

# Untersuchungen zum Gesundheitszustand von Buchen an sechs Standorten im Bayerischen Wald und Böhmerwald

## Investigations in health conditions of six beech stands in Bavarian and Bohemian Forest

**Manfred Kirchner\*, Stefan Braeutigam, Ernst Feicht & Antonius Kettrup**

*GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Institut für Ökologische Chemie, Ingolstädter  
Landstr. 1, D-85758 Neuherberg, Deutschland*

*\*kirchner@gsf.de*

### **Abstract**

The interdisciplinary project discussed in the paper has been performed in the years 1995–1997. Its goal was to know more about the role of ozone in relation to forest decline phenomena in beech stands in Bavarian and Bohemian Forest along the German, Czech and Austrian border. By combining results from soil and air chemistry, nutrient contents in foliage and plant physiology of adult and young trees lead to a risk evaluation of beech forests in Central Europe. The main result of the investigations performed by scientists from Bavaria, Austria and Czech Republic was that a big variety of factors are responsible for defoliation in beech stands. Episodic ozone events exert an additional stress for beech trees, but effects are restricted to leaves exposed to sunlight and the symptoms may disappear in subsequent years. The project, which has been supported by the Bavarian Ministry for State Development and Environmental Affairs and the European Regional Development Fund, was coordinated by the GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit.

*Key words:* Bohemian Forest, Bavarian Forest, Šumava, forest ecosystem research, beech, forest decline, causes, air pollutants, ozone, physiology, nutrient balance, deposition, climate

### **EINLEITUNG**

Die Waldzustandserhebungen in den 1980er Jahren deuteten erstmals auf eine großflächige Verschlechterung des Kronenzustands von Buchen hin; bereits in den 1970er Jahren hatten Tannen und Fichten die ersten Krankheitssymptome gezeigt. In Mitteleuropa, insbesondere in den Mittelgebirgslagen des Bayerischen Waldes und Böhmerwaldes betrug der Anteil an mittelstark bis stark geschädigten Buchen bis zu 50%. Als Ursache für diese Schädigungen wurde neben dem Einfluss von ungünstigen Klima- und Standortfaktoren auch die Einwirkung anthropogen erhöhter Schadgase wie Ozon diskutiert. Nachdem die Schwefeldioxidimmission durch massive Luftreinhaltemaßnahmen bis Anfang der 90er Jahre stark abgenommen hatte, lag und liegt nach wie vor der sekundär gebildete Luftschadstoff Ozon auf einem Niveau, bei dem potentiell pflanzenschädigende Wirkungen für möglich gehalten werden (LIPPERT & al. 1996, MATYSSEK & al. 1997).

Vor diesem Hintergrund erfolgte im Untersuchungsgebiet Bayerischer Wald–Böhmerwald im Zeitraum 1995 bis 1997 eine detaillierte Zustandscharakterisierung von Altbuchen an sechs Standorten am Dreiländereck Bayern (Forellenbach, Böhmweg)–Österreich (Dürriewie-

se, Buchwaldl)–Tschechien (Libin, Boubin). In den drei Ländern wurde an jeweils zwei Standorten unterschiedlicher Höhenlage (Tieflagen-, Hochlagenflächen) ein Kollektiv von Buchen untersucht. Das vom Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen und dem Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung finanzierte Projekt wurde vom GSF–Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit koordiniert. Die wissenschaftlichen Arbeiten erfolgten durch ein Team aus Bayern, Österreich und der Tschechischen Republik unter maßgeblicher Forschungsarbeit der TU München (früher LMU), Lehrstuhl für Forstbotanik (BAUMGARTEN 1999). Im Folgenden soll aus Sicht der Projektleitung hieraus exemplarisch berichtet werden (KIRCHNER & al. 2000).

## KONZEPTION

Das Projekt verfolgte das Ziel, an je zwei Flächen in Bayern, Oberösterreich und der Tschechischen Republik die Bedeutung der Standortfaktoren unter Berücksichtigung der herrschen-

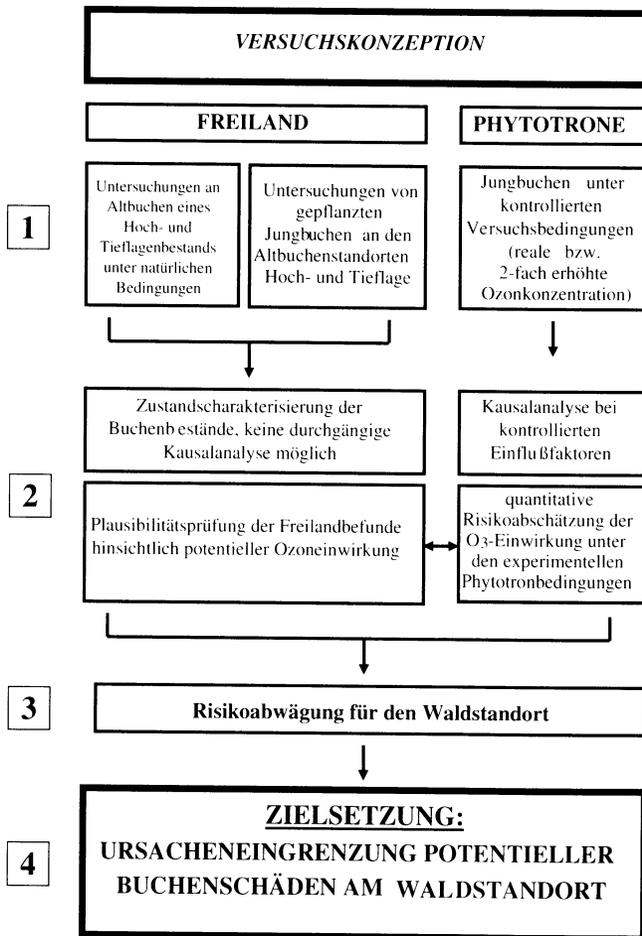


Abb.1. – Untersuchungskonzeption (BAUMGARTEN 1999).

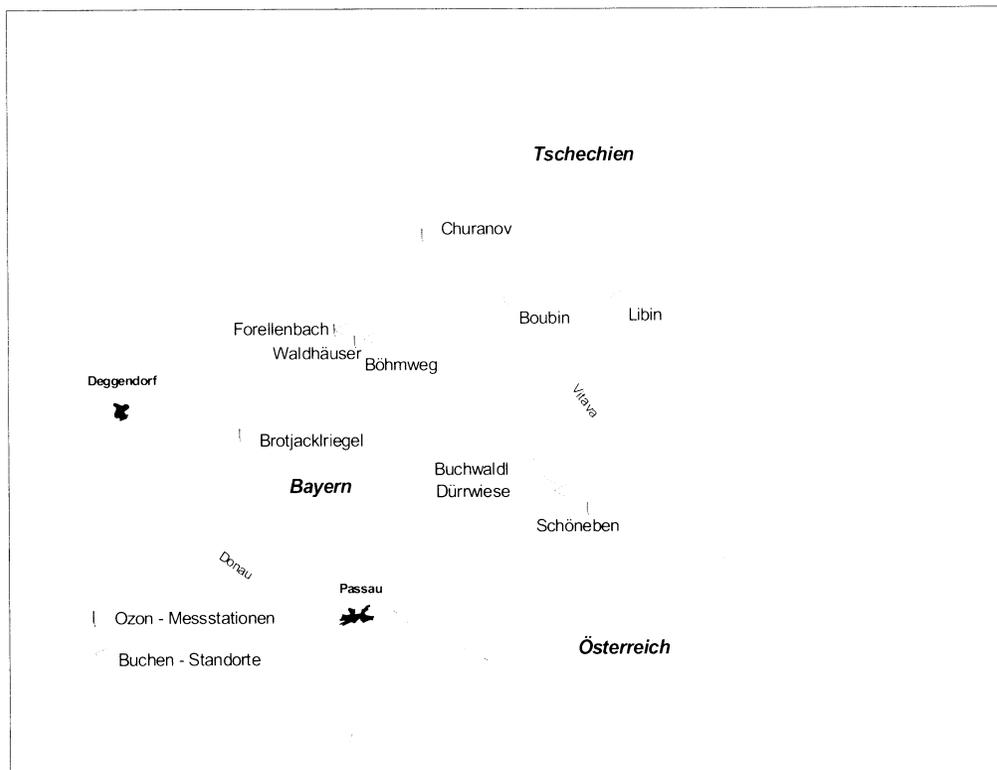
Fig.1. – Concept of investigations (BAUMGARTEN 1999).

den Ozonbedingungen für die Baumentwicklung zu analysieren. Es sollte geprüft werden, ob bzw. welche Indizien für eine Belastung der Baumart Buche vorliegen (BAUMGARTEN 1999). Die Befunde der pflanzenphysiologischen, biochemischen und phänologischen Untersuchungen, insbesondere aus den intensiver erforschten Standorten im Bayerischen Wald, wurden im Kontext standortkundlicher, klimatischer und immissionsbedingter Einflussfaktoren bearbeitet und einer Plausibilitätsprüfung unterzogen. Auf dieser Basis erfolgten eine Ursachenanalyse und -eingrenzung konstatierte Buchenschäden. Die für die beiden Schwerpunktsflächen im Bayerischer Wald aufgestellte Versuchskonzeption ist in Abb. 1 dargestellt.

An den Schwerpunktsflächen in Bayern wurden Altbuchen sowie ausgepflanzte Jungbuchen unter den gegebenen natürlichen Bedingungen vor allem mit dem Ziel untersucht, die Reaktion der Pflanzen bei der Einwirkung von Ozon zu ermitteln. In die Versuchskonzeption wurde ein Experiment mit Jungbuchen unter kontrollierten Bedingungen in Phytotronen des GSF-Forschungszentrums für Umwelt und Gesundheit einbezogen. Die Ergebnisse aus Versuch und Freiland wurden hinsichtlich der Symptome und der physiologischen Effekte an den Buchen verglichen.

## CHARAKTERISIERUNG DER STANDORTE UND BUCHENBESTÄNDE

Zur Beantwortung der in Abb. 1 formulierten Problemstellung wurden Buchen- bzw. Mischbestände mit deutlichem Buchenanteil im Umfeld des Dreiländerecks Bayern, Oberösterreich und Tschechien ausgewählt. Es wurde darauf Wert gelegt, repräsentative wie vergleichbare



**Abb. 2.** – Untersuchungsbestände (Buche) und Ozonmessstationen im Bayerischen Wald und Böhmerwald.  
**Fig. 2.** – Investigation stands (beech) and ozone measuring stations in Bavarian and Bohemian Forest.

**Tabelle 1.** – Charakterisierung der Untersuchungsflächen  
**Table 1.** – Characterization of investigation plots

Fläche	Forellenbach	Böhmweg	Libin	Boubin	Dürrwiese	Buchwaldl
Land	Bayern	Bayern	Tschechien	Tschechien	Oberösterreich	Oberösterreich
Höhe [m]	825	1150	940	1100	860	1100
geogr. Breite	48°57'10"N	48°57'20"N	48°59'10"N	48°59'15"N	48°44'13"N	48°45'18"N
geogr. Länge	13°25'30"O	13°29'15"O	14°01'20"O	13°47'25"O	13°53'11"O	13°51'51"O
Forstamt	Nationalpark- verwaltung	Nationalpark- verwaltung	Prachatice	Zaton	Schlägl	Schlägl
Exposition	SW	WSW	NO	O	O	O
Hangneigung [%]	< 10	< 10	20–25	10–20	15–25	10–20
Klimazone	submontan	montan	montan	montan	montan	montan
Geländeform	Unterhang, Mulde	Oberhang	Mittelhang	Oberhang, Kuppe	Mittelhang	Mittelhang
Geologie (Moldanubi- kum) und Bodentyp	älterer Finsterauer Kristallgranit/ Braunerde, z.T. pseudo-vergleyt	älterer Finsterauer Kristallgranit/ Braunerde, schwach podsoliert, z.T. pseudo-vergleyt	Gneis/ Pseudo-vergleyte Braunerde	Gneis/ Gebirgsbraun- erde	Schiefergneis Eisgarner Granit/ podsolierte Braunerde (periglaziale Fließerden)	Schiefergneis Eisgarner Granit/ podsolierte Braunerde (periglaziale Fließerden)
Baumarten	Bu 85 Fi 15	Bu 90 Fi 10	Bu 95 Fi, Ta 5	Bu 90 Fi 5, Ta 5	Bu 80 Fi 20	Bu 90 Fi, Ta Bah 10
Alter [a]	Bu 80–40 Fi 60–120	Bu 100–130 Fi 90–100	Bu 140	Bu 200–300 Fi 200, Ta 250	Bu 100–120 Fi 120	Bu 120–40
Kronenschluss	dicht	dicht	locker	dicht	dicht	locker
Mischungsform	einzel	einzel	Reinbestand	gruppenweise	einzel	einzel
Verjüngungsart	z.T. Pflanzungen	z.T. Pflanzungen	natürlich	natürlich	natürlich	natürlich
Mittleres Blattverlust- prozent in 1995/1996/1997	28 25 24	31 29 25	32 31 31	40 34 35	43 42 37	35 32 25

Flächen auszuwählen, und zwar in jedem Land je eine Fläche im oberen und unteren bzw. mittleren Hanglagenbereich (Abb. 2). Die für den Regionalvergleich grundlegenden Kenngrößen der einzelnen Flächen sind in Tab. 1 enthalten.

Nach Auswertung von vorliegenden Informationen der jeweiligen Forstverwaltungen konnte auf die frühere forstliche Behandlung der Untersuchungsbestände geschlossen werden (ÚHÚL 1976, PRUSA 1985, ELLING & al. 1987, SCHOLL 1997); dabei weisen die Hochlagen mehr oder weniger naturnahe Verhältnisse auf, wobei Wildverbiss zumindest in der Vergangenheit eine Rolle spielte. Streunutzung, Waldweide und Kahlschlag sind Maßnahmen, die eher auf den unteren Flächen zu finden waren. Neben den natürlichen Bodeneigenschaften und den klimatischen Voraussetzungen sind diese Befunde auch für den aktuellen ökologischen Zustand der Bestände, insbesondere für die Bodenvegetation, verantwortlich. Die Ableitung von Zeigerwerten (ELLENBERG 1996) belegt entsprechende Unterschiede hinsichtlich des Säuremilieus und bei der Stickstoffversorgung (KIRCHNER & al. 2000).

Für eine umfassende Zustandscharakterisierung der Bestände wurden bewährte Methoden der Schadansprache (MÜLLER & STIERLIN, 1990, BAUMGARTEN 1999, LWF 1995, 1996, 1997,

FELLNER & SOUKUP 1998) herangezogen und Nährelementuntersuchungen sowie physiologisch-biochemische Analysen an Blättern durchgeführt. Der Kronenzustand der Altbuchen, der auf den Bestandsflächen Dürrwiese und Boubin am schlechtesten und in Forellenbach am besten eingeschätzt wurde, verbesserte sich gemäß der terrestrischen Waldzustandsinventur an allen Standorten im Laufe der drei Jahre (Tab. 1); im ersten Erhebungsjahr wiesen die Buchen eine starke Fruktifikation auf. Während der Vegetationsperioden 1995 bis 1997 konnte auch an den am stärksten geschädigten Standorten kein vorzeitiger Blattfall festgestellt werden (BAUMGARTEN 1999). An den untersuchten Altbuchen der bayerischen Hochlagenfläche traten Chlorosen und Nekrosen ausschließlich in der obersten Sonnenkrone auf; diese waren im Untersuchungsjahr 1995 im Vergleich mit den Folgejahren besonders stark ausgebildet.

Jungbuchen der Hochlagenlichtung zeigten im Gegensatz zu den beschatteten Jungbuchen unter Schirm deutliche Schäden an strahlungsexponierten Blättern. Bei Jungbuchen des Phytotronexperimentes wurden bei einer Verdoppelung der Ozonkonzentration im Vergleich zu den üblichen Verhältnissen im Freiland starke Blattschädigungen, wie sie auch an Freilandjungbuchen auftreten, festgestellt. Bei der Kontrollbehandlung im Phytotron des GSF-Forschungsinstitut für Umwelt und Gesundheit kam es zeitlich verzögert ebenfalls zu Blattschäden (LANGEBARTELS & al. 1997, BAUMGARTEN 1999).

## SITUATION DER BÖDEN AN DEN STANDORTEN

Zur pedologischen Charakterisierung der sechs Standorte wurden die wichtigsten physikalischen und chemischen Bodenparameter erhoben (BAUMGARTEN 1999, SCHUME & HAGER 1999); die chemische Analyse erfolgte am Institut für Ökologische Chemie der GSF. Es wurden pseudovergleyte und in geringerem Umfang podsolierte Braunerden angetroffen (siehe auch Tab. 1). Hinsichtlich der Bodenart sind über alle Standorte hinweg sandiger Lehm oder Lehm vorherrschend. Die einzelnen Bodenprofile zeigten große Ähnlichkeiten untereinander.

In Tab. 2 sind die prozentualen Anteile der austauschbaren Ionen in verschiedenen Bodenschichten enthalten (SCHUME & HAGER 1999). Man erkennt, dass vor allem Forellenbach, Boubin, Dürrwiese und Böhmweg Böden mit geringen Kationenaustauschkapazitäten aufweisen. Trotz höherer Werte sind Libin und Buchwaldl auch nur in die Kategorie geringer Pufferungseigenschaften einzuordnen. Alle Flächen zeichnen sich insgesamt somit durch eine geringe Verfügbarkeit von Magnesium, Kalium, Eisen und Mangan aus. Auch in den tieferen Bodenhorizonten ist wenig dieser Elemente enthalten; eine Entbasung ist auch hier in unterschiedlichem Ausmaße anzutreffen.

Auf allen Flächen wird demnach der Nährelementbedarf überwiegend aus den Vorräten im Humus gedeckt. Die Verarmung an Nährelementen erscheint besonders drastisch an den Standorten Dürrwiese, Forellenbach und Böhmweg. Es kann festgestellt werden, dass auf allen Standorten – geologisch bedingt – eine chronische Nährstoffknappheit in den Böden vorhanden ist, und somit die Versorgung der Pflanzen insbesondere aus der Auflage erfolgt (KATZENSTEINER 1992, HOFMANN-SCHIELLE 1998). Verschärfend kommt hinzu, dass in der Vergangenheit ein Großteil der Bestände mehr oder minder intensiver Streunutzung ausgesetzt war. Desgleichen kann sich die zum Teil festgestellte verringerte Mykorrhizierung auf die Nährstoffaufnahme negativ auswirken (FELLNER & SOUKUP 1991, 1998). Akute Engpässe sind dann zu erwarten, wenn in Folge kühlerer Witterung die Mineralisierung gering ist. Ebenfalls können Probleme auftreten, wenn in Buchen-Mastjahren der Bedarf an Nährstoffen erhöht ist (KIRCHNER & al. 2000).

**Tabelle 2.** – Prozentuale Anteile der austauschbaren Ionen in den Bodenschichten und Kationenaustauschkapazität (Tiefe: 0–40 cm) (SCHUME & al. 1999).

**Table 2.** – Portion of exchangeable ions in different soil layers and cation exchange capacity (depth: 0–40 cm) (SCHUME & al. 1999).

Standort	[cm]	[cm]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[mmol kg <sup>-1</sup> ]
	von	bis	K_a	Ca_a	Mg_a	Na_a	Al_a	Mn_a	Fe_a	H_a	Ca+Mg_a	KAK
Dürrwiese	0	5	3,3	2,0	2,0	2,4	79,2	0,2	5,9	5,0	4,0	
	5	10	2,9	2,3	1,8	2,9	83,2	0,2	3,7	3,1	4,0	
	10	20	2,4	2,9	1,6	4,4	84,7	0,5	1,6	2,0	4,4	
	20	40	2,6	5,4	2,0	9,4	77,8	0,2	0,4	2,3	7,3	56,0
Buchwaldl	0	5	3,8	3,7	3,5	1,7	80,2	0,6	3,5	3,0	7,2	
	5	10	3,8	3,6	2,6	2,2	83,3	1,1	1,0	2,4	6,2	
	10	20	2,9	4,1	2,1	3,3	84,5	0,6	0,5	2,1	6,2	
	20	40	1,9	4,0	1,5	3,5	86,4	0,3	0,3	2,1	5,5	65,2
Libin	0	5	6,8	6,9	2,5	1,6	73,1	0,4	4,3	4,4	9,5	
	5	10	3,0	4,2	1,8	1,5	83,3	0,5	2,2	3,5	6,0	
	10	20	2,9	4,2	1,4	2,1	85,4	0,7	0,8	2,5	5,6	
	20	40	2,6	3,9	1,1	2,7	86,7	0,3	0,6	2,0	5,0	79,9
Boubin	0	5	4,6	5,1	2,0	1,6	75,0	0,2	6,1	5,4	7,0	
	5	10	3,4	3,1	1,3	1,3	83,3	0,4	3,2	3,9	4,4	
	10	20	3,3	4,0	1,3	2,7	85,1	0,7	0,6	2,4	5,3	
	20	40	3,2	6,0	1,4	5,0	81,4	0,3	0,4	2,3	7,4	55,4
Böhmweg	0	5	4,2	2,0	2,1	1,8	80,6	0,5	5,3	3,5	4,1	
	5	10	3,6	2,5	1,9	2,3	85,0	0,4	2,2	2,1	4,3	
	10	20	2,6	3,1	1,5	2,9	86,6	0,3	0,7	2,2	4,6	
	20	40	1,9	4,7	1,6	5,0	84,1	0,3	0,3	2,0	6,3	58,4
Forellenbach	0	5	3,5	2,0	1,9	2,2	81,4	0,9	4,4	3,7	3,9	
	5	10	3,5	2,3	1,5	2,7	85,5	0,4	1,8	2,2	3,8	
	10	20	2,9	3,4	1,3	4,4	85,4	0,2	0,5	1,9	4,7	
	20	40	2,4	5,0	1,3	7,4	81,2	0,1	0,3	2,3	6,3	41,1

## BESCHREIBUNG DER IMMISSIONSVERHÄLTNISSE

Eine Beurteilung der Immissionsverhältnisse für den Untersuchungsraum basierte einerseits auf einer Auswertung aktueller Daten von nahe liegenden Messstationen in Bayern, Österreich und der Tschechischen Republik und andererseits auf eigens durchgeführten Messungen in den sechs Beständen. Hinsichtlich der Immission von Luftschadstoffen stand Ozon im Vordergrund, da die Konzentrationen von Schwefeldioxid im Untersuchungsgebiet im Vergleich zu den vorangegangenen Jahrzehnten einen starken Rückgang zu verzeichnen hatten (RITTER & al. 2001).

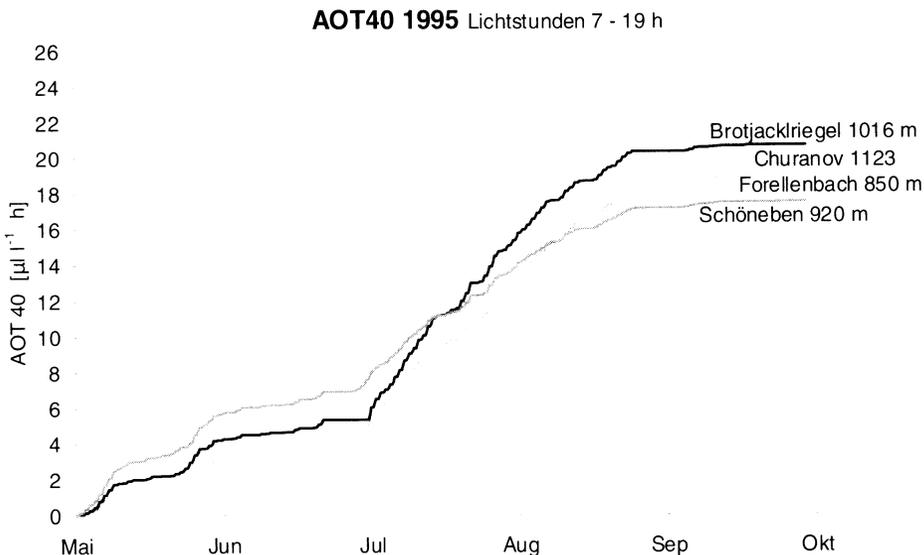
Vergleicht man die Tagesmittel und -maxima der Ozonimmission an den Messstationen Forellenbach (850 m NN), Schöneben (920 m NN), Waldhäuser (945 m NN), Brotjacklriegel (1016 m NN) und Churanov (1123 m NN), so ergibt sich ein ausgeprägter positiver Höhengradient, wie er auch aus anderen Gebieten dokumentiert ist (KIRCHNER & al. 1994, WERNER & al. 2000). Da allerdings weder aus den Konzentrationsverläufen noch aus Monats- und Jah-

resmittelwerten eine Bewertung der möglichen Dauerbelastung von Pflanzen durch Ozon abzuleiten ist, wurde eine dosisbezogene Bewertungsgröße, der AOT40-Wert, herangezogen (SKÄRBY & al. 1998).

Unter Normalbedingungen (20 °C; 1013 hPa) ergibt sich für eine Ozonkonzentration von:  
 $0,1 \text{ ppm} \cong 100 \text{ ppb} \cong 100 \text{ nl.l}^{-1} \cong 214 \text{ } \mu\text{g.m}^{-3}$   
 $[1 \text{ ppb} = 2,14 \text{ } \mu\text{g.m}^{-3} \text{ bei } 20^\circ\text{C}]$ .

Der AOT40 [accumulated exposure of ozone over a threshold of 40 ppb (nl.l<sup>-1</sup>)] beinhaltet die kumulative Ozondosis über einem Schwellenwert der oben genannten 40 nl.l<sup>-1</sup> innerhalb eines gegebenen Zeitraums (Vegetationsperiode) und während der Tages- bzw. Lichtstunden (hier: 7–19 Uhr). Er errechnet sich aus Summe der Differenzen von mittlerer stündlicher Ozonkonzentration und der Schwellenkonzentration (FUHRER & ACHERMANN 1994, FUHRER & al. 1997). Die Heranziehung der AOT40-Werte unterstellt, dass unterhalb einer Konzentration von 40 nl.l<sup>-1</sup> keine Belastung der Pflanze gegeben ist. Nach LEGGE & al. (1996) führen erst Ozonkonzentrationen über 40 nl.l<sup>-1</sup> zur Wachstumsreduktion und einer Verminderung der Biomasseproduktion. Aus Untersuchungen zur Biomasseproduktion ergaben sich Wachstumseinbußen von ca. 10% für die Buche bei einem AOT40 von 10  $\mu\text{l.l}^{-1}$  über eine Vegetationsperiode von sechs Monaten (FUHRER & al. 1997, SKÄRBY & al. 1998). Die stationsbezogenen Darstellungen (Abb. 3,4,5) des AOT40 sind mit der Einschränkung, dass einige Datenlücken (z.B. Mai 1995 und 1997 in Schöneben) auftraten, vergleichbar. Sieht man von der Unterschätzung der Werte für Schöneben ab, so zeigt sich in 1996 (Abb. 4) und 1997 (Abb. 5) wiederum ein deutlicher Höheneffekt (KIRCHNER & al. 2000). Das definierte „critical level for ozone“ für Waldbäume bei einem AOT40 von 10  $\mu\text{l.l}^{-1}$  wurde an den einzelnen Messstationen zu unterschiedlichen Zeitpunkten erreicht.

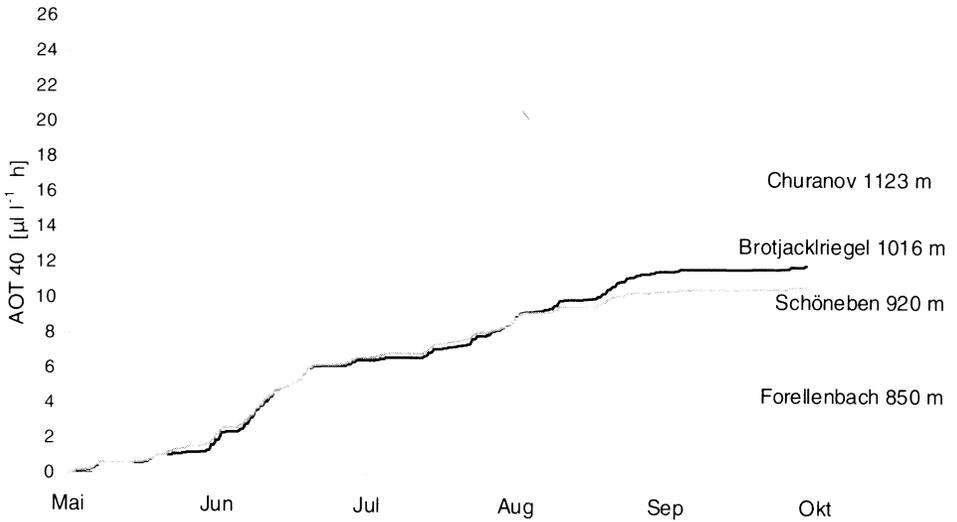
In 1995 trat eine solche Überschreitung an allen Stationen noch im Monat Juli auf (Abb. 3).



**Abb. 3.** – Summenwerte der Exposition gegenüber Ozon über einer Schwelle von 40 nl.l<sup>-1</sup> (ppb) im Bayerischen Wald–Böhmerwald in 1995 (kritische Schwelle für Waldbäume: 10  $\mu\text{l.l}^{-1}$ ).

**Fig. 3.** – Accumulated exposure of ozone over a threshold of 40 nl.l<sup>-1</sup> (ppb) in Bavarian and Bohemian Forest in 1995 (critical level for trees: 10  $\mu\text{l.l}^{-1}$ ).

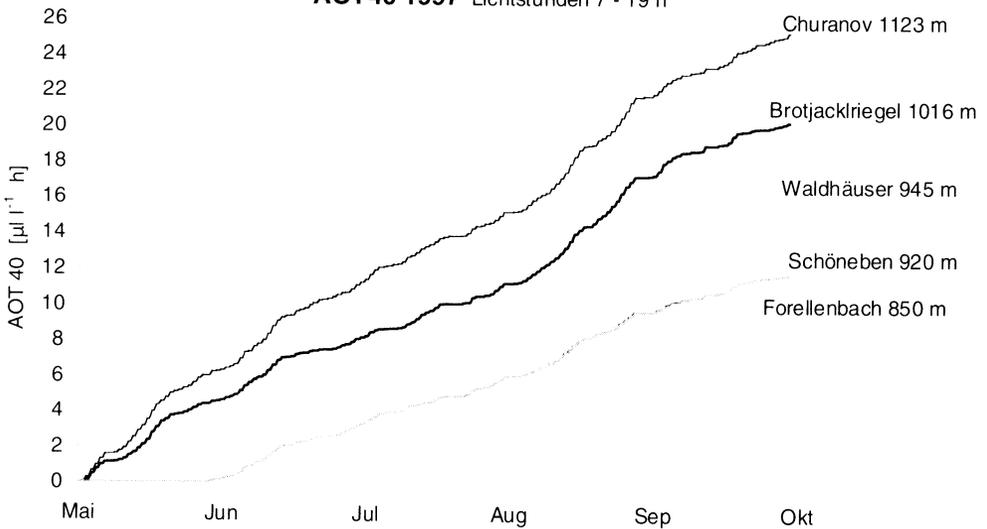
### AOT40 1996 Lichtstunden 7 - 19 h



**Abb. 4.** – Summenwerte der Exposition gegenüber Ozon über einer Schwelle von 40  $\text{nl.l}^{-1}$  (ppb) im Bayerischen Wald–Böhmerwald in 1996 (kritische Schwelle für Waldbäume: 10  $\mu\text{l.l}^{-1}$ ).

**Fig. 4.** – Accumulated exposure of ozone over a threshold of 40  $\text{nl.l}^{-1}$  (ppb) in Bavarian and Bohemian Forest in 1996 (critical level for trees: 10  $\mu\text{l.l}^{-1}$ ).

### AOT40 1997 Lichtstunden 7 - 19 h



**Abb. 5.** – Summenwerte der Exposition gegenüber Ozon über einer Schwelle von 40  $\text{nl.l}^{-1}$  (ppb) im Bayerischen Wald–Böhmerwald in 1997 (kritische Schwelle für Waldbäume: 10  $\mu\text{l.l}^{-1}$ ).

**Fig. 5.** – Accumulated exposure of ozone over a threshold of 40  $\text{nl.l}^{-1}$  (ppb) in Bavarian and Bohemian Forest in 1997 (critical level for trees: 10  $\mu\text{l.l}^{-1}$ ).

Auf der Buchenfläche Forellenbach wurden in diesem Zeitraum nach BAUMGARTEN (1999) die ersten Blattschäden beobachtet. Die kumulative AOT40-Gesamtdosis lag Ende September bei den betrachteten vier kontinuierlichen Messstationen im Bereich zwischen 18 und 21  $\mu\text{l}\cdot\text{l}^{-1}$  je nach Höhenlage. Im Jahre 1996 war die Belastung deutlich geringer, sie erreichte je nach Station nur etwa 20 bis 90% des Wertes in 1995. Der AOT40-Wert von 10  $\mu\text{l}\cdot\text{l}^{-1}$  dürfte in 1996 nur in Lagen oberhalb 900 bis 1000 m NN, wie z.B. an der Station Churanov, erreicht worden sein. In 1997 ergaben sich bei wieder ansteigendem Ozonlevel ebenfalls große Unterschiede zwischen höher und tiefer gelegenen Stationen; während in Forellenbach und Schöneben nur rd. 60 bis 80% des Wertes von 1995 erreicht wurden, lag die errechnete Ozonbelastung oberhalb von ca. 1000 m Seehöhe z.T. höher als in 1995. Dabei erfolgte im Gegensatz zu 1995, wo im Juli bereits eine ozonreiche Witterung herrschte, der steile Anstieg der AOT40-Kurven in der zweiten Augushälfte. An der oberen Verbreitungsgrenze der Buche im Bayerischen Wald/Böhmerwald wurden somit Werte bis zu 25  $\mu\text{l}\cdot\text{l}^{-1}$  erreicht.

Zur groben Charakterisierung der Verhältnisse in den Beständen wurden auch Passivsammler mit 14-tägiger Expositionszeit in mehreren Höhen im Bestandesraum eingesetzt (WERNER & al. 1999, KIRCHNER 1997); trotz großer Probleme bei der Positionierung der Sammler konnte nachgewiesen werden, dass innerhalb der Sonnenkronen die Ozonkonzentrationen nur wenig höhere Werte als in den Schattenkronen und am Bestandesboden annehmen (KIRCHNER & al. 2000).

## UNTERSUCHUNGEN ZUR NÄHRELEMENTSITUATION UND PHYSIOLOGIE DER BUCHEN

An den Buchen der sechs Bestände wurden z.T. mehrmals im Untersuchungszeitraum mit Hilfe von Baumsteigern Blattprobennahmen durchgeführt (BAUMGARTEN 1999); die Bestimmung der Elementkonzentrationen in den Blättern erfolgte dabei im Institut für Ökologische Chemie (Zentrale Analytik) des GSF-Forschungszentrums für Umwelt und Gesundheit (SCHRAMMEL 1988, STEFFEN & SCHRAMMEL 1988).

In Tab. 3 werden die wichtigsten Ergebnisse der Blattanalysen hinsichtlich der Hauptelemente dargestellt und mit Referenzwerten verglichen. Die Sonnenblätter der untersuchten Buchen waren im Vergleich zu den Schwellenwerten für eine ausreichende Versorgung („Referenzwerten“) von BERGMANN (1993) und LYR & al. (1992) mit Stickstoff auf fünf der sechs Flächen ausreichend (2,1–2,4%) versorgt, die Buchen in Forellenbach zeigten einen geringen N-Mangel (1,9–2,0%) an. Deutlich unter dem Bereich ausreichender Versorgung lagen die Mg-Konzentrationen für die Sonnenblätter von Buche auf allen Flächen, wobei die Situation sich am gravierendsten in Forellenbach, Dürrwiese, Böhmweg und Boubin (0,7–0,9  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) darstellte. Die Nährelementkonzentrationen in Schattenblättern waren gegenüber den Sonnenblättern meist erhöht, insgesamt zeigte sich jedoch ein ähnliches Bild für die Nährelementausstattung wie für Sonnenblätter. Hinsichtlich der K-Ausstattung waren die Buchen auf den bayerischen Flächen und in Dürrwiese am schlechtesten versorgt (3,5–5,9  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ). In den Schattenblättern war die Situation zwar deutlich besser, jedoch lag in allen Flächen eine Unterversorgung vor.

Hinsichtlich Mangan waren die Konzentrationen in den Sonnenblättern in Dürrwiese und Böhmweg im Vergleich zur Referenz gering. Im Falle von Bor ist die Versorgung lediglich auf der bayerischen Hochlagenfläche als knapp zu bezeichnen. Beim Phosphor zeigten sich für die Sonnenblätter geringe Konzentrationen in Forellenbach, Dürrwiese und Boubin (1,1–1,3  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), während die übrigen Bestände eine ausreichende P-Versorgung (1,3–1,5  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) aufwiesen. Die Eisengehalte lagen in den Sonnenblättern generell und meist auch in den Schattenblättern der sechs Bestände unter der von LYR & al. (1992) angegebenen Schwelle für ausreichende Versorgung (105  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).

**Tabelle 3.** – Nährelemente von Sonnen- und Schattenblättern der Buchen (n=3,4,5) mit Referenzwerten aus der Literatur (BERGMANN 1993, LYR & al. 1992) [in Anlehnung an BAUMGARTEN (1999)].

**Table 3.** – Nutrient content of sun and shadow orientated beech leaves (n=3,4,5) with reference values from literature (BERGMANN 1993, LYR & al. 1992) [referring to BAUMGARTEN (1999)].

Fläche	Exposition	Jahr	N [%]	P [g.kg <sup>-1</sup> ]	S [g.kg <sup>-1</sup> ]	K [g.kg <sup>-1</sup> ]	Ca [g.kg <sup>-1</sup> ]	Mg [g.kg <sup>-1</sup> ]	Mn [g.kg <sup>-1</sup> ]	B [mg.kg <sup>-1</sup> ]	Fe [g.kg <sup>-1</sup> ]	C [%]
Böhmweg	Sonnenblätter	1995	2,1	1,4	1,6	4,1	3,6	0,9	0,5	14,5	71,7	46
		1996	2,3	1,3	1,4	4,3	2,9	0,9	0,3	17,4	52,2	50
		1997	2,3	1,5	1,4	3,5	2,6	0,9	0,3	15,2	59,6	52
	Schattenblätter	1995	2,2	1,6	1,7	8,2	4,3	1,2	0,7	18,8	108	44,8
		1996	2,6	1,7	1,6	6,7	4,0	1,4	0,4	17,7	63,4	49,2
		1997	2,7	1,9	1,6	5,7	3,7	1,2	0,4	15,6	80,0	50,7
Forellnbach	Sonnenblätter	1995	1,9	1,2	1,4	5,4	3,6	0,8	–	21,6	57,9	49,7
		1996	1,9	1,1	1,2	4,9	2,9	0,7	0,8	17,6	51,4	49,6
		1997	2,0	1,1	1,2	3,9	3,4	0,8	1,0	20,7	53,5	51,6
	Sonnenblätter	1995	2,1	1,5	1,6	6,1	3,6	1,2	1,1	28,7	72,3	78,6
		1996	2,2	1,4	1,4	7,2	3,7	1,1	1,0	20,2	59,2	48,2
		1997	2,2	1,4	1,3	5,1	3,6	1,0	0,9	21,2	67,5	49,9
Dürrwiese	Sonnenblätter	1996	2,4	1,2	1,6	5,9	2,4	0,8	0,4	17,3	78,3	48,7
	Sonnenblätter	1996	2,4	1,2	1,6	5,7	2,2	0,8	0,4	12,9	93,7	48,6
Buchwaldl	Sonnenblätter	1996	2,3	1,5	1,6	5,8	5,6	1,4	1,0	21,2	72,3	48,1
	Sonnenblätter	1996	2,5	1,5	1,6	6,3	5,0	1,3	0,9	23,3	71,1	48,7
Libin	Sonnenblätter	1996	2,5	1,4	1,8	6,4	7,0	1,1	0,9	31,7	66,5	47,3
	Sonnenblätter	1996	2,6	1,4	1,8	7,5	7,5	1,2	1,0	33,8	78,9	47,2
Boubin	Sonnenblätter	1996	2,4	1,3	1,6	7,7	5,5	0,9	1,3	20,3	66,6	48,5
	Sonnenblätter	1996	2,3	1,3	1,6	8,3	5,5	0,8	1,3	20,4	74,0	48,0
aus BERGMANN (1993)	–	–	1,9–2,5	1,5–3,0	–	10–15	3,0–15	1,5–3,0	0,5–1,0	15–40	–	–
aus LYR & al. (1993)	–	–	–	1,5	–	7,4	5,5	1,3	0,24	36	105	–

Im Sommer 1995 wurden auf den beiden bayerischen Flächen Sonnenblätter mit unterschiedlich starker Schädigung näher untersucht (BAUMGARTEN 1999). Nach Schätzung der prozentualen Anteile chlorotisierter oder nekrotisierter Blattflächen wurden die Blätter getrennt nach Schädigungsklassen ebenfalls auf ihre Nährelementkonzentrationen hin analysiert. Die einzelnen Probestämme zeigten sowohl zu den drei Beprobungsterminen während der Vegetationszeit eines Jahres, als auch innerhalb der drei Untersuchungsjahre keine deutlichen Unterschiede der Elementkonzentration in den Blättern.

Eingehende biochemische und physiologische Untersuchungen wurden an Blattproben sowohl der Alt- und Jungbuchen der beiden bayerischen Flächen als auch an Jungbuchen aus dem Phytotronexperiment durchgeführt (BAUMGARTEN 1999). Die Ergebnisse können hier nur summarisch beschrieben werden.

Als erstes wurden die Konzentrationen an Chlorophyll *a*, *b* und Gesamtcarotinoiden in Anlehnung an die Methoden nach ZIEGLER & EGGLE (1965) und LICHTENTHALER & al. (1983) bestimmt. Schattenblätter wiesen hierbei während des Untersuchungszeitraumes an Hoch- und Tieflagenbuchen fast durchwegs höhere Konzentrationen auf als Sonnenblätter. Deutliche Unterschiede zwischen Hoch- und Tieflagenbäumen wurden nur vereinzelt festgestellt. Das verstärkte Auftreten von Schadsymptomen an Blättern der Sonnenkrone im Untersuchungs-jahr 1995 an Tieflagenbuchen kam durch verringerte Chlorophyll *a*- und *b*-Konzentrationen sowie besonders durch niedrige Gesamtcarotinoidkonzentrationen in den Sonnenblättern im Vergleich zu den Hochlagenbuchen und zum Untersuchungsjahr 1996 zum Ausdruck (BAUMGARTEN 1999).

Als weitere Parameter wurden Glucose, Fructose, Saccharose und Inositol (BÜCKER & GÜDERIAN 1994) in Blättern als Maß u.a. für die Photosyntheseleistung bestimmt. Die Identifizierung und Quantifizierung der Zucker führte zu relativ uneinheitlichen Ergebnissen. So waren die Saccharose-Konzentrationen in Sonnen- und Schattenblättern von Hochlagenbuchen im Jahre 1995 bei fast allen Messterminen gegenüber den Blättern der Tieflagenbuchen erhöht. Zum Ende der Vegetationszeit fand allerdings eine starke Abnahme der Saccharose-Konzentrationen bei Blättern von Hochlagenbuchen statt. 1996 waren dagegen die Saccharose-Werte in Sonnen- und Schattenblättern von Hochlagenbuchen nur teilweise höher als bei den Tieflagenbuchen. Zwischen Hoch- und Tieflagenbuchen konnten bei den Glucose- und Fructose-Konzentrationen keine einheitlichen Trends festgestellt werden. 1995 betrug die Inositolgehalte bei Sonnenblättern zwischen 4 und 8 mg.g<sup>-1</sup> TG, bei Schattenblättern 8 bis 13 mg.g<sup>-1</sup> TG; im Jahre 1996 lagen die entsprechenden Werte höher.

Im Phytotronexperiment des GSF-Forschungszentrums für Umwelt und Gesundheit konnten z.T. signifikante Veränderungen festgestellt werden. Bei der doppelten Ozonbeaufschlagung waren die Saccharose-Konzentrationen deutlich erhöht. Die Konzentrationen an Glucose und Fructose in den Blättern waren bei beiden Behandlungen niedriger als bei den Freilandpflanzen, lagen teilweise unter der Nachweisgrenze für die HPLC-Detektion, wiesen allerdings keine behandlungsspezifischen Unterschiede auf. Die Konzentrationen von Inositol in den Blättern betrug Mitte Juni noch ca. 5–6 mg.g<sup>-1</sup> TG, wobei Blätter im Fall der Verdoppelung der Ozonimmission signifikant höhere Gehalte hatten als bei der Kontrollbehandlung. Im August nahmen die Inositolkonzentrationen bei beiden Behandlungen stark ab.

Die Ligningehalte der Blätter (BRUCE & WEST 1989) waren in den Zeiten stärkerer Blattschädigungen, insbesondere in Sonnenblättern auf der tiefer gelegenen Fläche im Untersuchungsjahr 1995, erhöht. Für Schattenblätter ergaben sich keine einheitlichen Unterschiede zwischen Hochlagen- und Tieflagenbuchen.

Zusätzlich wurden Chlorophyll-Fluoreszenzmessungen nach SCHREIBER (1986) durchgeführt (BAUMGARTEN 1999). Das Ziel lag darin, die effektive Quantenausbeute der Photosynthese, das sog. Fv/Fm-Verhältnis, zu bestimmen (BOLHAR-NORDENKAMP & ÖQUIST 1993). Die Ergebnisse für die Alt- und Jungbuchen der Tieflagenfläche (Forellenbach) deuteten auf keinerlei Hemmung hin. Lediglich auf der Hochlagenlichtung nahm das Fv/Fm-Verhältnis bei den Jungbuchen ab. Bei den Behandlungen in den Phytotronen wurde ebenfalls eine deutliche Störung nachgewiesen. Eine Abnahme des Fv/Fm-Verhältnisses bedeutet, dass die eingestrahelte Lichtenergie nicht in üblicher Effizienz genutzt werden kann (BAUMGARTEN 1999).

## BEWERTUNG DER ERGEBNISSE HINSICHTLICH MÖGLICHER OZONWIRKUNGEN

Bei der Vielzahl der einwirkenden Standortparameter und der Heterogenität jedes Bestandes und gerade vor dem Hintergrund der Tatsache, dass nur je zwei Flächen in Bayern, Österreich und Tschechien untersucht werden konnten, verwundert es nicht, dass auf Basis der sechs

Standorte keine klaren, statistisch ableitbaren Abhängigkeiten zwischen Belaubungszustand und einzelnen Parametern gefunden werden konnten.

So konnte ein eindeutiger Bezug zu den Blattspiegelwerten bzw. zur Nährstoffsituation in den Böden nicht ermittelt werden. Ungeachtet dieser Ergebnisse bleibt allerdings der Eindruck, dass die geologische Ausgangssituation und die frühere Waldbehandlung das heutige Erscheinungsbild der sechs Bestände entscheidend geprägt haben.

Während des dreijährigen Untersuchungszeitraums traten im Gegensatz zu den 1970er Jahren, wo im gesamten Untersuchungsgebiet nach einem Temperatursturz Baumschäden beobachtet worden waren (MAYER 1987), auf keiner Fläche Witterungsextreme auf. Somit dürfte der Faktor „Witterung“ bei der unterschiedlichen Ausprägung der Blattschäden an den sechs Standorten, die in der Regel ohnehin mit Niederschlag gut versorgt sind, von eher untergeordneter Bedeutung sein. Eine deutliche Schwächung bereits labiler Bestände scheint allerdings mit einiger Wahrscheinlichkeit durch hohe Schwefeldioxidimmissionen bzw. Sulfatdepositionsraten in den 1970er und 1980er Jahren aufgetreten zu sein; dies ist aus den ebenfalls durchgeführten waldwachstumskundlichen Untersuchungen zu vermuten.

Die Mitwirkung von Ozon an der Ausbildung von Blattschäden sowie an physiologischen und biochemischen Veränderungen in den Blättern ist ausgehend von den Ergebnissen der Fallstudie an den bayerischen Flächen in Kombination mit den Versuchen an Jungbuchen für Jahre mit hoher Ozonbelastung (z.B. 1995) als wahrscheinlich anzusehen (MATYSSEK & INNES 1998). Die detaillierten Untersuchungen in Forellenbach und Böhmweg deuten an, dass die beobachteten Schäden auf eine kombinierte Wirkung von hoher Ozonbelastung und hoher Einstrahlung zurückzuführen sind.

Allerdings ist die flächenbezogene Ausprägung der Schäden, die sozusagen nur in drei Momentaufnahmen (1995, 1996 und 1997) visuell geschätzt wurden, nicht mit der höhenabhängigen Ozonimmission korreliert (KIRCHNER & al. 1994). Immerhin traten in 1996 und 1997 gegenüber dem ersten Untersuchungsjahr auf allen Flächen leichte Erholungstendenzen auf, die auch in der geringeren und im jeweiligen Jahr später stattfindenden Überschreitung der Schwellenwerte für Ozon ihre Entsprechung fanden. Allerdings können Definition und Grenzwertfestlegung des AOT40 nur als ein erster vorläufiger Ansatz gewertet werden (GRÜNHAGE & JÄGER 1994, BAUMGARTEN 1999). Dass höhenabhängige Anpassungsphänomene bei der Buche gegenüber dem Ozon vorliegen könnten, kann aus der vorliegenden Studie nicht gefolgert werden; andere Untersuchungen deuten aber darauf hin (MAURER & MATYSSEK 1997).

Aus den vorliegenden Untersuchungen erscheint es zweifelhaft, ob eine generelle Übertragbarkeit der Ergebnisse der Kammerversuche auf das Freiland in allen Punkten gegeben ist. Deutliche Unterschiede in der Reaktion von Jungpflanzen im Kammerexperiment und im Freiland auf vergleichbare Ozonkonzentrationen nähren diese Zweifel. Dagegen könnte das Versuchsdesign (Abb. 1) im Phytotronexperiment bei allen Einschränkungen eher ein Modell für die Verhältnisse in der frei exponierten Sonnenkrone von Altbäumen sein; die physiologischen Befunde zeigten hier einheitliche Reaktionsmuster.

So wurden Blattschäden primär auf der Oberseite der Kronen beobachtet. Da die oberste Kronenperipherie der Buchen im Vergleich zur Schattenkrone nur einen kleinen Anteil der gesamten Blattfläche einnimmt, kann davon ausgegangen werden, dass Blattschäden in der obersten Sonnenkrone, wie sie an den Standorten beobachtet wurden, allerdings nur eine geringe Beeinträchtigung der Primärproduktion nach sich ziehen.

Die Tatsache, dass das Dickenwachstum der Buchen nach wie vor eindeutig positiv mit warmen, strahlungsreichen Witterungsabschnitten korreliert ist, liefert vordergründig auch keine Hinweise, dass gravierende Ozoneinwirkungen, die eher an solche Witterungsbedingungen gekoppelt sein sollten, in der Vergangenheit massiv auftraten.

Auf der Basis des dreijährigen Untersuchungszeitraums kann aus heutiger Sicht somit auch

für die nahe Zukunft nicht von einer akuten Gefährdung der Buchenbestände im Untersuchungsgebiet Bayerischer Wald–Böhmerwald ausgegangen werden. Voraussetzung hierfür wäre, dass sich zukünftig keine massiven Klimaänderungen einstellen und die Ozonimmis-sion nicht noch weiter deutlich ansteigt. Da die Emission der Stickstoffoxide und Kohlenwas-serstoffe, der Vorläufersubstanzen für Ozon, eher leicht abnimmt (RITTER & al. 2001), er-scheint dies wenig wahrscheinlich. Aus den Ergebnissen dieser Studie kann allerdings eine potentielle chronische Wirkung von Ozon nicht vollkommen ausgeschlossen werden.

Vor dem Hintergrund der Stickstoffeinträge durch Nitrat und Ammonium, die mittelfristig dagegen kaum entscheidend abnehmen dürften (KIRCHNER & al. 1999), und der von Natur aus bestehenden und z.T. durch frühere Waldnutzung verstärkten Nährstoffimbalancen kann in Zukunft jedoch ein episodisches Auftreten zusätzlicher biotischer oder abiotischer Stressfak-toren, insbesondere bei anhaltend chronisch erhöhten Ozonkonzentrationen, die Schadensan-fälligkeit der Buchen sowie das Schadensausmaß vergrößern. Mit hoher Wahrscheinlichkeit beruhen die im Bayerischen Wald–Böhmerwald seit den 1980er Jahren wahrgenommenen Schäden an Buchen nicht auf einem Schadfaktor, sondern dürften auf ein komplexes Wir-kungsgefüge verschiedener anthropogener und natürlicher Faktoren zurückzuführen sein.

## LITERATUR

- BAUMGARTEN M., 1999: Charakterisierung des physiologischen Zustands von Altbuchen in zwei Höhenlagen des Ba-yerischen Waldes unter Berücksichtigung der Standortfaktoren und der Ozonbelastung. *Dissertation an der For-stwissenschaftlichen Fakultät der LMU München. Hieronymus München. XVI, 235 pp.*
- BERGMANN W., 1993: Ernährungsstörungen bei Kulturpflanzen: Entstehung, visuelle und analytische Diagnose. *Gus-tav Fischer Verlag, Jena, Stuttgart, 3., erw. Aufl., 835 pp.*
- BOLHAR-NÖRDENKAMP H.R. & ÖQUIST G., 1993: Chlorophyll fluorescence as a tool in photosynthesis research. *In: Photosynthesis and Production in a Changing Environment: a field laboratory manual, HALL D.O., SCURLOCK J.M.O., BOLHAR-NÖRDENKAMP H.R., LEGOOD R.C. & LONG S.P. (eds.), Chapman & Hall, London, pp.193–206.*
- BRUCE R.J. & WEST C.A., 1989: Elicitation of lignin biosynthesis and isoperoxidase activity by pectic fragments in suspension cultures of castor bean. *Plant Physiology 91: 889–897.*
- BÜCKER J. & GUDERIAN R., 1994: Accumulation of myoinositol in as a possible indicator of membrane disintegration due to air pollution. *Journal of Plant Physiology 144: 121–123.*
- ELLENBERG H., 1996: Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. *Ulmer Verlag, Stuttgart, 5., stark veränd. und verb. Aufl., 109 pp.*
- ELLING W., BAUER E., KLEMM G. & KOCH H., 1987: Klima und Böden – Waldstandorte. Nationalpark Bayerischer Wald. *Schriftenreihe des Bayer. Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Heft 1, 255 pp.*
- FELLNER R. & SOUKUP F., 1991: Mycological monitoring in the airpolluted regions of the Czech Republic. *Commun. Inst. Forest. Cechoslovaca 17: 125–137.*
- FELLNER R. & SOUKUP F., 1998: Results of mycological and forestry research from 1995–1997. *Ms., Internal Commu-nication to the Institute of Ecological Chemistry, GSF-Neuherberg, Forestry and Game Management Research Institute, Jiloviste-Sirnady, Praha, 26 pp. (GSF, Neuherberg).*
- FUHRER J. & ACHERMANN B. (eds.), 1994: Critical levels for ozone: A UN–ECE Workshop Report. *Ms., Swiss Federal Research station for Agricultural Chemistry and Environmental Hygiene, Liebefeld-Bern, FAC Report No. 16, 328 pp.*
- FUHRER J., SKARBY L. & ASHMORE M.R., 1997: Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe. *Environment-al Pollution 97: 911–106.*
- GRUNHAGE L. & JÄGER H.-J., 1994: Atmospheric ozone exposure-potential for vegetation: how suitable are critical le-vels? *In: Critical levels for ozone: a UN–ECE workshop report, Bern, FUHRER J. & ACHERMANN B. (eds.), Schriften-reihe der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Agrilkulturchemie und Umwelthygiene, Liebefeld-Bern, Nr. 16, pp. 222–230.*
- HOFMANN-SCHIELLE C., 1988: Bodenkundliche Untersuchungen in den Hochlagen des Bayerischen Waldes unter be-sonderer Berücksichtigung des Mineralkörpers. *Ms., Dissertation Universität München, 228 pp. (Zentralbibliothek d. Universitätsbibliothek München).*
- KATZENSTEINER K., 1992: Mineralstoffernährung, Bodenzustand und Baumvitalität in Fichtenwaldökosystemen des Böhmerwaldes. *Institut für Waldökologie Universität für Bodenkultur Wien, Österreich. FIW–Forschungsberich-te 1, 195 pp.*

- KIRCHNER M., 1997: Durchführung von Vergleichsversuchen zur Austestung von Passivsammlern. *Wetter und Leben* 49. Jahrgang, Heft 4: 191–204.
- KIRCHNER M., BAUMGARTEN M., MATYSSEK R., DITTMAR C., FELLNER R., HAGER H., PASUTHOVA J., REUTHER M., SCHUMME H., SOUKUP F., WERNER H. & BRAEUTIGAM S., 2000: Fallstudie Buche im Dreiländereck Böhmen, Oberösterreich, Bayern. *Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, Materialien* 151, 168 pp.
- KIRCHNER M., KAMMERLOHR R., KOHMANNS B., REDISKE G., SCHÖDL M. & WEIZL G., 1994: Erfassung der Immissionsbelastung im Alpenraum mit Passivsammlern. *Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, Materialien* 116, 167 pp.
- KIRCHNER M., PEICHL L., HOPPE A., BRAEUTIGAM S. & KETTRUP A., 1999: Vergleichende Darstellung von Depositionsmessungen im bayerisch-tschechischen Grenzgebiet. Einzugsgebiet Große Ohe – 20 Jahre hydrologische Forschung im Nationalpark Bayerischer Wald. *Symposium am 11. 5. 1999, Nationalpark Bayerischer Wald, Heft 7: 107–115.*
- LANGEBARTHEL C., HELLER W., ERNST D., LIPPERT M., LÜTZ C., PAYER H.D. & SANDERMANN H., 1997: Ozone responses of trees: Results from controlled chamber exposures in the GSF phytotron. In: *Forest decline and ozone: a comparison of controlled chamber and field experiments*, SANDERMANN H., WELLBURN A.R. & HEATH R.L. (eds.), *Ecological Studies, Springer Berlin Heidelberg New York* 127: 163–200.
- LEGGIE A.H., GRÜNHAJE L., NOSAL M. & JÄGER H.-J., 1996: Ambient ozone and adverse crop response: an evaluation of North American an European data as they relate to exposure indices and critical levels. In: *Exceedence of Critical Loads and Levels*, KNÖFLACHER M., SCHNEIDER J. & SOJA G. (eds.), *Umwelbundesamt, Wien*, pp. 18–46.
- LICHTENTHALER H.K. & WELLBURN A.R., 1983: Determination of total carotenoids and chlorophyll a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemistry Society Transactions* 2: 1329–1337.
- LIPPERT M., STEINER K., PAYER H.D., SIMONS S., LANGEBARTHEL C. & SANDERMANN H., 1996: Assessing the impact of ozone on photosynthesis of European beech (*Fagus sylvatica* L.) in environmental chambers. *Trees* 10: 268–275.
- LWF, 1995: Waldzustandsbericht 1995. *Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten – Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft* (Hrsg.).
- LWF, 1996: Waldzustandsbericht 1996. *Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten – Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft* (Hrsg.).
- LWF, 1997: Waldzustandsbericht 1997. *Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten – Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft* (Hrsg.).
- LYR H., FIEDLER H.-J. & TRANQUILLINI W., 1992: Physiologie und Ökologie der Gehölze. *Gustav Fischer Verlag, Jena, Stuttgart*, 620 pp.
- MATYSSEK R. & INNES J.L., 1998: Ozone – A risk for trees and forests in Europe? *Water, Air and Soil Pollution*, 116: 199–226.
- MATYSSEK R., HAVRANEK W.M., WIESER G. & INNES J.L., 1997: Ozone and the forests in Austria and Switzerland. In: *Forest Decline and Ozone*, SANDERMANN H., WELLBURN A.R. & HEATH R.L. (eds.), *Ecological Studies, Springer Verlag Berlin Heidelberg, New York*, 127: 95–134.
- MAURER S. & MATYSSEK R., 1997: Nutrition and ozone sensitivity of birch (*Betula pendula*). II. Carbon balance, water-use efficiency and nutritional status of the whole plant. *Trees* 12: 11–20.
- MAYER H., 1987: Die Frostereignisse der letzten Jahre als mögliche Stressfaktoren. *Symposium „Klima und Witterung in Zusammenhang mit den neuartigen Waldschäden“* 13.–14. 10. 1986, *GSF-Bericht* 10/87: 227–254.
- MÜLLER E. & STIERLIN H.R., 1990: Sanasilva Kronenbilder mit Nadel- und Blattverlustproduzenten für Wald, Schnee und Landschaft., Eidgenössische Forschungsanstalt, Hrsg. *CH-8903 Birmensdorf, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage*, 129 pp.
- PŘÍSA E., 1985: Die böhmischen und mährischen Wälder – ihre Struktur und Ökologie. *Akademia Verlag Prag*, 578 pp.
- RITTER M., POUPA S. & WAITZ E., 2001: Aktualisierung der Luftschadstofftrends in Österreich 1980–1999. *Umwelbundesamt Wien, Austria* (Hrsg.), *Bericht* 181, 74 pp.
- SCHOLL T., 1997: Historische Landnutzung im Böhmerwald. Ms., *Diplomarbeit Universität für Bodenkultur, Wien*, 141 pp.
- SCHRAMEL P., 1988: ICP and DCP spectrometry for trace element analysis in biochemical and environmental samples. *Spectrochimica Acta* 43B: 881–896.
- SCHREIBER U., 1986: Detection of rapid induction kinetics with a new type of high frequency modulated chlorophyll fluorometer. *Photosynthesis Research* 9: 261–272.
- SCHUME H. & HAGER H., 1999: Boden- und vegetationskundliche Untersuchungen an den sechs Standorten des Buchenprojekts. Ms., *Institut für Waldökologie Universität für Bodenkultur Wien, Österreich, Bericht an GSF*, 49 pp. (depon. in: *GSF, Neuherberg*).
- SKARBY L., RO-POULSEN H., WELLBURN F.A.M. & SHEPPARD L.J., 1998: Impacts of ozone forests: A European perspective. *New Phytologist* 139, 109–122.
- STEFFEN I. & SCHRAMEL P., 1988: Bestimmung von Stickstoff in Fichtennadeln. *Laborpraxis* 12: 1354–1361.
- ŮHŮL., 1976: Historie lesů. Speciální úkoly – III. cyklus. *Forstteinrichtungswerk – Waldgeschichte für den Forstbetrieb Prachaticy, Brandčs nad Labem – Č. Budějovice* 1976, 77 pp.

- WERNER H., KIRCHNER M., WELZL G. & HANGARTNER M., 1999: Ozone Measurements along vertical transects in the Alps. *Environmental Science And Pollution Research* 6: 83–87.
- WERNER H., 1999: Ozonmessung mittels Passivsammlern. Ms., *Interner Bericht an die GSF, 83 pp.* (GSF, Neuherberg).
- ZIEGLER E. & EGLE K., 1965: Pigmentbestimmung. *Beiträge zur Biologie der Pflanze*, 41: 11–37.