

**Zeitschrift:** Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse  
**Herausgeber:** Schweizerischer Forstverein  
**Band:** 152 (2001)  
**Heft:** 5

**Artikel:** Diagnose von Umwelteinflüssen auf Bäume  
**Autor:** Günthardt-Georg, Madeleine Silvia / Vollenweider, Pierre  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1098289>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 03.05.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Diagnose von Umwelteinflüssen auf Bäume<sup>1</sup>

MADELEINE SILVIA GÜNTHARDT-GOERG und PIERRE VOLLENWEIDER

Keywords: Trees; environmental stress diagnosis. FDK 161 : 181.4 : 48

## Einleitung

Nur in der passenden Umwelt können sich die Organismen entwickeln; dies gilt für die Menschen ebenso wie für die Tiere, Pflanzen, einzelnen Organe und Zellen. Besonders für die nicht mobilen Bäume können Umweltveränderungen zu Stressfaktoren werden, welche zu Schädigungen führen. Wenn uns die Reaktionen der Bäume oder erkennbare Schädigungen Hinweise auf die Art und Dauer des einwirkenden Stressfaktors geben, sprechen wir von Bioindikationen. Vom Erkennen und Nachweisen einzelner Stressfaktoren im Experiment (BRUNOLD *et al.* 1996) bis zum Erkennen im Feld, wo viele klimatische, biotische, anthropogene und Standorteffekte sich gegenseitig beeinflussen, ist jedoch ein langer Weg. Wir möchten hier aus der laufenden und abgeschlossenen Erforschung der Bäume und ihrer Bioindikationen Beispiele zum Erkennen und Differenzieren von klimatischen, biotischen und anthropogenen Stressfaktoren geben.

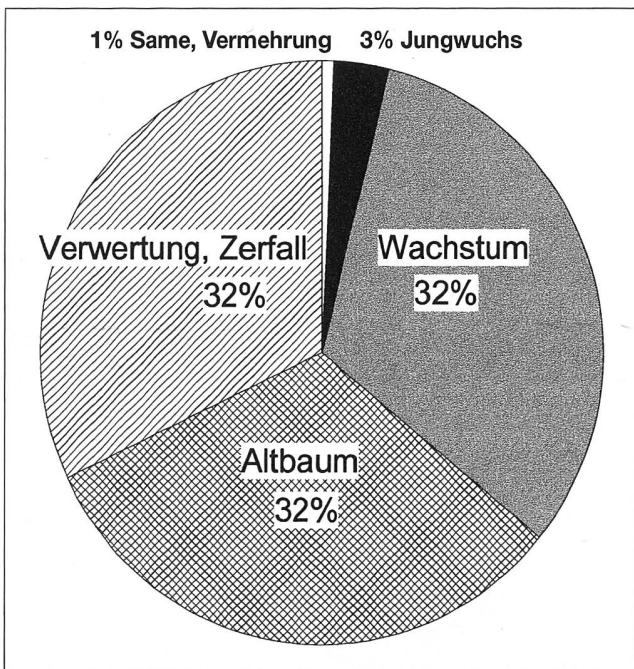


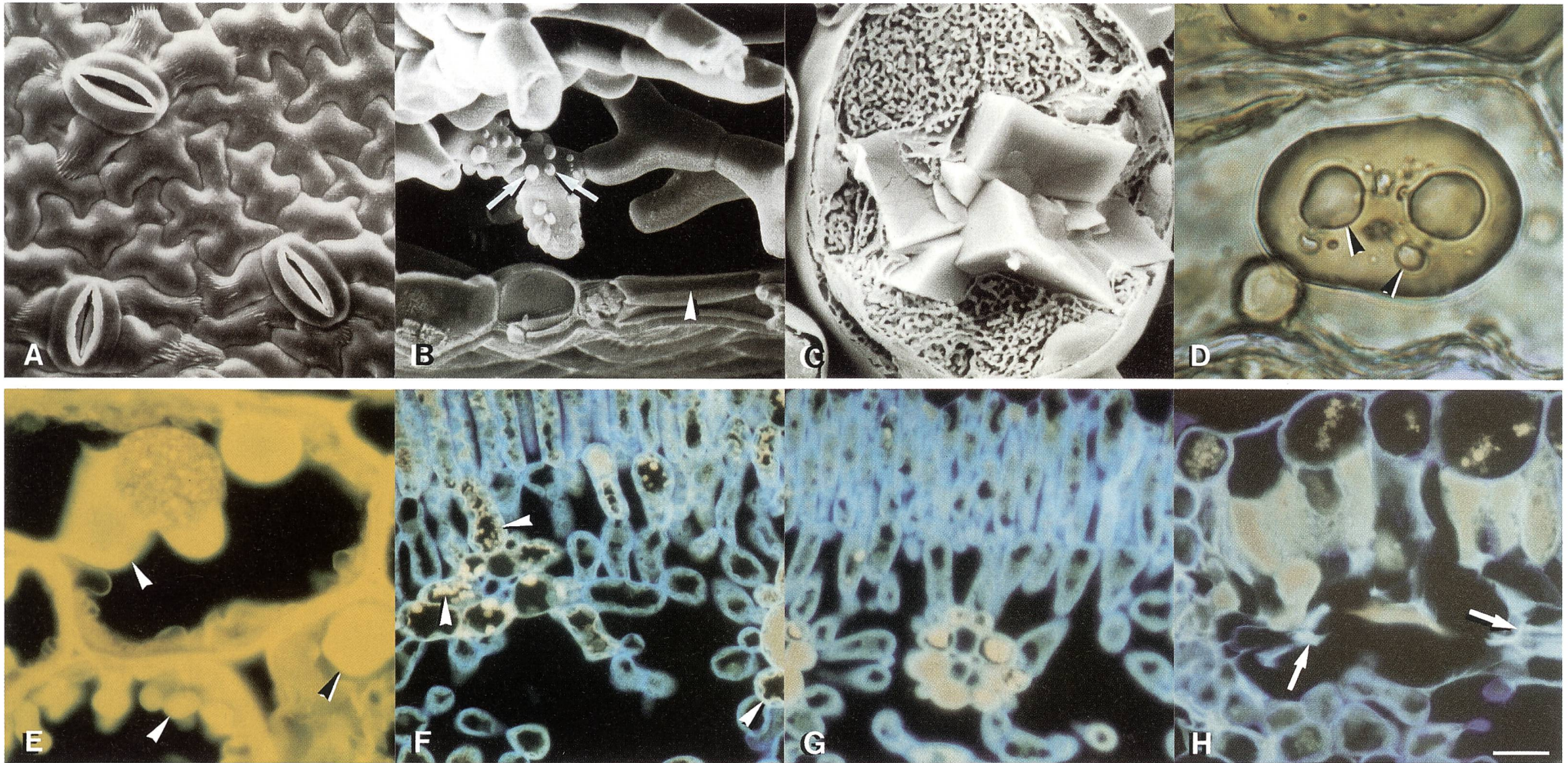
Abbildung 1: Lebenszyklus von Bäumen.

Die Umwelt der Bäume verändert sich in Zeit und Raum. Es ist dabei wesentlich, wann im Lebenszyklus der Bäume (Abbildung 1), wann im Jahresgang und wann während der Entwicklung der Zellen, Organe und ganzen Pflanzen ein Stress einwirkt. Spätfrost schädigt z.B. die Nadeln, wenn sie im Frühling die Frosthärte verloren haben; Zellschädigungen durch Ozonperioden im September vermischen sich mit der Blattalterung und Herbstverfärbung. Die einzelnen Zellen, Organe und ganzen Pflanzen überstehen Stress, indem sie sich anpassen, vermeiden, entgiften, abkapseln, reparieren oder kompensieren. Falls die Veränderungen ein erträgliches Mass überschreiten, tragen die Zellen, Gewebe, Organe und schliesslich die ganzen Pflanzen Schädigungen davon, welche im schlimmsten Fall zum Absterben führen.

## Beispiele von Reaktionen in Zellen, Geweben und Organen/ganzen Pflanzen Zellen

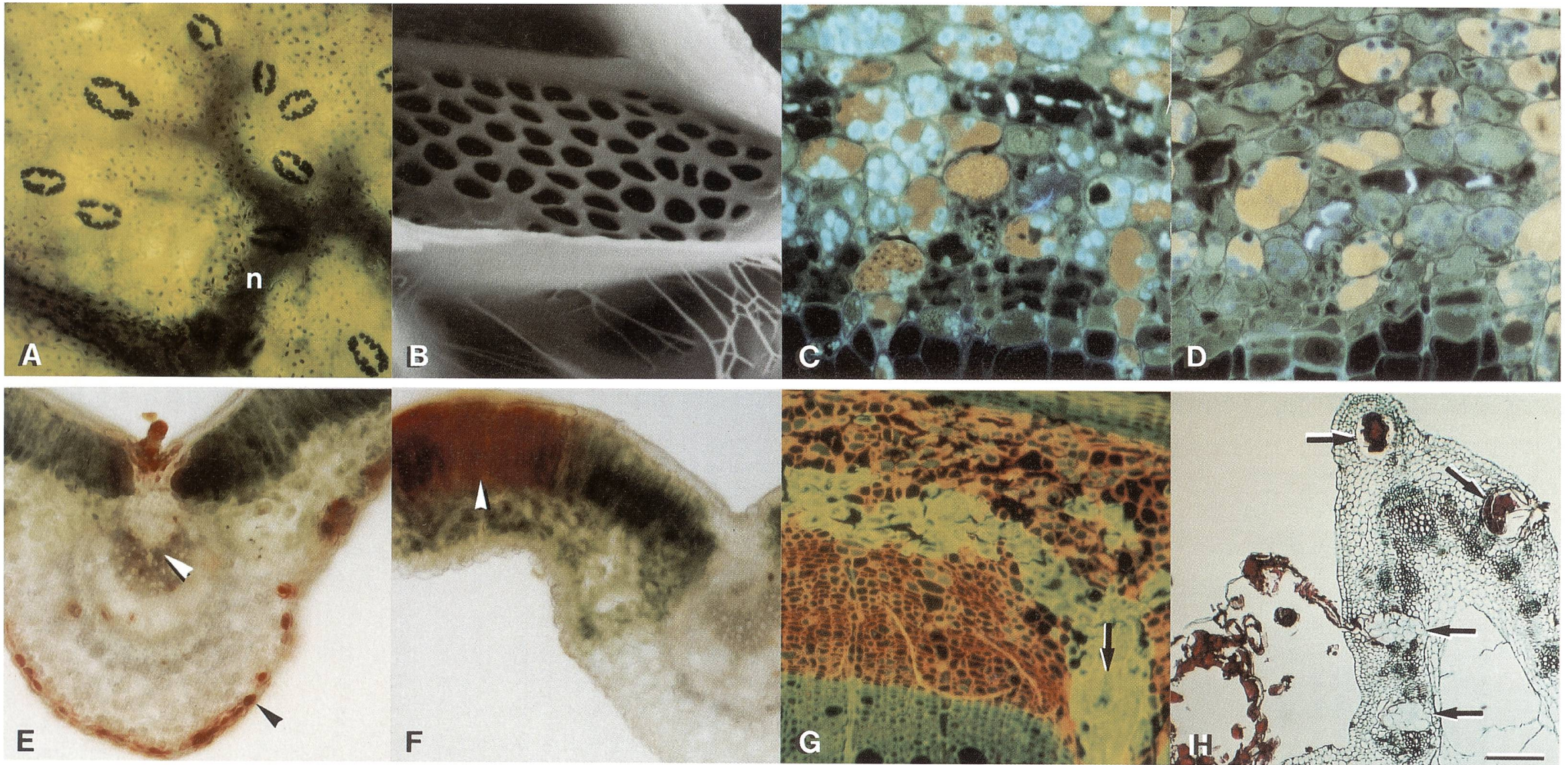
Die Spaltöffnungen der Blättern regulieren den Gasaustausch, d.h. die Abgabe von Wasser und Aufnahme von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) aus der Luft für die Assimilation. Die Poren der Spaltöffnungen verengen sich (Farbtafel 1A) bei ungünstigen Licht-, Wasser- und Temperaturverhältnissen oder wenn die Assimilationszellen im Blattinnern Funktionsstörungen melden. Dadurch wird der Gasaustausch den Umweltbedingungen angepasst, und es wird vermieden, dass das Assimilationsgewebe überfordert, vergiftet oder ausgetrocknet wird. Die Spaltöffnungen werden durch zwei Schliesszellen reguliert, welche als hochspezialisierte Zellen selber auf Umwelteinflüsse weniger empfindlich sind als die Assimilationszellen. Die Regulation ist daher noch gewährleistet, wenn die Assimilationszellen schon erste Schädigungen zeigen (Farbtafel 1B, GÜNTHARDT-GOERG *et al.* 1993, 1997 und 2000a). Ausscheidungen an Zellwänden der Assimilationszellen wurden entdeckt (GOODMANN *et al.* 1977), weil sie infektiöse Bakterien immobilisierten. Aber auch bei Stress durch Sauerstoffradikale aus Ozon wurden solche Ausscheidungen von Kalzium-Pektat (Farbtafel 1B) gebildet. Darin enthaltenes Protein (GÜNTHARDT-GOERG 1996b) könnte auf Enzyme hinweisen, welche Sauerstoffradikale entgiften. Gleichzeitig wird in diesen Ausscheidungen Kalzium gebunden, denn zuviel Kalzium ist für die Zellen giftig. Überschüssiges Kalzium und hohe Oxalsäurekonzentrationen werden in den Vakuolen engiftet durch die Bildung von Kalziumoxalatkristallen (Farbtafel 1C). Die Kristalle wachsen so lange, bis die Zellen absterben; dabei wird das Kalziumoxalat aus dem Metabolismus entfernt. Die Vakuolen sind für das Ionen-gleichgewicht der Zellen zuständig, gelten aber auch als Abfall- und Speichersäcke der Zellen mit vielen komplexen und noch wenig bekannten chemischen Vorgängen. Innerhalb der Zellvakuole gibt es keine Membranen, um die vielen chemisch verschiedene Substanzen abzutrennen, dennoch können sie durch ihre chemische Form voneinander getrennt vorliegen. Wir sind dabei, die chemische Identität, Funktion, Menge und das mikroskopische Erscheinungsbild einer Reihe von verschiedenen phenolischen Substanzen zu untersuchen. Diese Stoffgruppen haben unterschiedliche Funktionen zur Entsorgung von überschüssigem Kohlenstoff, Entgiftung (z.B. antioxidativ, Bindung von Metallionen), Konservierung (Holz und Rinde) und Abwehr (gegen Frass und Infektionen). Sie umfassen Tausende von verschiedenen Substanzen inklusive die bekannten Tannine, die häufig in Baumarten vorkommen. An Querschnitten durch frische Blätter und Nadeln konnten wir zeigen, dass die Phenole in den Vakuolen in getrennter Form vorliegen (Farbtafel 1D), nämlich gelöst als kleine oligomere

<sup>1</sup> Nach einem Referat, gehalten am Symposium des Schweizerischen Forstvereins «Forstwissenschaften im Wandel – neue Methoden für tragfähige Lösungen» im Rahmen der 180. Jahresversammlung der Schweiz. Akademie der Naturwissenschaften (SANW) am 13. Oktober 2000 in Winterthur.



Farbtafel 1: Stressreaktionen in Zellen (aus kontrollierten Experimenten).

- A) Birke (*Betula pendula* Roth.), Blattunterseite, verengte Spaltöffnungen, verursacht durch Ozon. Tieftemperatur-Rasterelektronenmikroskopie, WSL (REM), Messbalken = 25  $\mu\text{m}$ .
- B) Querbruch durch ein Birkenblatt. Untere Epidermis mit einer der beiden Schliesszellen (▶). Assimilationszellen mit tröpfchenförmigen Pektinausscheidungen ( $\rightarrow$   $\leftarrow$ ), welche beobachtet werden nach Perioden mit erhöhten Ozonkonzentrationen (Stundenmittel > 120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). REM, Messbalken = 12  $\mu\text{m}$ .
- C) Pappelblatt (*Populus nigra* L.) Quergebroschene Zelle mit grossem Kalzium-Oxalatkristall in der Vakuole. REM, Messbalken = 3  $\mu\text{m}$ .
- D) Querschnitt durch eine frische Fichtennadel (*Picea abies* (L.) Karst.) mit gelösten und kondensierten (▶) phenolischen Substanzen in der Vakuole, betrachtet im Lichtmikroskop (LM), Messbalken = 8  $\mu\text{m}$ .
- E) Querschnitt durch eine Fichtennadel, welche gewachsen war unter Luft mit doppelter  $\text{CO}_2$ -Konzentration der Aussenluft. Zellen gefärbt mit Corphosphin. Kondensierte Phenole in den Vakuolen sind gelb gefärbt (▶). Betrachtet unter Blaulicht im Fluoreszenzmikroskop (FM), Messbalken = 8  $\mu\text{m}$ .
- F) G) und H) Querschnitte durch Birkenblätter, gefärbt mit Calcofluor White MR2, betrachtet unter ultraviolettem Blaulicht, FM, Messbalken = 21  $\mu\text{m}$ .
- F) Durch Ozon (AOT40 11  $\mu\text{L}\cdot\text{h}$ ) geschädigte Zellen weisen in den Vakuolen viele kleine gelb gefärbte Tropfen von Phenolkörpern auf (▶).
- G) Bei mildem Wasserstress (-1.3Mpa, keine Welke) sind solche Phenolkörper selten.
- H) Bei starkem Spinnmilbenbefall werden gelöste oligomere Phenole (ockerfarbig) in den Vakuolen der Assimilationszellen gebildet, Lipoproteidspuren der Spinnmilben fluoreszieren weiss ( $\rightarrow$ ).



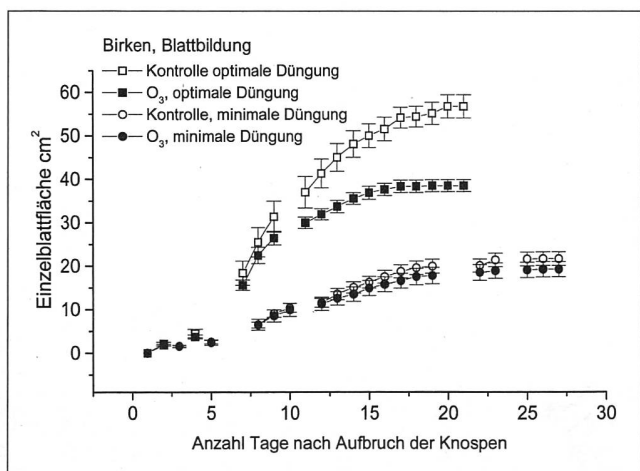
Farbtafel 2: Stressreaktionen in Geweben (aus kontrollierten Experimenten).

- A) Birke, Blick auf die Blattunterseite. Stärkekörner (mit Jod/Jodkali violett gefärbt) sind durch Ozoneinfluss in Spaltöffnungen (bohnenförmig mit grossen Stärkekörnern), Epidermiszellen (mit kleinen Stärkekörnern) und entlang der Blattnerven (n) angehäuft. LM, Messbalken = 52  $\mu$ m.
- B) Rinde von Birke. Angebrochene Siebröhrenzelle mit Blick auf die Siebplatte mit beinahe noch allen Poren offen. REM, Messbalken = 2.5  $\mu$ m.
- C) und D) Birkenwurzeln gefärbt mit Anilin. Stärkekörner fluoreszieren blau, Kallose auf den Siebplatten der Siebröhren fluoresziert weiss, phenolische Substanzen in den Vakuolen erscheinen gelblich. Betrachtet unter ultraviolettem Licht, FM, Messbalken = 21  $\mu$ m.
- E) Birkenwurzel mit viel Reservestärke von einem Baum, welcher unter gefilterter Luft gewachsen war (Kontrolle).
- F) Birkenwurzel mit wenig Reservestärke und anderer Zusammensetzung der Phenole als die Kontrolle dank erhöhter Ozonkonzentration.
- E) und F) Querschnitte durch frische Ahornblätter (*Acer pseudoplatanus* L.). Nachweis der Phenole, genauer der Oligoproanthocyanidine, mit Vanillin (rot gefärbt,  $\blacktriangleright$ ). LM, Messbalken = 82  $\mu$ m.
- G) Nachweis der Phenole in der unteren Epidermis und in den Nerven bei schwermetallhaltigem Boden (Zn, Cu, Pb, Cd).
- F) Nachweis der Phenole im Assimilationsparenchym nach Ozoneinfluss.
- G) Querschnitt durch die Rinde eines Buchensämlings (*Fagus sylvatica* L.). Gefärbt mit Coriphosphin. Das Rindengewebe ist orange, das Holz grünlich. Eine geringe Verletzung brachte das Festigungsgewebe ( $\rightarrow$  Sklerenchym, gelb leuchtend) dazu, als Abwehrreaktion einen Keil bis ins Holz zu bilden. Betrachtet unter Blaulicht, FM, Messbalken = 21  $\mu$ m.
- H) Querschnitt durch den Stengel einer Bohnenpflanze (*Vicia faba* L.) mit einer beim Eierlegen gestorbenen Kleinzikade (*Empoasca decipiens* Paoli, rot gefärbt, mit dem Legestachel im Stengelgewebe inseriert). In zwei Eiern sind kleine Embryonen zu sehen. Betrachtet unter Blaulicht, FM, Messbalken = 21  $\mu$ m.

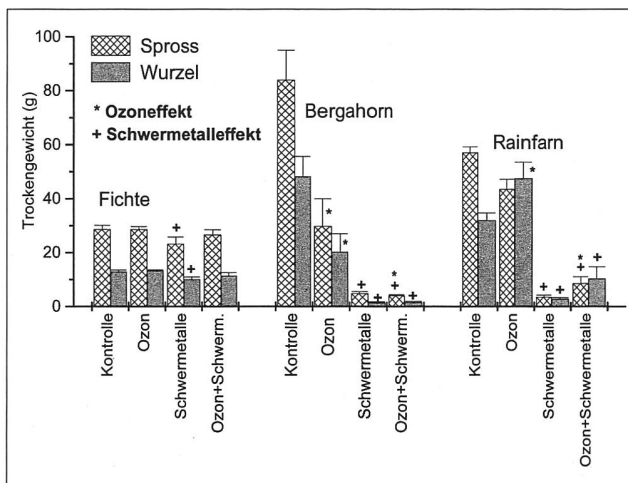
Moleküle oder als unlösliche hochpolymerisierte Phenolkörper. Beide haben ein unterschiedliches chemisches Reaktionsvermögen. Die Bildung von Phenolen ist vorerst als unspezifische Stressreaktion zu bewerten, welche Vorbote des Zelltodes sein kann. Erst die Bestimmung der chemischen Natur der Phenole und wo sie auftreten, gibt Aufschluss über die möglichen Stressfaktoren. *Farbtafel 1E* zeigt verfrühte Alterung an bei doppelter CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft. Unter Ozoneinfluss zeigen Phenolkörper (*Farbtafel 1F*) Zellschädigungen an, nicht aber unter Wasserstress (*Farbtafel 1G*). Bei Spinnmilbenbefall werden oligomere Phenole induziert und weiss fluoreszierende Lipoproteide markieren die Saugstellen (*Farbtafel 1H*).

### Gewebe

Wird der Transport von Zelle zu Zelle durch geschädigte Zellen gestört, wie es unter Ozoneinfluss der Fall ist, so bleibt die im Assimilationsprozess gebildete Stärke vor allem entlang der Transportbahnen (Blattnerven) liegen (*Farbtafel 2A*). Es werden auch mehr Stärkekörner in die Schliesszellen der Spaltöffnungen eingelagert und die Poren geschlossen. Zudem können in den äussersten Zellschichten der Blätter (Epidermis), auf der Blattober- und Unterseite Stärkekörner «entsorgt» werden (im Bild als getupftes Muster, *Farbtafel 2A*). Wenn durch Schädigungen im Laub die Siebröhren, welche im Rindengewebe die Assimilate zu den Wurzeln transportieren, entsprechende Signale erhalten, werden die Siebplatten (*Farbtafel 2B*) verschlossen. Dieser Regulationsprozess findet jeweils im Herbst statt, während im Frühling das Verschlussmaterial Kallose wieder aufgelöst wird. Schädigung des Laubes durch Ozon hat eine ähnliche Wirkung wie der Herbst. In den Wurzeln wird bei Ozonschädigung weniger Reservestärke eingelagert, und Kallosekissen verschliessen auch in den Wurzeln die Siebplatten (*Farbtafel 2C* und *D*). In welchem Gewebe die als Stressreaktion bekannten Phenole gebildet werden, gibt uns zusammen mit ihrer chemischen Natur Hinweise auf die Stressfaktoren, welche diese Abwehr verursachten. Neueste Ergebnisse zeigen, dass Schwermetalle im Boden als Sekundärreaktion in den Nadeln von Fichten und in den Blättern von Ahorn zur Induktion von oligomeren Phenolen führen. *Farbtafel 2E* zeigt den Nachweis in den Blättern in den Leitbündeln der Blattnerven und in der unteren Epidermis. Ozon aus der Luft hingegen induziert ähnliche Phenole im Assimilationsgewebe (*Farbtafel 2F*). Mechanischer Stress wird wiederum anders auf-



**Abbildung 2:** Birken, Blattbildung in Abhängigkeit von Düngung und erhöhter Ozonkonzentration. Mittelwerte mit Standardfehler von je einem gleich alten Blatt pro Baum von je 10 Bäumen pro Behandlung. Die Ozonkonzentration während 9 Tageslichtstunden war 180 µg/m<sup>3</sup>. Minimale Düngung war 1/10 Verdünnung der optimalen Düngung.

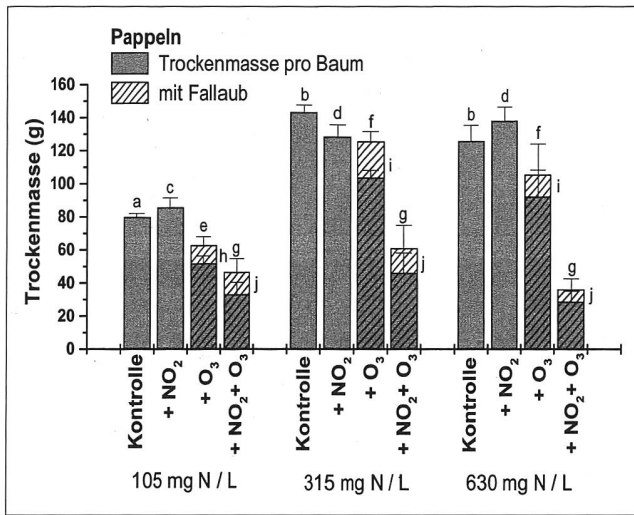


**Abbildung 3:** Einfluss von Schwermetallen im Boden (Zn und Pb 2000; Cu 1000; Cd 30 mg/kg) und Ozon auf unter- und oberirdische Pflanzenteile von Fichte, Bergahorn und Rainfarn (*Tanacetum vulgare* L.). Ozondosis während einer Vegetationsperiode AOT40 = 18 ppmh. AOT40 als Summe aller Stundenmittelwerte über 40 ppb (80 µg/m<sup>3</sup>). Mittelwerte mit Standardfehler von je 5 Pflanzen pro Behandlung. + \* signifikante Behandlungseffekte (ANOVA).

gefangen, nämlich durch mechanische Barrieren. Druckstellen im Stammgewebe werden so durch die Bildung von Faserzellen gefestigt (*Farbtafel 2G*). Bei Verletzungen in Blättern wird entweder der Oxidationsprozess gestoppt durch den programmierten Zelltod der angrenzenden Zellen, welche damit das «Loch» abkapseln, oder indem Wundkallusgewebe den «Fremdkörper» dicht abschliesst (*Farbtafel 2H*, Eier einer Kleinzikade, zwei davon mit Embryonen).

### Organe/ganze Pflanzen

Häufig wirken sich Stressfaktoren schon auf die Blattbildung aus. Bei schlechter Ernährung werden trotz guter Wasserversorgung kleinere Blätter gebildet. Eine zusätzliche Verringerung der Blattgrösse durch Ozon kann jedoch besser bei guter Ernährung gemessen werden (*Abbildung 2*, POLLE *et al.* 2000). Beide Faktoren wirken unabhängig. Bei Ozon aus der Luft und Schwermetallbelastung im Boden gab es Interaktionen. Ozonstress milderte im kontrollierten Experiment die schwache Wachstumsreduktion durch Schwermetallstress bei Fichte und die starke Reduktion bei Rainfarn (*Abbildung 3*, GÜNTHARDT-GOERG *et al.* 2000b). Ahorn war am empfindlichsten auf beide Stressfaktoren, während Ozon allein bei jungen Fichten keine Wachstumsverminderung bewirkte und bei Rainfarn (eine Komposite) sogar das Wurzelwachstum förderte. Nicht nur die Pflanzenarten und deren Organe reagieren verschieden auf Umweltstress, auch die Aufnahme der einzelnen Schwermetalle in die Organe ist unterschiedlich und geht nicht einher mit der Wachstumsreduktion: die Rainfarnblätter enthielten im Experiment viel höhere Kadmium-, Kupfer-, Blei- und Zink-Konzentrationen als die Fichtennadeln. Näheres siehe Poster <http://www.wsl.ch/forest/wus/bioindic/bo3hm-de.htm>. Ähnliche Interaktionen zwischen Schwermetallen, saurem Regen, Bodentyp und Wurzelpathogen bei verschiedenen Baum- und Unterwuchsarten untersuchen wir zurzeit im Grossprojekt «Von der Zelle zum Baum» <http://www.wsl.ch/forest/wus/bioindic/bzb-de.htm>. Bei der Kombination von drei Faktoren, nämlich Stickstoffdüngung im Boden, erhöhte NO<sub>2</sub>- und Ozonkonzentration in der Luft, wird das Zusammenwirken noch komplexer: Wenn das Optimum (315 mg N/L) überschritten wird, bringt erhöhte Düngung (630 mg N/L) kein besseres Wachstum (*Abbildung 4*). NO<sub>2</sub> aus der Luft steigert das Wachstum bei suboptimaler Stickstoffversorgung (Mangel



**Abbildung 4:** Biomasse von Pappel (oberirdisches + unterirdisches Trockengewicht pro Pflanze nach 16 Wochen) in Abhängigkeit von drei Behandlungsfaktoren. Mittelwerte und Standardfehler von je 10 Bäumen pro Behandlungskombination. Verschiedene Kleinbuchstaben bezeichnen signifikant verschiedene Mittelwerte.  
 1. Stickstoffdüngung (1.05, 3.15 und 6.3 g N pro 10L-Topf)  
 2. NO<sub>2</sub> (zugegeben als Tagesgang, mittlere Konzentration 200 µg/m<sup>3</sup>)  
 3. Ozon (zugegeben als Tagesgang, mittlere Konzentration 120 µg/m<sup>3</sup>).

oder Überdüngung). Ozon reduziert die Biomasseproduktion und vermindert sie noch zusätzlich durch frühen Blattfall. Weil NO<sub>2</sub> die Aufnahme von Ozon durch die Spaltöffnungen fördert, ist die Wachstumsreduktion in der kombinierten Behandlung noch bedeutend stärker als bei Ozon allein, wobei die Düngung im Boden beim ohnehin reduzierten Wachstum keine signifikante Rolle mehr spielt. Im Wald sind deshalb die Ursachen von Wachstumsveränderungen nicht leicht zu erkennen.

## Differentialdiagnose bei Blättern und Nadeln

Oft helfen uns Angaben über den Standort und von Auge erkennbare Blattsymptome beim Unterscheiden verschiedener Umwelteinflüsse, aber häufig müssen analytische und mikroskopische Tests für die Differentialdiagnose verwendet werden. Nährstoffmangel führt zu flächiger Vergilbung, zu hellgrün, goldgelb oder rot verfärbten Blättern und Nadeln. Je nach Nährstoffgleichgewicht schreitet die Verfärbung von älteren zu jüngeren Baumteilen (Mangan-/Eisenmangel) fort oder umgekehrt von jüngeren zu älteren. Bei Stickstoffmangel findet die Vergilbung gleichmässig am ganzen Baum statt (HARTMANN *et al.* 1995). Goldgelbe bis rotbraune Verfärbung der Nadelspitzen älterer Nadeln verursacht durch Magnesium-, Mangan-/Eisen- oder Kaliummangel ist nie so scharf vom grünen Nadelteil getrennt wie bei Frostschäden (Farbtafel 3A), welche an den am meisten exponierten Baumteilen auftreten. Nährstoff-Analysen helfen, die ganze Palette von Verfärbungen durch Nährstoffungleichgewichte zuzuordnen.

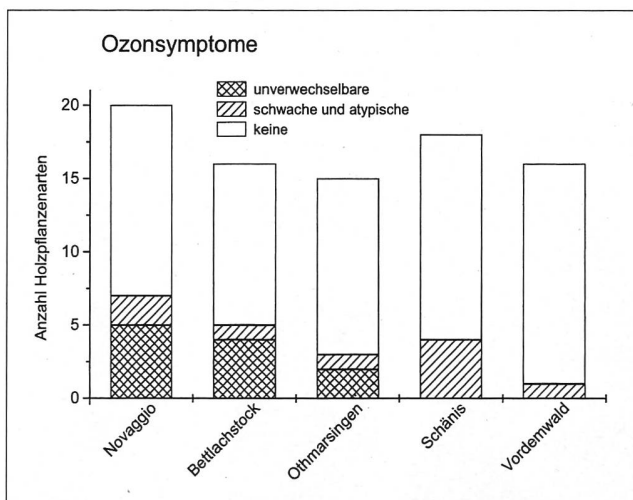
Unter den klimatischen Stressfaktoren ist Trockenstress bekannt, welcher meistens ohne fleckige Vergilbung oder Musterung zum Absterben der jüngsten Blätter und Zweige (braun-nekrotisch vom Blattrand her) führt. Neben Hagellöchern gibt es auch winzige «Durchschusslinien» bei heftigem Hagel mit ganz kleinen Körnern (Farbtafel 3B und C). Die Herbstverfärbung in Reinluft ohne zusätzliche Stressfaktoren verläuft homogen (ohne Punkte und Muster) von grün über gelb oder rot nach braun, typisch beginnend an den Zweig-

spitzen. Im Gegensatz dazu betreffen Immissionssschäden die älteren und lichtexponierten Blätter; die Verfärbungen sind oft punktförmig, die Blätter «gemustert» und der Blattfall schreitet grob gesagt eher an den Zweigen von innen nach aussen voran.

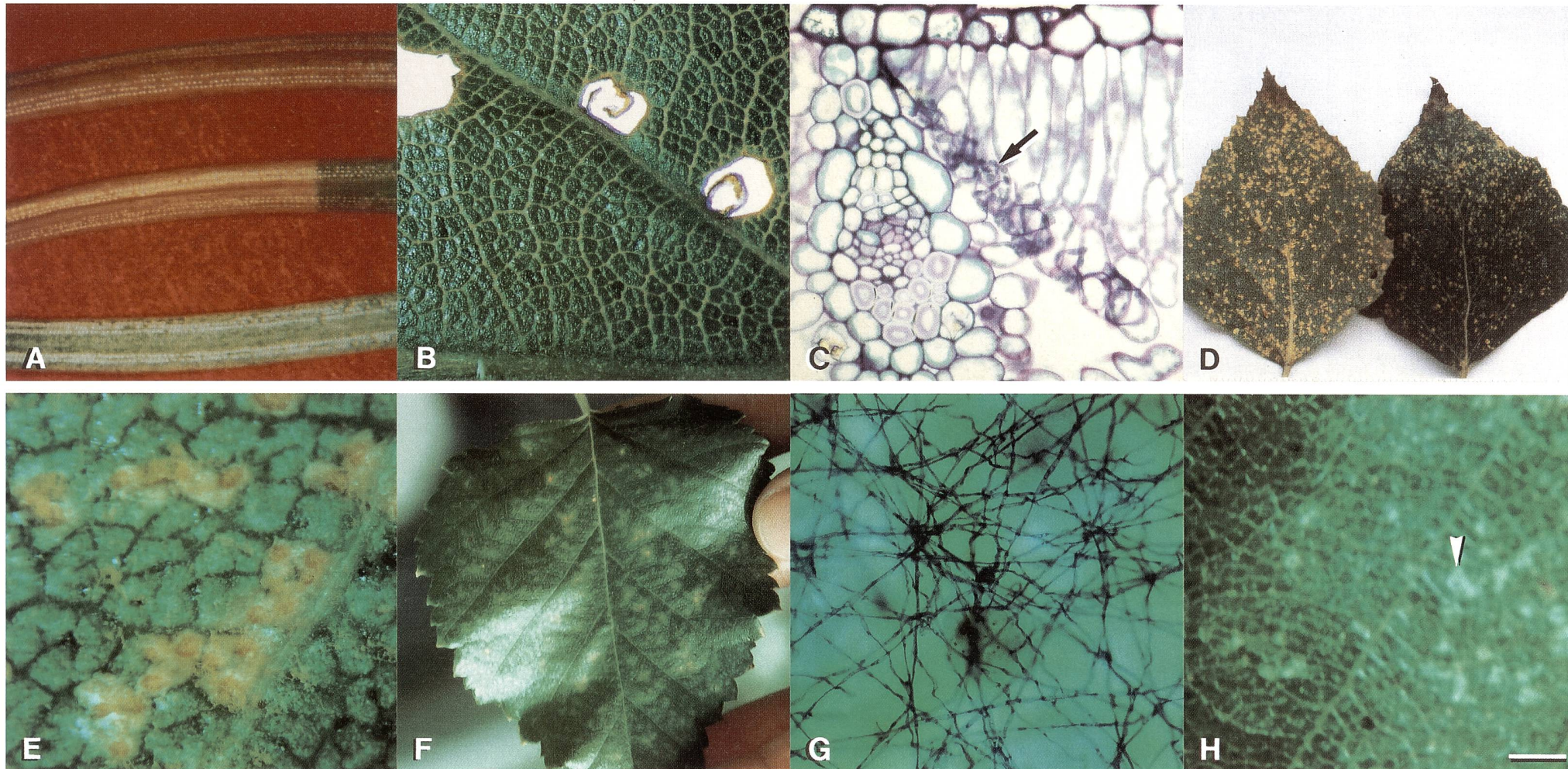
Pilzinfektionen zeigen ihre Herkunft oft erst mit der Bildung von Fruchtkörpern (Farbtafel 3D und E), während der Ursprung vorausgehender Verfärbungen im Blatt nur mikroskopisch als Hyphengeflecht nachgewiesen werden kann. Die Pilzart ist jedoch in diesem Stadium selten bestimmbar (Farbtafel 3F und G). Insekten sind meistens als Tiere erkennbar oder hinterlassen Kot, Larvenhäute oder andere typische Hinweise. Bei kleinen Blattsaugern, wie den Zikaden, welche auf der Blattunterseite wenig beachtet werden und bei der kleinsten Erschütterung fliehen, sind die schneeweissen klar begrenzten Punkte auf Blättern und Nadeln charakteristisch (Farbtafel 3H). Spinnmilbenschäden (Farbtafel 4A) können mit schwachen Ozonsymptomen (Farbtafel 4B) verwechselt werden. Mit einer Lupe erkennen wir die Spinnmilbeneier (Farbtafel 4C) oder im Falle von Ozonschädigung einzelne nekrotische (schwarze) Zellgruppen (Farbtafel 4D). Die Spinnmilben hinterlassen beim Einstechen winzige Lipoproteidtröpfchen, welche im Lichtmikroskop blau angefärbt die Einstiche zeigen (Farbtafel 4E). Erst im rasterelektronenmikroskopischen Bild erkennt man, wie klein diese Markierungen, Einstichlöchlein und Spinnfäden im Verhältnis zu einer Spaltöffnung sind (Farbtafel 4F).

## Ozonsymptome

Eine heutige Herausforderung ist es, Ozonsymptome (durch Ozon hervorgerufene Blattsymptome) zu erkennen und von anderen Einflüssen, wie sie oben genannt wurden, zu unterscheiden. Seit den Achtzigerjahren wurde an der WSL der Einfluss von erhöhten Ozonkonzentrationen auf Waldbäume mit derjenigen der Aussenluft und der Kontrolle (gefilterter Aussenluft) in Freilandkammern untersucht (LANDOLT und LÜTHY-KRAUSE 1991). Ozonsymptome erscheinen an Blättern von Laubbäumen zwei Wochen bis zwei Monate nach dem Austreiben bei ozonreichen (Stundenmittelwerte > 120 · g/m<sup>3</sup>) Schönwetterperioden. Dies ist häufig auf der Alpensüdseite der Fall, dort wurden deshalb in den letzten Jahren Ozonsymptome an vielen Baum- und Straucharten beobachtet (SKELLY *et al.* 1999) und in Freilandkammern getestet (Aussenluft verglichen mit gefilterter Luft). Im Gegensatz zu Kräutern nehmen die

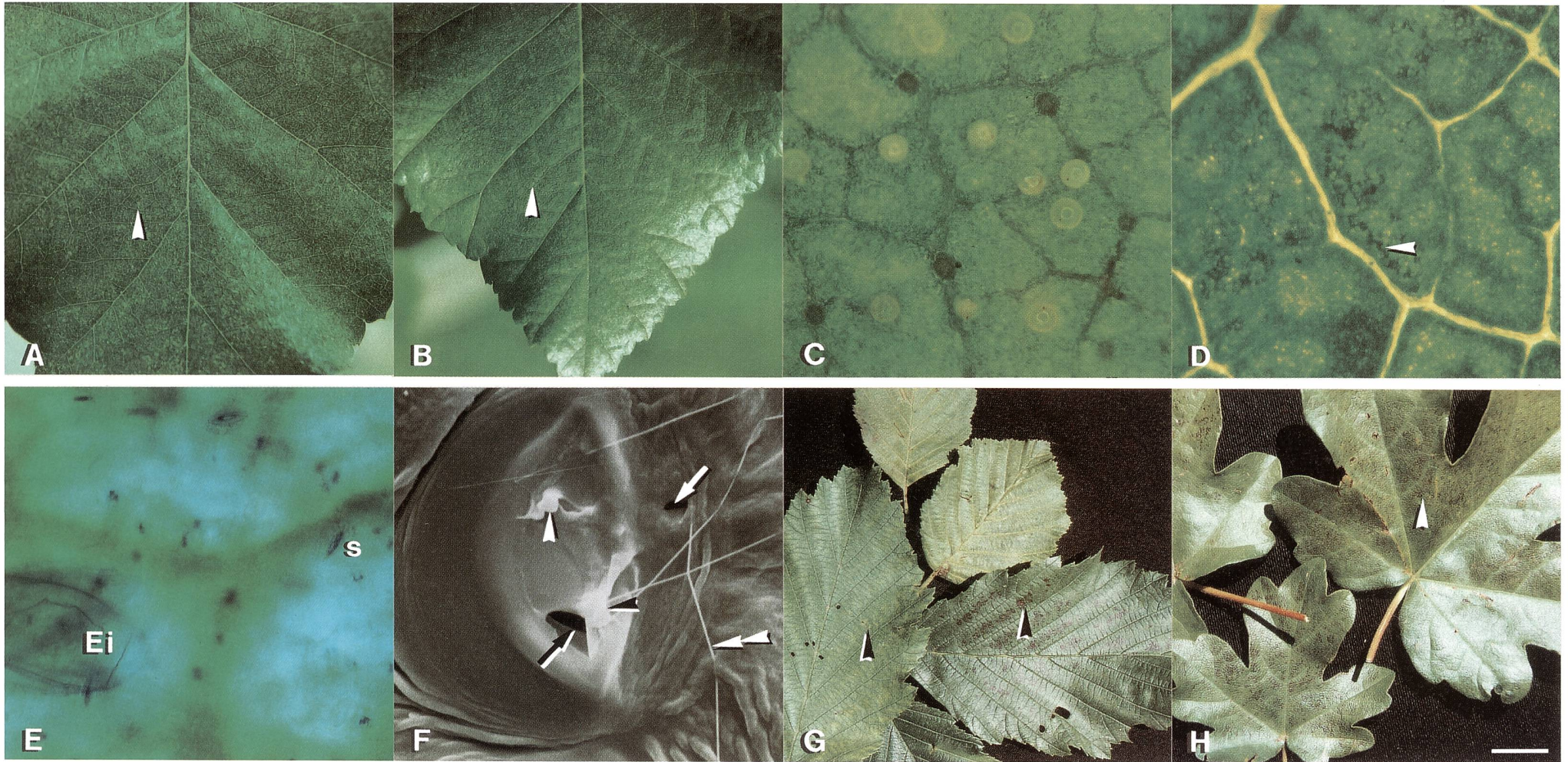


**Abbildung 5:** Anzahl der Holzpflanzen mit Ozonsymptomen an fünf Schweizer Standorten, Aufnahme vom 5. bis 8. September 2000. Novaggio, TI, 1088 m ü.M. Bettlachstock, SO, 1076 m ü.M. Othmarsingen, AG, 460 m ü.M. Schänis, SG, 640 m ü.M., Vorderwald, AG, 480 m ü.M.



**Farbtafel 3:** Klimatische und biotische Bioindikationen auf Blättern (Freilandproben).

- A) Durch Frost abgestorbene Nadelteile (braun) am jüngsten Nadeljahrgang mit scharfer Grenze zum astnahen, ungeschädigten Nadelteil. Nesslau SG 1987.  
 B) Buchenblatt unter der Lupe mit Hagellöchern. Niederurnen 1997. Messbalken = 1.25 mm.  
 C) Querschnitt durch ein Buchenblatt mit «Hagel-Durchschuss» (→), Blaufärbung mit Toluidinblau, LM, Messbalken = 21 µm.  
 D) Birkenblatt mit Birkenrostinfektion (*Melampsorium betulinum* [Persoon] Klebahn).  
 E) Uredosporenlager (gelb-orange) des Birkenrosts, unter der Lupe betrachtet. Messbalken = 0.8 mm.  
 F) Birkenblatt mit durch Pilzinfektion verursachter Vergilbung.  
 G) Birkenblatt mit Hyphen diverser Pilze, angefärbt mit Lactophenol. LM, Messbalken = 52 µm.  
 H) Birkenblatt mit weissen, begrenzten Saugstellen (▶) der Kleinzikade (*Linnavuoriana decempunctata*) unter der Lupe betrachtet. Messbalken = 0.8 mm.



Farbtafel 4: Spinnmilben und Ozon (Freilandproben).

- A) Birkenblatt: hellgrüne Punkte (▶) bei schwachem Spinnmilbenbefall.  
 B) Birkenblatt: diffuse hellgrüne (▶) oder bräunliche Punkte bei schwacher Schädigung durch Ozon.  
 C) Blattunterseite des Blattes A): dunkelgelb = Drüsen der Blattepidermis, hellgelb = Spinnmilbeneier. Mit der Lupe betrachtet, Messbalken = 1 mm.  
 D) Blattoberseite des Blattes B): grau-schwarze Zellgruppen (▶) sind geschädigte Zellen durch Ozon. Mit der Lupe betrachtet, Messbalken = 0.8 mm.  
 E) Birkenblatt mit Spinnmilbenbefall. Lipoproteidtröpfchen (blau gefärbt mit Lactophenol) markieren die Einstichstellen, s = Spalt einer Spaltöffnung, Ei = leere Eihülle. LM, Messbalken = 52 µm.  
 F) Spaltöffnung auf der Blattunterseite mit Einstichstellen (→), Lipoproteidtröpfchen (▶) und Spinnfäden (▶▶). REM, Messbalken = 52 µm.  
 G) Verschieden fortgeschrittene (▶ von hellgrünen Punkten bis braunen, nekrotischen Punkten) Ozonsymptome auf Grau-Erlenblättern (*Alnus incana* [L.] Moench), im August 2000.  
 H) Ozonsymptome (▶ braun-nekrotische Punkte) auf Feld-Ahorn (*Acer campestre* L.), im August 2000.

Bäume auch in der Dämmerung und nachts Ozon auf; Schädigungen an Blättern treten jedoch im Schweizer Mittelland nicht regelmässig auf (GÜNTHARDT-GOERG *et al.* 1996a). Wenn erste Symptome nach einem kühlen Juni bzw. Juli erst im August erscheinen, so werden die ausgeprägten Nekrosepunkte im August und September als frühe Herbstverfärbung hingenommen. Im Jahr 2000 führte die Schönwetterperiode im Frühsommer an vielen Orten zu gut erkennbaren Blattsymptomen an Laubbäumen und Sträuchern (*Abbildung 5*).

Erste Symptome auf Blättern sind diffuse hellgrüne (*Farbtafel 4B*) oder je nach Pflanzenart gelbliche oder rötliche Punkte in den Feldern zwischen den Blattnerven. Es ist noch nicht bekannt, wann keine Regeneration mehr stattfinden kann und ab welchem Stadium sich erste sichtbare Symptome auch weiterentwickeln, wenn keine Ozon- bzw. Schönwetterperioden mehr folgen. Die Punkte werden mit der Zeit gelblich, rot und schliesslich braun oder schwarz, d.h. nekrotisch (*Farbtafeln 4G und H*). Die Partien entlang der Blattnerven bleiben oft am längsten grün (im Gegensatz zu Schädigungen durch Schwermetalle). Am häufigsten findet man Ozonsymptome an lichtexponierten Ästen und Blättern und normalerweise nur auf der Blattoberseite. Ein gutes Erkennungsmerkmal ist der «Schatteneffekt», d.h. das Fehlen von Ozonsymptomen auf Blatteilen, welche von einem anderen Blatt dicht überdeckt sind. *Farbtafel 5B* zeigt den grünen Blattteil auf dem unteren Blatt, weil das obere Blatt (*Farbtafel 5A*) entfernt wurde. Je nach Pflanzenart äussern sich erste Ozonsymptome als bronzefarbige Verfärbung (*Farbtafel 5C*), welche sich später zu braunen Nekrosepunkten entwickelt. Die Symptome entwickeln sich mit zunehmender Ozondosis (Konzentration mal Zeit), sie sind deshalb stärker ausgeprägt an älteren Blättern. Manchmal können an Ästen, welche über den Sommer stets neue Blätter bilden, die Ozonperioden «abgelesen» werden (*Farbtafel 5D*). Suboptimale Ernährung oder Trockenheit verstärken oder verhüten keine Schädigungen durch Ozon, ausser, wenn sie zum Schliessen der Spaltöffnungen führen und dadurch die Aufnahme von Ozon verringern.

Bei Koniferennadeln, sind Ozonschädigungen von Auge erst sichtbar, wenn die Zellen im Nadelinnern schon tot sind. Eine hellere Nadelfarbe entsteht in besonnten Zweigen auf der Zweigoberseite und Nadeloberseite (*Farbtafeln 5E und F*). Erst im folgenden Jahr entstehen typische diffuse helle Bänder, welche von geübtem Auge sichtbar sind, auf den Nadeln (*Farbtafeln 5G und H*). Diese vorjährigen Nadeln fallen früher ab als ungeschädigte.

Laut neuesten Berichten (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE [IPCC], Shanghai, 20.1.2001) wird mit einer Verdreifachung der Ozonkonzentration auf der nördlichen Erdhalbkugel im Laufe des 21. Jahrhunderts gerechnet, vor allem wegen den stets zunehmenden Vorläufersubstanzen (Stickoxide, Kohlenwasserstoffe) in asiatischen Ländern und der grossräumigen Verfrachtung von Luftmassen. In Europa häufen sich die Beobachtungen von Ozonschädigungen insbesondere in Südeuropa (SKELLY *et al.* 1999). Die Ozonsymptome sollen deshalb im Rahmen des International Co-operation Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests (UN/ECE ICP-Forest) ab 2001 im Beobachtungsnetz der Standorte mit intensiver Beobachtung aufgenommen werden. In diesem Kontext ist die Eidg. Forschungsanstalt WSL (CH-8903 Birmensdorf) für die Differentialdiagnose von zunehmenden Ozonsymptomen an Blättern und Nadeln von Bäumen und Sträuchern gewappnet. Das Regional Co-Ordination Centre, Validation and Quality control for Ozone Injury für Zentraleuropa wird an der WSL aufgebaut.

Um Ihr allgemeines Wissen über Ozon spielerisch zu testen, klicken Sie auf «Ozonquiz»: <http://www.wsl.ch/forest/products/ozone>.

## Zusammenfassung

Wenn Umwelteinflüsse das Mass der möglichen Anpassung, Entgiftung und Reparatur überschreiten, tragen die Zellen, Gewebe, Organe und schliesslich die ganzen Pflanzen Schädigungen davon. Letzere werden zu Bioindikationen, wenn sie uns Hinweise auf die Art und Dauer der einwirkenden Stressfaktoren geben. Anhand vieler Beispiele werden hier Reaktionen von Zellen, Geweben, Organen und ganzen Bäumen auf Umweltstress in Wort und Bild gezeigt. Die Kenntnis solcher Reaktionen nützen uns für die Differentialdiagnose, um Schadsymptome durch Nährstoffungleichgewichte, Trockenstress, Frost, Hagel, Insekten, Pilz- und Milbeninfektionen, oder Ozon zu unterscheiden und ihre Wirkung auf die Bäume abzuschätzen.

## Summary

### Diagnosis of environmental stress on trees

If environmental stress exceeds the potential of acclimation, detoxification and reparation, then the cells, tissues, organs and entire plants suffer injury. The latter serves as a bioindication, when it indicates the nature and duration of the stress factor. Exemplary reactions of cells, tissues, organs and entire trees to environmental stress are presented here in words and pictures. The knowledge of such reactions can be used for a differential diagnosis to determine whether the injury is by nutrient imbalance, drought stress, frost, hail, insects, fungus and mite infections or ozone and to estimate their influence.

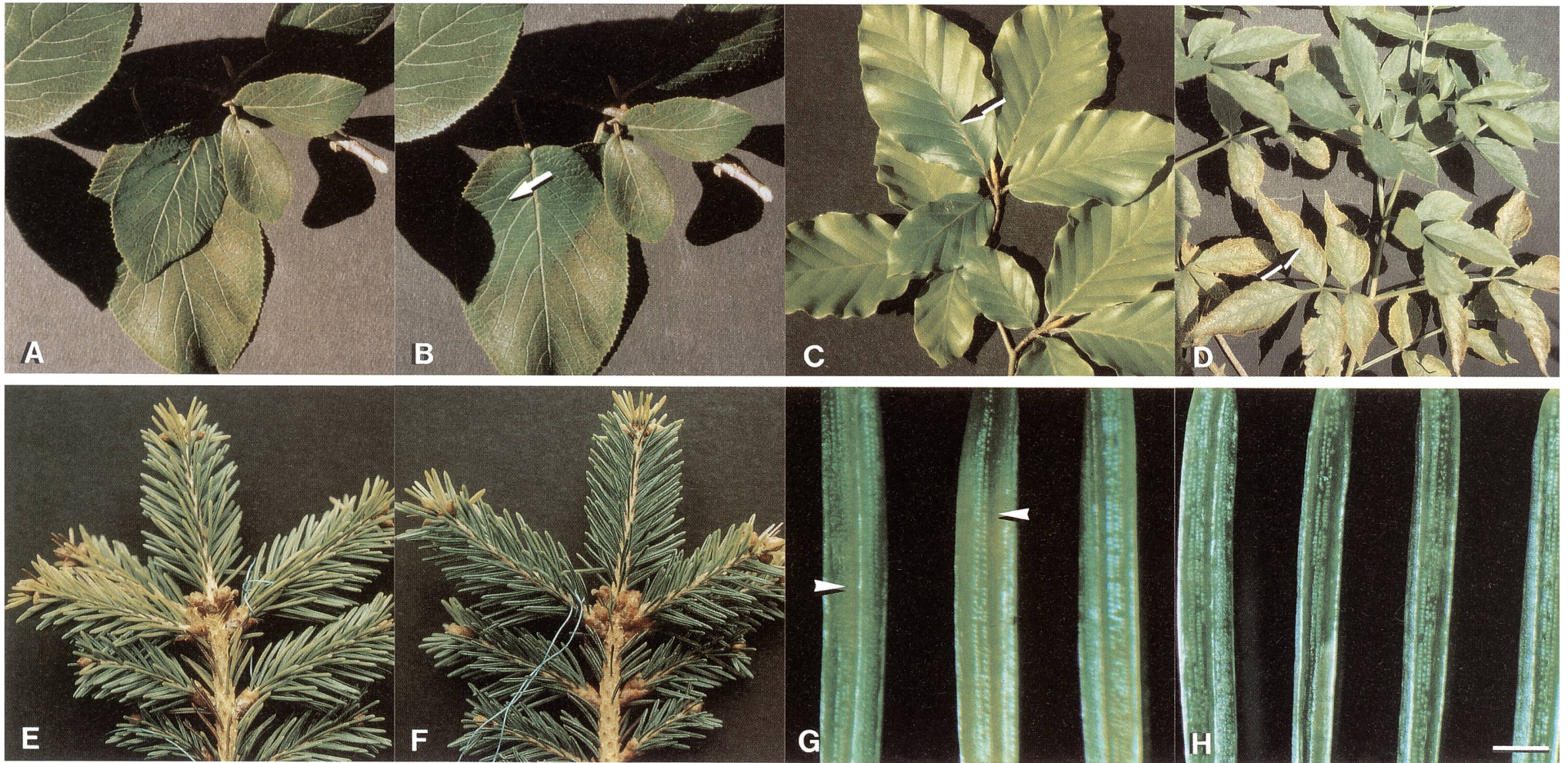
## Résumé

### Analyse diagnostique du stress environnemental chez les arbres

Quand les stress environnementaux excèdent leurs capacités d'adaptation, de détoxification et de réparation, les arbres subissent des dégâts au niveau de leurs cellules, de leurs tissus, de leurs organes et finalement au niveau de la plante toute entière. Les symptômes qui apparaissent constituent aussi des bioindications quand leur morphologie nous renseigne sur la nature et la durée du stress environnemental qui en est à l'origine. Dans le présent article, les réactions des arbres à différents niveaux sont décrites et illustrées avec de nombreux exemples de symptômes micro- et macroscopiques. De telles connaissances sont utiles en vue du diagnostic différentiel des stress induits par des agents tels que des carences nutritionnelles, un stress hydrique, du gel, de la grêle, des infections parasitaires par des champignons, des acariens et des insectes ou un stress oxydant causé par l'ozone.

## Literaturverzeichnis

- BRUNOLD, C., RÜEGSEGGER, A. und BRÄNDLE, R. (1996): Stress bei Pflanzen. Verlag Haupt, Bern, Stuttgart, Wien, 407 S.
- GOODMAN, R.N., POLITIS, D.J. and WHITE, J.A. (1977): Ultrastructural evidence of an «active» immobilization process of incompatible bacteria in tobacco leaf tissue: a resistance reaction. In: SOLHEIM, B. and RAA, J. (eds.): Cell wall biochemistry related to specificity in host-plant pathogen interactions. Scandinavian University Books, Tromsø, Oslo, Bergen, 423–438.
- GÜNTHARDT-GOERG, M.S., MATYSSEK, R., SCHEIDEGGER, C. and KELLER, T. (1993): Differentiation and structural decline in the leaves and bark of birch (*Betula pendula*) under low ozone concentrations. *Trees* 7, 104–114.
- GÜNTHARDT-GOERG, M.S., LANDOLT, W. und BUCHER, J.B. (1996a): Wie wirkt Ozon auf Waldbäume? *Wald und Holz* 77/3, 16–19.



Farbtafel 5: Ozonsymptome auf Blättern und Nadeln:

- A) Blätter von Schneeball (*Viburnum lantanum* L.) mit bräunlichen Punkten durch Ozon. Bettlachstock, 1076 m ü. M., 8.9.2000.  
 B) Dieselben Blätter wie A), das oberste entfernt. Der vorher überdeckte Blatteil des unteren Blattes ist grün ohne Symptome (→ Schatteneffekt, typisch für Ozon)  
 C) Buche, Birmensdorf 19.7.2000, erste Ozonsymptome = hellgrün-bronzefarbige Blattverfärbung auf besonnten Blattstellen (→ Schatteneffekt wie bei B)).  
 D) Schwarzer Hollunder (*Sambucus nigra* L.), 11.8.2000, die im Frühsommer ausgetriebenen Blätter zeigen starke Ozonsymptome (▶ braune Punkte vom Blattrand her), die später bei schlechtem Wetter mit wenig Ozon gebildeten Blätter sind grün.  
 E) Fichte Zweigoberseite mit Ozonsymptomen (Vergilbung), Experiment 1999 = *Abbildung 3*, Ozondosis AOT 40 = 18 ppmh.  
 F) Derselbe Zweig wie E), Unterseite ohne Vergilbung.  
 G) Juni 2000, vorjährige Nadeln mit diffusen hellgrünen Punkten (▶) der Fichten aus der Ozonbehandlung (=E) im Vorjahr. Betrachtet mit der Lupe, Messbalken = 1 mm.  
 H) Juni 2000, grüne vorjährige Nadeln der Fichten aus der Kontrollbehandlung mit einer minimalen Ozonkonzentration im Vorjahr (Hintergrundkonzentration von 40 µg/m<sup>3</sup>).

- GÜNTHARDT-GOERG, M.S., SCHMUTZ, P., MATYSSEK, R. and BUCHER, J.B. (1996b): Leaf and stem structure of poplar (*Populus x euramericana*) as influenced by O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, their combination and different soil N supplies. *Can. J. For. Res.* 26, 649–657.
- GÜNTHARDT-GOERG, M.S., McQUATTIE, C.M., SCHEIDEGGER, C., MATYSSEK, R. and RHINER, C. (1997): Ozone-induced cytochemical and ultrastructural changes in the leaf mesophyll cell wall. *Can. J. For. Res.* 27, 453–463.
- GÜNTHARDT-GOERG, M.S., McQUATTIE, C.J., MAURER, S. and FREY, B. (2000a): Visible and microscopical injury in leaves of five deciduous tree species related to current critical ozone levels. *Environ. Pollut.* 109: 3, 489–500.
- GÜNTHARDT-GOERG, M.S., VOLLENWEIDER, P. und EGLI, P. (2000b): Sichtbare Reaktionen auf Ozon und/oder Schwermetalle bei Pflanzen. Schriftenreihe KRDL (Kommission Reinhaltung der Luft) 32, 349–354.
- HARTMANN, G., NIENHAUS, F. und BUTIN, H. (1995): Farbatlas Waldschäden. Diagnose von Baumkrankheiten. 2., erweiterte und überarbeitete Auflage, Ulmer, Stuttgart, 288 S.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), Shanghai, 20.1.2001, [www.ipcc.ch/press/pr.htm](http://www.ipcc.ch/press/pr.htm)
- LANDOLT, W. und LÜTHY-KRAUSE, B. (1991): Wirkungen umweltrelevanter Ozon-Konzentrationen auf verschiedene Pflanzen. In: STARK, M. (Hrsg.): Lufthaushalt, Luftverschmutzung und Waldschäden in der Schweiz. Bd. 5, Luftschadstoffe und Wald. Verlag der Fachvereine Zürich, 127–134.
- POLLE, A., MATYSSEK, R., GÜNTHARDT-GOERG, M.S. and MAURER, S. (2000): Defence strategies against ozone in trees: the role of nutrition. In: AGRAWAL, S.B. and AGRAWAL, M. (eds.): *Environmental Pollution and Plant Responses*. Lewis Publishers, Boca Raton, London, New York, Washington D.C., 223–245.
- SKELLY, J.M., INNES, J.L., SAVAGE, J.E., SNYDER, K.R., VANDERHEYDEN, D., ZHANG, J. and SANZ, J.M. (1999): Observation and confirmation of foliar ozone symptoms of native plant species of Switzerland and southern Spain. *Water, Air, and Soil Pollution* 116, 227–234.

Die Farbbildungen wurden mit finanzieller Unterstützung der Eidg. Forschungsanstalt WSL gedruckt.

**Autoren:**

Dr. MADELEINE SILVIA GÜNTHARDT-GOERG und Dr. PIERRE VOLLENWEIDER,  
Eidg. Forschungsanstalt WSL, Zürcherstr. 111, CH-8903 Birmensdorf  
Tel. 739 22 76, Fax. 739 22 54, E-Mail [goerg@wsl.ch](mailto:goerg@wsl.ch) und [vollenwe@wsl.ch](mailto:vollenwe@wsl.ch)  
<http://www.wsl.ch/forest/wus/bioindic/bioin-de.htm>