

Luftverschmutzung durch Ozon erschwert den Pflanzenbau

Jürg FUHRER, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene (FAC), CH-3097 Liebefeld-Bern

Im Sommer wird die Luftverschmutzung von einem einzelnen Gas beherrscht: Ozon. Dessen Giftigkeit für Pflanzen ist längst bekannt, seine Wirkung auf Kulturpflanzen aufgrund in- und ausländischer Untersuchungen belegt, und das Risiko für die Pflanzenproduktion in der Schweiz kann mit Hilfe von Modellrechnungen abgeschätzt werden. Kurzfristig gefährdet sind unter anderem der Ertrag von Weizen und die Qualität von Kunstpflanzen; längerfristige Wirkungen, beispielsweise auf die Artenvielfalt von Naturwiesen, werden zurzeit noch untersucht. Massnahmen gegen die Ozonbelastung würden den Pflanzenbau entlasten, indem die eingesetzten Mittel effizienter in qualitativ hochwertige Produkte umgesetzt werden könnten.

Massive Schäden an landwirtschaftlichen Kulturen in Kalifornien führten in den 40iger Jahren zur Erforschung einer damals neuartigen Form der Luftverschmutzung, dem Sommersmog. Ozon - verursacht durch die Emission von Stickoxiden (NO_x) und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) - wurde als Leitsubstanz des Sommersmogs und als Verursacher der Pflanzenschäden identifiziert. Der Sommersmog umfasst aber nicht nur Ozon, sondern zusätzlich andere Oxidantien und Säuren als Gase und in Aerosolen. In den 50iger Jahren wurde Ozon auch als Verursacher von Schäden an der amerikanischen Ostküste erkannt (z.B. «weather flecks» an Tabak). 25 Jahre später wurden die Auswirkungen des Ozons im Rahmen des National Crop Loss Assessment Network (NCLAN) auf nationaler Ebene untersucht. Dazu wurden verschiedene Kulturen mit Hilfe von Freilandbegasungsanlagen getestet (open-top Begasungskammern). Die wirtschaftlichen Verluste wurden auf jährlich mehrere Milliarden Dollar geschätzt. In Europa wurden Schäden an empfindlichen Pflanzenarten bereits in den 70iger Jahren beobachtet. Die Untersuchung der Wirkung auf landwirtschaftliche Kulturen wurde hier aber erst 1985 in Angriff genommen; ein internationales Forschungsprogramm der Europäischen Union (European Open-Top Chamber Programme) führte zur Erkenntnis, dass auch in Europa bedeutende Schäden an einzelnen Kulturen zu erwarten sind (Jäger *et al.* 1993). Die FAC beteiligte sich an diesem Programm und lieferte damit die Grundlagen für eine nationale Risikoab-

schätzung, sowie für die Festlegung der kritischen Belastungswerte (Critical levels).

Akute und chronische Wirkungen

Kurzfristig auftretende, hohe Ozonkonzentrationen führen bei empfindlichen Pflanzenarten zu sichtbaren Schädigungen der Blätter. Dabei werden die Zellen einzelner Blattpartien durch das ins Blatt eindringende Ozon rasch zerstört. Pflanzenarten und -sorten mit hoher Blattdurchlässigkeit für Ozon sind besonders gefährdet. Dazu gehören unter anderem verschiedene Vertreter der Leguminosen.

Besonders am Weissklee können typische Ozonsymptome während Ozonepisoden alljährlich beobachtet werden (Becker *et al.* 1989). Betroffen sind speziell die älteren Blätter, junge Blätter sind relativ resistent. Die geschädigten Blätter werden beim Klee rasch durch neue ersetzt, so dass der Schaden einer einmaligen Belastung nach wenigen Tagen oder Wochen wieder verschwinden kann. Zusätzlich zum Weissklee wurden in der Schweiz auch sichtbare Symptome an einzelnen Sorten von Rotklee, Luzerne, Tomate, Soja und Bohne beobachtet.

Tritt eine Schädigung häufig auf oder besteht eine Belastung über einen langen Zeitraum, so führt dies zu chronischen Wirkungen. Dazu gehören: Abnahme des Wachstums, verminderte Bildung von Reservestoffen, Abnahme der Krankheitsresistenz, etc. Während beim Klee speziell der Wiederaustrieb nach dem Schnitt betroffen ist, besteht beim Weizen die chronische Wirkung hauptsächlich in einer Abnahme des Einzelkorngewichts sowie in einer zunehmenden Anfälligkeit gegenüber fakultativ parasitischen Pilzen (z.B. *Septoria*) (Fuhrer *et al.* 1989).



Abb. 1. Der in «open-top»-Begasungskammern bei verschiedenen Ozonkonzentrationen kultivierte Weizen wird zur Ermittlung der Beziehung zwischen Ozonbelastung und Ertrag von Hand geerntet.

Auswirkungen im Ackerbau

Die Auswirkungen von Ozon auf Ackerkulturen wird mit Hilfe von Feldbegassungsanlagen untersucht. Diese Anlagen ermöglichen es, das Wachstum und den Ertrag bei unterschiedlicher Ozonbelastung zu studieren und eine quantitative Beziehung zwischen Belastung (Exposition) und Wirkung herzustellen (= Expositions-Wirkungsbeziehung) (Abb. 1). Dabei gilt es zu beachten, dass die Wirkung einer Ozonbelastung im Verhältnis zu einer anderen ausgedrückt wird, beispielsweise der Ertrag bei der heutigen Ozonbelastung relativ zum Ertrag bei einer tieferen Belastung (Kontrolle = 100%). Andere Einflussfaktoren, wie Klima, Boden, Bewirtschaftung etc. sind für alle Behandlungen gleich. So kann der Ozon-effekt getrennt von der Wirkung anderer Faktoren untersucht werden. Europäische Untersuchungen konzentrierten sich bisher auf Weizen (hauptsächlich Sommer-

weizen) und Ackerbohne. Vereinzelt wurden auch Gerste und Hafer einbezogen. Während Weizen und Ackerbohne empfindlich auf Veränderungen in der Ozonkonzentration reagieren, bleiben auch erhöhte Konzentrationen bei Gerste und Hafer praktisch wirkungslos. Dieser Befund entspricht weitgehend auch den amerikanischen Erfahrungen, aufgrund welcher auch die Kartoffel als empfindlich, der Körnermais aber als resistent eingestuft werden muss.

Modellierung potentieller Ertragsverluste

Mit Hilfe von Expositions-Wirkungsfunktionen können verschiedene Modellrechnungen durchgeführt werden. Die Ergebnisse dieser Berechnungen reichen von der räumlichen Darstellung der Risikoverteilung hin bis zur Abschätzung der ökonomischen Auswirkungen im Ackerbau (vgl. unten). Als Beispiel für eine

räumliche Risikoanalyse ist in Abbildung 2 die geschätzte Veränderung des Ertrags von Weizen für landwirtschaftlich genutzte Gebiete unter 1000 m dargestellt. Die Daten gelten für das Jahr 1994, in welchem recht hohe Ozonwerte gemessen wurden, die Ozonwirkung aber durch längere Trockenperioden reduziert wurde (vgl. Führer 1995). Die Verteilung des potentiellen Ertragsverlustes zeigt, dass in weiten Teilen des Mittellandes und im Tessin der Verlust im Bereich von 10 bis 20 % lag. In Jahren ohne «schützende» Wirkung durch Trockenheit, beispielsweise 1992, lag der Schwerpunkt der potentiellen Wirkung im stark ozonbelasteten Tessin (Staffelbach und Nefstel 1995). Ähnliche Karten werden auch für andere europäische Länder hergestellt, damit das Ozonrisiko europaweit dargestellt werden kann. Ziel der internationalen Luftreinhaltepolitik ist es, differenzierte Emissions-Reduktionsstrategien zu entwickeln, welche das Ozonrisiko unter 10 % Ertragsverlust senken. Diese Arbeiten

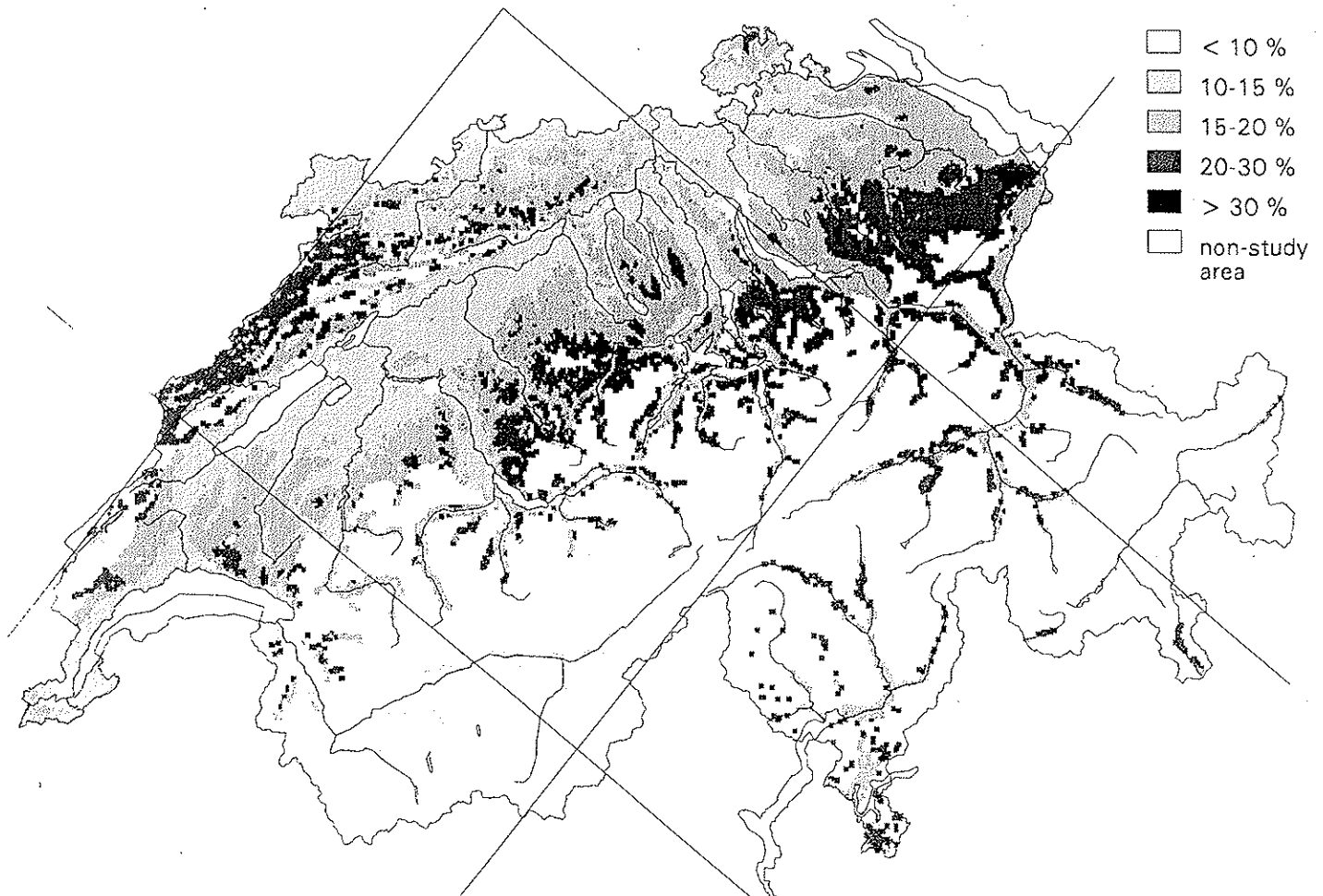


Abb. 2. Verteilung der für 1994 berechneten, potentiellen Verluste im Weizenertrag aufgrund der Ozonbelastung während der Monate Mai bis Juli. Die Berechnung berücksichtigt die Verminderung der Ozonwirkung aufgrund des geringen Niederschlags (Herstellung der Karten in Zusammenarbeit mit Fa. METEOTEST, Bern).

werden im Rahmen der Konvention über weiträumige, grenzüberschreitende Luftverunreinigung der UN/ECE (UNO Wirtschaftskommission für Europa) durchgeführt.

Auswirkungen im Futterbau

Die sichtbaren Schädigungen am Klee bringen zum Ausdruck, dass in Wiesen einzelne Pflanzenarten stärker als andere vom Ozon betroffen sind. So können an Gräsern keine akuten Ozonsymptome beobachtet werden. Die unterschiedliche Empfindlichkeit von Gräsern und Klee führt deshalb zu einer Verschiebung im Gras-Klee Verhältnis durch Ozon. Dies ist das Ergebnis eines 2jährigen Feldversuchs mit der Standardmischung SM 330 (Fuhrer *et al.* 1994). Abbildung 3 zeigt den Rückgang des Kleeanteils am Gesamtertrag mit steigender Belastung, beziehungsweise den Anstieg des Kleeanteils bei einer Abnahme der heutigen Ozonbelastung auf ein tieferes Niveau. Eine Verbesserung der Luftqualität könnte damit die Erhaltung einer guten Qualität des Futters erleichtern, und auch die ökologisch wichtige Funktion der Leguminosen (biologische Stickstofffixierung) würde gefördert.

Auswirkungen des Ozons auf weniger intensiv genutzte, artenreiche Wiesen sind Bestandteil laufender Untersuchungen. Erste Ergebnisse zeigen, dass verschiedene wichtige Arten kurzfristig empfindlich auf Ozon reagieren (Nebel und Fuhrer 1994). Wegen der Langlebigkeit von Dauerwiesen, der genetischen Vielfalt und der Möglichkeit einer Selektion resistenter Genotypen innerhalb einzelner Arten, ist es aber schwierig, die langfristige Wirkung erhöhter Ozonbelastungen auf das Dauergrünland abzuschätzen. Experimente können hier lediglich mithelfen, Möglichkeiten aufzuzeigen, wie Ozon die biologische Vielfalt, die Qualität und die Stabilität dieser immer wichtiger werdenden Ökosysteme beeinflussen könnte - wieder im Sinne einer Risikoanalyse.

Wirtschaftliche Folgen

Die Luftreinhaltepolitik setzt meist voraus, dass nicht nur das Risiko erkannt wird, sondern dass auch die effektiven Kosten der Luftverschmutzung mindestens näherungsweise bekannt sind. Um diesem Anliegen gerecht zu werden, wur-

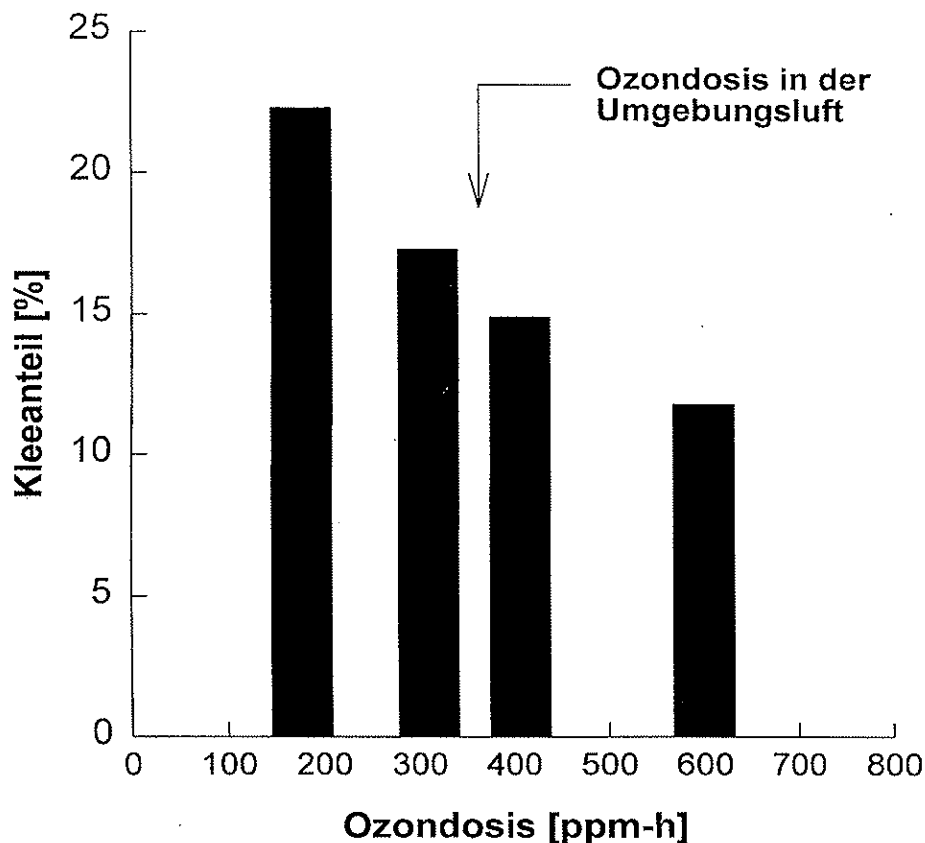


Abb. 3. Ozonbedingte Veränderung des Kleeanteils im gesamten Erntegut einer Kunstwiese (SM 330) über zwei Jahre (9 Schnitte).

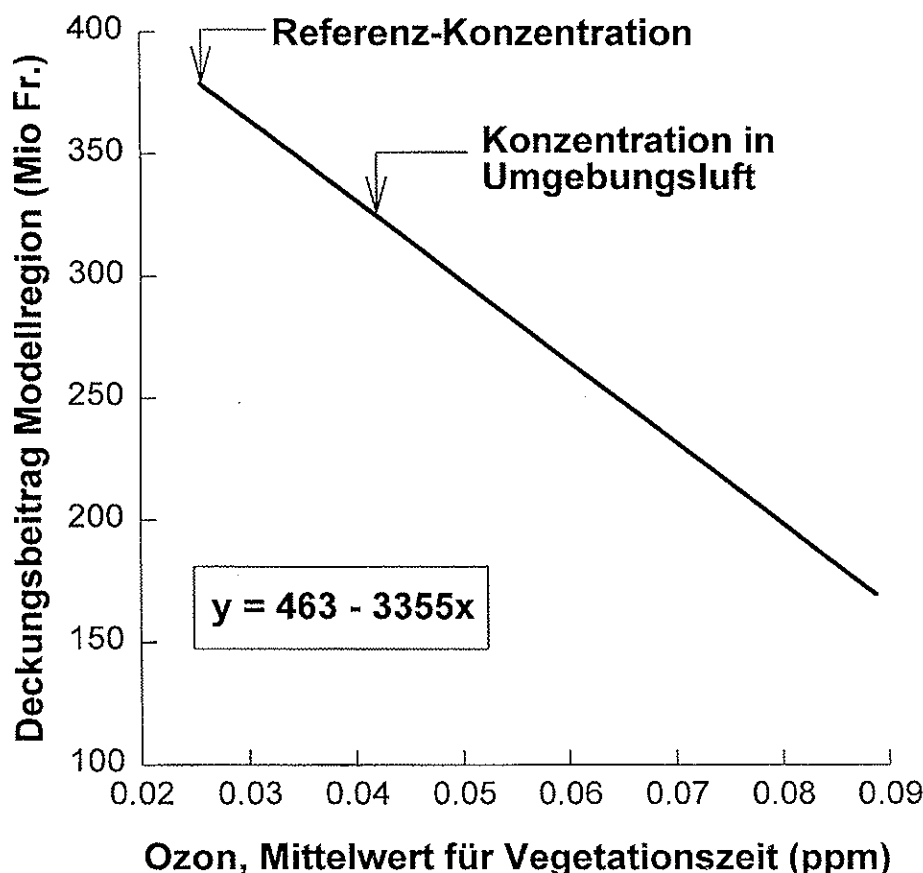


Abb. 4. Abnahme des aggregierten Deckungsbeitrags im Ackerbau einer Modellregion im Talgebiet (85'000 ha) mit steigender Ozonbelastung (nach Näf 1991). Die Abnahme beträgt rund 4 Prozent pro 10 Prozent Zunahme der Ozonkonzentration (Mittelwert aller 7h-Mittel von 0900-1600, April-September).

den die ökonomischen Folgen verschiedener Ozonbelastungen (Szenarien) am Beispiel des Ackerbaus im Talgebiet berechnet (Näf 1991). Dazu diente ein Modell des Instituts für Agrarwirtschaft der ETH Zürich (OPTICROP). Mit Hilfe dieses Modells konnte aus einer Vielzahl möglicher Fruchtfolgen jene ausgewählt werden, welche unter den gegebenen Randbedingungen in einer Modellregion von 85'000 ha in Abhängigkeit vom Ozon den grösstmöglichen aggregierten Deckungsbeitrag liefert. Dadurch wurde es möglich, nicht nur ozonbedingte Veränderungen im Einkommen, sondern für ausgewählte Szenarien auch die Veränderungen in der Anbaustruktur und der damit einhergehenden Verschiebungen im Bedarf an Arbeitskräften, Maschinen, Düngern und Pflanzenschutzmitteln abzuschätzen. In Abbildung 4 ist die Abnahme des aggregierten Deckungsbeitrags in Abhängigkeit von der Ozonbelastung für die Modellregion dargestellt.

Die Modellrechnung zeigt, dass eine Reduktion des Ozons auf ein wesentlich tieferes Niveau - wie es möglicherweise ohne vom Menschen verursachte Schadstoffemissionen herrschen würde - der Modellregion ein Mehreinkommen von jährlich 46 Millionen Franken bringen würde, welches den Betrieben zusätzlich für die Abgeltung der im Betriebszweig Ackerbau eingesetzten Fixfaktoren (z.B. Verzinsung, Amortisation etc.) und zur Eigenkapitalbildung zur Verfügung stehen würde. Hochgerechnet auf das gesamte Ackerbaugesamt der Schweiz entspricht dies jährlich über 210 Millionen Franken. Diese Schätzung zeigt die Gröszenordnung der positiven, wirtschaftlichen Effekte, welche durch rigorose Massnahmen zur verminderten Ozonbelastung im Pflanzenbau erzielt werden könnten.

Massnahmen

Der Landwirt kann durch Bewirtschaftungsmassnahmen die Auswirkungen des Ozons selbst nur wenig beeinflussen. Möglich wäre dies dann, wenn ihm Sorten angeboten werden könnten, welche bei gleichem Ertragspotential gegenüber Ozon relativ unempfindlich sind. Im Falle von Weizen ist dies nicht möglich; die wenigen bisher verglichenen Sorten reagieren ähnlich stark auf Ozon. Ein umfassender Vergleich der einheimischen Sorten wäre wünschbar - aus praktischen

Gründen aber kaum realisierbar. Beim Klee wurden markante Sortenunterschiede beobachtet, welche allenfalls ausgenutzt werden könnten. Für andere Kulturpflanzen werden Sortenunterschiede zwar vermutet, experimentelle Daten gibt es aber praktisch keine.

Die ökonomische Modellrechnung weist darauf hin, dass wirtschaftliche Folgen durch Umstellung von Fruchtfolge und Anbaufläche teilweise kompensiert werden können. Ob aber ein Ausbau der Weizenanbaufläche auf Kosten von Kunst- und Naturwiesen unter den heute herrschenden Randbedingungen zweckmässig wäre, muss bestritten werden.

Die Ergebnisse der landwirtschaftlichen Ozonforschung liefern somit nicht primär den Bauern Entscheidungshilfen für den praktischen Pflanzenbau - obwohl dies oft verlangt wird. Vielmehr bilden sie die Grundlage für Massnahmen und Strategien im Bereich der Luftreinhaltung - sowohl national wie international. Sie zeigen auf, dass verstärkte Massnahmen notwendig sind, um den Pflanzenbau zu entlasten. Dies wäre sowohl aus ökologischer, wie auch aus ökonomischer Sicht wünschenswert.

LITERATUR

- Becker K., Saurer M., Egger A. and Fuhrer J., 1989. Sensitivity of white clover to ambient ozone in Switzerland. *New Phytol.* 112, 235-243.
- Fuhrer J., 1995. Luftreinhaltung im Interesse des Pflanzenbaus. *Agrarforschung* 2 (6), 209-212.
- Fuhrer J., Egger A., Lehnerr B., Grandjean A. and Tschannen W., 1989. Effects of ozone on the yield of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in open-top field chambers. *Environ. Pollut.* 60, 273-289.
- 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. *Environ. Pollut.* 86, 307-314.
- Jäger H.J., Unsworth M.H., De Temmermann L. and Mathy P. (Eds.), 1993. Effects of air pollution on agricultural crops in Europe. *CEC Air Pollution Reports* 46, 618 p.
- Näf W., 1991. Ökonomische Konsequenzen der Luftverschmutzung für die schweizerische Landwirtschaft. Dissertation Univ. Fribourg, 219 p.
- Nebel B. and Fuhrer J., 1994. Inter- and intraspecific differences in ozone sensitivity in semi-natural plant communities. *Angew. Botanik* 68, 116-121.
- Staffelbach T. und Neftel A., 1995. Ozon - die Landwirtschaft im Zwiespalt? *Agrarforschung* 2 (6), 213-216.

RÉSUMÉ

La pollution atmosphérique par l'ozone rend la culture des champs plus difficile

Les effets négatifs de la pollution atmosphérique par l'ozone sur les cultures agricoles ont été intensément étudiés aux États-Unis et en Europe. Des charges croissantes d'ozone provoquent, surtout pour le blé, des diminutions rapides de rendements. De même, la sensibilité par rapport à certaines maladies fongiques augmente. D'autres cultures, telles l'orge, l'avoine et le maïs grain sont considérées comme étant moins sensibles. Pour les prairies temporaires, l'ozone provoque une diminution de la proportion de trèfle avec pour conséquence une réduction de la qualité du fourrage. Les effets à long terme pour les prairies naturelles sont encore très peu connus. Les pertes de rendements potentiels pour le Plateau suisse en 1994 ont été estimées entre 10 et 20 %. Les conséquences économiques de l'effet de l'ozone pour les grandes cultures sont estimées à au moins 200 Mio. de Fr. par année. De ce fait, des mesures de réduction de la charge en ozone auraient, d'un point de vue écologique ainsi qu'économique, des effets positifs et pourraient décharger la production végétale.

SUMMARY

Air pollution by ozone affects agricultural plant production

The negative effects of air pollution by ozone on agricultural crops has been studied intensively both in the USA and in Europe. Especially in wheat, a decrease in yield with increasing ozone stress has been observed. In parallel, the sensitivity to several fungal diseases increases. Other crops, such as oat, barley, and corn, are less sensitive. In the case of managed pasture, ozone affects the quality of the fodder by negatively affecting the proportion of clover. Long-term effects on permanent grasslands are still largely unknown. On the Swiss Central Plateau, potential yield loss in 1994 ranged between 10 and 20 %. Economic consequences of ozone pollution for arable farming are estimated to be more than 200 Mio Swiss Francs annually. Therefore, measures to reduce ozone pollution would have positive ecological and economic effects in agriculture.

KEY WORDS: Air pollution, ozone, agricultural crops, yield loss, risk assessment