree Physiol* 18: 211–222.
- MAIER-MAERCKER U, KOCH W (1991)** Experiments on the control capacity of stomata of *Picea abies* (L.) Karst. after fumigation with ozone and in environmentally damaged material. *Plant Cell Environ* 14: 175–184.
- MATYSSEK R ET AL (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: 2527–2532.
- MILLS G ET AL (2011)** 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. *Glob Chang Biol* 17: 592–613.
- NELLEMANN C, THOMSEN MG (2001)** Long-term changes in forest growth: Potential effects of nitrogen deposition and acidification. *Water Air Soil Pollut* 128: 197–205.
- NOVAK K ET AL (2003)** Ozone air pollution and foliar injury development. *Environ Pollut* 125: 41–52.
- PAOLETTI E (2005)** Ozone slows stomatal response to light and leaf wounding in a Mediterranean evergreen broadleaf, *Arbutus unedo*. *Environ Pollut* 134: 439–445.
- PEARSON M, MANSFIELD TA (1993)** Interacting effects of ozone and water stress on the stomatal resistance of beech (*Fagus sylvatica* L.). *New Phytol* 123: 351–358.
- REICH PB (1987)** Quantifying plant response to ozone: a unifying theory. *Tree Physiol* 3: 63–91.
- SAMUELSON L, KELLY JM (1996)** Carbon partitioning and allocation in northern red oak seedlings and mature trees in response to ozone. *Tree Physiol* 16: 853–858.
- SKELLY JM ET AL (1999)** Observation and confirmation of foliar ozone symptoms of native plant species of Switzerland and Southern Spain. *Water Air Soil Pollut* 116: 227–234.
- UDDLING J ET AL (2004)** Biomass reduction of juvenile birch is more strongly related to stomatal uptake of ozone than to indices based on external exposure. *Atmos Environ* 38: 4709–4719.
- UNECE (1993)** Critical levels for ozone. UN-ECE-Workshop, Liebefeld, 1–4 Nov 1993. Bern: Swiss Federal Research Station for Agricultural Chemistry and Environmental Hygiene, Schriftenreihe 328.
- UNECE (1996A)** Manual on methodologies for mapping critical loads/levels and geographical areas where they are exceeded, revised version June 1996. Berlin: Umweltbundesamt. 142 p.
- UNECE (1996B)** Critical loads for ozone in Europe: testing and finalising the concepts. UN-ECE-Workshop, Kuopio, 15–17 Apr 1996. Kuopio: University of Kuopio.
- UNECE (2010)** Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical loads & levels and air pollution effects, risks and trends. Chapter 3: Mapping critical levels for vegetation. <http://icpvegetation.ceh.ac.uk/manuals/documents/Ch%203%20revised%20summer%202010,%20updated%20June%202011.pdf> (14.8.2012)
- VAN DER HEYDEN D ET AL (2001)** Ozone exposure thresholds and foliar injury on forest plants in Switzerland. *Environ Pollut* 111: 321–331.
- WELLBURN FAM, WELLBURN AR (1994)** Atmospheric ozone affects carbohydrate allocation and winter hardiness of *Pinus halepensis* Mill. *J Exp Bot* 45: 607–614.
- WITTIG VE, AINSWORTH EA, NAIDU SL, KARNOSKY DF, LONG SP (2009)** Quantifying the impact of current and future tropospheric ozone on tree biomass, growth, physiology and biochemistry: a quantitative meta-analysis. *Glob Chang Biol* 15: 396–424.

Ozonbelastung von Waldbäumen in der Schweiz und damit verbundene Wachstumseinbussen

Ozon (O₃) ist ein starkes Pflanzengift. Basierend auf Dosis-Wirkungs-Kurven aus Begasungsversuchen hat die UNO-Wirtschaftskommission für Europa (UNECE) zum Schutz der Vegetation Ozongrenzwerte (Critical Levels) festgelegt. Im vorliegenden Artikel wird dem sogenannten AOT40 (accumulated ozone over a threshold of 40 ppb), welcher auf den aufsummierten stündlichen Ozonkonzentrationen basiert, eine flussbasierte Risikoabschätzung für Ozon gegenübergestellt. Letztere berücksichtigt die Ozonaufnahme über die Spaltöffnungen. Beide Ozonquantifizierungen wurden aufgrund von Messwerten ländlicher Ozonstationen für die Schweiz kartiert und mit den entsprechenden Critical Levels verglichen. Die Auswertungen legen nahe, dass die Ozonbelastung hoch genug ist, um deutliche Wachstumseinbussen im Schweizer Wald zu verursachen.

Estimation des concentrations d'ozone des arbres des forêts suisses et des risques induits

L'ozone (O₃) est un puissant phytocide. Sur la base de courbes dose-effet d'essais de gazage, la Commission économique pour l'Europe des Nations Unies (CEE-ONU) a établi des valeurs limites de la concentration d'ozone pour la protection de la végétation. Le présent article compare l'AOT40 (seuil de concentration d'ozone dans l'air ambiant supérieur à 40 ppb) – qui se base sur la somme des concentrations horaires d'ozone – avec une évaluation des risques liés à l'ozone en fonction des flux. Cette dernière prend en compte l'absorption d'ozone par les stomates. Les deux méthodes de quantification de l'ozone ont utilisé les données des stations terrestres de mesure de l'ozone pour la Suisse, qu'elles ont comparées aux valeurs limites. L'interprétation des données montre que la charge d'azote est suffisamment élevée pour causer d'importantes pertes de croissance dans les forêts suisses.