

Ursachen von Waldschäden

# Wie wirkt Ozon auf Waldbäume?

Wie wirkt Ozon auf Waldbäume? Dieser Frage sind Forscher an der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL in Birmensdorf nachgegangen. Untersucht wurden vor allem empfindlichere Laubbäume, welche zuvor begast worden waren. Dabei konnten deutliche Zellschädigungen durch Ozon nachgewiesen werden.

**A**bfallprodukte, Schädigungen und Regeneration sind Teil des Lebens. Ozon wird ohne menschlichen Einfluss in der Troposphäre (10 km, erdnahe Teil der Atmosphäre) durch eine Reihe *photoche-*

und Turbulenzen. Messungen gelten deshalb immer nur für einen bestimmten Standort (z.B. Birmensdorf, WSL in Waldnähe, und Davos, NABEL-Station, Abb. 1).

## Ozonaufnahme

Wie gelangt das Ozon in den Organismus der Waldbäume und wie wirkt dieser Stoff dort? Untersuchungen der Gruppe Bioindikationen an der WSL liefern darüber neue Erkenntnisse. Das in der Luft enthaltene Ozon dringt zunächst durch die *Spaltöffnungen* in die interzellulären Lufträume der Blätter. Bei geschlossenen Spaltöffnungen ist die Aufnahme 10'000 mal geringer.

In einem luftdurchgängigen *Birkenblatt* (Abb. 2A) erreicht das Ozon die empfindlichen Zellen im Blattinnern besser als in einer dichten Fichtennadel (Abb. 2B). Bei Fichtennadeln konnte eine Schädigung durch Ozonkonzentrationen unserer Aussenluft bisher *nicht nachgewiesen* werden. Da die Nadeln mehrere Jahre alt werden, wäre eine Schädigung nach langjähriger Ozoneinwirkung denkbar; sie ist aber umstritten und experimentell nicht einwandfrei nachgewiesen worden.

Der jüngste Nadeljahrgang trägt allerdings dem Baum den meisten Stoffgewinn ein. Bei experimentell während des Sommerhalbjahres begasteten Föhren führte die Konzentration von 200 µg / m<sup>3</sup> (3-faches Monatsmittel der ozonreichen Sommermonate) zum Abwurf der älteren Nadeljahrgänge. Im folgenden beschreiben wir deshalb Wirkungen von Ozon auf Blätter von *Laubbäumen*.

## Ozonsymptome auf Blättern

Erhöhte Ozonkonzentrationen treten bei warmem, sonnigem und trockenem Wetter auf. Länger andauernde *Ozonepisoden* erzeugen insbesondere im Frühsommer auf frisch ausgetriebenen Blättern von Laubbäumen Symptome, nämlich *hellgrüne Punkte*, welche sich später zu *bronzefarbenen* oder *winzigen schwarzen Punkten*, und schliesslich zu braunen nekrotischen Fleckchen entwickeln (Abb. 3A und 3B). Die Anzahl Tage, bis solche hellgrünen Punkte auf den Blättern entstehen, hängt von der Ozonaufnahme und deshalb von der Witterung oder Beschattung ab und kann zudem vom Ernährungszustand der Bäume modifiziert werden (Beispiel Birke, Abb. 4). Durch Ozonbegasung mit Konzentrationen, wie sie in der Aussenluft auftreten, konnten auch an Pappeln, Eschen und Buchen solche Blattsymptome experimentell erzeugt werden. Ab September sind im Freien die Ozonsymptome schwierig zu unterscheiden von anderen, ähnlichen Symptomen, welche von früher Alterung, Pilzinfektionen, Spinnmilbenbefall oder saugenden Insekten stammen.

## Schattenblätter

Die Beschattung führt nicht nur zur Ausbildung luftdurchgängiger dünner Blätter, sondern auch zur vermehrten Schadstoffaufnahme während der ozonreichen Tageszeit. Starkes Licht und Lufttrockenheit führt zur Ausbildung dicker und dichter Blätter (Sonnenblätter) und zum Schliessen der Spaltöffnungen. Auf den Waldbaum bezogen, tragen die Schattenblätter durch schwächere Photosyntheseleistung allerdings nur ca. 30 % Stoffgewinn ein (Sonnenblätter 70%), so dass sich der Baum deren Schädigung leisten kann.

Ein weiterer unbekannter, die Schädigung beeinflussender Faktor ist die Pho-

Von Madeleine S. Günthardt-Goerg, Werner Landolt und Jürg B. Bucher\*

*mischer Umwandlungsprozesse* gebildet. *Stickoxide* sind die Ausgangsstoffe dieser Reaktionen, aus denen in Gegenwart von flüchtigen organischen Kohlenwasserstoffen und Sonnenstrahlung Ozon hervorgeht.

## Ozonkonzentrationen

Durch Austauschprozesse mit der Stratosphäre (10-25 km, erdferner ozonhaltiger Teil der Atmosphäre) wird Ozon auch aus oberen in bodennahe Luftschichten eingetragen. Diese natürliche Ozonkonzentration variiert im Jahres- und Tagesgang je nach Klima und Vegetation, Meereshöhe und Sonneneinstrahlung von 20 bis 30, in Extremfällen bis 120 Mikrogramm pro Kubikmeter (µg / m<sup>3</sup>, 20 µg / m<sup>3</sup> = 10 ppb).

Zusätzliche Ausgangsstoffe entstehen durch *Verbrennungsprozesse*. Während in Stadtzentren das Überangebot dieser Vorläufersubstanzen zu einer Ozonzerstörung führt, kommt es in den Agglomerationen durch die gleichen, aber bereits verdünnten Luftverunreinigungen zum Ankurbeln der Ozonbildung. Hinzu kommen Verfrachtungen durch Wind

**B**esonders im Sommer kommt es häufig zu erhöhten Ozonkonzentrationen der Aussenluft. An der WSL in Birmensdorf hat die Gruppe «Bioindikationen» die Wirkung von Ozon auf Blätter von Birken, Pappeln, Eschen, Erlen und Buchen untersucht. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass solche Ozoneinwirkungen auf den Blättern deutliche, von Auge sichtbare Symptome erzeugen. Es handelt sich dabei um Zellschädigungen. Sie führen dazu, dass sich assimilierte Stärke in den Blättern anreichert, statt in den Stamm und die Wurzeln transportiert zu werden.

\* Dr. M.S. Günthardt-Goerg ist Leiterin der Gruppe Bioindikationen, Dr. W. Landolt leitet die Gruppe Biochemie und Dr. J.B. Bucher ist Chef der Sektion Immissionsökologie der WSL in Birmensdorf.

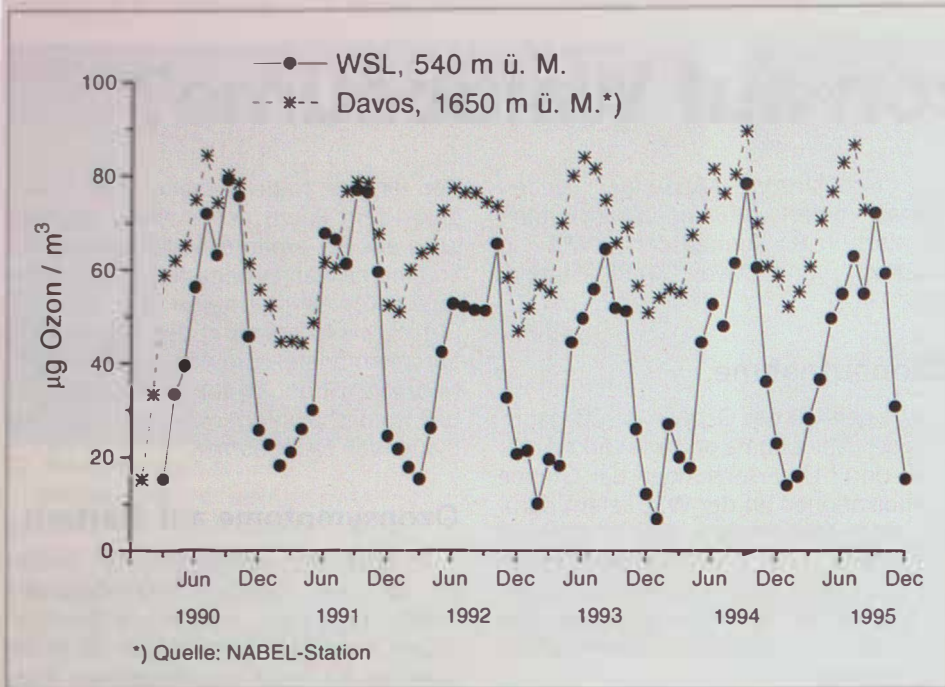


Abbildung 1: Monatsmittelwerte der Ozonkonzentration.

tochemie von Ozon im Bestand. Sie wird beeinflusst durch die grosse innere Oberfläche des Waldes, mit der möglichen Beteiligung der flüchtigen organischen Substanzen (insbesondere der von Koniferennadeln abgegebenen Terpene) und mit den kleinräumig unterschiedlichen Klimaverhältnissen (Temperatur, Strahlung, Turbulenzen).

**Ozonaufnahme nachts**

Im Gegensatz zu vielen krautigen Pflanzen (z.B. Tabak, welcher bei Nachtbegasung gesund bleibt, Abb. 5) sind die Spaltöffnungen der getesteten Laubbaumarten Birke, Pappel, Erle und der Koniferenarten Lärche und Fichte während der Nacht nicht ganz geschlossen. Ob

Ozon im Experiment nur tagsüber, nur nachts, oder kontinuierlich zugegeben wurde, spielt deshalb im Juli bei Laubbäumen keine Rolle – Schadsymptome an den Blättern treten in allen drei Begasungsvarianten gleichermaßen auf (Abb. 5).

**Genetische Variabilität und Ernährungszustand**

Die genetische Variabilität von Sämlingen gegenüber genetisch einheitlichen Bäumen aus Stecklingen zeigt im Experiment die unterschiedliche Empfindlichkeit einzelner genetischer verschiedener Bäume (grosse Standardabweichung der Mittelwerte bei Grünerlen-Sämlingen verglichen mit Schwarzerlen-Stecklingen, Abb. 5).

Der Ernährungszustand der jungen Versuchsbäume beeinflusste die Ozonempfindlichkeit, beurteilt an den Blattsymptomen, nur wenig. Gut gedüngte Birken wiesen hingegen dank fortgesetztem Wachstum einen höheren Anteil junger ungeschädigter Blätter auf als wenig gedüngte Birken mit beschränktem Längenwachstum.

**Zellschädigung durch Ozon**

Der Zerfall von Ozon an der Zellwand und der folgende biochemische Schneeballeffekt führen zuerst zur Akklimatisierung (z.B. Ausbildung kleinerer Blätter),

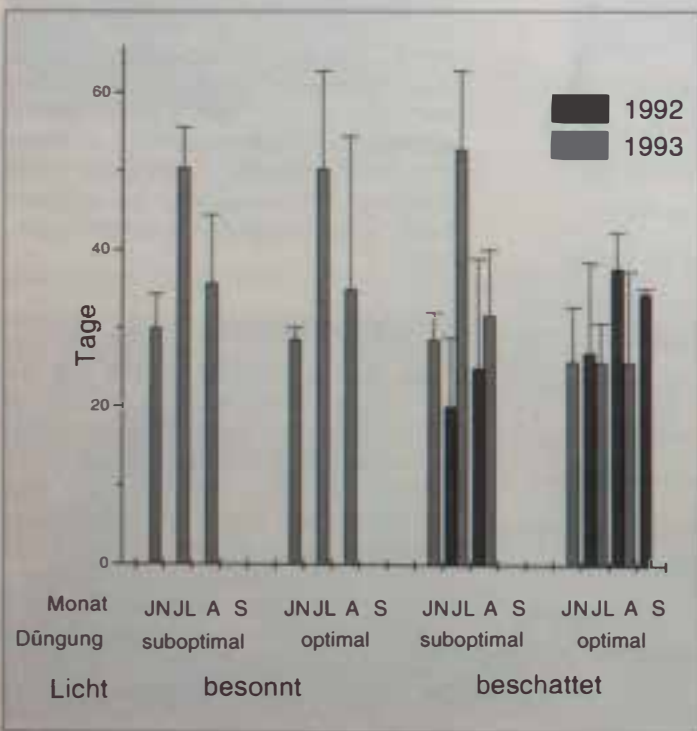


Abbildung 4: Hängebirke. Anzahl Tage (Mittelwerte und Standardabweichung) bis in Birmensdorfer Umgebungsluft Ozonsymptome auf den Blättern erscheinen.

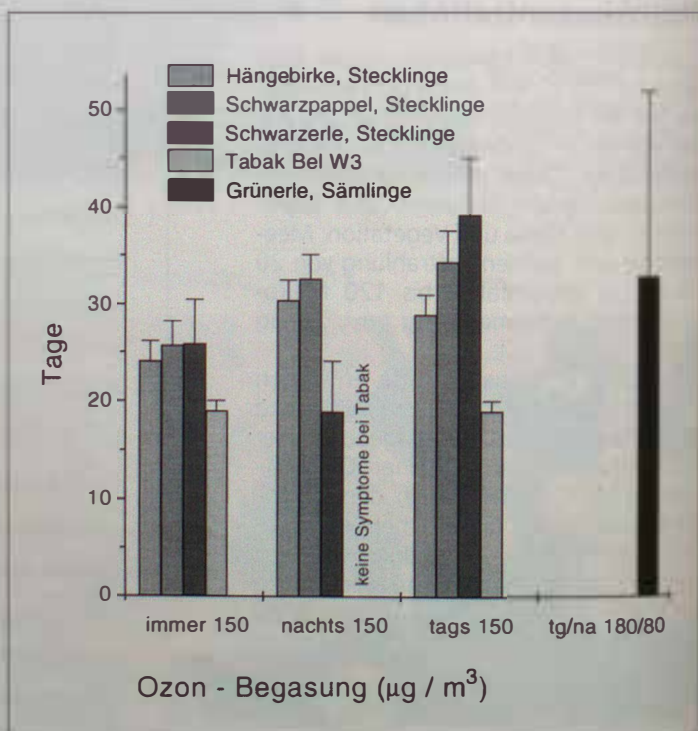
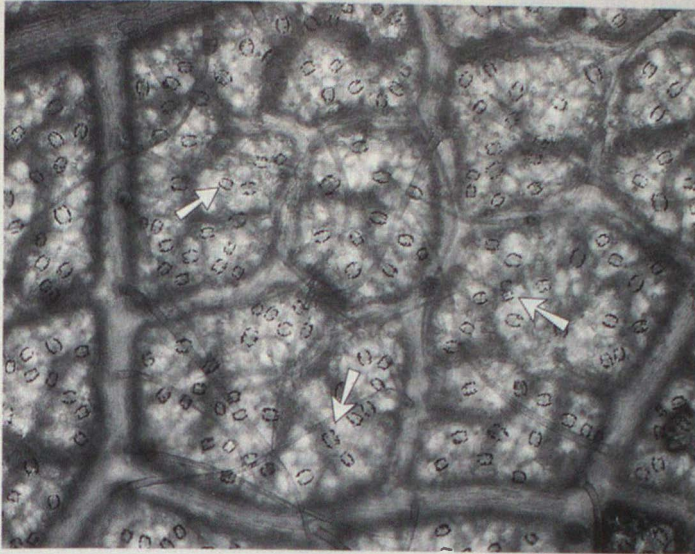
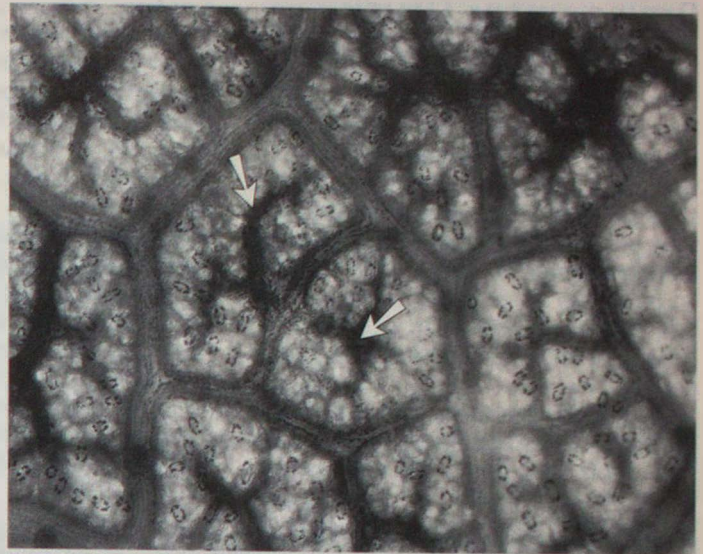


Abbildung 5: Anzahl Tage (Mittelwerte und Standardabweichung) bis im Juli erste Blattsymptome auftreten.

Abbildung 7: Blick auf die Blattunterseite von Birkenblättern mit netzartigen Blattnerven, auf welchen durchsichtige Haare sitzen. Die Spaltöffnungen sind mit Pfeilen angezeigt. Stärke erscheint grau-schwarz. Vergrößerung 20:1.

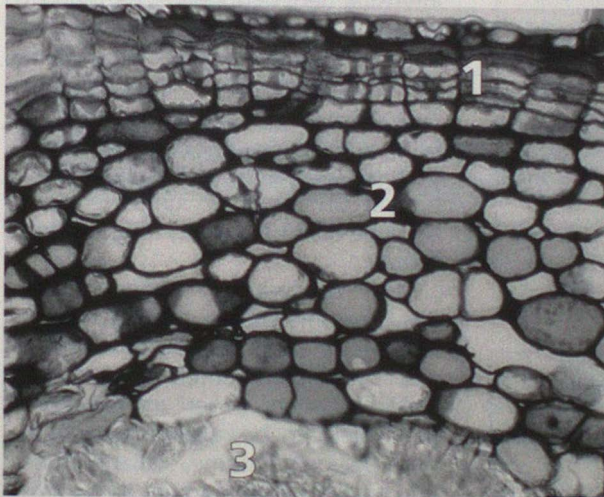


A) Im Assimilationsgewebe dieses gesunden Blattes ist kaum mehr Stärke zu sehen, weil sie über Nacht zum Aufbau der nicht grünen Pflanzenteile (Stamm, Wurzel) abtransportiert wird.



B) In diesem Blatt mit Zellschädigung durch Ozon ist braunschwarze Stärke entlang der Blattnerven liegen geblieben, weil der Abtransport nicht mehr richtig funktioniert.

Abbildung 8: Querschnitt durch Birkenrinde, gefärbt, Vergrößerung 81:1. 1) Borke, 2) Rindenzellen, 3) verholzte Faserzellen.



A) Birke, gewachsen in gefilterter Luft.



B) Birke, gewachsen unter Ozon-einfluss. Der Pfeil zeigt auf geschädigte Zellen.

schliesslich aber zur Zellschädigung (Abb. 6A und 6B) und zu von Auge sichtbaren Blattsymptomen. Die Zellschädigung nach Ozoneinwirkung ist mikroskopisch von der Blattalterung verschieden. Ein gutes Merkmal ist die entlang der kleinsten Blattnerven angereicherte Stärke zu Tageszeiten, an denen in gesunden Blättern die Assimilate in den Stamm und die Wurzel abtransportiert werden (Abb. 7A und 7B). In Versuchen mit Topfpflanzen war deshalb die neu gebildete Wurzelmasse unter dem Einfluss von mindestens 2-fachen Ozonaussenkonzentrationen stärker verringert als der oberirdische Baumteil.

Es bleibt uns noch viel Arbeit, bis wir die verschiedenen Ursachen von Zellschä-

digungen einwandfrei erkennen können. Zellschädigung haben wir auch in der Rinde von jungen Bäumen oder Ästen gefunden (Abb. 8A und 8B). Dies könnte sowohl eine Folge von direkter als auch von indirekter (via geschädigte Blätter und gehemmten Stoffabtransport) Ozonwirkung sein.

Künftige Untersuchungen werden uns zeigen, ob gerade die Rinde oder ältere Nadeljahrgänge Auskunft über Langzeitwirkungen oder vergangene Schädigungsfaktoren geben. Inwieweit Experimente mit kleinen Bäumen oder Topfbäumen auf über Jahre hinweg an die Standorte angepasste Bestandesbäume übertragen werden können, ist noch ungewiss.

Beim neuesten von einer UNO-Expertengruppe aufgrund der wenigen vorhandenen Experimente festgelegten Grenzwert für Ozon wird angenommen, dass nur Ozonkonzentrationen über  $80 \mu\text{g} / \text{m}^3$  ( $40 \text{ ppb}$ ) schädigend wirken. Die Summe der Überschreitungen von  $80 \mu\text{g} / \text{m}^3$  der Stundenmittel während jeweils 24 Stunden und 6 Monaten Vegetationsperiode soll unter dem Grenzwert liegen. Am Standort WSL wird dieser Grenzwert bis um etwa Faktor 2 (Davos Faktor 3) überschritten. Ein zwei bis drei Jahre lang laufender Versuch als Beitrag zur besseren Abstützung des Grenzwertes wird uns bald mehr Auskunft geben können. □