

# Luftverschmutzung und floristische Biodiversität\*

Anton GRUB, Patrick BUNGENER, François CONTAT, Stefan NUSSBAUM, Verena ENDTNER und Jürg FUHRER, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau (FAL) - Institut für Umweltschutz und Landwirtschaft (IUL), Liebefeld, CH-3003 Bern

**Immer häufiger wird von negativen Auswirkungen der Luftverschmutzung auf die Biodiversität berichtet. Die Immissionen von Stickstoff sowie bodennahes Ozon scheinen die wichtigsten Luftschadstoffe zu sein, welche die floristische Artenvielfalt beeinträchtigen. In Liebefeld durchgeführte Untersuchungen mit Ozon weisen darauf hin, dass der Verlust der botanischen Vielfalt von Naturwiesen aufgrund der hohen Empfindlichkeit einzelner Arten möglich ist. Zusätzliche Untersuchungen sind notwendig, um die kritischen Ozonbelastungen bestimmen zu können, die einzuhalten sind, um die floristische Biodiversität von Naturwiesen zu bewahren.**

Eine Population ein und derselben Pflanzenart zeichnet sich durch eine natürliche Variabilität aller charakteristischen Merkmale aus. Diese artspezifische biologische Vielfalt ist die Grundvoraussetzung für die Anpassungsfähigkeit einer Population an ändernde Umweltbedingungen. Der Begriff Biodiversität, der seit dem Erdgipfel von Rio 1992 in die breite Öffentlichkeit Eingang gefunden hat, beginnt auf der Stufe der genetischen Unterschiede zwischen den Individuen einer Art und reicht bis zur Artenvielfalt von Pflanzengemeinschaften und ganzen Ökosystemen. Die Biodiversität ist heute weltweit gefährdet. Als Hauptgrund sind die Veränderungen in der Bodennutzung anzuführen, deren Ausmasse die Anpassungsfähigkeit der Pflanzen übersteigen. Die Luftverschmutzung ist ein weiterer, zusätzlicher Stressfaktor, der einen Selektionsdruck auf Pflanzenpopulationen ausübt. Die genetischen Unterschiede führen zu artspezifisch differenzierten Reaktionen (Abwehrmechanismen) gegen die Stressfaktoren mit entsprechenden Auswirkungen auf die zwischenartlichen Konkurrenzverhältnisse. Aber auch innerhalb einer Art findet eine Selektion nach Schadstoffresistenz statt. Dies belegen Beobachtungen seit den 70-iger Jahren an Pflanzenpopulationen, die Schwermetallen oder Luftschadstoffen wie Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ) ausgesetzt waren. Deren Resistenz gegenüber den Schadstoffen war höher als bei Populationen ohne Schadstoffstress. Seither wurden ähnliche Beobachtungen mit weiteren Schadstoffen bestätigt.

\*Übersetzung: Annelies Bracher-Jakob, Neyruz

## Fluor schädigt Bodenfauna, Pflanzen und Nagetiere

In der Schweiz ist das atmosphärische Fluor in erster Linie auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen. Der Hauptanteil der Fluorverbindungen, die in gewissen Landstrichen auftreten, stammt aus der elektrolytischen Aluminiumherstellung und in geringerem Umfang von Kehrlichtverbrennungsanlagen, Phosphatdüngerefabriken, Zementfabriken und der Glasindustrie.

Im Boden liegt Fluor als Fluorsalz verbunden mit Alkali- und Erdalkalimetallen vor. Der Oberboden in kontaminierten Regionen weist in der Regel höhere Fluorgehalte als der Unterboden auf. Der Einfluss auf den Fluorgehalt von Futtergräsern ist nach Contat *et al.* (1994) nicht signifikant. Buchen- und Fichtenpflanzen hingegen, die auf belasteten Böden wuchsen, enthielten geringfügig mehr Fluor als Pflanzen nicht kontaminierter Böden (Keller *et al.* 1995). Auch wenn gewisse Pflanzen nicht oder nur wenig durch das im Boden vorhandene Fluor kontaminiert werden, kann es sich andererseits in der Bodenfauna (Insekten und Mikroorganismen) beträchtlich anreichern. Für die Laufkäfer, zum Beispiel, kann Fluor die Struktur der Artengemeinschaft verändern und gewisse Arten auf Kosten anderer bevorzugen. Die Empfindlichkeit der Pflanzen gegenüber atmosphärischem Fluor ist sehr variabel und hängt von zahlreichen Faktoren ab, wie Belastungsdosis, Pflanzenart, Sorte, Pflanzenmorphologie (Spaltöffnungen, Behaarung, Alter), Klimafaktoren und weiteren Luftschadstoffen ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_3$ ). Empfindliche Pflanzen werden schon

ab  $0,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  stark geschädigt (Chlorosen). In einem Industriegebiet bewegen sich die Werte zwischen  $0,5 - 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und erreichen Spitzen von  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in unmittelbarer Nähe der Verschmutzungsquelle. Die beobachteten zytogenetischen Effekte (Mutationen, Chromosomenschädigung) konnten mit den Fluorgehalten im Pflanzengewebe in Verbindung gebracht werden. Bei gewissen Pflanzenarten hat das vegetative Wachstum auf Kosten der generativen Vermehrung zugenommen. Empfindliche und stark chlorosegeschädigte Pflanzen verschwinden auf diese Weise, wodurch die botanische Zusammensetzung der Vegetation verändert wird.

Walton (1987) hat in der Nachbarschaft einer Aluminiumfabrik verschiedene Kleinsäuger gefangen: Wühlmäuse (*Microtus agrestis*), Waldmäuse (*Apodemus sylvaticus*), Maulwürfe (*Talpa europaea*) und Spitzmäuse (*Sorex araneus*). In ihren Skeletten wurden Fluorgehalte von über  $15'000 \text{ ppm}$  gemessen, während die Knochen von Vergleichstieren im Mittel  $168 \text{ ppm}$  Fluor enthielten. Das Gebiss der in der Werknähe gefangenen Tiere war schwer geschädigt (Läsionen). Gerade bei Nagetieren verkürzt ein angeschlagenes Gebiss die Lebenserwartung drastisch.

## Stickstoff-Eintrag aus der Luft beträchtlich

Die Stickstoffemissionen ( $\text{NO}_x$  und  $\text{NH}_3$ ) haben seit den 50-iger Jahren beträchtlich zugenommen. Der Gesamtausstoss an  $\text{NH}_3$  stieg in der Schweiz zwischen 1950 und 1990 von  $40'000 \text{ t N}$  auf  $52'600 \text{ t N/Jahr}$  an und die  $\text{NO}_x$  kletterten von  $16'400 \text{ t N}$  auf  $60'000 \text{ t N/Jahr}$  (Stadelmann 1992). Hauptverursacher ist im Falle des Ammoniaks ( $\text{NH}_3$ ) die Landwirtschaft, während die  $\text{NO}_x$  in erster Linie von Verkehr und Industrie ausgestossen werden. Pro Jahr belüftet sich in der Schweiz der durchschnittliche N-Eintrag aus der Luft auf  $23 \text{ kg N pro ha}$  mit Maximalwerten um  $60$  bis  $70 \text{ kg N}$  (Nefel *et al.* 1994).  $60\%$  des N-

Eintrages geht zu 3/5 auf das Konto der Ammoniakemissionen und zu 2/5 auf die Stickoxide aus dem Strassenverkehr, der Industrie und der Haushalte. Diese N-Einträge bedeuten für die Agrarökosysteme eine Zusatzversorgung mit dem für das Pflanzenwachstum wichtigsten Nährstoff. Andererseits belastet der Stickstoff empfindliche Ökosysteme wie Wald, Moore und Magerwiesen, wenn der kritische Schwellenwert (5 bis 35 kg N/ha, Jahr) überschritten wird (Bobbink *et al.* 1996). Das N-Überangebot bringt die Nährstoffversorgung aus dem Gleichgewicht (Eutrophierung) und führt zu einer Bodenversauerung. Zudem können Vergiftungssymptome oder eine erhöhte Anfälligkeit der Pflanzen gegenüber Krankheiten, Schädlingen und Stoffwechselstörungen auftreten. Verschiedene niederländische Untersuchungen haben gezeigt, dass eine N-Gabe von 100 kg/ha pro Jahr auf Magerwiesen und kalkhaltigem Boden eine rasche Abnahme der Artenzahl bewirkt hat (Bobbink 1991; Willems *et al.* 1993). Die seltenen und bedrohten Arten wurden durch das übermässige Wachstum der Gräser, welche die vertikale Bestandesstruktur veränderten, unterdrückt. In die gleiche Richtung weisen die Ergebnisse der Untersuchung einer Alpweide im Simmental (Baumberger *et al.* 1996). Über die Auswirkungen der Stickstoff-Immissionen auf die Biodiversität der Fauna sind wenig Angaben verfügbar, aber man weiss mit einiger Sicherheit, dass mit abnehmender pflanzlicher Artenvielfalt auch die Fauna verarmt. Bobbink *et al.* (1992) führen die Verarmung der pflanzlichen Vielfalt vorab auf die Eutrophierung zurück. In den ansonst N-armen Ökosystemen hat die Stickstoffzufuhr die botanische Zusammensetzung allmählich verschoben, um den N-liebenden Pflanzen Platz zu machen.

### Ozon, Schadgas und Risikofaktor

Seine pflanzentoxische Wirkung, die räumliche Verteilung und das Auftreten gerade während der Vegetationsperiode machen aus dem bodennahen Ozon ein Schadgas, dem die Vegetation in besonderem Mass ausgesetzt ist. In verschiedenen Arbeiten wurde die Ozonempfindlichkeit zahlreicher Pflanzenarten in Klimakammern oder Feldversuchen untersucht. Als Beurteilungskriterien dienen häufig die sichtbaren Schädigungen oder Veränderungen im Wachstum. Daneben wurden auch Effekte auf die Blütenstand- und

Kornbildung nachgewiesen. Diese Schadsymptome fallen bei einjährigen Pflanzen mit schwach ausgeprägter vegetativer Vermehrung besonders stark ins Gewicht. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus der Begasungsanlage mit nach oben offenen Begasungskammern (Open Top Chamber = OTC) auf die Freilandbedingungen einer Wiese wird verschiedentlich in Frage gestellt. Gleiches gilt für die ausgewählten, biologischen Kriterien für die Bestimmung der Ozonwirkung, die zeitabhängige Beziehung zwischen den Ozonepisoden und den jeweiligen Entwicklungsstadien der Pflanzen und die Beobachtungsdauer. Denn je nach angewendetem Versuchsprotokoll kann die gleiche Pflanze verschiedenen Empfindlichkeitsklassen zugeordnet werden. Trotz dieser Schwierigkeiten lassen gewisse Befunde den Schluss zu, dass in einer Pflanzengemeinschaft die empfindlichen Individuen von den ozontoleranten Pflanzen verdrängt werden könnten. Die begründete Annahme konnte experimentell bestätigt werden (Fuhrer 1997). In einer Kunstwiese verschob sich mit zunehmender, chronischer Ozondosis das Klee-Gras-Verhältnis zugunsten des Gräseranteils und im Verfahren mit der höchsten Ozonbelastung ist der Klee praktisch verschwunden (Fuhrer *et al.* 1994). Da die Gräser vom Kleerückgang profitieren konnten, gab es nur eine geringfügige Än-

derung im Gesamtertrag. Im weiteren zeigte der Versuch, dass die überlebenden Pflanzen nach einer Reduktion der Ozonbelastung immer noch vermehrungsfähig waren. In der Beurteilung der Ozonwirkung auf Pflanzengemeinschaften stösst man auf die Schwierigkeit, dass die innerartlichen Unterschiede in der Schadwirkung mitunter genau so gross sein können wie zwischen den Arten. Die innerartliche Variationsbreite in der Ozonempfindlichkeit könnte als Selektionskriterium benutzt werden: in einer dem Ozon ständig ausgesetzten Population würden empfindliche Genotypen allmählich verschwinden, womit sich eine zunehmende Ozonresistenz herausbilden könnte. Untersuchungen in England mit dem Breitwegerich (*Plantago major*) haben den Nachweis erbracht, dass diese Möglichkeit tatsächlich besteht (Reiling und Davidson 1992). Erste, entsprechende Hinweise gibt es auch in der Schweiz. So zeigte aus dem Tessin stammender gelber Acker-Klee (*Trifolium campestre*) nach einer Begasung weniger Schadsymptome als Ackerkleepflanzen einer Population des Mittellandes, wo eine geringere Ozonbelastung vorherrscht als im Tessin (Abb. 1, Endtner 1997). Beim gegenwärtigen Wissensstand ist es nicht möglich, die langfristigen Auswirkungen der Ozonbelastung auf die Pflanzengesellschaften und besonders auf deren botanische Zu-

Fortsetzung Seite 336

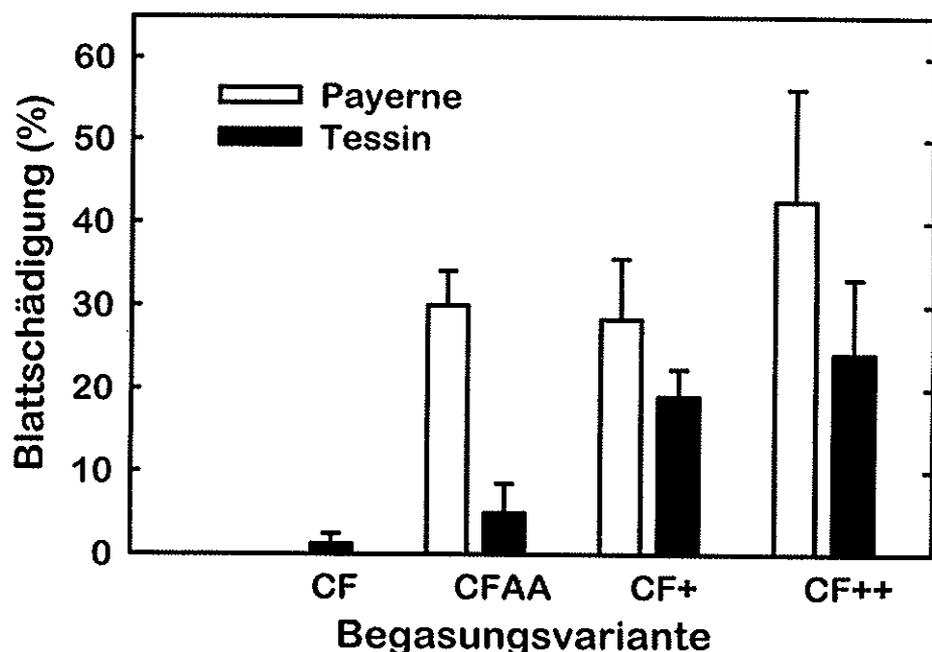


Abb. 1. Wirkung einer Ozonbelastung auf die Blattschäden (Verhältnis der nekrotisierten Blattfläche zur Blattgesamtfläche in %) zweier Populationen von gelbem Acker-Klee (*Trifolium campestre*). Versuchsverfahren: CF=Kontrollverfahren (charcoal filtered <40 ppbv O<sub>3</sub>); CFAA=Umgebungskonzentration; CF+=1,5-fache Umgebungskonzentration; CF++=2-fache Umgebungskonzentration während den Ozonepisoden und Umgebungskonzentration während der übrigen Expositionsdauer. Angegeben sind die Mittelwerte und Standardabweichungen von neun Wiederholungen, die während fünf Wochen dem Ozon ausgesetzt waren.

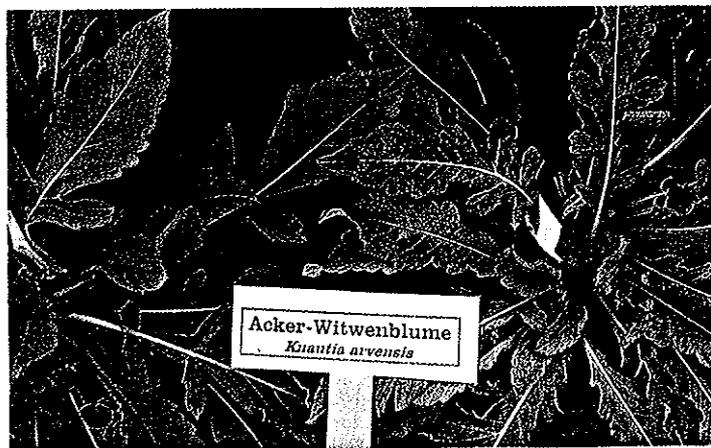
# Ozon- schäden

Versuche mit Begasungskammern in Liebefeld



▲ Aufnahme der zufällig angeordneten, 24 Pflanzenarten in einer der Begasungskammern (OTC).

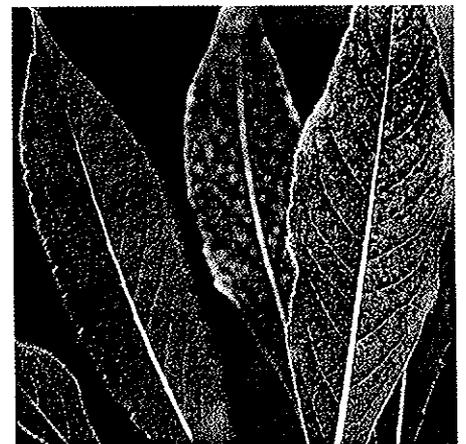
▼ Ozonbedingte Blattschäden an *Knautia arvensis* (Acker-Witwenblume). Typisches Schadbild einer «Anthocyanbildung» (links: Kontrollverfahren CF; rechts: Verfahren CF+ mit 1,5-facher Umgebungskonzentration).

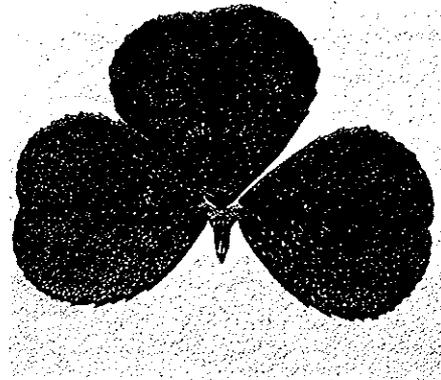
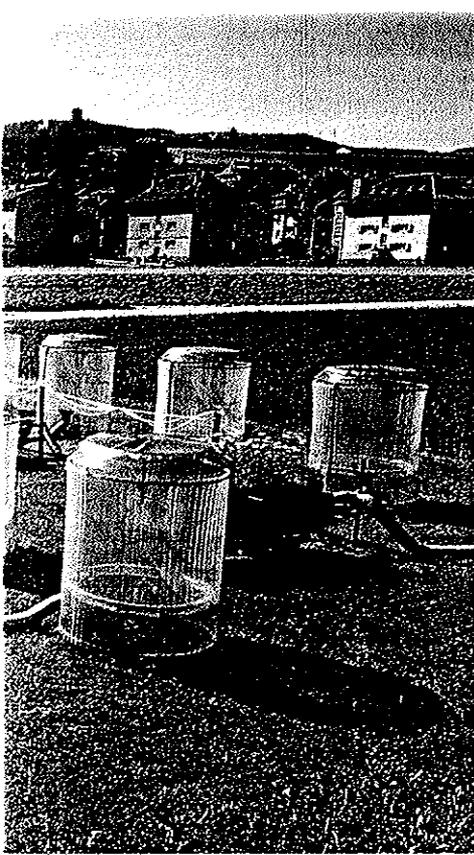


► Nahaufnahme der Blätter von *Knautia arvensis* mit einer Anthocyanverfärbung.



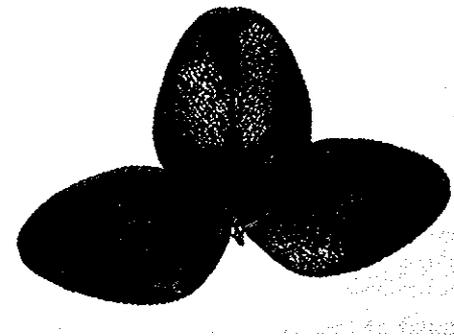
▲ Ozonbedingte Blattschäden an *Trisetum flavescens* (Goldhafer). Typisches Schadbild einer «vorzeitigen Vergilbung und Alterung» (links: Verfahren CF+ mit 1,5-facher Umgebungskonzentration; rechts: Kontrollverfahren CF = charcoal filtered).





◀ Ozonbedingte Blattschäden an *Trifolium repens* (Weissklee). Schadtyp «gelb-graue chlorotisierte Blattflecken».

▼ Ozonbedingte Blattschäden an *Trifolium pratense* (Rotklee). Schadtyp «braune nekrotische Blattflecken».

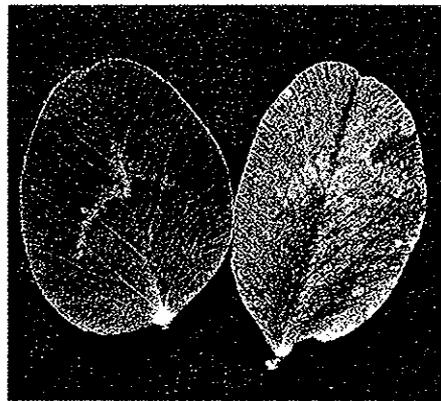


◀ Die Freilandbegasungsanlage in Liebefeld mit offenen Begasungskammern (OTC = Open Top Chamber).

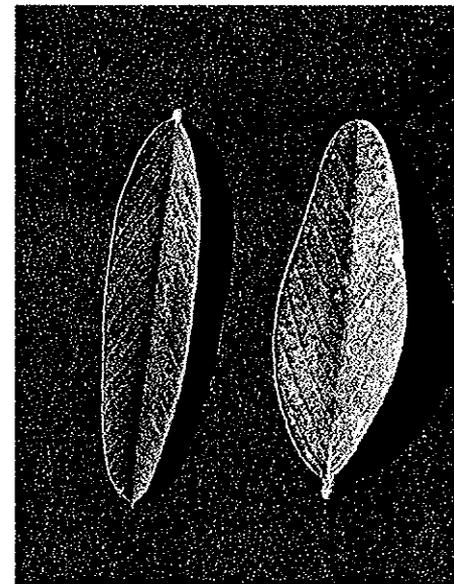
▼ Teilblatt von *Trifolium pratense* mit Ozonspezifischen Blattschäden. Schadtyp „braune nekrotische Blattflecken. Links: ein gesundes Teilblatt.



▼ Ozonbedingte Blattschäden an *Rumex obtusifolius* (stumpfbliättriger Ampfer = Blacke). Typisches Schadbild einer «Anthocyanbildung» (Links: Kontrollverfahren CF; rechts: Verfahren CF+ mit 1,5-facher Umgebungskonzentration).

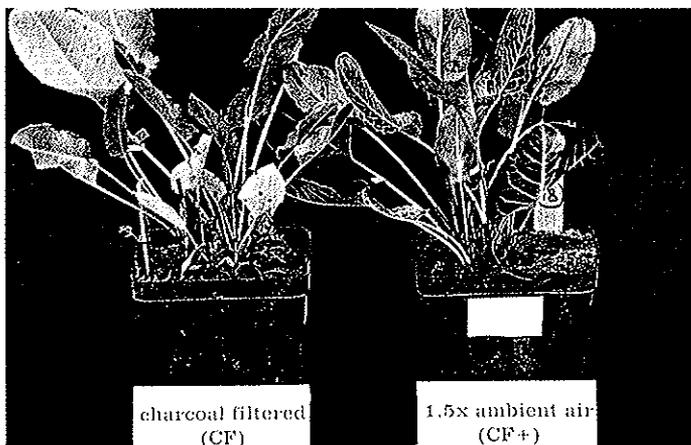


◀ Ozonbedingte Blattschäden an *Centaurea jacea* (Wiesenflockenblume). Typisches Schadbild einer «Anthocyanbildung» (Verfahren siehe gegenüberliegende Legende).



▲ Teilblatt von *Onobrychis sativa* (Espace) mit Ozon spezifischen Blattschäden. Schadtyp «braune nekrotische Flecken». Links: ein gesundes Teilblatt.

▼ Nahaufnahme der Blätter von *Rumex obtusifolius* mit einer Anthocyanverfärbung.



sammensetzung abschliessend zu beurteilen. Evolutionäre Anpassungsmechanismen könnten die anhand kurzdauernder Versuche gewonnenen Ergebnisse wieder in Frage stellen. Aus diesen Gründen wurde in Liebefeld ein langfristiger Versuch zur Bestimmung der Ozonempfindlichkeit verschiedener Wiesenpflanzen der Schweiz ins Leben gerufen. Dazu wird in einem laufenden Begasungsprojekt eine neue Technik (ohne offene Kammern) bei einer Naturwiese angewandt.

## Bestimmung der Ozonempfindlichkeit

Der Ozonversuch wurde als Split-plot Versuch in drei Blöcken angelegt, wobei Ozon der Hauptfaktor (4 Stufen) und das Wasserangebot (2 Verfahren) der Nebenfaktor ist. Somit wurde mit insgesamt 24 Begasungskammern (OTC) gearbeitet. Jede Kammer wurde mit 24 Pflanzen unterschiedlicher, für die Schweizer Naturwiesen repräsentativen Arten ausgestattet (Tab. 1). Alle Pflanzen unterlagen einer normalen Wasserversorgung (feucht), ausser in bestimmten Versuchsphasen, während denen die Hälfte der OTC einer Trockenheit (einige Tage) ausgesetzt waren und die andere Hälfte weiter normal bewässert wurde. Der Versuch begann im Frühling 95 und dauerte bis Herbst 1996. Pro Jahr wurden alle Pflanzen dreimal abgeerntet und jeweils die Trockengewichte verschiedener Pflanzenteile (Stengel mit Blattscheide, Blattspreite und Blütenstand) sowie die Anzahl Blätter und Blüten erfasst.

**Blattschäden:** Vier typische Ozonschadbilder konnten bei folgenden Arten beobachtet werden und sind in den farbigen Abbildungen dargestellt:

■ «braune, nekrotische Blattflecken»: *Carum carvi* (Wiesenkümmel), *Trifolium repens* (Weissklee), *T. pratense* (Rotklee), *Onobrychis sativa* (Esparsette), *Knautia arvensis* (Witwenblume), *Arrhenaterum elatius* (Fromental).

■ «gelb-graue chlorotisierte Blattflecken»: *Trifolium repens*, *Tragopogon orientalis* (Habermark), *Centaurea jacea* (Wiesenflockenblume), *Chrysanthemum leucanthemum* (Wiesenmargerite), *Taraxacum officinale* (Löwenzahn), *Plantago lanceolata* (Spitzwegerich), *Lotus corniculatus* (Hornklee)

■ «vorzeitige Vergilbung»: *Crepis biennis* (Wiesenspippau), *Plantago lanceolata*

■ «Rotverfärbung» (Anthocyanbildung): *Rumex obtusifolius* (stumpfbliättriger Ampfer), *Centaurea jacea*, *Knautia arvensis*.

**Tab. 1. Charakterisierung der Ozonbehandlungen anhand der AOT 40-Werte von 1995** (Summe aller Stundenmittelwerte von Ozon über 40 ppb während den drei Aufwüchsen) **und der Wasserregime** (Behandlungen)

Behandlung	Beschreibung	AOT 40 (ppb.h)
CF	Kontrolle, Konzentration < 40 ppb	468,5
CFAA	Umgebungskonzentration	13906
CF+	1,5x Umgebungskonzentration	37579
CF++	2x Umgebungskonzentration während den Episoden, ansonsten CFAA	24250
<b>Wasserregime</b>		
Feucht	Bewässerung während der Nacht, die Feldkapazität wird jeden Morgen erreicht	
Trocken	beschränkte Bewässerung während den Episoden, 1/3 bis 1/2 der Feldkapazität wird jeden Morgen erreicht	

Mehrere Schadbilder können bei der gleichen Art auftreten.

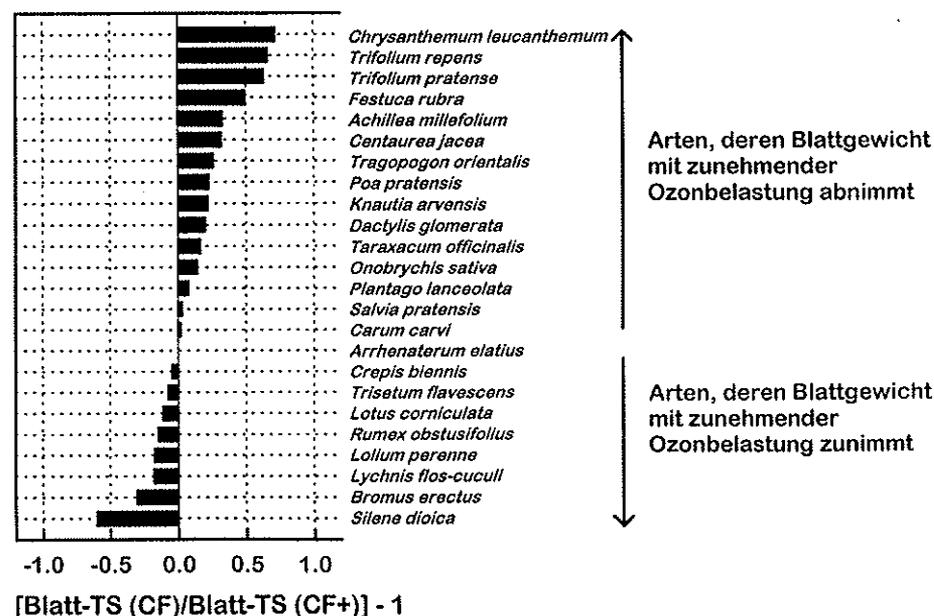
**Artspezifische Ozonempfindlichkeit:** In der Blattmassenproduktion kommt ein deutliches Empfindlichkeitsgefälle zwischen den untersuchten Arten gegenüber der Wasserversorgung und hohen Ozonkonzentrationen (Verfahren CF+) zum Ausdruck. Bei normaler Wasserversorgung (feucht) nahm die Blattmasse bei 66,6 % der Arten im Vergleich zum Kontrollverfahren CF ab (Abb. 2), während unter trockenen Bedingungen 75 % der Arten von einer Blattmassenabnahme betroffen waren. Im Verfahren CF++ mit der höchsten Ozonexposition reagierten unter trockenen Verhältnissen weniger Arten mit einem Rückgang der Biomasse (52,2 % der Arten).

In Gegenwart hoher Ozonkonzentrationen sind die Auswirkungen auf die Biomasseproduktion artabhängig, so dass das Ausmass und die Richtung stark streut.

Einige Pflanzen wie *Trifolium repens*, *T. pratense*, *Festuca rubra* und *Achillea millefolium* verzeichneten eine markante Biomasseverminderung während andere (*Silene dioica*, *Bromus erectus*) ihre Biomasse gegenüber Kontrollpflanzen erhöhten. Die Ozonschadwirkung (critical level) kann demzufolge nicht von vornherein mit einer Ertragseinbusse gleichgesetzt werden.

**Blattmasseertrag:** Die Ernten 1 und 2 des Jahres 1995 wurden in Abhängigkeit der Ozondosis (nur feuchtes Wasserregime) ausgewertet. Dabei konnten in bezug auf Veränderungen in der Blattmasse vier Reaktionstypen unterschieden werden (Abb. 3; eine repräsentative Art pro Reaktionstyp dargestellt):

1. Die Blattmasse geht mit steigendem Expositionsindex «AOT 40» (AOT 40 = Accumulated Exposure Above Threshold of 40 ppb) linear zurück (*Trifolium repens*, *T. pratense*, *Tragopogon orientalis*, *Festuca rubra*, *Poa pratensis*)



**Abb. 2. Ausmass der Ozonwirkung auf die Blattmasse der 24 untersuchten Pflanzenarten bei einer Ozondosis, die einer 1,5-fachen Umgebungskonzentration entspricht. Die Empfindlichkeit ist in % der Biomasse der Kontrollpflanzen angegeben.**

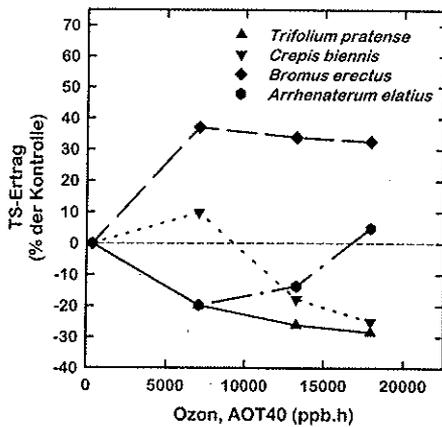


Abb. 3. Wirkung einer steigenden Ozonbelastung (angegeben als Expositionsindex AOT 40) auf die Blattmasse, dargestellt in % der Kontrollvariante, der ersten Ernte 1995. Die ausgewählten Pflanzenarten repräsentieren je einen Reaktionstyp (siehe Text).

2. Die Blattmasse nimmt bei mässigen Ozongehalten (Verfahren CFAA) zu, während bei höheren Ozonkonzentrationen eine Abnahme auftritt (*Centaurea jacea*, *Taraxacum officinalis*, *Crepis biennis*, *Plantago lanceolata*, *Achillea millefolium*, *Chrysanthemum leucanthemum*)

3. Die Blattmasse steigt regelmässig mit zunehmender Ozonbelastung an (*Bromus erectus*, *Silene dioica*, *Lychnis flos-cuculi*)

4. Die Blattmasse vermindert sich bis zu einem kritischen Ozonschwellenwert, oberhalb diesem wird die Biomasseproduktion wieder gefördert (*Arrhenaterum elatius*, *Lotus corniculatus*).

Wie aus Abbildung 3 ersichtlich ist, reagieren die verschiedenen Pflanzenarten auf hohe Ozonbelastungen vom Typ und Ausmass her ganz unterschiedlich, wobei die Wasserversorgung einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf die artspezifische Ozonempfindlichkeit auszuüben scheint. Die potentielle Auswirkung der Luftverschmutzung mit Ozon auf die Artenvielfalt unserer Wiesen ist greifbarer geworden, muss aber noch im Feld an Wiesenbeständen untersucht werden.

## Folgerungen und Ausblick

Die Auswirkungen der Luftverschmutzung auf die Biodiversität auf Stufe Art, Pflanzengemeinschaft und Ökosystem sind vielfältiger Natur. Die N-Einträge und das bodennahe Ozon sind offenbar die zwei Luftschadstoffe, die hauptsächlich zur Verarmung der biologischen Vielfalt beitragen. Weitere Untersuchungen sind noch notwendig, um das mögliche Ausmass der Artenzahlreduktion, den Anpassungsgrad (Selektion) der Organismen

und die Toleranzgrenze für Luftschadstoffe zu bestimmen, unterhalb welcher die Biodiversität bewahrt werden kann.

## LITERATUR

Baumberger C., Koch B., Thomet P., Christ H. und Gex P., 1996. Entwicklung der Artenvielfalt im Langzeitversuch Eggenalp. *Agrarforschung* 3 (6), 275-278.

Bobbink R., 1991. Effects of nutrient enrichment in Dutch chalk grassland. *J. Appl. Ecol.* 28, 28-41.

Bobbink R., Boxman D., Fremstad E., Heil G., Houdijk A. and Roelofs J., 1992. Critical loads for nitrogen eutrophication of terrestrial and wetland ecosystems based upon changes in vegetation and fauna. In: Grennfelt P. and Thörnelöf E. (Eds.), Critical load for nitrogen. *Nord (Miljörapport)* 41, 111-159. Nordic Council of Ministers, Copenhagen.

Bobbink R., Hornung M. and Roelofs J.G.M., 1996. Empirical Nitrogen Critical Loads for Natural and Semi-Natural Ecosystems. In: Manual on Methodologies for Mapping Critical Loads/Levels and geographical areas where they are exceeded, in UNECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (Annex III), 1-54.

Contat F., Stadelmann F.X., Stauffer W., Genoud L. et Zadelek J., 1994. Le fluor édaphique n'a pas d'influence notable sur la teneur en fluor d'une graminée fourragère (*Lolium perenne*). Résultat d'un essai effectué en Valais. *Bull. Murithienne* 112, 117-133.

Endtner V., 1997. Ozonempfindlichkeit von *Trifolium campestre*. Diplomarbeit der Universität Bern (non publié).

Fuhrer J., 1997. Ozone sensitivity of managed pastures. In: Ecological Advances and Environmental Impact Assessment, Paul N. Cheremisinoff, (Ed.), 681-706.

Fuhrer J., Shariat-Madari H., Perler R., Tschannen W. and Grub A., 1994. Effects of ozone on managed pasture. II. Yield, species composition, canopy structure, and forage quality. *Environmental Pollution* 86, 307-314.

Keller TH., Lüscher F. und Contat F., 1995. Bedeutet bodenbürtiges Fluor eine « Altlast » nach Stilllegung einer Aluminiumhütte? *Schweiz. Z. Forstwes.* 146 (1), 25-38.

Neftel A., Wanner H., Blatter A., Eugster W., Fahrni M., Hesterberg R. und Rosset M., 1994. Stickstoffeintrag aus der Luft in ein Naturschutzgebiet. *Umweltmaterialien* 28, Luft. BUWAL (Ed.).

Reiling K. and Davison A.W., 1992. Spatial variation in ozone resistance of British populations of *Plantago major* L. *New Phytol.* 122, 699-708.

Stadelmann F.X., 1992. Waldschäden und Luftschadstoffe. Mögliche Wirkungen von Stickstoff aus landwirtschaftlicher Sicht. In: Forum für Wissen 1992 «Waldschadenforschung in der Schweiz: Stand der Kenntnisse». WSL Birmensdorf, 113-126.

Walton K.C., 1987. Tooth damage in field voles, wood mice and moles in areas polluted by fluoride

from an aluminium reduction plant. *The Science of the Total Environment* 65, 257-260.

Willems J.H., Peet R.K. and Bil, L., 1993. Changes in chalk-grassland structure and species richness resulting from selective nutrient additions. *J. Veg. Science* 4, 203-212.

## RÉSUMÉ

### Pollution atmosphérique et biodiversité floristique

De plus en plus, des travaux signalent les effets négatifs des polluants d'origine atmosphérique sur la biodiversité. A titre d'exemple, quelques résultats en rapport avec le fluor, l'azote et l'ozone sont présentés. L'azote déposé par l'air et l'ozone troposphérique semblent être les principaux polluants affectant la diversité de la flore. De récentes études effectuées à Liebefeld avec de l'ozone indiquent que la diminution de la biodiversité floristique des prairies peut être due à la très grande sensibilité relative des espèces. De plus amples recherches sont encore nécessaires afin de déterminer la charge critique permettant de préserver la biodiversité floristique des prairies permanentes.

## SUMMARY

### Air pollution and floristic biodiversity

The number of reports on negative effects of air pollution on biodiversity is increasing. Here, examples from the literature are presented which concern effects of fluoride, deposition of nitrogen, and ozone. Today, nitrogen loads and levels of tropospheric ozone seem to be the most relevant forms of air pollution affecting species diversity of the flora. Results from recent investigations of ozone effects at Liebefeld indicate that the loss of floristic diversity in permanent meadows is possible because of the high relative sensitivity of some typical species. Further studies will be necessary to validate the results obtained from experiment with single plants at the level of the intact plant community in the field, and to identify the critical level of ozone to protect the floristic biodiversity of meadows.

**KEY WORDS:** biodiversity, atmospheric pollution, ozone, N deposition, fluoride