

# Luftreinhaltung im Interesse des Pflanzenbaus

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

**Die Luftverschmutzung durch Ozon ist im Sommer am stärksten und gefährdet die Kulturpflanzen. Im Rahmen der Genfer Konvention werden international verbindliche Massnahmen zur Reduktion der Ozonbelastung ausgearbeitet. Das Reduktionsziel orientiert sich an jener Ozonbelastung, welche die untere Grenze des Risikobereichs markiert (= Critical Level). Für Kulturpflanzen wurde ein Critical Level bestimmt, der in der Schweiz deutlich überschritten wird. Daraus ergibt sich ein potentieller Ertragsverlust, der differenzierter berechnet werden kann, indem das Wasserangebot mitberücksichtigt wird.**

Die Luftverschmutzung durch Ozon entsteht durch photochemische Umwandlung von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) und flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) aus Industrie und Verkehr sowie teilweise aus natürlichen Quellen. Sie ist im Sommer am stärksten und gefährdet Wachstum und Qualität von landwirtschaftlichen Kulturen, Wildpflanzen und Bäumen. Um diese Bedrohung zu vermindern, bedarf es international verbindlicher Luftreinhaltmassnahmen. Aufgrund der Genfer Konvention über die weiträumige, grenzüberschreitende Luftverschmutzung (LRTAP) verfolgt die Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UN-ECE) das Ziel, die notwendigen Reduktionsstrategien zu entwickeln und die Massnahmen zur Emissionsbeschränkung in verpflichtenden Protokollen zu fixieren. Zur Bekämpfung des Ozonproblems bedarf dies entsprechender Protokolle für NO<sub>x</sub> und VOC.

## Konzept der UN-ECE

Das Vorgehen der UN-ECE basiert auf dem Konzept der kritischen Belastungsgrenzen, das heisst der **Critical Levels** für Gase und **Critical Loads** für Stoffeinträge. Die Strategie zur Bekämpfung des Ozonproblems orientiert sich also an der Wirkung auf empfindliche Rezeptoren. Verschiedene Kulturpflanzen sind besonders empfindlich; durch die Bestimmung des Critical Levels für diese Kulturen soll erreicht werden, dass die Umsetzung der Genfer Konvention deren Schutz mitberücksichtigt. Durch räumlich differenzierte Massnahmen soll die Ozonbelastung grossräumig soweit reduziert werden, dass die Überschreitung der kritischen

Grenzen abnimmt und keine negativen Ozonwirkungen auf die empfindlichsten Pflanzen mehr möglich sind. Die gesamt-europäische Kartierung der Überschreitung bildet also die Grundlage für die Ausarbeitung von Reduktionsszenarien und anschliessend für die politische Evaluation der Reduktionsmassnahmen

(Abb. 1). Berücksichtigt dieser Vergleich Faktoren, welche die Ozonwirkung beeinflussen (modifizierende Faktoren, wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Bodenwasser etc.), so erfolgt die Kartierung auf der differenzierten 2. Stufe (LEVEL II), andernfalls auf der undifferenzierten 1. Stufe (LEVEL I). Dieses Vorgehen beruht damit einerseits auf der Wirkungsforschung, welche im Rahmen von internationalen Programmen koordiniert wird (ICPs), andererseits auf der Bestimmung der Luftverschmutzung in Europa aufgrund von Modellen und Messungen durch das EMEP (Cooperative Programme for Monitoring and Evaluation of Long-Range Transmission of Air Pollutants in Europe).

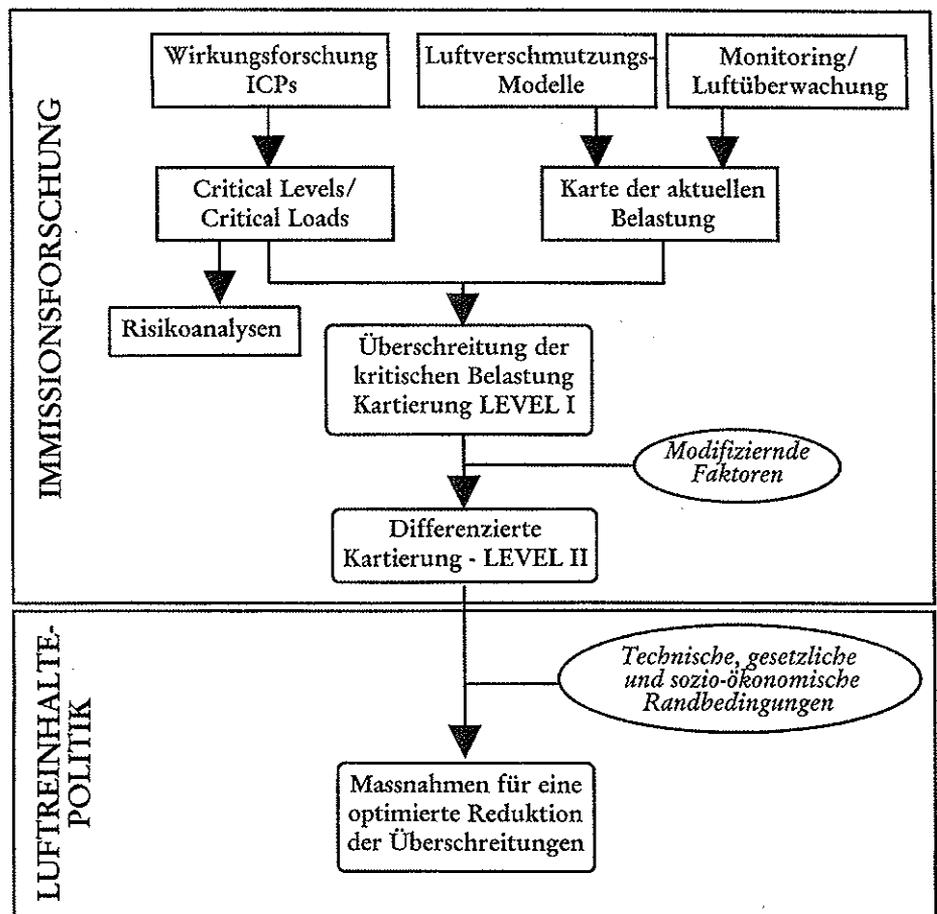


Abb. 1. Übersicht über die Gliederung der Arbeiten unter der Genfer Konvention. Die landwirtschaftliche Forschung leistet mit der Wirkungsforschung und mit der Bestimmung der modifizierenden Faktoren einen Beitrag an die internationalen Bestrebungen zur Luftreinhaltung.

## Expositions- Wirkungsbeziehungen

Für die Bestimmung des kritischen Belastungswerts (Critical Level) braucht es geeignete experimentelle Daten. Dazu gehören Expositions-Wirkungsbeziehungen, das heisst quantitative Funktionen für die Beziehung zwischen der Ozonexposition und einem relevanten Pflanzenparameter. Im Falle von Weizen ist dies der Körnerertrag, bei Kunstwiese der Gewichtsanteil des Klees.

In der Vergangenheit wurde die Ozonexposition üblicherweise durch die mittlere Ozonkonzentration während der Vegetationsperiode ausgedrückt. Die Ozonwirkung auf den Ertrag ist aber die Folge einer kumulativen (aufsummierenden) Beeinflussung, und die Länge der Expositionszeit ist ebenso wichtig wie die Konzentration. Neu wird deshalb die Exposition aufgrund eines kumulativen Expositionsindex<sup>1</sup> charakterisiert. Weiter wird berücksichtigt, dass höhere gegenüber tieferen Konzentrationen eine relativ stärkere Wirkung ausüben. Dazu werden die Konzentrationen mit einem Gewichtungsfaktor versehen. Das UN-ECE-Konzept sieht vor, dass dieser Faktor für Konzentrationen unterhalb von 40 ppb<sup>1</sup> (ungefähr 80 µg/m<sup>3</sup>) gleich null ist, und für Konzentrationen von 40 ppb und mehr gleich 1 (Fuhrer und Achermann 1994). Die Grenze von 40 ppb wurde gewählt, da sie eine Trennung zwischen Gebieten mit hauptsächlich «natürlichem» Ozon und solchen mit einem starker Luftverschmutzungsanteil markiert. Sie stellt nicht eine wirkungsbezogene Schwellenwertkonzentration dar; auch unterhalb von 40 ppb können negative Wirkungen eintreten. Dieser diskontinuierlichen Gewichtung steht eine kontinuierliche Gewichtung gegenüber, welche biologisch sinnvoller wäre (Lefohn 1992). Aus praktischen Gründen kommt sie für die Umsetzung des Konzepts aber nicht in Frage. Schliesslich wird bei der Charakterisierung der Ozonexposition auch berücksichtigt, dass die meisten Kulturpflanzen Ozon nur tagüber aufnehmen. Der Expositionsindex wird demzufolge als Summe der Stunden-Mittelwerte (während der Tagesstunden) über 40 ppb (Abb. 2) wäh-

<sup>1</sup> ppb = parts per billion; 1 ppb entspricht einem Ozonmolekül auf 1 Milliarde Luftmoleküle. Werden alle Stundenmittelwerte in ppb aufsummiert, so entspricht dies der Ozondosis in ppb-h.

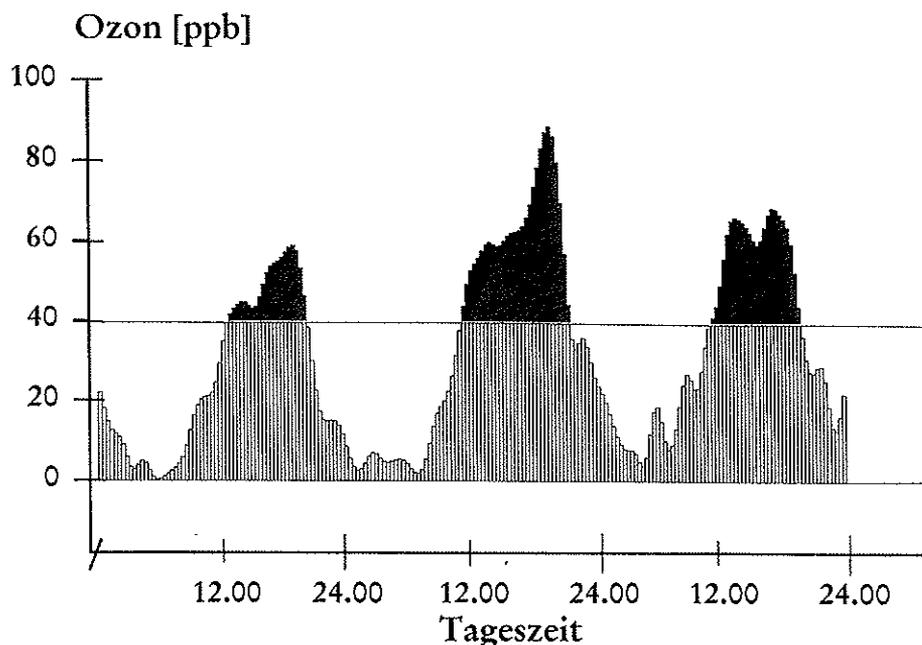


Abb. 2. Typischer Verlauf der Ozonkonzentration während drei Tagen mit hohen Werten am Nachmittag und tiefen in der Nacht. Der schwarze Bereich des Konzentrationsverlaufs wird für die Berechnung der Ozonexposition verwendet (Summe der Konzentrationen oberhalb 40 ppb = AOT40).

rend einer für verschiedene Kulturen entscheidenden Expositionszeit von drei Monaten (Mai - Juli) berechnet. Der Index wird als AOT40 (accumulated exposure over threshold) bezeichnet.

## Critical Level für Kulturpflanzen

Die Abschätzung des Critical Level für Kulturpflanzen beruht auf Expositions-Wirkungsbeziehungen für den Ertrag einer oder mehrerer Kulturen in Abhängigkeit des AOT40. Während der letzten zehn Jahre wurden im Rahmen von europäischen Forschungsprogrammen haupt-

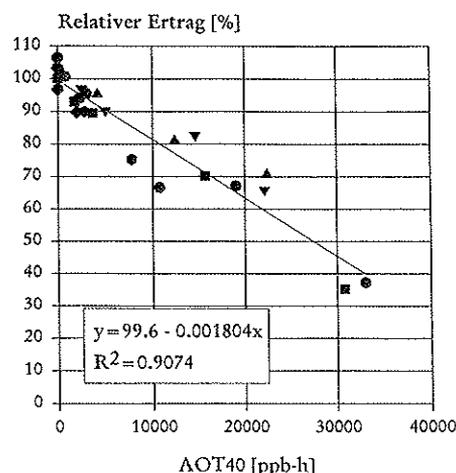


Abb. 3. Expositions-Wirkungsbeziehung für die Ozonwirkung auf den Körnerertrag von Weizen. Mit verschiedenen Symbolen sind die Ergebnisse verschiedener europäischer Experimente mit Sommerweizen eingetragen.

sächlich Experimente mit Weizen (Sommerweizen) durchgeführt. Deshalb ist für diese Kultur die Datenbasis am besten. Abbildung 3 stellt die aus mehreren Datensätzen konstruierte Expositions-Wirkungsbeziehung für Weizen dar. Berücksichtigt sind die Ergebnisse von Experimenten an fünf Standorten in fünf Jahren und mit vier verschiedenen Sorten. In allen Experimenten wurde mit einer vergleichbaren Technik gearbeitet, das heisst alle Forschungsgruppen verwendeten die Freiland-Begasungstechnik mit «open-top» Kammern (Abb. 4). Um eine Beeinflussung durch unterschiedliche Niederschläge zu vermeiden, wurden die Versuchspartellen bewässert. Durch lineare Regression wurde für jeden Datensatz der Ertrag bei einem AOT40 von 0 ppb-h bestimmt, gleich 100 % gesetzt und für die Berechnung der relativen Erträge bei den verschiedenen Belastungsstufen benützt. Damit konnten die Datensätze zusammengeführt werden. Es entstand eine signifikante lineare Beziehung zwischen Ertrag und Ozonexposition. 90 % der Variabilität sind mit dem linearen Modell erklärbar, das heisst Unterschiede von weniger als 10 % sind nicht mit Sicherheit bestimmbar. Entsprechend wurde jener AOT40-Wert als Critical Level definiert, der einer 10prozentigen Abnahme des relativen Körnerertrags entspricht. Dieser Wert beträgt 5'300 ppb-h (Fuhrer 1994). Entsprechend kann ein Critical Level für Kunstwiesen berechnet werden; aller-

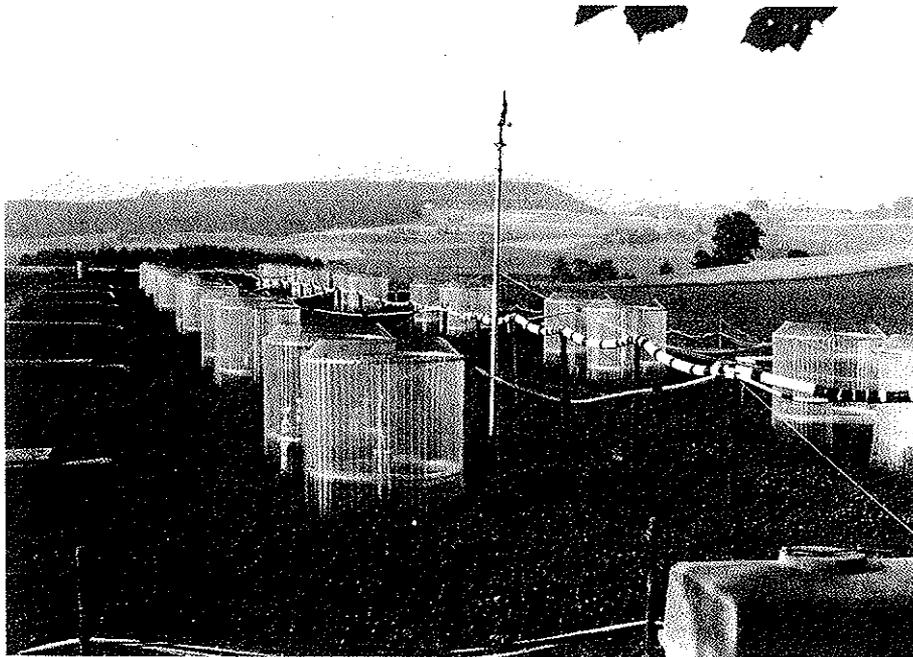


Abb. 4. Freiland-Begasungsanlage mit open-top Begasungskammern zur Untersuchung der Ozonwirkung auf Kulturpflanzen.

dings stehen dazu nur die Ergebnisse eines einzigen Experiments zur Verfügung. Der Critical Level für eine 10prozentige Abnahme des Kleeanteils beträgt 6'300 ppb-h (für eine Periode von 3 Monaten mit 3 Schnitten) und ist damit leicht höher als jener für Weizen (Fuhrer 1994).

### Überschreitung des Critical Level

Ein Risiko für Ertragsverluste besteht, sobald der Critical Level überschritten wird.

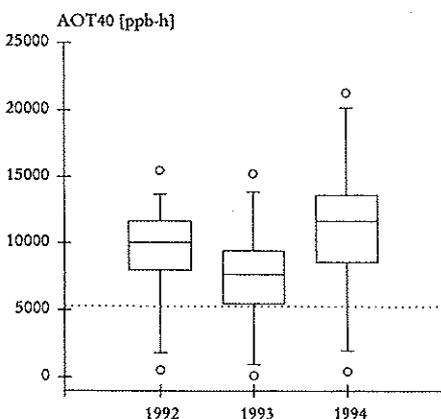


Abb. 5. Box-Whiskers-Darstellung der Ozonbelastung in der Schweiz, ausgedrückt als AOT40 für die Jahre 1992 bis 1994. Innerhalb der Box befinden sich 75 % aller Werte, die «Whiskers» bezeichnen den Bereich, ausserhalb dessen nach unten die tiefsten und nach oben die höchsten 10 % aller Werte liegen (10 % und 90 % Perzentil). Die Kreise markieren die Werte, ausserhalb denen 5 % der Werte liegen (5 % und 95 % Perzentil). Die gestrichelte Linie markiert den kritischen Belastungswert (Critical Level).

Vergleicht man den Critical Level von 5'300 ppb-h mit schweizerischen AOT40 Werten, so wird klar, dass potentiell ein grosses Risiko besteht (Abb. 5). Am geringsten ist das Risiko in städtischen Gebieten und Agglomerationen. Gegenüber 1992 und 1993 war die Belastung 1994 deutlich höher. Dies würde auf ein erhöhtes Risiko im «Ozonsommer» 1994 schliessen. Durch die Berücksichtigung anderer Einflussgrössen, insbesondere des Wasserangebots, kann aber gezeigt werden, dass dies nicht der Fall war.

### Trockenheit reduziert Ozonwirkung

Ozon dringt auf dem Weg über die Stomata ins Blatt ein, und nur die aufgenommene Ozondosis ist physiologisch wirksam. Trockenheit, das heisst unter anderem Wassermangel im Boden, reduziert die Stomataöffnung und damit die Ozonwirkung (Fangmeier *et al.* 1993). Dadurch wird die negative Ozonwirkung auf den Pflanzenertrag um den Faktor  $f_{[wasser]}$  vermindert (siehe Kasten). Übertrifft die Niederschlagsmenge die potentielle Evapotranspiration, so ist  $f_{[wasser]}$  gleich 1. Ist dies nicht der Fall, so sinkt  $f_{[wasser]}$ . Entsprechend nimmt die Ozonwirkung ab.

Unter Verwendung der entsprechenden Meteorodaten für den Versuchsstandort Zimmerwald (BE) wurde  $f_{[wasser]}$  für verschiedene Jahre berechnet (Abb. 6a). In Jahren mit genügend Niederschlag

### Berechnung des Bodenwasser-Korrekturfaktors

Der Schutz der Pflanzen vor Ozonaufnahme und -wirkung durch die Trockenheit wird wirksam, wenn das Wasserdefizit im Boden so gross ist, dass der Ertrag zurückgeht. Dies ist für Weizen im Bereich von 60 - 70 % des verfügbaren Wassers (relativ zur Feldkapazität) (%nFK) der Fall. Aus verschiedenen Daten kann für den Bereich unterhalb dieser Schwelle folgende empirische Beziehung zwischen %nFK und dem relativen Körnerertrag %E bestimmt werden:

$$\%E = -0,198 + 0,018 \%nFK \quad (1)$$

Unter der Annahme, dass sich die Ozonwirkung proportional zum relativen Ertrag verhält, ist  $\%E = f_{[wasser]}$  dem Korrekturfaktor für die Ozonwirkung. %nFK kann vereinfacht als Funktion der Differenz von Niederschlag (N) und potentieller Evapotranspiration (PET) berechnet werden. Damit wird unter anderem vernachlässigt, dass Wasser durch Kapillaraufstieg nachgeliefert wird. Die Beziehung lautet nach Wendling (1980):

$$\%nFK = \frac{FK_0 - b \sqrt{(PET - N)}}{FK_0} 100 \quad [\%] \quad (2)$$

Die Grösse b ist ein variabler Abtrocknungskoeffizient (wird hier gleich 1 gesetzt).  $FK_0$  steht für den relativen Bodenwassergehalt zu Beginn der Berechnungsperiode, und  $FK_0$  steht für die Feldkapazität. PET kann nach Campbell (1986) durch eine einfach empirische Funktion aus Strahlung (GS in  $W m^{-2}$ ) und Temperatur (T in  $^{\circ}C$ ) abgeschätzt werden:

$$PET = \frac{0,025 * (T + 3) * GS}{2430} 86,4 \quad [mm/T] \quad (3)$$

Aufgrund der Funktionen (2) und (3) lässt sich der mittlere Bodenwassergehalt für die Monate Juni und Juli, welche bezüglich der Ozonempfindlichkeit von Weizen als besonders wichtig angesehen wird, abschätzen. Aus Gleichung (1) und (2) lässt sich  $f_{[wasser]}$  bestimmen.

( $PET < N$ ) ist  $f_{[wasser]} = 1$  und eine Reduktion der Ozonwirkung durch Trockenheit ist nicht zu erwarten. In den übrigen Jahren, beispielsweise 1994, sinkt  $f_{[wasser]}$  deutlich unter 1. Das bedeutet, dass eine Abschätzung des potentiellen Ertragsverlustes ohne Berücksichtigung des Wasserfaktors zu einer Überschätzung führt. Diese Überschätzung kommt in Abbildung 6b zum Ausdruck. Durchschnittlich wird der Ertragsverlust für die ausgewählten Jahre um 5,3 % überschätzt, im Extremfall (1994) sogar um 18 %.

Diese Differenzierung der Risikoabschätzung zeigt, dass Jahre mit extrem hoher Ozonbelastung nicht *a priori* auch Jahre mit höchstem Ozonrisiko für Kulturpflan-

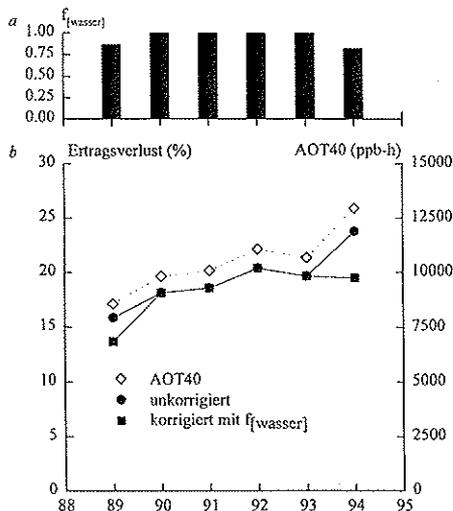


Abb. 6. a) Verlauf des Korrekturfaktors, der die Wirkung von Trockenheit auf die Ozonwirkung berücksichtigt. b) Verlauf der Ozonbelastung (AOT40) und der geschätzten, potentiellen Ertragsverluste bei Weizen mit und ohne Berücksichtigung des Korrekturfaktors.

zen darstellen. Ebenso sind die Ertragsverluste in niederschlagsarmen Gebieten bei starker Ozonbelastung nicht entsprechend hoch. Dies setzt allerdings voraus, dass keine künstliche Bewässerung erfolgt; ansonsten muss die Bewässerungsmenge in die Berechnung miteinbezogen werden, und  $f_{\text{wasser}}$  steigt gegen 1. Eine Bewässerung in Zeiten starker Ozonbelastung führt also zu einer Erhöhung des Risikos einer Ozonwirkung. Die Modifikation des Ozonrisikos durch den Bodenwassergehalt sollte bei der Auswahl von Referenzjahren berücksichtigt werden, damit sich die Luftreinhaltestrategie an jenen Situationen orientiert, welche für die Vegetation das grösste Risiko darstellen.

## Ausblick

Um den Pflanzenbau vor den negativen Ozonwirkungen zu schützen, muss die Forschung die Zielgrössen, das heisst die Critical Levels, selbst erarbeiten. Aufgrund der bisherigen Ergebnisse der Ozon-Wirkungsforschung konnte ein erster Critical Level für empfindliche landwirtschaftliche Kulturpflanzen festgelegt werden. Weitere Untersuchungen sollen helfen, diesen Wert zu differenzieren und den zeitlichen und standörtlichen Gegebenheiten anzupassen. Die Einführung eines Korrekturfaktors für den Bodenwassergehalt stellt dabei einen 1. Schritt dar. Weitere Faktoren werden zu berücksichtigen sein. Ferner werden zusätzliche Informationen über die unterschiedliche Ozon-

empfindlichkeit verschiedener Arten und Sorten benötigt. Der Critical Level für landwirtschaftliche Kulturpflanzen wird verwendet, um das Ozonrisiko in Europa zu kartieren und die Wirksamkeit von Emissionsreduktions-Szenarien durchzurechnen. Diese Rechnungen orientieren sich damit an der Empfindlichkeit der Kulturpflanzen. Auf diesem Weg kann landwirtschaftliche Forschung die internationale Luftreinhaltepolitik im Interesse eines effizienten und damit umweltschonenden Pflanzenbaus beeinflussen.

## LITERATUR

- Campbell, G.S., 1986. An Introduction to Environmental Biophysics. Heidelberg Science Library. 159 p.
- Fangmeier, A., Galaup, S. and Bonte, J., 1993. CEC Assessment on drought stress effects. In: The European Open-top Chamber Project: Assessment of the Effects of Air Pollutants on Agricultural Crops. CEC Air Pollution Research Report 48, 143-154.
- Fuhrer, J., 1994. The critical level for ozone to protect agricultural crops - an assessment of data from European open-top chamber experiments. In: Critical Levels for Ozone - A UN-ECE Workshop Report (Fuhrer, J. & Achermann, B., Eds.), *Schriftenreihe der FAC* 16, 42-57.
- Fuhrer, J. and Achermann, B., 1994. Critical Levels for Ozone - A UN-ECE Workshop Report (Fuhrer, J. & Achermann, B., Eds.), *Schriftenreihe der FAC* 16. Eidg. Forschungsanstalt für Agrilkulturchemie und Umwelthygiene, Liebefeld-Bern. 328 p.
- Lefohn, A.S., 1992. The characterization of ambient ozone exposures. In: Surface Levels Ozone Exposures and their Effects on Vegetation (A.S. Lefohn, Ed.). Lewis Publishers, Chelsea, MI, pp. 31-92.
- Wendling, U., 1980. Ein Verfahren zur Berechnung der Abtrocknung der obersten Bodenschicht für die Einschätzung der Befahrbarkeit. *Z. Meteorologie* 30, 131-135.

## RÉSUMÉ

### Contrôle de la pollution de l'air pour la protection des grandes cultures

Un niveau critique d'ozone pour protéger les cultures agricoles sensibles a été établi sous la convention CEE-ONU sur la pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance (Convention de Genève). La valeur, exprimée en index cumulatif (AOT40) sur 3 mois, a été définie comme le taux d'ozone correspondant à 10 % de la perte du rendement en grains dans le blé. En Suisse, ce niveau critique est souvent dépassé et

des pertes significatives de rendement potentiel peuvent être alors estimées pour les différentes années. Lorsque le sol est sec (année sèche), les effets de l'ozone sont diminués. Un facteur dérivé de l'équilibre de l'eau dans le sol a été utilisé pour corriger l'estimation des pertes de rendement dues à l'effet négatif de l'humidité du sol. En utilisant ce facteur, il a pu être ainsi démontré qu'en 1994, avec une haute pollution d'ozone et des conditions sèches, la perte estimée de rendement potentiel avait diminué de 24 % à 19 %, et que cette perte s'avérait être plus basse que les années précédentes avec des taux d'ozone plus faibles, mais des précipitations plus élevées.

## SUMMARY

### Air pollution control to protect crop production

A critical level for ozone has been established under the UN-ECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (Geneva Convention) to protect sensitive agricultural crops. The value, expressed as cumulative index (AOT40) for 3 months, has been defined as the ozone exposure corresponding to a 10 % grain yield loss in wheat. In Switzerland, this critical level is often exceeded, and significant potential yield losses can be estimated for various years. Under low soil moisture (dry years), ozone effects are reduced. A factor derived from the soil-water balance is used to correct yield loss estimates for the interacting effect of soil moisture. Using this factor, it can be shown that in 1994 when high ozone pollution occurred, the estimated potential yield loss was decreased from 24 % to 19 % due to dry conditions, and thus was lower than in previous years with less ozone but with ample precipitation.

**KEY WORDS:** Ozone, critical level, yield, yield loss, soil water, agricultural crops, UN/ECE