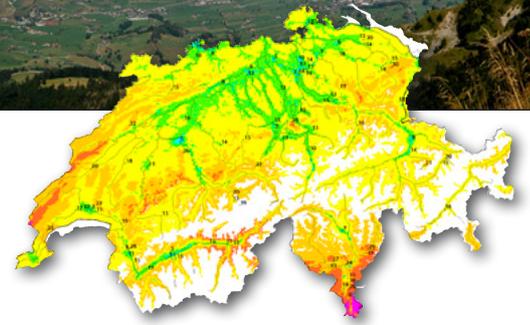




Cercl  
Air

sc | nat 

ACP  
Atmospheric Chemistry and Physics  
A Commission of the Swiss Academy of Sciences



## Ozon und Sommersmog

Fachtagung zum Stand der Forschung und zur Reduktionsstrategie

## Ozone et smog estival

État de la recherche et stratégie de réduction des immissions excessives

Bern, 30. Oktober 2008

## **Impressum**

Editoren: H. Gygax, J. Staehelin, R. Weber  
Titelblatt: M. Fischer, Paul Scherrer Institut  
Druck: Paul Scherrer Institut  
Foto©: Michael Sengers, Zürich, [www.sengers.ch](http://www.sengers.ch)

## Inhaltsverzeichnis

<b>Programm</b>	2
<hr/> <b>H. Gygax</b> , Cercl'Air Thematik, Thème	4
<hr/> <b>Chr. Hüglin</b> , EMPA Entwicklung der Konzentrationen von Ozon und seiner Vorläufer an NABEL-Stationen	6
<hr/> <b>J. Brunner</b> , UGZ Zürich, Ostluft Ozon im Tagesgang – Mechanismen	9
<hr/> <b>M. Camenzind</b> , LHA beider Basel Entwicklung der Ozonkonzentration und der meteorologischen Bedingungen in der Region Basel	12
<hr/> <b>J. Staehelin</b> , ETHZ Ozon in der Grenzschicht, Ozon in der Stratosphäre: Chemische Grundlagen und zeitlicher Verlauf	13
<hr/> <b>I. Bey</b> , EPFL Résultats des modèles de chimie transport globaux sur le transport à longue distance de l'ozone troposphérique	18
<hr/> <b>A. Prévot</b> , PSI Statistische Analyse der Ozonspitzenwerte im schweizerischen Mittelland und Datenanalyse des Hintergrundozons	21
<hr/> <b>V. Lanz</b> , Empa Identifikation von anthropogenen VOC-Quellen basierend auf Immissionsmessungen und deren Bedeutung bei der Ozonbildung	23
<hr/> <b>Chr. Spirig</b> , Agroscope Reckenholz Rolle biogener VOC-Emissionen bei der Ozonbildung	25
<hr/> <b>S. Andreani</b> , PSI Ergebnisse eines regionalen Modells für schweizerische Ozonveränderungen im Mittelland	29
<hr/> <b>U. Baltensperger</b> , PSI, Präsident ACP Neue Ergebnisse zur sommerlichen Partikelbildung	31
<hr/> <b>P. Straehl</b> , BAFU Beurteilungskriterien für die Schädlichkeit der Ozonbelastung	33
<hr/> <b>R. Ballaman</b> , OFEV Stratégie de lutte contre le smog estival et l'ozone au niveau national et international	38
<hr/>	

**Ozon und Sommersmog**

Fachtagung zum Stand der Forschung und zur Reduktionsstrategie

**Ozone et smog estival**

État de la recherche et stratégie de réduction des immissions excessives

Hotel Ador, Laupenstrasse 15, Bern

<b>Tagungsprogramm-Vormittag</b>		
09:15	Kaffee / Café	
09:40 – 09:45	Begrüssung, Fragestellung Salutations, présentation de la problématique	H. Gygax, Cercl’Air
09:45 – 10:00	Entwicklung der Konzentrationen von Ozon und seiner Vorläufer an NABEL-Stationen	Chr. Hüglin, EMPA
10:00 – 10:15	Ozon im Tagesgang – Mechanismen	J. Brunner, UGZ Zürich, Ostluft
10:15 – 10:25	Entwicklung der Ozonkonzentration und der meteorologischen Bedingungen in der Region Basel	M. Camenzind, LHA beider Basel
10:25 – 11:00	Ozon in der Grenzschicht, Ozon in der Stratosphäre: Chemische Grundlagen und zeitlicher Verlauf	J. Staehelin, ETHZ
11:00 – 11:20	Kaffeepause / Pause café	
11:20 – 11:45	Résultats des modèles de chimie transport globaux sur le transport à longue distance de l’ozone troposphérique	I. Bey, EPFL
11:45 – 12:05	Statistische Analyse der Ozonspitzenwerte im schweizerischen Mittelland und Datenanalyse des Hintergrundozons	A. Prévot, PSI
12:05 – 12:25	Identifikation von anthropogenen VOC-Quellen basierend auf Immissions-Messungen und deren Bedeutung bei der Ozonbildung	V. Lanz, Empa
12:25 – 13:40	Mittagpause / Pause de midi	

<b>Tagungsprogramm-Nachmittag</b>		
13:40 – 14:00	Rolle biogener VOC-Emissionen bei der Ozonbildung	Chr. Spirig, Agroscope Reckenholz
14:00 – 14:20	Ergebnisse eines regionalen Modells für schweizerische Ozonveränderungen im Mittelland	S. Andreani, PSI
14:20 – 14:40	Neue Ergebnisse zur sommerlichen Partikelbildung	U. Baltensperger, PSI, Präsident ACP
14:40 – 15:00	Kaffeepause / Pause café	
15:00 – 15:20	Beurteilungskriterien für die Schädlichkeit der Ozonbelastung	P. Straehl, BAFU
15:20 – 15:40	Stratégie de lutte contre le smog estival et l'ozone au niveau national et international	R. Ballaman, OFEV
15:40 – 16:15	Diskussion: Schlussfolgerungen zur Strategie und zur Kommunikation Discussion: conclusions concernant la stratégie et la communication	Plenum Leitung-direction: H. Gygax

## Thematik

Die schweizerischen und europäischen Emissionen von  $\text{NO}_x$  und VOC als den wichtigsten Vorläufersubstanzen für bodennahes Ozon konnten in den letzten 15 Jahren etwa halbiert werden. Dennoch hat sich die Belastung durch Ozon nicht wesentlich verringert. Seit dem Rückgang der Ozonspitzen bis anfangs der 90er Jahre verharren die Ozonmaxima auf konstantem Niveau. Es wurde sogar ein Anstieg der mittleren Ozonwerte und der Belastung an hochalpinen Stationen festgestellt.

Die Eidgenössische Kommission für Lufthygiene hielt 2004 fest: „Die bisherige Strategie, die  $\text{NO}_x$ - und VOC-Emissionen zu senken, ist richtig und deshalb weiterzuführen. Gegenüber dem Stand von heute müssen die Emissionen der Vorläuferschadstoffe in der Schweiz noch mindestens einmal halbiert werden. Auf internationaler Ebene sind noch Emissionsreduktionen von mehr als 60 % notwendig. Darüber hinaus sind Anstrengungen zu treffen, die  $\text{CH}_4$ - und CO-Emissionen zu senken.“

Von wissenschaftlicher Seite wurde die Auffassung vertreten, eine weitere Senkung der Ozonspitzen im Sommer sei nicht durch kurzfristige regionale oder auf die Schweiz beschränkte Massnahmen zu erreichen. Erfolg versprechend sei nur ein europaweit koordiniertes Vorgehen, und auch da müssten Massnahmen bereits zu Beginn einer Schönwetterperiode ergriffen werden. Andererseits sind von verschiedenen Interessenverbänden bereits eingeführte oder geplante Massnahmen unter Beschuss geraten, indem die wesentliche Bedeutung der anthropogenen VOC oder der  $\text{NO}_x$  für die Ozonbelastung bezweifelt wird.

Es stellt sich die Frage, ob die bisher verfolgte Strategie zur Bekämpfung des Sommersmogs, mit Ozon als Leitsubstanz, geeignet ist und wie eine Strategie für zukünftige Massnahmen aussehen soll. Ähnliche Fragen wurden auch auf europäischer Ebene aufgeworfen und durch eine grosse Gruppe von Forschenden in den „Answers to the Urbino questions“ von 2005 beantwortet. Offen bleibt, ob für die Situation in der Schweiz andere Antworten gelten und ob seitdem gewonnene neue Erkenntnisse die damaligen Antworten stützen.

Der Cercl’Air will deshalb zusammen mit Fachleuten von Hochschul- und Forschungsinstituten auf der Basis des heutigen Wissens die Strategie zur Bekämpfung übermässiger Ozonbelastungen überdenken und damit die diesbezügliche Kommunikation verbessern.

## Thème

Au cours des 15 dernières années, les émissions de NO<sub>x</sub> et de COV, substances précurseurs de l'ozone, ont été réduites de moitié en Suisse et en Europe. Malgré ce succès, les concentrations d'ozone n'ont pas sensiblement baissé. Après une certaine diminution des pics d'ozone au début des années 90, les valeurs maximales d'ozone sont restées constantes. Dans certaines stations de mesure alpines, les moyennes d'ozone ont même augmenté.

En 2004, la Commission Fédérale de l'Hygiène de l'Air a constaté que « la stratégie actuelle, à savoir réduire les émissions de NO<sub>x</sub> et de COV, doit être poursuivie puisqu'elle est appropriée. En Suisse, les émissions des précurseurs de l'ozone doivent encore être réduites au moins de moitié par rapport au niveau d'aujourd'hui. A l'échelon international, il faut encore réduire les émissions de plus de 60% et consentir des efforts supplémentaires pour réduire les émissions de CH<sub>4</sub> et de CO. »

Certains milieux scientifiques ont exprimé l'avis qu'une diminution des valeurs de pointe en été ne pourrait pas être obtenue par des mesures à court terme, introduites sur une région limitée ou même sur tout le territoire suisse. Pour être efficaces, les mesures devraient être prises au début d'un épisode dans toute l'Europe. Par ailleurs, plusieurs groupes d'intérêt ont critiqué les mesures, introduites ou planifiées, en mettant en doute l'utilité d'une réduction des émissions anthropogènes de NO<sub>x</sub> et de COV pour lutter contre le smog estival.

Dès lors, la question se pose de savoir si la stratégie poursuivie jusqu'ici pour combattre les immissions excessives d'ozone est adéquate et quelles devraient être les mesures prioritaires dans le futur. En 2005, cette problématique a été débattue au niveau européen et certaines réponses ont été données par des scientifiques (« Answers to the Urbino questions »). Ces réponses sont-elles aussi valables pour la Suisse, et les derniers résultats de la recherche confirment-ils les réponses données en 2005 ?

Le séminaire organisé par Cercl'Air, conjointement avec la Commission pour la chimie et la physique de l'atmosphère (ACP), propose de faire le point sur les connaissances actuelles et, sur cette base, d'élaborer ensemble une stratégie de lutte contre l'ozone afin que scientifiques et autorités présentent des points de vue cohérents.

## Entwicklung der Konzentrationen von Ozon und seiner Vorläufer an NABEL-Stationen

Christoph Hüglin

Empa, Abt. Luftfremdstoffe/Umwelttechnik, christoph.hueglin@empa.ch

Ozon ( $O_3$ ) ist einer der wichtigsten Bestandteile des photochemischen Smogs (Sommersmog) und wird in der Atmosphäre durch Reaktionen aus sogenannten Vorläufersubstanzen gebildet. Als starkes Oxidationsmittel und Reizgas greift Ozon Atemwege und Lungengewebe von Menschen und Tieren an und schädigt Pflanzen (EKL, 2004). Troposphärisches Ozon ist zudem ein wirksames Treibhausgas (IPCC, 2007).

Die Ozonkonzentration an einem bestimmten Standort wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst (Dentener et al., 2008):

- Von der Hintergrundkonzentrationen von Ozon und dessen Vorläufersubstanzen. Vorläufersubstanzen von Ozon sind insbesondere Stickoxide ( $NO_x$ ) und flüchtige organische Verbindungen (VOC), Kohlenmonoxid (CO) und Methan ( $CH_4$ ). Die Hintergrundkonzentration von Ozon wird durch grossräumige Prozesse bestimmt, z.B. durch den Austausch von Luftmassen zwischen der Stratosphäre und der Troposphäre, oder aber von den globalen Emissionen der Vorläufersubstanzen.
- Von regionalen und lokalen Emissionen der Vorläufersubstanzen (insbesondere  $NO_x$  und VOC).
- Von den meteorologischen Verhältnissen. Für die Bildung von Ozon ist intensive Sonneneinstrahlung notwendig, erhöhte Lufttemperaturen begünstigen die Bildungsreaktionen.

Eine Kombination dieser Faktoren führt in der Schweiz und anderen Ländern in Europa regelmässig zu Überschreitungen der geltenden Ozon-Grenzwerte.

Massnahmen zur Verringerung der Ozonbelastung konzentrierten sich in der Schweiz und in Europa bisher hauptsächlich auf die Reduktion von lokalen und regionalen Emissionen von Stickoxiden und flüchtigen organischen Verbindungen im Rahmen der UN ECE Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigungen (UN ECE CLRTAP).

Als Folge der Umsetzung dieser Massnahmen sind in der Schweiz die  $NO_x$ - und VOC-Emissionen während der letzten 20 Jahren stark zurückgegangen ( $NO_x$  - 45% und VOC -65%, siehe BAFU 2008). Dies wird auch aus den Immissionsmessungen deutlich, Abb. 1 zeigt den Verlauf der  $NO_x$ - und der Nicht-Methan VOC (NMVOC) an verschiedenen Standorttypen des NABEL-Messnetzes. Die Emissionen von Kohlenmonoxid konnten in den letzten Jahrzehnten ebenfalls stark reduziert werden, die CO-Immissionen sind seit 1992 um etwa 60% zurückgegangen (BAFU, 2008). Was haben diese Reduktionen bezüglich Ozonbelastung in der Schweiz bewirkt?

Abb. 2 zeigt die Immissionsentwicklung von Ozon seit 1990 für verschiedene Standorttypen. Dargestellt sind verschiedene Quantile der Verteilung der während eines Jahres gemessenen 1h-Ozonmittelwerten. Es zeigt sich folgendes Bild: Die Ozon-Spitzenkonzentrationen (hohe Quantile) zeigen eine leichte Ab-

nahme, oder keinen signifikanten Trend, die tiefen Quantile (z.B. Medianwert) zeigen dagegen eine Zunahme.

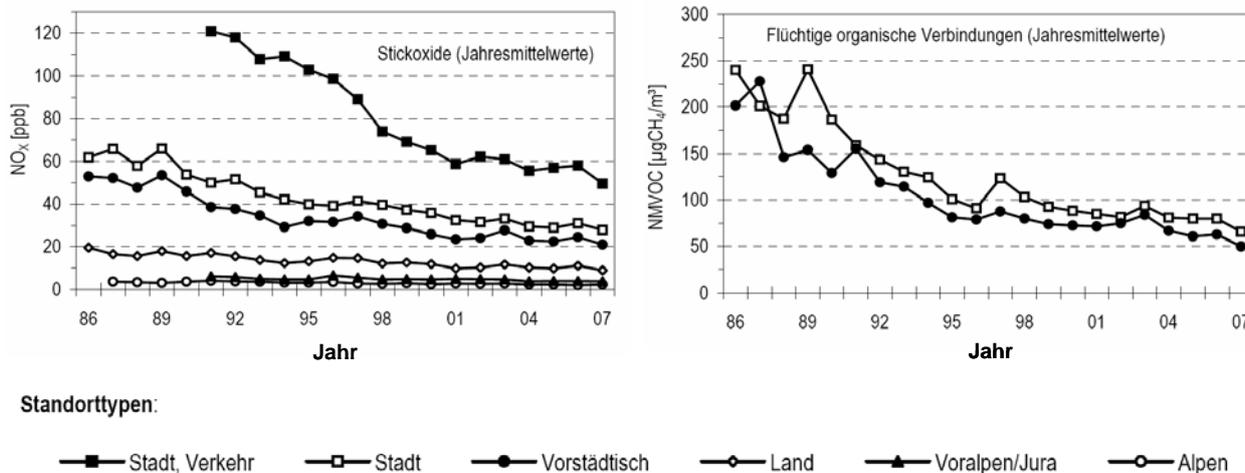


Abb.1: Immissionsmessungen von Stickoxiden (links) und flüchtigen organischen Verbindungen (rechts) für die Zeit von 1986 bis 2007 (aus BAFU, 2008).

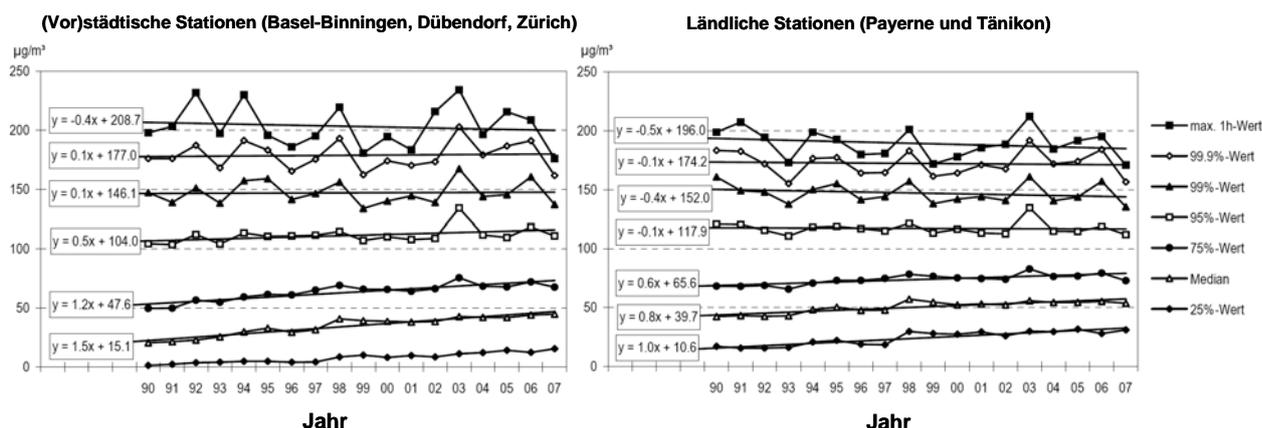


Abb. 2: Entwicklung verschiedener Statistiken der 1h-Ozonwerte von 1990-2007 und zugehörige Schätzungen des linearen Trends (aus BAFU, 2008).

Wie lassen sich die beobachteten Trends erklären?

Zunächst ist festzustellen, dass in den Gebieten mit höheren  $\text{NO}_x$ -Emissionen (in Städten und in Stadtnähe) der Abbau von Ozon durch die Reaktion mit  $\text{NO}$  als Folge der reduzierten  $\text{NO}_x$ -Emissionen verringert wurde. Dies erklärt einen wesentlichen Teil der Zunahme der tiefen Quantile von Ozon an städtischen und vorstädtischen Standorten. Verschiedene Untersuchungen weisen zudem darauf hin, dass die Ozonbelastung des hemisphärischen Hintergrundes zugenommen hat (Vingarzan, 2004; Derwent, 2007). Diese Zunahme der Hintergrundkonzentration führte wahrscheinlich zu einer zumindest teilweisen Kompensation der Ozonminderung, welche durch die Reduktion der regionalen Emissionen von Vorläufersubstanzen erreicht wurde (Derwent, 2007).

Die in der Schweiz beobachteten konstanten oder leicht abnehmenden Ozon-Spitzenkonzentrationen stimmen mit der Entwicklung in anderen Teilen Europas

überein und entsprechen den Veränderungen die aufgrund von Ozonmodellen zu erwarten waren (Derwent et al., 2003). Modellergebnisse zeigen, dass die Ozonreduktion nicht direkt proportional zur Reduktion der Emissionen von Vorläufer-substanzen ist. Es sind weitere erhebliche Reduktionen der Emissionen von Vorläufersubstanzen auf nationaler und internationaler Ebene notwendig, um die zu hohen Ozonbelastungen dauerhaft zu mindern.

## Referenzen

- BAFU, NABEL Luftbelastung 2007. Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL). Hrsg. BAFU und EMPA, Bern, 2008.
- EKL, Sommersmog – Stellungnahme der Eidgenössische Kommission für Lufthygiene, Bern 2004.
- Dentener, F., D. Stevenson, J. Cofala, R. Mechler, M. Amann, P. Bergamaschi, F. Raes, R.G. Derwent, The impact of air pollutant and methane emission controls on tropospheric ozone radiative forcing: CTM calculations for the period 1990-2030, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 1731–1755, 2005.
- Derwent, R.G., M.E. Jenkin, S.M. Saunders, M.J.Pilling, P.G. Simmonds, N.R. Pas-sant, G.J. Dollard, P.Dumitrean, A. Kent, Photochemical ozone formation in north west Europe and its control. *Atmos. Environ.* 37, 1983-1991, 2003.
- Vingarzan, R., A review of surface ozone background levels and trends. *Atmos. Environ.*, 38, 3431-3442, 2004.
- IPCC, Vierter Sachstandsbericht des IPCC (AR4). Klimaänderung 2007: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger. Deutsche Übersetzung, ISBN-Nummer: 978-3-907630-28-0, Bern/Wien/Berlin, 2007.

## Ozon im Tagesgang Mechanismen

Jürg Brunner<sup>1)</sup>, Alfred Meier<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> OSTLUFT, Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich (UGZ),  
juerg.brunner@zuerich.ch

<sup>2)</sup> ehem. Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich (UGZ)

Ozon (O<sub>3</sub>) ist eines der wichtigsten Spurengase in der Atmosphäre. Das natürliche Vorkommen von Ozon in 20 bis 40 km Höhe (Ozonschicht in der Stratosphäre) schützt uns vor der gefährlichen Ultraviolettstrahlung der Sonne. Auch in den unteren Schichten der Atmosphäre (Troposphäre) kommt Ozon natürlicherweise vor, allerdings in relativ tiefen Konzentrationen (in unseren Breiten etwa 15 bis 20 ppb).

Stark erhöhte Ozonkonzentrationen treten in Bodennähe während sommerlicher Schönwetterperioden auf. Während solcher Phasen werden Ozon und weitere Oxidantien durch komplizierte fotochemische Prozesse aus Vorläuferschadstoffen gebildet. Ozon gilt dabei als Leitsubstanz dieses Sommer- oder Fotosmogs. Die wichtigsten Ozonvorläufer sind Stickoxide (NO<sub>x</sub>) und flüchtige organische Verbindungen (VOC, wie z.B. Benzin und Lösemittel). Auf Grund der ausgeprägten Wetterabhängigkeit schwankt die Ozonbelastung von Jahr zu Jahr.

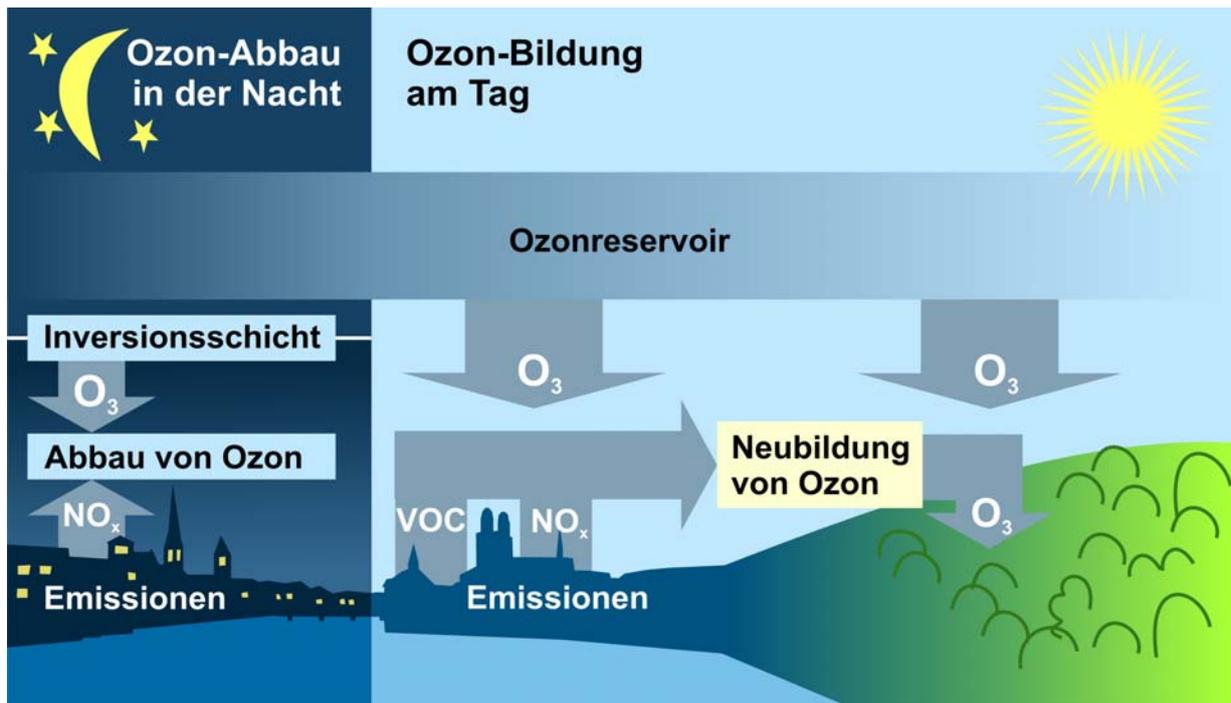
Beim Ozon sind die Zusammenhänge zwischen Vorläufer-Emissionen und den beobachteten Ozonkonzentrationen sehr komplex. Infolge seiner Langlebigkeit in der Atmosphäre kann Ozon über weite Strecken transportiert werden. Auch weit entfernte Quellen von NO<sub>x</sub> und VOC tragen so zu einem beträchtlichen Teil zur lokalen Ozonbelastung bei. Wegen dieser weiträumigen Verfrachtungen ist der Sommersmog nicht allein durch lokale Massnahmen in den Griff zu bekommen.

Im Folgenden sollen die Mechanismen der lokalen Ozonbelastung an Hand der Datenreihen einer typischen Sommersmog-Lage im Raum Zürich etwas eingehender betrachtet werden.

### Ozon im Tagesgang

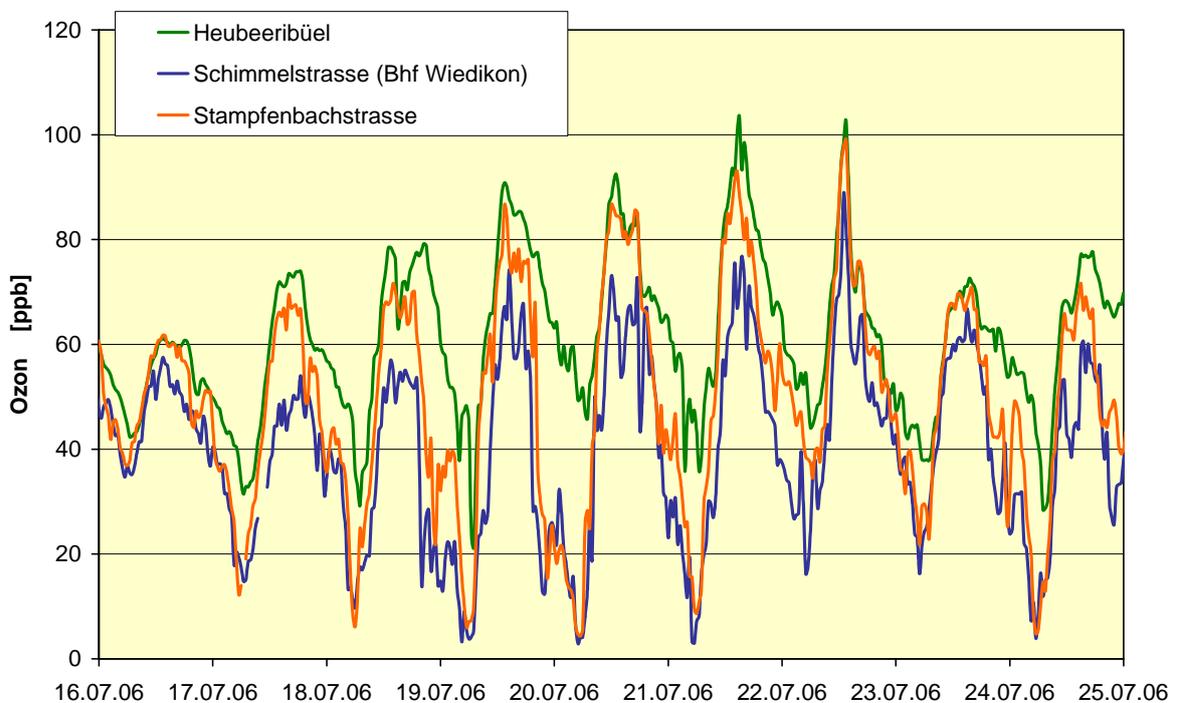
Mit Einsetzen der Nacht füllen lokale und regionale Kaltluftabflüsse das Limmattal mit kühlerer und somit schwererer Luft auf. Zusätzlich kühlt sich der Boden durch Strahlungsverlust rascher ab als die Luft. Es entsteht eine nächtliche Inversionslage. Diese Temperaturverteilung wirkt wie eine Sperre, d.h. der Ozonfluss von oben nach unten kommt zum Erliegen. Unterhalb der Inversionsschicht baut sich das Ozon durch Bodenkontakt und Reaktion mit Stickoxiden rasch ab, manchmal bis hinunter an die Nachweisgrenze. In den vom Boden abgekoppelten höheren Luftschichten bleibt das Ozon hingegen nahezu unverändert bestehen (Ozon-Reservoir).

Mit dem Sonnenaufgang und zunehmender Erwärmung im Verlauf des Vormittags löst sich die Inversion allmählich auf und die ozonarme Luft über dem Boden beginnt sich mit Luft aus dem Ozonreservoir zu mischen. Die Folge ist ein steiler Anstieg der Ozonkonzentrationen am Boden im Verlauf des Vormittags.



Vereinfachtes Schema zur Beschreibung der Ozon-Mechanismen in Bodennähe

Der hohe Sonnenstand und zunehmende Temperaturen setzen um die Mittagszeit die Photochemie zur Neubildung von Ozon aus lokalen bzw. regionalen NO<sub>x</sub>- und VOC-Quellen in Gang. Dieser Lokalbeitrag addiert sich zum bereits vorhandenen Ozonsockel. Je nach Witterungsbedingungen erreicht die Ozon-Belastung ihr Maximum am früheren oder späteren Nachmittag.



Typischer Verlauf einer mehrtägigen Sommersmog-Episode im Raum Zürich (Juli 2006)

Die Ozonproduktion in Emittentennähe führt durch den vertikalen Luftaustausch dazu, dass während länger anhaltenden, stabilen sommerlichen Hochdruck-Wetterlagen die Konzentration an Ozon in der Reservoirschicht steigt. Die mit solchen Wetterlagen verbundenen täglich etwas höheren Temperaturen heizen zudem die lokale Ozon-Produktion weiter an. Ein Zusammenspiel dieser beiden Faktoren dürfte für die täglich höheren Ozon-Spitzenwerte verantwortlich sein.

Dies zeigt, dass Vertikaltransporte entscheidenden Einfluss auf die am Boden gemessenen Ozonkonzentrationen haben. Ohne Einbezug der dritten Dimension können letztere nicht verstanden werden.

### **Ozon-Reservoir**

Die Lebensdauer von Ozon in höheren Luftschichten beträgt einige Wochen bis Monate. Je nach Wetterlage kann das Ozon in der freien Troposphäre (ca. 3 bis 12 km Höhe) über weite Strecken transportiert werden. Nationale, kontinentale und gegebenenfalls auch NO<sub>x</sub>- und VOC-Emissionen der nördlichen Hemisphäre tragen so ihren Teil zur lokalen Ozonbelastung bei. Die freie Troposphäre ist daher als weiteres, sehr grossräumiges Ozonreservoir zu betrachten.

## **Entwicklung der Ozonkonzentration und der meteorologischen Bedingungen in der Region Basel**

Markus Camenzind<sup>1)</sup>, Dr. Hansruedi Moser<sup>1)</sup>, Max Baumann<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Lufthygieneamt beider Basel, Lufthygieneamt@bl.ch

Die Ozonmessreihen der Region Basel für den Zeitraum 1990 bis 2006 wurden mit Untersuchungen und Ergebnissen anderer Regionen der Schweiz verglichen. Hier zeigen sich ähnliche Tendenzen, nämlich eine Abnahme der Ozonbelastung an der untersuchten ländlichen Station und eine Zunahme an Agglomerationsstandorten.

Die untersuchten klimatischen Kennwerte (Sommer-, Hitzetage, Sonnenscheindauer, Niederschlagstage) im Sommerhalbjahr zeigen keinen systematischen Trend. Die Belastung der Luft mit Vorläuferschadstoffen ist seit 1990 praktisch halbiert worden.

Die Zahl der Belastungstage (mind. 1h > GW) hat sich regional unterschiedlich entwickelt, an der untersuchten ländlichen Station hat sich die Anzahl Belastungstage reduziert, an den Agglomerationsstandorten hat die Anzahl der Belastungstage zugenommen. Die Zunahme der Belastungstage verläuft parallel mit einer Zunahme der Ozonwettertage (Tage mit bestimmten ozonfördernden meteorologischen Bedingungen).

### **Referenzen**

Kernen René, Ozontrends in der Ostschweiz, Diplomarbeit an der Uni Bern, 2004  
Moser Hansruedi, Baumann Max, Interner Bericht: Trendentwicklung Ozon Region Basel 1990 - 2006, Lufthygieneamt beider Basel, Liestal, Juli 2007

## Ozon in der Grenzschicht, Ozon in der Stratosphäre: Chemische Grundlagen und zeitlicher Verlauf

Johannes Staehelin

Institut für Atmosphäre und Klima, Universitätstrasse 16, ETHZ  
Johannes.Staehelin@env.ethz.ch

Seit der Dokumentation sehr grosser Ozonkonzentrationen in der Abluftfahne der Grossstadt Los-Angeles in Südkalifornien am Ende des zweiten Weltkrieges wurde eine komplexe Theorie entwickelt, welche die Bildung des troposphärischen Ozons durch photochemische Reaktionen aus den Vorläuferschadstoffen (Stickoxide ( $\text{NO}_x$ :  $\text{NO} + \text{NO}_2$ ), organische flüchtige Verbindungen (VOC: Volatile Organic Compounds) und Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ )) erklärt. Trotz starker Reduktion der Emissionen der schweizerischen (und europäischen) anthropogenen Vorläuferschadstoffe seit Beginn der 90-er Jahre haben die Ozonspitzenwerte in der Schweiz kaum abgenommen. In dieser Präsentation sollen einige wissenschaftlich gesicherte Grundlagen der Erklärung des atmosphärischen Ozons kurz dargestellt werden. Da Ozon in der Stratosphäre ebenfalls zum troposphärischen Kreislauf beiträgt, sollen zuerst die heutigen Kenntnisse zum stratosphärischen Ozonproblem zusammengefasst werden. Im folgenden werden die Gesetzmässigkeiten der troposphärischen Ozonbildung kurz diskutiert und es soll anhand der Beschreibung der Abnahme der Spitzenwerte des bodennahen Ozons in Südkalifornien gezeigt werden, dass das Fehlen der Abnahme der sommerlichen Ozonspitzenwerte in der Schweiz nicht mit einem Versagen der Theorie der photochemischen Ozonbildung erklärt werden kann.

Das **Ozon in der Stratosphäre** hat seit Beginn der 70er-Jahre als Folge der menschlichen Emissionen von ozonzerstörenden Substanzen (ODS: Ozone Depl-

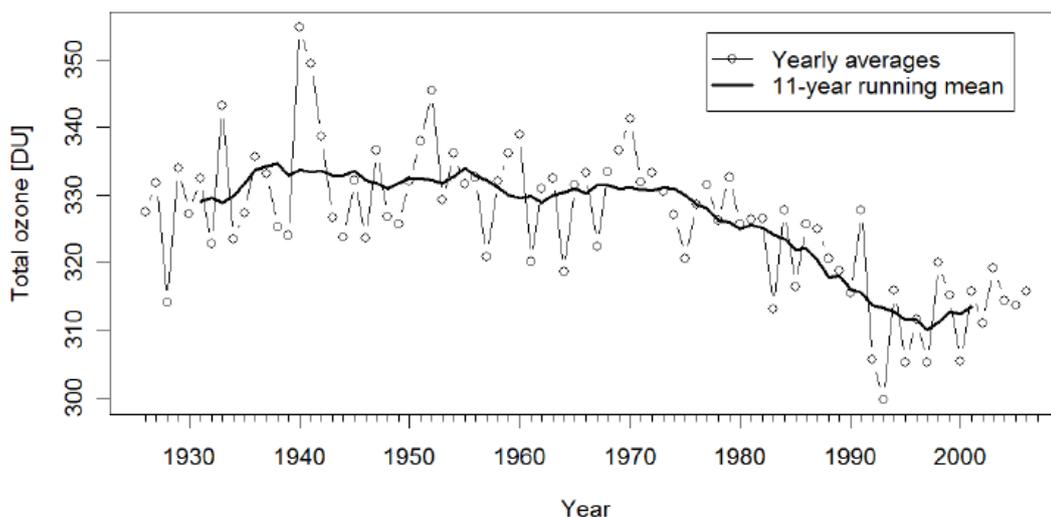


Abbildung 1: Jahresmittelwerte der Gesamtozonmessungen von Arosa (MeteoSchweiz).

eting Substances: FCKWs, HFCKWS und Halone) abgenommen. Die weltweiten Emissionen der ODS sind als Folge des Montrealer Protokolls (1987) stark rückläufig, was durch Messungen dieser Stoffe an entlegenen Standorten in der Troposphäre bestätigt wird (WMO, 2006). In mittleren nördlichen Breiten wurde eine Zunahme des stratosphärischen Ozons seit 1992 gemessen, wie dies auch die Ozonmessreihe von Arosa zeigt (s. Abb. 1). Diese Zunahme kann jedoch im Wesentlichen (noch) nicht mit dem Erfolg des Montrealer Protokolls erklärt werden, da die Einmischung der vom Erdboden emittierten ODS in die Stratosphäre ein langsamer Prozess ist und die maximale chemische Ozonzerstörung (in mittleren Breiten) erst in der zweiten Hälfte der 90er-Jahre erfolgte. Der Anstieg ab 1992 ist (hauptsächlich) (i) den niederen stratosphärischen Ozonwerten von 1992/1993, die durch den Vulkan Pinatubo (1991) bedingt waren und (ii) Langzeitklimavariabilität (die etwa durch die Nordatlantische Oszillation beschrieben werden kann) zuzuschreiben. Gewisse numerische Simulationen legen nahe, dass die stratosphärischen Ozonkonzentrationen in Zukunft grösser sein werden als vor der Abnahme durch die anthropogenen ODS (WMO, 2006). Diese „Superrecovery“ könnte in ferner Zukunft zu einer zusätzlich wichtigen Quelle des troposphärischen Ozons werden.

Abbildung 2 enthält eine Zusammenfassung, wie das **troposphärische Ozon** durch zwei miteinander verknüpfte radikalische Kettenreaktionen unter dem Einfluss des Sonnenlichtes entsteht. In unmittelbarer Nähe grosser NO-Quellen sind die Ozonkonzentrationen zunächst erniedrigt (wegen der Reaktion von NO mit O<sub>3</sub>), die chemische Bildung setzt die (langsamere) Oxidation der organischen Gase (ROG) voraus, weshalb die chemische Ozonbildung eine gewisse Zeit benötigt, sodass die maximalen Ozonkonzentrationen in den Abluftfahen von Städten gefunden werden. Numerische Simulationen (die ebenfalls die trockene

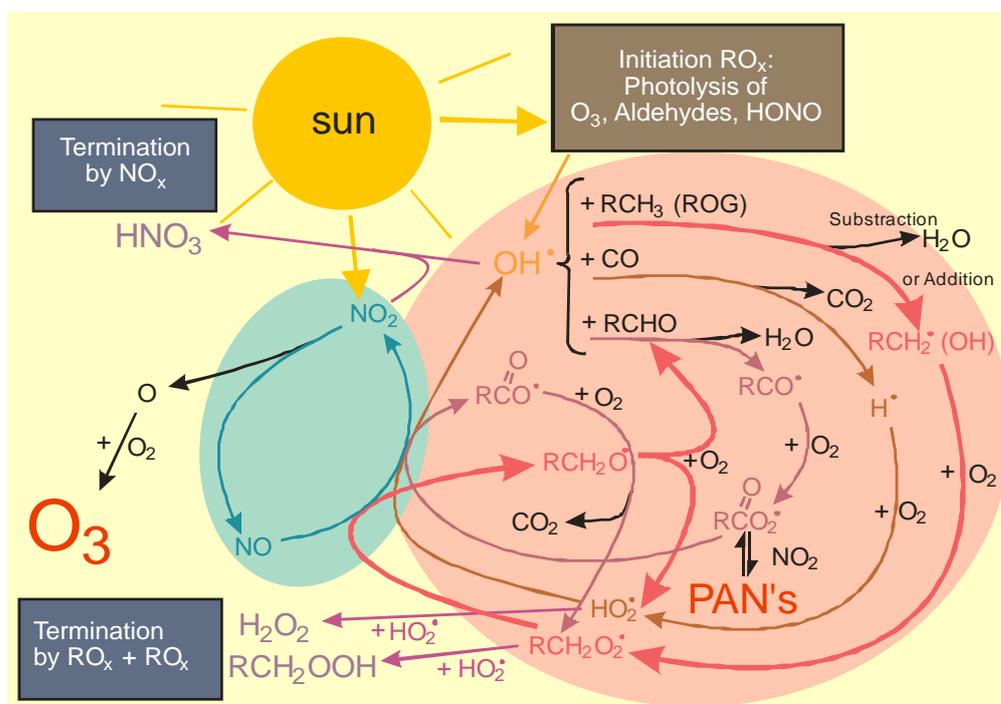


Abbildung 2: Zusammenfassung der troposphärischen Ozonbildung (aus Staehelin et al., 2000).

Deposition berücksichtigen) erlauben zu erklären, wie die Ozonbildung in der Grenzschicht von den Emissionen der (anthropogenen)  $\text{NO}_x$ -, und der VOC-Emissionen abhängen. Die Ozonbildung ist zunächst (meist) durch die VOC-Emissionen (VOC-Limitierung) und weiter entfernt von der Quelle durch die  $\text{NO}_x$ -Emissionen ( $\text{NO}_x$ -Limitierung) bestimmt. Zusätzlich ist zu beachten, dass das Ozon in der Reservoirschicht, die sich oberhalb der nächtlichen sommerlichen Inversionsschicht befindet, über grosse Distanzen verfrachtet werden kann. (Bei sehr geringen  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen erfolgt schliesslich ein chemischer Ozonabbau).

Die Spitzenwerte des bodennahen Ozons waren in **Südkalifornien** in den 50er- und 60-er Jahren extrem gross (s. Abb. 3). Die jährlichen Maximalkonzentrationen sind mit etwa 200 ppb nach wie vor sehr hoch, aber ihre Abnahme um mehr als einen Faktor drei ist sehr bemerkenswert. Abbildung 4 zeigt, dass die anthropogenen Emissionen der VOCs in Südkalifornien im Zeitraum von 1987-1997 um fast einen Faktor 3 abgenommen haben (was hauptsächlich auf die Reduktion der Strassenfahrzeugemissionen zurückzuführen ist), wohingegen die Emissionen der Stickoxide im gleichen Zeitraum nur vergleichsweise wenig abgenommen haben.

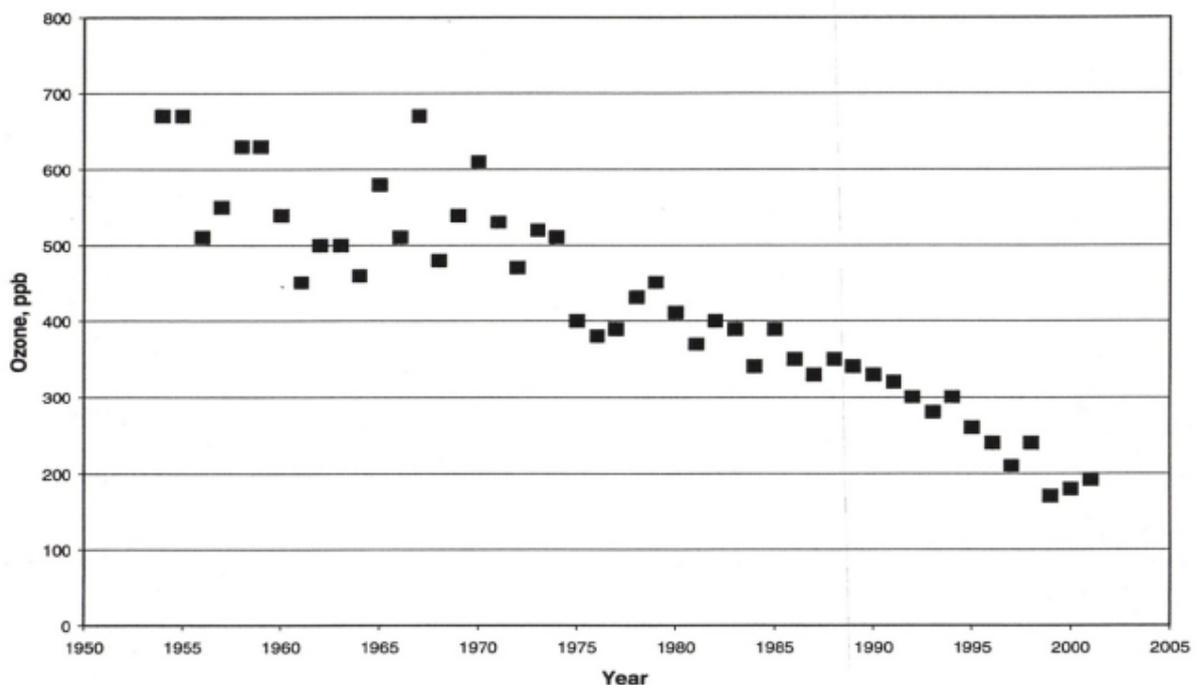


Abbildung 3: Zeitreihe der jährlichen Ozonspitzenwerte, die im Grossraum Los-Angeles (Südkalifornien) gemessen wurden (Grosjean, 2003).

Martien und Harley (2006) verwendeten ein komplexes numerisches Modell um die Ozonbelastung in Südkalifornien zu berechnen, das neben dem atmosphärischen Transport das in Abbildung 2 zusammengefasste chemische Reaktionssystem umfasst und die anthropogenen Emissionen von Abbildung 4 berücksichtigt (die biogenen VOC-Emissionen wurden zeitlich nicht verändert). Die modellierten Ozonkonzentrationen von drei ausgewählten Rezeptorstandorten

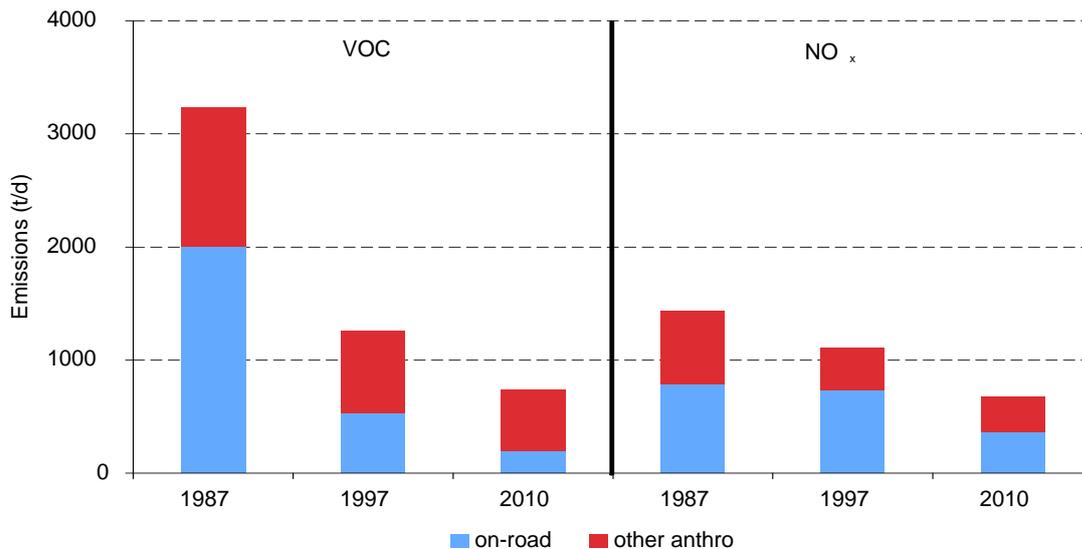


Abbildung 4: Veränderung der anthropogenen Emissionen der Ozonvorläufer-schadstoffe in Südkalifornien (aus Martien and Harley, 2006).

(sie befinden sich alle im Bereich der VOC-Limitierung) und drei ausgewählten Jahren sind in Abbildung 5 dargestellt. Abbildung 6 zeigt zum Vergleich die Zeitreihen der Ozonmaximalwerte der entsprechenden Messstandorte. Für den Zeitraum von 1987-1997 zeigen die modellierten Ozonkonzentrationen an allen drei Standorten eine Ozonabnahme, die am Standort „Azusa“ am stärksten ist.

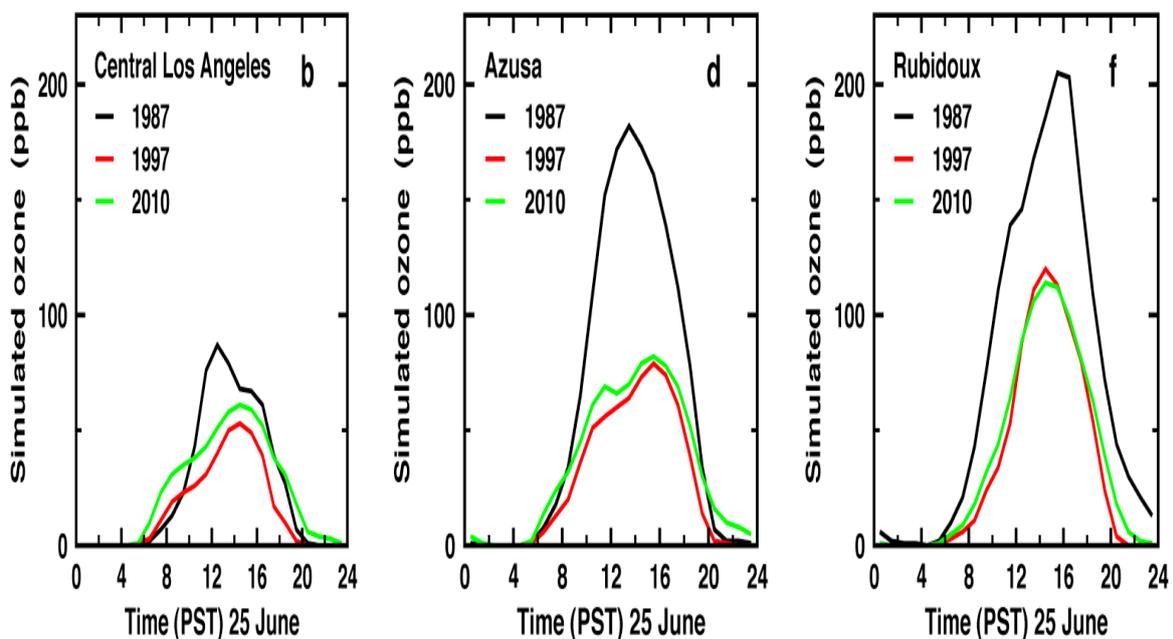


Abbildung 5: Tagesgänge der simulierten Ozonkonzentrationen für ausgewählte Messstandorte und Jahre in Südkalifornien (aus Martien and Harley, 2006).

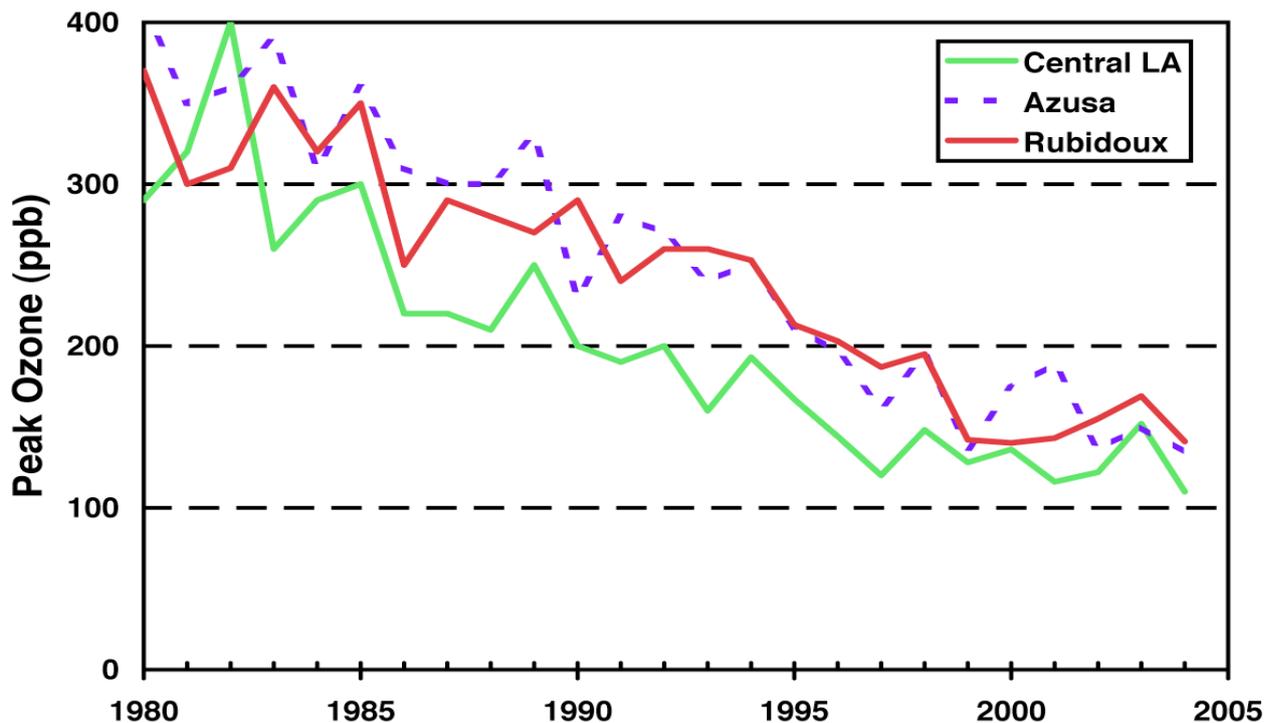


Abbildung 6: Jährliche maximale Ozonkonzentrationen von drei Messtandorten in Südkalifornien (aus Martien and Harley, 2006).

Die berechneten Ozonsveränderungen stimmen mit den Messungen (Jahresmittelwerte, s. Abb. 6) gut überein. Dabei haben sich die Emissionsreduktionen der anthropogenen VOCs stark auf die Ozonkonzentrationen ausgewirkt, was mit der Erwartung der Ausdehnung der VOC-Limitierung in Einklang steht (der Standort „Azusa“ ist von der VOC-Limitierung am stärksten betroffen). Da im Zeitraum 1997-2010 nur noch geringfügigere und gleichzeitige Reduktionen der  $\text{NO}_x$  und der anthropogenen VOC-Emissionen erwartet werden, werden für die Zukunft keine starken Reduktionen der Ozonspitzenwerte in Südkalifornien erwartet. Aus der guten Übereinstimmung zwischen den numerischen Simulationen der Ozonspitzenwerte und der Messungen in Südkalifornien insbesondere auch bezüglich ihres zeitlichen Verlaufs darf geschlossen werden, dass die photochemische Theorie der Ozonbildung (s. Abb. 2) auf die Troposphäre anwendbar ist.

## Referenzen

- Grosjean, D., Ambient PAN and PPN in southern California from 1960 to the SCOS97-NASTRO, *Atmos. Environ.*, 37, Suppl. 2., S221-S238, 2003.
- Martien, P.T., R.A. Harley, Adjoint sensitivity analysis for a three dimensional photochemical model: Application to Southern California, *Env. Sci. Technol.*, 40, 4200-4210, 2006.
- Staehelin, J., A.S.H. Prévôt, J. Barnes, Photochemie der Troposphäre, Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie, Band IA: Atmosphäre, R. Guderian, Ed., Springer Verlag, 207-341, 2000.
- WMO, 2006: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006, Global Ozone Res. Monit. Proj. Rept. 50, World Meteorological Organization (WMO), Geneva, Switzerland, 2006.

## **Résultats des modèles de chimie transport globaux sur le transport à longue distance de l'ozone troposphérique**

Isabelle Bey

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, isabelle.bey@epfl.ch

### **La problématique du transport à longue distance.**

La présence d'ozone en trop grande quantité dans les basses couches de l'atmosphère se révèle néfaste pour la santé humaine. Les normes environnementales en matière de concentrations d'ozone sont régulièrement dépassées en particulier en été dans de nombreuses régions industrialisées dans le monde, y compris l'Europe et la Suisse. Les deux sources d'ozone dans la troposphère, à savoir, le transport de l'ozone depuis la stratosphère et la production in situ par une suite de réactions chimiques impliquant l'oxydation des hydrocarbures en présence d'oxyde d'azote (aussi communément appelés précurseurs d'ozone) sont connues mais demeurent encore mal quantifiées.

La communauté scientifique a réalisé depuis longtemps que l'échelle spatiale d'intérêt pour les problèmes de qualité de l'air allaient bien au-delà de la ville en elle-même et pouvait s'étendre sur des bassins régionaux voir des continents entiers. Cependant, depuis une dizaine d'année, l'avènement de nouvelles techniques d'exploration (en particulier la mesure de composés atmosphériques à partir de satellites) a permis de montrer que les problèmes de pollution de l'air devaient être envisagés à l'échelle globale (cf. par exemple Akimoto, (2003)). Ceci tient essentiellement au fait que l'ozone (ainsi que certains de ces précurseurs) ont des temps de vie dans la troposphère suffisamment long (de plusieurs jours à plusieurs semaines) pour pouvoir être transportés sur des distances pouvant atteindre plusieurs milliers de kilomètres

Une nouvelle problématique est donc apparue, dans le sens où l'on doit désormais considérer que la concentration d'ozone observée à un endroit donné peut-être vue comme étant la somme de plusieurs contributions, incluant la contribution locale (produite directement à partir des précurseurs d'ozone émis localement ou dans la région proche du point considéré) et une contribution que l'on peut qualifier de « lointaine » (ou « niveaux de fond ») (cf. par exemple Prather et al., (2003)).

La mise en place de politiques de réduction des problèmes environnementaux liés à des concentrations trop élevées d'ozone requière que l'on puisse quantifier en détail la contribution relative de ces deux quantités. Cette information est cependant souvent difficile à obtenir en utilisant uniquement des observations atmosphériques et requière l'utilisant de modèles de chimie transport opérant à l'échelle globale de façon à pouvoir intégrer les aspects et processus liés au transport de pollution à longue distance.

## **L'impact du transport à longue distance sur le budget l'ozone au dessus de l'Europe**

L'utilisation de modèles globaux de chimie transport a permis de quantifier un certain nombre de processus liés au transport à longue distance. En particulier, la contribution relative des plus importantes régions sources de précurseurs d'ozone (ce qui inclue l'Amérique du Nord, l'Asie et l'Europe) ainsi que leur impact sur le budget d'ozone au dessus de l'Europe ont pu être analysés.

Il a été ainsi montré [Auvray et Bey, 2005] que l'import d'ozone d'origine nord américaine est contrôlé par les variations saisonnières de la météorologie et de la production photochimique et atteint donc un maximum en été. Des sources anthropiques venant d'Asie sont aussi transportées sur de longues distances et tout particulièrement en été par des vents d'est associés à la mousson indienne. Pendant cette période, les éclairs accompagnant les processus de convection émettent des NO<sub>x</sub> qui contribuent également à la production d'ozone, s'ajoutant aux fortes concentrations déjà présentes au niveau du bassin Méditerranéen.

Diverses études de sensibilité ont ainsi pu montrer que les contributions anthropiques nord américaine et asiatique participent au budget d'ozone sur l'Europe (intégrées sur la colonne troposphérique) à hauteur de 11 et 8% respectivement, alors que la participation anthropique européenne s'élève seulement à hauteur de 9% (en moyenne annuelle, pour une année « normale »). La contribution nord américaine (la plus importante à priori du fait des distances relativement courtes entre les continents nord américain et européen) en été est estimée à environ 3 à 5 ppb (7–11%) dans la couche limite planétaire (avec des valeurs maximales pouvant atteindre 10-12 ppb) et jusqu'à 10 à 13 ppb (18–23%) dans la moyenne et haute troposphère [Li et al., 2002 ; Guerova et al. 2006].

L'Asie connaît un essor démographique, urbain et industriel sans précédent depuis les 20 à 30 dernières années, ce qui a résulté en une large augmentation d'émissions anthropiques en général et de précurseurs d'ozone en particulier. Des simulations réalisées avec différents scénarios d'émissions anthropiques ont permis d'estimer que, au cours des 20 dernières années, l'augmentation des émissions anthropiques d'origine asiatique a pu très vraisemblablement contribuer à compenser (en particulier dans la haute et moyenne troposphère) les réductions locales des précurseurs d'ozone menées en Europe [Auvray et Bey, 2005].

## **Incertitudes liées aux modèles de chimie transport.**

Comme indiqué précédemment, les contributions relatives de différentes régions géopolitiques doivent être déterminées à partir de modèles. Or, bien que ces modèles de chimie transport aient souvent fait l'objet d'une évaluation minutieuse, des nombreuses incertitudes demeurent quant à la précision avec laquelle ils sont capables de représenter l'ensemble complexe des processus physico-chimiques qui déterminent les distributions

d'ozone dans la troposphère. En particulier, une récente étude a examiné les capacités d'un modèle global de chimie transport à représenter la variabilité interannuelle de l'ozone et de ses précurseurs pendant la période 1990-2005. Bien que le modèle semble reproduire raisonnablement bien les principales caractéristiques de la variation interannuelle d'au moins un des précurseurs de l'ozone, certaines des variations temporelles de l'ozone observée dans les moyennes latitudes dans l'hémisphère nord pendant les années 90 ne sont pas reproduites par le modèle [Koumoutsaris et al., 2008]. De plus, le modèle ne parvient à reproduire les tendances positives d'ozone présentes dans des observations représentatives des niveaux de fond de l'ozone dans l'hémisphère nord. Ceci indique que certains phénomènes qui ont contribué aux distributions spatio-temporelles de l'ozone troposphérique pendant la période 1990-2005 ne sont pas encore bien modélisés (et donc compris) par la communauté scientifique.

## Bibliographie

- Akimoto H., Global Air Quality and Pollution, *Science*, 302, 1716-1719, 2003
- Auvray, M., and I. Bey, Long-Range Transport to Europe: Seasonal Variations and Implications for the European Ozone Budget, *J. Geophys. Res.*, 110, D11303, doi:10.1029/2004JD005503, 2005
- Guerova, G., I. Bey, J.-L. Attié, R. V. Martin, J. Cui, and M. Sprenger, Impact of transatlantic transport episodes on summertime ozone in Europe, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 2057-2072, 2006
- Koumoutsaris S., I. Bey, S. Generoso, and V. Thouret, Influence of El Niño–Southern Oscillation on the interannual variability of tropospheric ozone in the northern mid-latitudes, in press, *J. Geophys. Res.*, 2008
- Li, Q., Jacob, D., Bey, I., Palmer, P., Duncan, B., Field, B., Martin, R., Fiore, A., Yantosca, R., Parrish, D., Simmonds, P., and Oltmans, S.: Transatlantic transport of pollution and its effects on surface ozone in Europe and North America, *J. Geophys. Res.*, 107, 4166, doi:10.1029/2001JD001422, 2002.
- Prather, M., et al., Fresh air in the 21st century?, *Geophys. Res. Lett.*, 30(2), 1100, doi:10.1029/2002GL016285, 2003

## Statistische Analyse der Ozonspitzenwerte im schweizerischen Mittelland und Datenanalyse des Hintergrundozons

André S.H. Prévôt<sup>a</sup>, Johannes Keller<sup>a</sup>, Carlos Ordóñez<sup>a,b</sup>, Andreas F. Beguin<sup>a,b</sup>, V. Jutzi<sup>a</sup>, Johannes Staehelin<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Labor für Atmosphären Chemie, Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen

<sup>b</sup>Met-Office, United Kingdom

<sup>c</sup>Institut für Atmosphäre und Klima, ETH Zürich

Die Analyse der Ozonmessungen in der Schweiz seit 1992 zeigt folgendes Bild auf, welches in Abbildung 1 nachvollzogen werden kann. Die mittleren nachmittäglichen Ozonkonzentrationen sind im Sommer im wesentlichen konstant geblieben, währenddem sie im Winter zugenommen haben. Die Zunahme im Winter ist teilweise aufgrund verminderter lokaler Reduktion von Ozon durch die NO-Emissionen zu erklären. Um den Effekt der lokalen NO-Emissionen zu reduzieren, betrachtet man statt Ozon  $O_x$  (die Summe von Ozon und  $NO_2$ ), welches ein besseres Mass ist für den Erfolg der Emissionsreduktionen auf die regionale Ozonkonzentration. Der  $O_x$ -Trend ist im Winter nach wie vor für alle Stationen positiv, was auf eine Zunahme der Ozon-Hintergrundkonzentration zurückgeführt werden kann. Diese Zunahme der Hintergrundkonzentration ist insbesondere auch ersichtlich in der Erhöhung der Konzentration auf dem Jungfrauoch. Im Sommer erkennt man einen leicht negativen  $O_x$ -Trend für die meisten Stationen. Die negativsten Trends sind im Raum Zürich und im Tessin zu erkennen. Die negativen Trends auf der Alpennordseite sind jedoch alle nicht signifikant. Die Erhöhung der Hintergrundkonzentrationen, welche auf dem Jungfrauoch aber auch an der Westküste von Irland festgestellt wird, hat eine stärkere erwartete Abnahme verhindert. Die möglichen Gründe für die Zunahme der Hintergrundkonzentrationen werden im Vortrag beleuchtet. Die 90%-Perzentile der nachmittäglichen  $O_x$ -maxima-Trends im Sommer waren negativer und für einige Stationen signifikant auf der Alpennord- und Alpensüdseite. Die Ozonspitzen haben demnach trotz der Zunahme der Ozonhintergrundkonzentration aufgrund regionaler Massnahmen (typischer Radius: 500-1000 Kilometer) abgenommen.

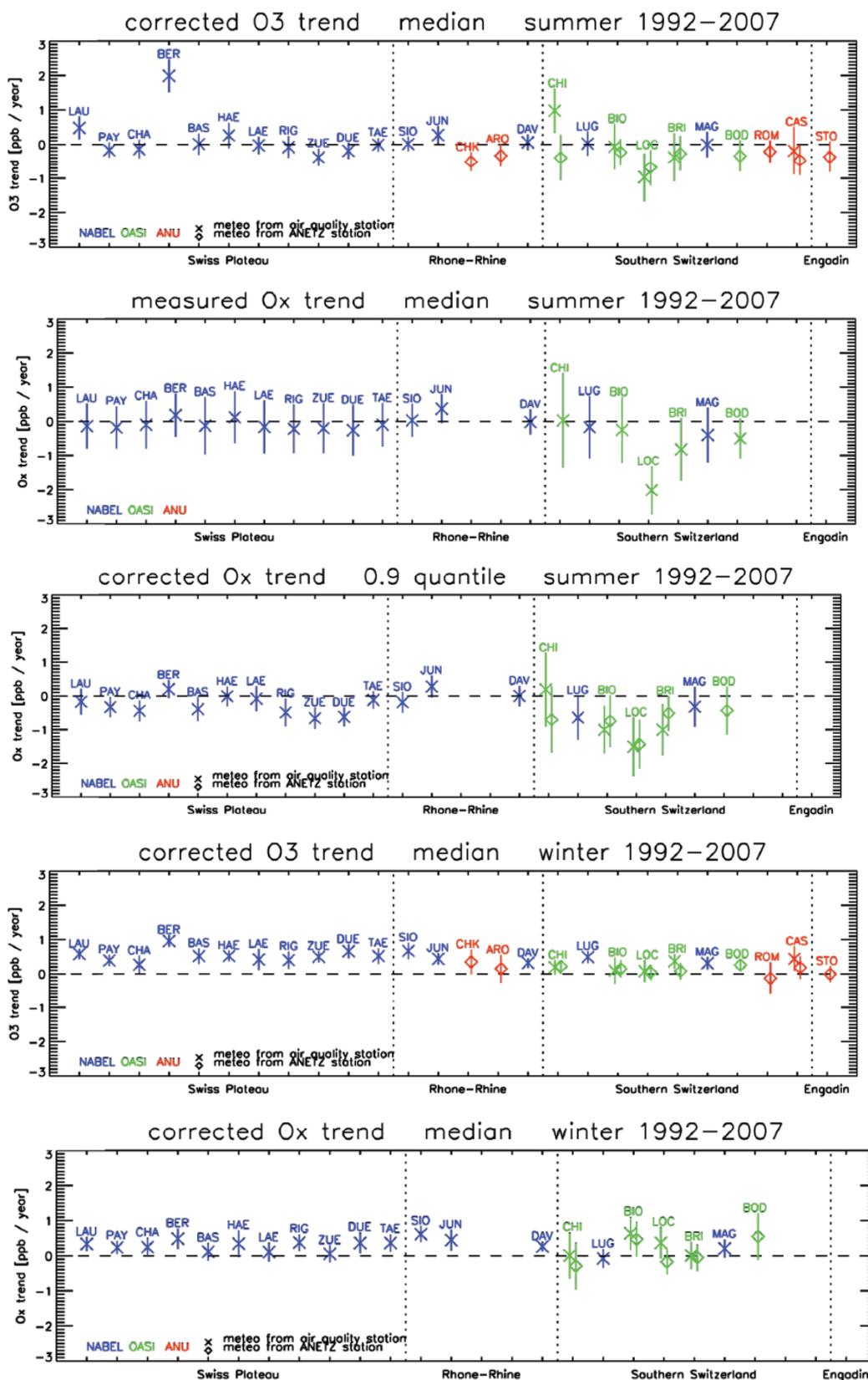


Abbildung 1: Meteorologie-korrigierte Ozon und O<sub>x</sub> (O<sub>3</sub>+NO<sub>2</sub>) Trends im Sommer und Winter (Nachmittagsmediane und 90% Perzentil im Sommer).

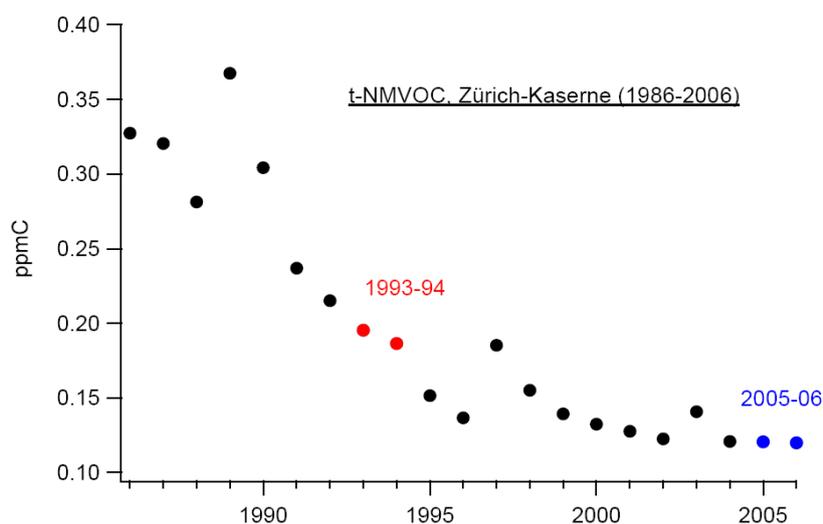
## Identifikation von anthropogenen VOC-Quellen basierend auf Immissions-Messungen und deren Bedeutung bei der Ozonbildung

V. A. Lanz

Empa Dübendorf, valentin.lanz@empa.ch

Als VOCs bezeichnet man flüchtige organische Substanzen. Gelangen VOCs in die Atmosphäre, wirken sie klimarelevant (z.B. Methan), giftig (z.B. Benzol) und/oder fungieren als Vorläufersubstanzen des sog. "Sommersmogs" (d.h. erhöhte Konzentrationen von Ozon und sekundären organischen Aerosolen).

Die Summe aller NMVOCs (d.h. alle VOCs abzüglich Methan) werden seit 1986 in Zürich gemessen. Eine starke Abnahme um mehr als -50% kann zwischen 1986 und Ende der 90er Jahre beobachtet werden (Abbildung 1). Etwa seit dem Jahr 2000 sind die VOC-Konzentrationen jedoch stabil.



**Abbildung 1: Entwicklung der VOC-Konzentrationen in Zürich-Kaserne (städtischer Hintergrund) zwischen 1986-2006. Hier gezeigt ist das Jahresmittel der Summe aller flüchtiger organischen Verbindungen (NMVOC oder sog. nicht-Methan VOC). Messwerte von einzelnen VOC-Spezies liegen für die Jahre 1993 und 1994 (rot) sowie ab 2005 vor (blau).**

Es stellen sich folgende Fragen: Bei welchen VOC-Quellen konnten in der Vergangenheit die Emissionen reduziert werden? Welche Quellen sind heute dominant? Welche Quellen sind am stärksten an der Bildung des gesundheitsschädlichen Ozons während der Sommersmog-Episoden beteiligt?

In Zürich (Kasernenhof) wurden Messungen von einzelnen VOCs Anfangs der 90er Jahre durchgeführt (durch das AWEL) und seit 2005 wieder (Empa und Bafu im Rahmen des NABEL-Messprogramms). Solche Spezies-aufgelösten Messungen erlauben die Anwendung multivariater statistischer Methoden zur Identifikation

der wichtigsten VOC-Quellen und der Quantifizierung von deren Beiträgen am Messort Zürich-Kasernenhof. Auf diese Art wurden folgende Quellen flüchtiger, anthropogener Kohlenwasserstoffe identifiziert:

- **Benzin-Verdampfung und Treibstoff-Verbrennung (Verkehr)**
- **Lösemittelgebrauch**
- **Leckagen im Erdgasnetz**
- **Holzverbrennung**

Diese Kategorisierung basiert auf dem charakteristischen chemischen Fingerprint der verschiedenen VOC-Emissionsquellen. Die Abschätzungen zu den Emissionsstärken zeigen, dass am Standort Zürich-Kaserne der Verkehr (Anfangs 90er Jahre 40%; heute 26%) immer noch die wichtigere anthropogene Quelle von flüchtigen Kohlenwasserstoffen ist als z.B. Lösemittelgebrauch (29%; 20%). Dieses Resultat ist in Einklang mit den Modellierungs-Ergebnissen zu anderen Städten in Europa, aber im Widerspruch zum nationalen Emissionsinventar (das den Anteil des Lösemittelgebrauchs höher einschätzt). Dieser Unterschied kann teilweise durch die Kurzlebigkeit vieler Lösemittel erklärt werden: d.h. die Lösemittel werden zwar emittiert, aber in der Atmosphäre umgewandelt bevor sie zur Messstation transportiert und dort gemessen werden können.

Zwischen 1993-94 und 2005-06 haben die Verkehrsbeiträge am stärksten abgenommen (absolut und relativ betrachtet). Es scheint, dass die zahlreichen Massnahmen zur VOC-Emissionsreduktion (Katalysatoren, Gasrückführsysteme an Tankstellen etc.) erfolgreich waren. Die Beiträge beinahe aller identifizierter VOC-Quellengruppen (Holzverbrennung, Verkehr, Lösemittel) haben zwischen Anfang der 90er und heute um einen Faktor 2-3 abgenommen, die Beiträge aus den Erdgasleckagen etwas weniger stark. Der relative Anteil von Erdgasbestandteilen aus Leckagen nimmt in der Tendenz zu und stellt heute (2005-2006) die grösste Massenfraktion (35%) anthropogener Kohlenwasserstoffe dar. Die VOCs dieser Quelle (Methan, Ethan, Propan) sind typischerweise eher langlebig: d.h., dass bezüglich dieser Immissionen auch weit entfernte Quellen-Regionen einen Einfluss auf die Konzentrationen in Zürich haben können. Berücksichtigt man aber das Ozonbildungspotential (POCP, Derwent et al., 1996) der verschiedenen Substanzen, die den unterschiedlichen Quellen zugeordnet werden konnten, so ist der Einfluss des Verkehrs auf den Sommersmog jedoch immer noch am wichtigsten.

#### **Referenz**

Derwent et al., Atmos. Environ., 30, 181-189, 1996; Lanz et al., Atmos. Chem. Phys., 8, 2313-2323, 2008.

## Rolle biogener VOC bei der Ozonbildung

Christoph Spirig

Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART,  
christoph.spirig@art.admin.ch

### Biogene VOC

Flüchtige organische Verbindungen (englisch: volatile organic compounds, VOC) sind neben den Stickoxiden für die bodennahe Ozonbildung verantwortlich. Natürliche (= biogene) Quellen tragen dabei wesentlich zur VOC-Menge in den bodennahen Luftschichten bei. Es ist sogar so, dass die biogenen VOC-Emissionen den vom Menschen verursachten Ausstoss weltweit um ein Vielfaches übertreffen (Guenther et al., 1995). In stark besiedelten Gebieten überwiegen die anthropogenen Emissionen, in der Schweiz ist das Verhältnis von biogenen und anthropogenen VOC-Emissionen insgesamt etwa ausgeglichen (Andreani-Aksoyoglu und Keller, 1995, Nyfeler-Brunner 2008).

Üblicherweise werden unter dem Begriff „biogene VOC“ alle flüchtigen organischen Verbindungen ohne Methan, CO und CO<sub>2</sub> verstanden, die von Pflanzen an die Luft abgegeben werden. Die Beschränkung auf die Emissionen von der Vegetation ist gerechtfertigt, weil sie die natürlichen Quellen mengenmäßig dominieren.

Die wichtigsten biogenen VOC können in folgende Kategorien zusammengefasst werden: Isopren, Mono- und Sesquiterpene und Oxidierte VOC.

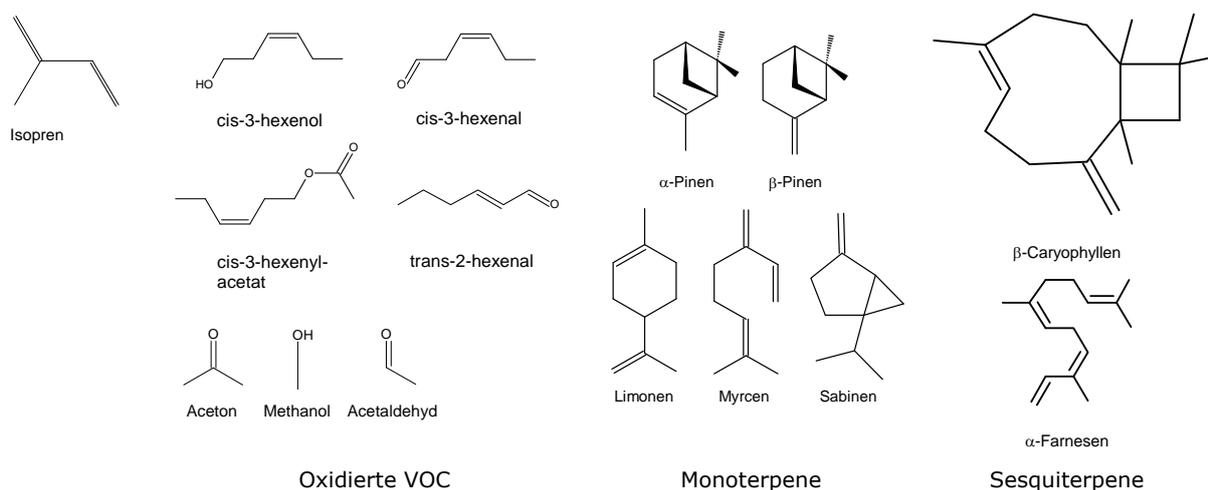


Abbildung 1: Beispiele einiger biogener VOC

Biogene VOC werden von Pflanzen entweder permanent oder als Reaktion auf Stress oder Verletzung freigesetzt. Zu den dauernd emittierten Verbindungen

gehören Isopren und Monoterpene. Typische Vertreter der kurzzeitig als Reaktion auf Stress produzierten Stoffe sind oxidierte VOC wie C<sub>6</sub>-Alkohole und -Aldehyde, welche den charakteristischen Geruch von frisch geschnittenem Gras ausmachen (Fall et al., 1999). Die Emissionen von Isopren, Monoterpenen und Sesquiterpenen hängen stark von der Temperatur und teilweise auch von der Sonnenstrahlung ab (Guenther et al., 1993, Duhl et al., 2008). Deshalb zeigen die biogenen VOC-Emissionen einen starken Jahresgang mit maximalen Frachten in der Sommersmog-Saison (Beispiel: geschätzte Monoterpen-Emissionen in der Schweiz, Spirig und Neftel, 2002).

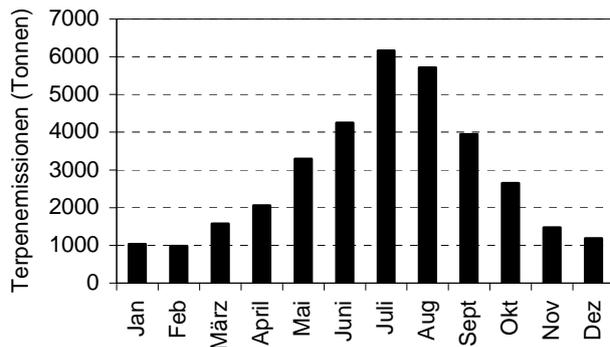


Abbildung 2: Jahresgang der biogenen Monoterpen-Emissionen in der Schweiz

### Bedeutung der biogenen VOC bei der Ozonbildung

In den 80er und 90er Jahren wurde erkannt, dass biogene VOC einen bedeutenden Teil der VOC-Menge im Sommersmog ausmachen können. Je nachdem wie gross dieser natürliche VOC-Hintergrund ist, wird die Wirksamkeit einer Reduktion der anthropogenen VOC-Emissionen zur Ozonminderung stark eingeschränkt (Chameides et al., 1988).

Für die Schweiz wurde beispielsweise berechnet, dass im Mittelland selbst mit einer vollständigen Ausschaltung der anthropogenen VOC-Emissionen die Ozonproduktion während Sommersmog-Lagen nur etwa um ein Viertel reduziert werden könnte (Staffelbach und Neftel, 1997). Es ist eine direkte Folge davon, dass die Ozonbildung im Mittelland stärker vom Vorrat an Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) als von den VOC bestimmt ist. In Gebieten mit hohen NO<sub>x</sub>- und VOC-Emissionen und bei geringer Sonnenstrahlung wird die Ozonbildung auch durch die VOC limitiert. Es hängt deshalb stark vom Reduktionsziel ab (Wo soll Ozon reduziert werden? Ozonspitzen oder mittlere Belastung?), ob NO<sub>x</sub>- oder VOC-Reduktionen wirksamer sind. Die geltende Strategie – kombinierte Reduktion von VOC- und NO<sub>x</sub>-Emissionen – trägt diesen komplexen Umständen Rechnung.

### Änderungen der biogenen VOC-Emissionen?

In den letzten Jahren wurden die biogenen VOC-Emissionen intensiv erforscht. Antrieb war neben ihrer Rolle bei der Ozonbildung insbesondere auch ihre große Bedeutung bei der sekundären Feinstaubbildung und ihr Mitwirken am globalen C-Kreislauf (Guenther et al., 2002, Kesselmeier et al., 2002) und der Klima-veränderung.

Dank neuen Messtechniken konnte insbesondere über die Emissionen von oxidierten und hochreaktiven Stoffen neue Erkenntnisse gewonnen werden. Neuere

Abschätzungen zu biogenen VOC-Emissionen gehen davon aus, dass Verbindungen wie Methanol oder Aceton in ähnlichen Mengen wie Monoterpene ausgestossen werden (Karl et al., 2008). Mit kürzlich durchgeführten Messungen über landwirtschaftlichen Flächen konnte gezeigt werden, dass dies auch für die Schweiz gilt (Brunner et al., 2007) und dass frühere Emissionsabschätzungen (Spirig und Neftel, 2002) entsprechend nach oben korrigiert werden müssen. Diese oxidierten VOC bewirken wegen ihrer relativen Trägheit für die lokale Ozonbildung nur wenig, sind aber wichtig in der Chemie der freien Troposphäre und für das Hintergrund-Ozon (Jacobs et al., 2005, Tie et al., 2003).

Emissionen von bisher nicht berücksichtigten hochreaktiven biogenen VOC könnten für die lokale Ozonbildung von Bedeutung sein. Als hochreaktive VOC werden meist Verbindungen mit Lebenszeiten von wenigen Minuten verstanden. Verschiedene Sesquiterpene gehören zu dieser Kategorie. Nach heutigem Kenntnisstand werden sie von verschiedenen Pflanzenarten in ähnlicher Weise wie Monoterpene (d.h. stark temperaturabhängig) ausgestossen. Man geht davon aus, dass die Emissionsraten einige Prozent von jenen der Monoterpene ausmachen (Duhl et al., 2008).

Die Unsicherheiten über die Mengen an VOC, die von Pflanzen freigesetzt werden, sind trotz allen Fortschritten immer noch groß. Bei der Planung von Reduktionsmaßnahmen muss deshalb abgeschätzt werden, wie stark ihr Erfolg von den angenommenen biogenen VOC-Mengen abhängt.

Mit der Klimaerwärmung werden auch höhere biogene VOC-Emissionen erwartet (Lathière et al., 2006). Dabei spielen Veränderungen der Landnutzung eine wichtige Rolle. So hat beispielsweise in der Schweiz in den letzten 10 Jahren nicht nur die Waldfläche zugenommen, sondern auch eine deutliche Verlagerung von Nadel- zu Laubbäumen stattgefunden. Auch Veränderungen in der Landwirtschaft werden die biogenen VOC-Emissionen beeinflussen. Sollte die Ackerfläche zunehmen – beispielsweise im Zuge einer erhöhten Biofuel-Produktion – ist mit einer Zunahme der VOC-Emissionen von Pflanzen zu rechnen. Spätestens an dieser Stelle muss auch über die Abgrenzung von anthropogenen und biogenen Emissionen nachgedacht werden.

## Referenzen

- Andreani-Aksoyoglu S. und J. Keller, Estimates of monoterpene and isoprene emissions from the forests in Switzerland. *Journal of Atmospheric Chemistry* 20, 71-87, 1995.
- A. Brunner, C. Ammann, A. Neftel, and C. Spirig, Methanol exchange between grassland and the atmosphere, *Biogeosciences*, 4, 395-410, 2007.
- Chameides W.L., R.W. Lindsay, J. Richardson, C.S. Kiang, The role of biogenic hydrocarbons in urban photochemical smog: Atlanta as a case study, *Science*, 241, 1-10, 1988.
- T. R. Duhl, D. Helmig, and A. Guenther, Sesquiterpene emissions from vegetation: a review, *Biogeosciences*, 5, 761-777, 2008.
- Fall, R.: Biogenic emissions of volatile organic compounds from higher plants, in *Reactive hydrocarbons in the atmosphere*, edited by C. N. Hewitt, pp. 41-96, Academic Press, New York, 1999.
- Guenther, A., Zimmerman, P., Harley, P., Monson, R., and Fall, R.: Isoprene and monoterpene emission rate variability: Model evaluation and sensitivity analysis, *J. Geophys. Res.*, 98, 12609-12617, 1993.

- Guenther A., Hewitt C., Erickson D., Fall R., Geron C., Graedel T., Harley P., Klinger L., Lerdau M., McKay W., Pierce T., Scholes B., Steinbrecher R., Tallamraju R., Taylor J. und Zimmerman P., 1995. A global model of natural volatile organic compound emissions. *Journal of Geophysical Research* 100, 8873-8892.
- Guenther, A.: The contribution of reactive carbon emissions from vegetation to the carbon balance of terrestrial ecosystems, *Chemosphere*, 49, 837-844, 2002.
- Guenther, A., T. Karl, P. Harley, C. Wiedinmyer, P.I. Palmer, C. Geron, Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 3181-3210, 2006.
- Hoffmann, T., Odum, J. R., Bowman, F., Collins, D., Klockow, D., Flagan, R. C., and Seinfeld, J. H.: Formation of organic aerosols from the oxidation of biogenic hydrocarbons, *J. Atmos. Chem.*, 26, 189-222, 1997.
- Jacob, D. J., B. D. Field, Q. Li, D. R. Blake, J. de Gouw, C. Warneke, A. Hansel, A. Wisthaler, H. B. Singh, A. Guenther, Global budget of methanol: Constraints from atmospheric observations, *J. Geophys. Res.*, 110, D08303, doi:10.1029/2004JD005172, 2005.
- Karl, M., A. Guenther, R. Köble, G. Seufert, A new European plant-specific emission inventory of biogenic volatile organic compounds for use in atmospheric transport models, submitted to *Biogeosciences Discussions*, 2008.
- Kesselmeier, J., Ciccioli, P., Kuhn, U., Stefani, P., Biesenthal, T., Rottenberger, S., Wolf, A., Vitullo, M., Valentini, R., Nobre, A., Kabat, P., and Andreae, M. O.: Volatile organic compound emissions in relation to plant carbon fixation and the terrestrial carbon budget, *Global Biochem. Cycles*, 16, art. no.-1126, 2002.
- J. Lathière, D. A. Hauglustaine, A. D. Friend, N. De Noblet-Ducoudré, N. Viovy, and G. A. Folberth, Impact of climate variability and land use changes on global biogenic volatile organic compound emissions, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 2129-2146, 2006.
- Nyfeler-Brunner, Aurelia. Characterisation of volatile organic compounds emission from grassland systems. Diss. ETH, 2008.  
<http://e-collection.ethbib.ethz.ch/view/eth:30462>
- Spirig, C., A. Neftel, Biogene VOC und Aerosole, Schriftenreihe der FAL, 42, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich-Reckenholz, 2002.
- Staffelbach T., A. Neftel, Relevance of biogenically emitted trace gases for the ozone production in the planetary boundary layer in Central Europe, Schriftenreihe der FAL, 25, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zürich-Reckenholz, Institut für Umweltschutz und Landwirtschaft, Liebefeld-Bern, 1997.
- Tie, X., Guenther, A., and Holland, E., Biogenic methanol and its impacts on tropospheric oxidants, *Geophys. Res. Letters*, 30, 2003.

## Ergebnisse eines regionalen Modells für schweizerische Ozonveränderungen im Mittelland

Şebnem Andreani-Aksoyođlu<sup>a\*</sup>, Johannes Keller<sup>a</sup>, Carlos Ordóñez<sup>a,b</sup>, Michel Tinguely<sup>a</sup>, Martin Schultz<sup>c</sup> and André S.H. Prévôt<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Labor für Atmosphären Chemie, Paul Scherrer Institut (PSI), Villigen

<sup>b</sup>Met-Office, United Kingdom

<sup>c</sup>Forschungszentrum Jülich GmbH, Germany

Die Massnahmen zur Reduzierung der Luftverunreinigungen haben während der letzten zwei Jahrzehnte bei einer Reihe von Luftschadstoffen zu einem bemerkenswerten Rückgang der Konzentrationen geführt. Obwohl aufgrund erheblicher Emissionsminderungen die Konzentrationen der Ozonvorläufer (NO<sub>x</sub> und VOC) in der Schweiz seit Mitte der 80er Jahre deutlich zurückgegangen sind, hat die Ozonbelastung im gleichen Zeitraum weniger stark abgenommen. Die Messungen zeigen, dass die NO<sub>x</sub>- und VOC-Emissionen zwischen Anfang der 90er Jahre und 2005 um bis zu einem Faktor 2 abgenommen haben (NABEL, 2005; Hueglin, *et al.*, 2006). Die Schadstoffemissionen sind auch in den Nachbarländern reduziert worden. Die Datenanalyse von Ozon-Spitzenwerten zwischen 1992 und 2002 hingegen ergaben auf der Alpennordseite eine relativ kleine oder sogar verschwindende Reduktion (Ordóñez, *et al.*, 2005).

Die langfristige Abnahme von sommerliche Ozon ist relativ klein (zwischen 0 und 0.5 ppb y<sup>-1</sup>) im Vergleich mit der starken Reduktion von Vorläuferemissionen in der Schweiz und in Europa. Brönnimann *et al.* (2002) berichtete von einer kontinuierlichen Zunahme von Ozon auf dem Jungfrauoch in der 90er Jahre. Diese Zunahme ist auf den zunehmenden Beitrag des Hintergrundozons auf der Nordhalbkugel zurückzuführen. Die Autoren spekulierten, dass die Ozonzunahme in der Luft die grossräumig nach Europa transportiert wurde, wahrscheinlich die Ozonabnahme im schweizerischen Mittelland kompensierte. Ordóñez, *et al.* (2007) weisen darauf hin, dass erhöhtes stratospherisches Ozon und ein Ozonfluss in die Troposphäre der Grund für die Zunahme des in den 90er Jahren auf dem Jungfrauoch gemessenen Hintergrundozons gewesen sein könnte.

In dieser Studie haben wir mit dem 3-dimensionalen regionalen Modell CAMx den Einfluss von Emissionsminderungen seit 1985 auf Ozon in der Schweiz untersucht (Andreani-Aksoyoglu, *et al.*, 2008). Die Modellergebnisse weisen darauf hin, dass die Emissionsreduktionen zwischen 1985 und 2000 eine gewisse Wirkung in der Schweiz haben sollten. Allerdings zeigen die Messungen keine signifikante Änderung der Ozonkonzentrationen seit den 90er Jahren, mit der Ausnahme von Zürich, wo es einen kleinen negativen Trend gibt. Das Modell zeigt die gleiche örtliche Variabilität der Trends wie die Messungen, die modellierten Trends sind jedoch etwa 0.5 ppb y<sup>-1</sup> tiefer als die Messungen. Dieser Unterschied ist sehr ähnlich wie die Zunahme des Hintergrundozons auf dem Jungfrauoch. Diese Resultate stützen die Annahme, dass der Anstieg des Hintergrundozons die aufgrund von Emissionsminderungen erwartete Abnahme der Ozonwerte zum Teil oder ganz kompensiert haben könnte. Diese Annahme sollte jedoch noch mit einer detaillierteren Korrektur für Hintergrundozon, basiert auf langzeitige Rechnungen, bestätigt werden.

Die Modellergebnisse zeigen, dass Ozonspitzenwerte in der Schweiz im Jahr 2000 bis 20 % höher gewesen wären, wenn es seit 1985 keine Reduktionsmassnah-

men gegeben hätte. Die Simulationsperiode im August 2003 war sehr warm und hat in Europa erhebliche gesundheitliche Probleme verursacht. Diese Hitzewelle kann als Prototyp für künftige Sommer betrachtet werden (*Vautard and Hauglustaine, 2007*). Auf der Basis dieser spezifischen Periode wurden einige Zukunftsszenarien simuliert um die Einflüsse verschiedener Emissionsreduktionen abzuschätzen. Im Jahr 2010 lägen die Ozonmaxima in der Schweiz wegen der Massnahmen in Europa gemäss Göteborg Protokoll 5-6 % tiefer als 2000. Unsere Modellresultate zeigen weiter, dass die Massnahmen in der Schweiz allein keine nennenswerte Wirkung hätten. Schliesslich ist die Langzeitentwicklung des Hintergrundozons eine wesentliche Komponente der troposphärischen Ozonkonzentrationen über Europa.

### **Verdankung**

BAFU, NABEL, MeteoSwiss, INFRAS, Meteotest, Freie Universitaet Berlin, EMEP, IIASA ACCENT.

### **Referenzen**

- Andreani-Aksoyoglu, S., J. Keller, C. Ordonez, M. Tinguely, M. Schultz, and A. S. H. Prevot (2008), Influence of various emission scenarios on ozone in Europe, *Ecological Modelling*, 217, 209-218.
- Bronnimann, S., Buchmann, B., and Wanner, H. (2002): Trends in near-surface ozone concentrations in Switzerland: the 1990s, *Atmos. Envir.*, 36, 2841-2852.
- Hueglin, C., B. Buchmann, and R. O. Weber (2006), Long-term observation of real-world road traffic emission factors on a motorway in Switzerland, *Atmospheric Environment*, 40, 3696-3709.
- Ordóñez, C., D. Brunner, J. Staehelin, P. Hadjinicolaou, J. A. Pyle, M. Jonas, H. Wernli, and A. S. H. Prevot (2007), Strong influence of lowermost stratospheric ozone on lower tropospheric background ozone changes over Europe, *Geophysical Research Letters*, 34, doi:10.1029/2006GL029113.
- Ordóñez, C., H. Mathis, M. Furger, S. Henne, C. Hueglin, J. Staehelin, and A. S. H. Prevot (2005), Changes of daily surface ozone maxima in Switzerland in all seasons from 1992 to 2002 and discussion of summer 2003, *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 1187-1203.
- Vautard, R., and D. Hauglustaine (2007), Impact of global climate change on regional air quality: Introduction to the thematic issue, *Comptes Rendus Geosciences*, In Press.

## Neue Ergebnisse zur sommerlichen Partikelbildung

Urs Baltensperger<sup>1)</sup>, André Prévôt<sup>1)</sup>, Josef Dommen<sup>1)</sup>, Sebnem Andreani<sup>1)</sup>, Roberto Chirico<sup>1)</sup>, Peter DeCarlo<sup>1)</sup>, Jonathan Duplissy<sup>1)</sup>, Kathrin Gäggeler<sup>1)</sup>, Maarten Heringa<sup>1)</sup>, Axel Metzger<sup>1)</sup>, Claudia Mohr<sup>1)</sup>, Torsten Tritscher<sup>1)</sup>, Ernest Weingartner, Valentin Lanz<sup>2)</sup>, Christoph Hueglin<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Labor für Atmosphärenchemie, Paul Scherrer Institut, 5232 Villigen PSI, urs.baltensperger@psi.ch

<sup>2)</sup> Abteilung Luftfremdstoffe / Umwelttechnik, Empa, 8600 Dübendorf

Parallel mit der Ozonkonzentration steigt im Sommer auch die Feinstaubkonzentration durch Bildung von sekundärem organischen Aerosol (SOA) an. Als Beispiel zeigt Abbildung 1 den Zusammenhang zwischen der Konzentration des organischen Aerosols (OA) und der Ozonkonzentration um 16 Uhr in Payerne.

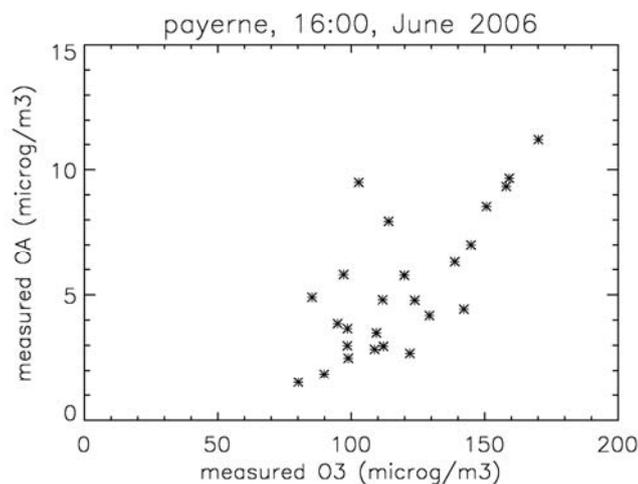


Abbildung 1. Konzentration des organischen Aerosols (OA) gemessen mit einem Aerosolmassenspektrometer (AMS) versus die gemessene Ozonkonzentration. Daten von Payerne im Juni 2006; Stundenwerte von 16 Uhr.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass OA nicht nur SOA beinhaltet, sondern auch das primäre organische Aerosol (POA). Lanz et al. (2007) haben allerdings gezeigt, dass im Sommer das organische Aerosol durch SOA dominiert ist. Eine kürzliche epidemiologische Studie hat für den Sommer einen stärkeren Zusammenhang zwischen Mortalität und PM<sub>2.5</sub> (Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als 2.5 µm) als für den Winter ergeben. Dies lässt vermuten, dass SOA neben POA ebenfalls zur Mortalität beiträgt und unterstreicht die Wichtigkeit weiterer Untersuchungen zur SOA-Bildung.

Diese Resultate zeigen auf, dass es für effiziente Massnahmen zur Erhöhung der Luftqualität wichtig ist, einerseits die Anteile von SOA und POA zu kennen, und andererseits zu wissen, welche Quellen wie viel zu diesen beiden Klassen beitragen. Zu diesem Zweck hat das PSI vor ca. 5 Jahren damit begonnen, in einer eigenen ‚Smogkammer‘ die Bildung von SOA zu untersuchen. Dabei wurde darauf geachtet, diese Experimente unter Bedingungen durchzuführen, die der realen Atmosphäre so nahe als möglich kommen. Dies ist umso wichtiger, als bei höheren Konzentrationen das SOA eine andere chemische Zusammensetzung aufweist als bei tiefen, atmosphärenrelevanten Konzentrationen (Duplissy et al., 2008). Dies hat seinen Grund darin, dass bei höheren Aerosol-Konzentrationen vermehrt

semivolatile Verbindungen in das Aerosol partitionieren; das heisst, man findet bei höheren Aerosol-Konzentrationen chemische Verbindungen im Aerosol, die bei tieferen Aerosol-Konzentrationen praktisch ausschliesslich in der Gasphase vorliegen.

Während die Studien sich in den ersten Jahren auf die Bildung von SOA aus gasförmigen Vorläufern konzentrierten (mit Verwendung von Trimethylbenzol als anthropogener SOA-Vorläufer (Kalberer et al., 2004) sowie von  $\alpha$ -Pinen (Baltensperger et al., 2005) und Isopren (Dommen et al., 2006) als biogene SOA-Vorläufer), wird heute vermehrt auch die SOA-Bildung von realen Abgasen aus einem Dieselmotor oder einer Holzfeuerung untersucht. Die ersten Ergebnisse lassen darauf schliessen, dass bei Dieselmotoren wie bei Holzfeuerungen das SOA-Bildungspotential deutlich höher sein kann als die eigentlichen POA-Emissionen. Im Interesse einer optimierten Quellenzuordnung und entsprechender Verbesserungsmassnahmen ist es deshalb notwendig, nicht nur die primären Emissionen sondern auch das SOA-Bildungspotential der verschiedenen Quellen zu kennen.

## Referenzen

- Baltensperger, U., M. Kalberer, J. Dommen, D. Paulsen, M.R. Alfarra, H. Coe, R. Fisseha, A. Gascho, M. Gysel, S. Nyeki, M. Sax, M. Steinbacher, A.S.H. Prévôt, S. Sjögren, E. Weingartner, R. Zenobi, Secondary organic aerosols from anthropogenic and biogenic precursors, *Faraday Discuss.*, 130, 265-278, 2005.
- Dommen, J., A. Metzger, J. Duplissy, M. Kalberer, M.R. Alfarra, A. Gascho, E. Weingartner, A.S.H. Prévôt, B. Verheggen, U. Baltensperger, Laboratory observation of oligomers in the aerosol from isoprene/NO<sub>x</sub> photooxidation, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L13805, doi:10.1029/2006GL026523, 2006.
- Duplissy, J., M. Gysel, M.R. Alfarra, J. Dommen, A. Metzger, A.S.H. Prévôt, E. Weingartner, A. Laaksonen, T. Raatikainen, N. Good, S.F. Turner, G. McFiggans, U. Baltensperger, Cloud forming potential of secondary organic aerosol under near atmospheric conditions, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L03818, doi:10.1029/2007GL031075, 2008.
- Kalberer, M., D. Paulsen, M. Sax, M. Steinbacher, J. Dommen, A.S.H. Prévôt, R. Fisseha, E. Weingartner, V. Frankevich, R. Zenobi, U. Baltensperger, Identification of polymers as major components of atmospheric organic aerosols, *Science*, 303, 1659-1662, 2004.
- Lanz, V.A., M.R. Alfarra, U. Baltensperger, B. Buchmann, C. Hueglin, A.S.H. Prévôt, Source apportionment of submicron organic aerosols at an urban site by factor analytical modelling of aerosol mass spectra, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 1503-1522, 2007.
- Nawrot, T.S., R. Torfs, F. Fierens, S. de Henauw, P.H. Hoet, G. van Kersschaever, G. de Backer, and B. Nemery, Stronger associations between daily mortality and fine particulate air pollution in summer than in winter: evidence from a heavily polluted region in western Europe, *J. Epidemiology Community Health*, 61, 146-149, 2007.

## **Beurteilungskriterien für die Schädlichkeit der Ozonbelastung**

Peter Straehl, PhD, MPH

Bundesamt für Umwelt BAFU, 3003 Bern, peter.straehl@bafu.admin.ch

Ozon ist sowohl aus gesundheitlicher Sicht wie auch aus Sicht der Wirkungen auf die Vegetation die Leitsubstanz des Sommersmogs. Sommersmog ist eine Mischung von verschiedensten Schadstoffen und enthält neben Ozon auch NO<sub>2</sub>, lungengängigen Feinstaub PM10 resp. PM2.5, PAN (Peroxyacetylnitrat) und weitere Substanzen. Diese Stoffe sowie die Hitze und (natürliche) Allergene können die Wirkungen von Ozon verstärken und umgekehrt.

### **A. Wirkungen von Ozon auf die Gesundheit**

Die Wirkungen von Ozon auf die Gesundheit des Menschen wurden in zahlreichen experimentellen und epidemiologischen Studien beobachtet und nachgewiesen. Ozon ist ein aggressives Reizgas und kann aufgrund seiner geringen Wasserlöslichkeit tief in die Lungen eindringen. Es kommt zu diffusen akuten entzündlichen Prozessen im gesamten Respirationstrakt. Einige Bereiche wie z.B. die Nasenhöhle oder die Bronchiolen können stärker betroffen sein. Die Folge sind starke Reizwirkungen und Gewebeschäden in diesen Zonen. Die Schäden wurden in Konzentrationsbereichen beobachtet, welche während „normalen“ Ozon-Sommermonaten in der Schweiz erreicht werden. Aus verschiedenen Studien gibt es Hinweise, dass sich die akuten Entzündungen nicht nur auf den Respirationstrakt beschränken. Auch systemische Wirkungen z.B. in der Leber wurden nachgewiesen.

Ozon kann die Abwehr- und Schutzmechanismen der Lunge auf verschiedene Weisen beeinträchtigen, so z.B. durch Störung der mukoziliären Clearance oder Verminderung der Makophagen-Aktivität. Eine gewisse Adaptation bei wiederholten Ozon-Expositionen (länger als 3 Tage hintereinander) u.a. aufgrund einer Steigerung der anitoxidativen Effizienz des Lungenepithels wurde zwar beobachtet, trotzdem können sich persistierende entzündliche Prozesse in den Bronchiolen entwickeln. Länger andauernde Ozon-Expositionen können strukturelle Änderungen in der Lunge hervorrufen, welche durch Veränderungen des Mukus, Verengung der Bronchiolen oder fibrotische Prozesse in den Alveolen charakterisiert sind. Diese Veränderungen sind teilweise reversibel.

Die Empfindlichkeit auf Ozon ist von Mensch zu Mensch verschieden. Eine genau abgrenzbare Risikogruppe für die Wirkung des Ozons gibt es nicht. Es gibt aber Hinweise, dass die Ozonbelastung für Kleinkinder, für Kinder mit Asthma, für Personen mit bestehenden Atemwegsproblemen und ältere Personen ein grösseres Problem darstellt als für gesunde Erwachsene. Zudem beeinflussen auch genetische Faktoren die Empfindlichkeit für ozoninduzierte Schäden. Nach Schätzungen der Weltgesundheitsorganisation WHO reagieren ca. 10 bis 15% der Bevölkerung - quer durch alle Bevölkerungsgruppen - besonders empfindlich auf Ozon.

### **Akute Wirkungen auf die Gesundheit**

Von den akuten Auswirkungen betroffen sind Menschen, die sich viel im Freien aufhalten, körperlich aktiv sind und kräftig durchatmen. Dies betrifft speziell Kin-

der und jüngere Personen aber auch Sportler und Arbeiter, die körperliche Schwerarbeit verrichten. In unseren klimatischen Verhältnissen wurden Lungenfunktionsverminderungen oder Leistungseinschränkungen in verschiedenen Studien bei verschiedenen Personengruppen konkret beobachtet so z.B. bei Schulkindern im Tessin nach kontrolliertem Velo fahren. Zu den akuten Wirkungen von Ozon gehören Augenbrennen, Reizungen und Entzündungen der Atemwege, Atemwegssymptome, vorübergehende Einschränkungen der Lungenfunktion und der Leistungsfähigkeit, Spitaleintritte wegen respiratorischen Problemen sowie vorzeitige Todesfälle. Daneben gibt es auch Studien zu möglichen Ozon-Wirkungen auf das kardiovaskuläre System. Zurzeit ist es aber noch nicht möglich, diese von Feinstaubwirkungen klar zu differenzieren.

Die Wirkungen von Ozon sind abhängig von:

- Der Konzentration: Je höher die Ozonwerte steigen, desto mehr Personen sind betroffen.
- Der Expositionsdauer: Je länger sich jemand in ozonreicher Luft aufhält, desto stärker wird die Reaktion.
- Dem Atemvolumen: Je grösser die körperliche Anstrengung ist, desto stärker wird die Reaktion.

Ozon und Kinder: Die Lungen der Kinder sind keine Miniaturversionen der Lungen von Erwachsenen. Im Gegensatz zu vielen andern Organen ist die Lunge bei Geburt noch nicht voll ausgebildet. Mehr als 80% der Lungenbläschen werden erst nach Geburt bis etwa zum 5. Altersjahr gebildet. Auch atmen Säuglinge und Kleinkinder wegen ihres relativ grösseren Sauerstoffbedarfs eine Luftmenge pro Minute ein, die – bezogen auf ihre Grösse und Körpergewicht – schon in Ruhe so gross ist wie bei einem sich körperlich betätigenden Erwachsenen. Zudem ist ihr Immunsystem noch nicht vollständig ausgebildet, eine zusätzliche Reizung durch Ozon kann deshalb ihre Anfälligkeit gegenüber Infektionen des Atemtrakts erhöhen. Aus Vorsorgegründen müssen deshalb alle Säuglinge und Kleinkinder als Risikogruppe eingestuft werden.

Spitaleintritte und Sterbefälle an oder nach Tagen mit hohen Ozonwerten: Die Weltgesundheitsorganisation WHO hat kürzlich eine umfassende Übersichtsarbeiten zu den Auswirkungen von erhöhten Ozon- und PM-Belastungen auf den Menschen fertig gestellt. Nach der Bewertung von Studien aus 15 Städten Europas, so auch der Städte Zürich, Basel und Genf, bezüglich der Wirkung von Ozon auf die Mortalität kommen die WHO-Experten zum Schluss, dass die Sterbefälle in den Sommermonaten um ca. 0.3% zunehmen wenn die Ozon 8-h Werte um 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  steigen. Diese Wirkungen werden dem Ozon zugeordnet und sind verschieden von den Wirkungen der Feinpartikel- oder Stickstoffdioxid-Belastung. Eine gleichzeitig erhöhte PM10- PM2.5- oder  $\text{NO}_2$ -Belastung kann aber die Wirkungen von Ozon verstärken. Die WHO hat auch die Wirkungen von Ozon auf die Spitaleintritte untersucht. Die Auswertung der Studien aus Europa zeigt, dass die Spitaleintritte wegen respiratorischen Beschwerden bei den 15- bis 64-jährigen Personen um 0.1%, bei den über 65-jährigen um 0.5% zunehmen, wenn die 8-h Mittelwerte von Ozon um 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  höher sind (vgl. Tabelle). Die WHO schätzt, dass in Europa im Jahr 2000 rund 22'000 Menschen wegen der Ozonbelastung vorzeitig gestorben sind, in der Schweiz liegt die entsprechende Zahl bei rund 200. Aufgrund der Studien lässt sich aber nicht abschätzen, wie gross die Reduktion der Lebenserwartung ist (Monate?).

Anstieg des 8-h Mittelwertes von Ozon um ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Zunahme der Sterbefälle insgesamt wegen $\text{O}_3$ (%)	Zunahme der Spitaleintritte wegen respiratorischen Beschwerden (%)
10	0.3%	0.1 - 0.5%
50	1.5%	0.5 - 2.5%
100	3%	1 - 5%

### Langzeitwirkungen auf die Gesundheit

Die chronischen Wirkungen von Ozon auf die menschliche Gesundheit wurden in Studien weltweit deutlich weniger untersucht als die akuten Wirkungen. Dies hängt u.a. damit zusammen, dass ein geeigneter Langzeit-Expositionsindikator schwer zu bestimmen ist. Es gibt aber zunehmend Hinweise, dass chronisch erhöhte Ozonbelastungen einen Einfluss auf die Inzidenz von Asthma bei Kindern und Erwachsenen, auf das Wachstum der Lunge und die Lungenfunktion bei Kindern und Jugendlichen sowie evtl. auf eine Reduktion der Lebenserwartung haben können. Die Resultate dieser Studien sind allerdings nicht sehr konsistent. In der Schweiz wurden mögliche chronische Wirkungen von Ozon bisher nicht untersucht.

Um die Wirkungen von Ozon auf die Gesundheit zu bestimmen, verwenden Experten der WHO den Indikator SOMO35. SOMO35 ist die Summe der maximalen 8h-Werte eines Tages über 35ppb während einem Jahr. Simulationen von SOMO35 zeigen, dass die Ozon-Exposition der Bevölkerung in Südfrankreich, Deutschland, Norditalien und der Schweiz bis ins Jahr 2020 um 20-30% abnehmen könnte (verglichen mit 2000).

Insgesamt kann aufgrund der Resultate von verschiedensten Studien gesagt werden, dass die übermässigen Ozonbelastungen in der Schweiz ein ernsthaftes Risiko für die Gesundheit der Bevölkerung darstellen. Nach Meinung der Experten der WHO ist Ozon der zweitwichtigste Luftschadstoff (nach Feinstaub) bezüglich Wirkungen auf die Gesundheit.

### B. Wirkungen von Ozon auf die Vegetation

Die sommerliche Ozonbelastung führt periodisch zu sichtbaren Schäden hauptsächlich an den Blättern von Laubbäumen, Sträuchern und Kulturpflanzen. Eine anhaltende Dauerbelastung durch Ozon kann das Wachstum und die Vitalität empfindlicher Pflanzenarten beeinträchtigen.

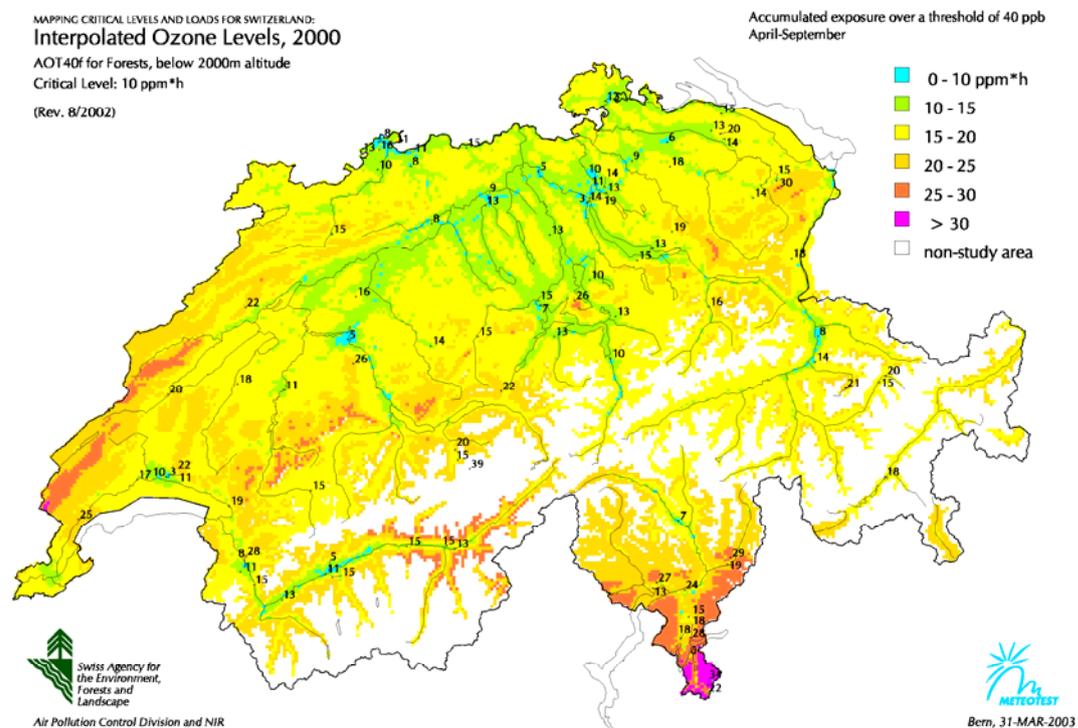
Da Ozon bei Bäumen die Versorgung der Wurzeln mit energiereichen Verbindungen (z.B. Kohlenhydrate) aus den Blättern und Nadeln behindert, werden weniger Feinwurzeln gebildet und die Vitalität von Wurzelpilzen (Mycorrhiza) wird eingeschränkt. Dies hat negative Langzeitfolgen für die Ernährung und den Wasserhaushalt der Bäume. In experimentellen und epidemiologischen Studien wurde festgestellt, dass mit zunehmender Ozonbelastung der Stammzuwachs von Bäumen abnimmt.

Ozon schädigt auch landwirtschaftliche Kulturen. Besonders bei Nutzpflanzenarten mit einer hohen Blattdurchlässigkeit wie Klee, Luzerne, Tomate, Soja oder Bohne kann Ozon leicht ins Blattinnere eindringen und Blattzellen angreifen. Dies führt kurzfristig zu sichtbaren Blattschädigungen. Aber auch ohne typische Schadsymptome führt die Dauerbelastung durch Ozon zu Ertragseinbussen bei

wichtigen Kulturen, wie Weizen oder Kartoffel. Je nach Kultur und Region, und in Abhängigkeit der herrschenden Umweltbedingungen, sind diese Ernteeinbussen unterschiedlich gross. Experimentell wurde auch festgestellt, dass die anhaltende Ozonbelastung zu einer Veränderung des Artenspektrums von angesäten Wiesen, einer Abnahme der Produktivität von Dauerwiesen, und zu einer erhöhten Empfindlichkeit der Pflanze gegenüber Parasiten und andern Krankheitserregern führt.

Auf internationaler Ebene wurden Werte für die Ozonbelastung festgelegt (Critical Levels), welche zum Schutz der empfindlichsten Pflanzenarten nicht überschritten werden sollten. Dabei wird die über die Vegetationszeit akkumulierte Ozonbelastung oberhalb eines Schwellenwerts von 40 ppb (AOT 40) berücksichtigt. Der AOT-Wert zum Schutz der Vegetation beträgt 3ppm.h (über 3 Monate), der Wert zum Schutz des Waldes beträgt 5 ppm.h (über 6 Monate). In der Schweiz werden diese kritischen Belastungswerte zurzeit um mindestens das Zwei- bis Dreifache überschritten (siehe Abbildung). Vergleiche zwischen dem Gesundheitsindikator SOMO35 und den Wirkungen auf die Vegetation zeigen, dass in Gebieten mit Überschreitungen des SOMO-Wertes auch sichtbare Schäden an Pflanzen beobachtet werden.

Die Wirkung auf Pflanzen kann sich nur entfalten, wenn das Ozon in die Blätter und Nadeln eindringen kann. Die Ozonaufnahme geschieht auf dem Weg durch die Spaltöffnungen, deren Öffnungsweite durch die Umweltbedingungen verändert wird. Besonders Trockenheit führt zu einer Verengung der Spaltöffnungen und damit zu einer Verminderung der Aufnahmerate. Dadurch nimmt auch die Wirksamkeit des Ozons ab.



Die Karte zeigt, dass die international festgelegten Ozon-Dosiswerte für den Wald (AOT40 5 ppm.h) in der Schweiz deutlich überschritten werden.

## Grenzwerte/Zielwerte der Schweiz, der EU und der USA, Richtwerte der WHO

Für die Festlegung von Grenzwerten und andern Beurteilungskriterien/Messlatten sind vor allem Konzentrations-Wirkungs Funktionen in Bevölkerungsgruppen massgebend. Die Werte sind in folgenden Verordnungen und Direktiven festgelegt:

CH: LRV 85, Stand 2008, Art. 13 und 14 sowie Art. 11 Abs. 2 und 3 USG

EU: Richtlinie 2008/50/EG, Mai 2008

USA: Clear Air Act 1990, National Ambient Air Quality Standards, O<sub>3</sub> 2008

WHO: Air Quality Guidelines, Global Update 2005

	Grenzwert, Zielwert	Air Quality Guideline, Richtwert	Informationsschwelle Alarmschwelle
WHO	---	100 µg/m <sup>3</sup> , 8h max SOMO35	160 µg/m <sup>3</sup> , 8h max Important health effects, Interim Target  240 µg/m <sup>3</sup> , 8h max Sgnificant health effects, substantial proportion of vulnerable population affected, High Level
Schweiz	120 µg/m <sup>3</sup> , 1h max, 1x 100 µg/m <sup>3</sup> , 98%, 0x	---	---
EU	120 µg/m <sup>3</sup> , 8h max, 25x, ab 2010, Zielwert AOT40 18'000 µg/m <sup>3</sup> .h, ab 2010, Zielwert 120 µg/m <sup>3</sup> , 8h max, 0x, Langfristziel, ab? AOT40 6'000 µg/m <sup>3</sup> .h, Langfristziel, ab?	---	180 µg/m <sup>3</sup> , 1h, Informationsschwelle 240 µg/m <sup>3</sup> , 1h, 3x, Alarmschwelle
USA	0.075ppm, 8h, 4th	---	0.12ppm, lim.

### Referenzen

Air Quality Guidelines. Global Update 2005. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen 2006

Evidence of Widespread Ozone Damage to Vegetation in Europe 1990-2006. ICP Vegetation – Working Group on Effects of LRTAP. Centre for Ecology and Hydrology, Bangor UK 2007

Health Risks of Ozone from Long-Range Transboundary Air Pollution (LRTAP). Task Force on Health – Working Group on Effects of LRTAP. WHO European Centre for Environment and Health, Bonn Office (in press)

Sommersmog. Eidgenössische Kommission für Lufthygiene EKL, Bern 2004

## **Stratégie de lutte contre le smog estival et l'ozone au niveau national et international**

Richard Ballaman

Chef de la section Qualité de l'air,  
Office fédéral de l'environnement,  
richard.ballaman@bafu.admin.ch

La Stratégie de lutte contre la pollution de l'air, adoptée par le Conseil fédéral en 1985, portait sur la réduction des émissions de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), des oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et des hydrocarbures (HC, aujourd'hui: composés organiques volatils COV). Cette stratégie a été complétée en 1989 par le rapport « L'ozone en Suisse » publié par la Commission fédérale de l'hygiène de l'air, qui y faisait le point sur les connaissances scientifiques en la matière et présentait les conclusions suivantes: «En se basant sur des considérations suprarégionales, ainsi qu'en considérant les réactions se produisant dans la troposphère libre, il convient de chercher à obtenir une réduction des émissions des deux précurseurs NO<sub>x</sub> et COV, voire aussi du monoxyde de carbone (CO) et du méthane (CH<sub>4</sub>). Malgré les nombreuses incertitudes existant encore dans les modélisations, on constate que des réductions massives des émissions de NO<sub>x</sub> et COV, de l'ordre de 70 à 80% (par rapport aux quantités annuelles émises durant la première moitié des années 80), sont nécessaires pour obtenir un abaissement généralisé de la charge en ozone jusqu'au niveau préconisé par les directives actuelles de la qualité de l'air (p. ex. OMS). » (CFHA 1989)

Par la suite, différentes études scientifiques, qui incluent aussi bien des recherches expérimentales que des modélisations, ont mis en évidence les liens de cause à effet entre les émissions de précurseurs et les concentrations d'ozone (Neftel & Spirig, 2003; Volz-Thomas et al., 2003), ainsi que les éléments déterminant cette formation (facteurs limitant).

Par ailleurs, des travaux de modélisations ont montré qu'une réduction conjointe des émissions de NO<sub>x</sub> et de COV constitue la mesure la plus efficace pour diminuer la pollution par l'ozone en Suisse et, partant, pour réduire le smog estival et en abaisser les pics. La réduction combinée des deux polluants précurseurs est plus favorable qu'une réduction des NO<sub>x</sub> ou des COV uniquement (OFEFP 1996).

Les études ont également confirmé qu'il est nécessaire de réduire les émissions de méthane et de monoxyde de carbone pour réduire l'ozone de fond dans la troposphère libre (Fiore et al. 2002).

Les mesures d'urgence au jour le jour, qui sont déclenchées seulement en cas de concentrations extrêmement élevées d'ozone et réalisées sur un territoire restreint durant une courte période, ne sont pas appropriées pour réduire durablement la charge d'ozone. Des mesures effectuées durant l'été 2003 ont en effet montré que les concentrations d'ozone ne baissent que de très peu, même si l'air contient un tiers de moins de précurseurs pendant un ou deux jours. Par contre, la charge polluante totale qui affecte la santé est plus faible et ainsi malgré tout bénéfique.

## Les réductions d'émissions réalisées: bilan et prévisions

Les mesures de réduction d'émissions qui ont été mises en oeuvre jusqu'à présent en Suisse ont permis de diminuer les émissions de NO<sub>x</sub> d'environ 50% et celles de COV d'environ 60% par rapport à leur niveau maximal atteints en 1985 (Rapport CF 99.077, OFEFP 2005).

La **Convention CEE/ONU** de Genève sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance (CLRTAP) a permis de réduire les émissions de précurseurs à grande échelle. C'est ainsi que 31 pays se sont engagés par le Protocole de Göteborg, adopté en 1999, à réduire d'ici à 2010 leurs émissions de NO<sub>x</sub> et de COV de 40 à 60% par rapport à 1990. Ces engagements correspondent pour la Suisse à respectivement 52% et 51%, chiffres comparables pour l'Autriche, l'Allemagne, l'Italie et la France. En parallèle, la Directive NEC (« National Emission Ceilings »), qui a été adoptée au sein de l'Union européenne en 2001, prévoit des plafonds d'émission similaires pour 2010 pour les 27 pays de l'UE.

## Evolution des concentrations d'ozone

En dépit de ces réductions considérables des émissions, les concentrations d'ozone mesurées dans les agglomérations et dans les régions rurales au Nord resp. au Sud des Alpes sont restées excessives **dans les couches d'air proches du sol** (couche limite planétaire). Elles n'évoluent pas proportionnellement aux émissions et aux concentrations des précurseurs.

Durant les dix dernières années, les moyennes annuelles d'ozone ont même légèrement augmenté. Cette hausse apparaît également dans les stations de montagne, qui ne sont guère influencées directement par les émissions suisses, si bien qu'on peut la considérer comme la conséquence d'une hausse de la pollution de fond à grande échelle. Les analyses de séries de mesures sur plusieurs années dans les stations rurales d'Europe de l'Ouest mettent également en évidence une augmentation des valeurs moyennes (Roemer 2001).

Des travaux de modélisation récents entrepris au PSI ont permis de mettre en évidence l'impact pour la Suisse résultant de différents scénarios de réduction des émissions en Europe pour une situation météorologique typique d'août 2003. Il apparaît que les réductions de NO<sub>x</sub> et de COV qui seront réalisées en 2010 en application du protocole de Göteborg et de la directive NEC devraient faire diminuer les pics d'ozone en Suisse, d'environ 5-6% au Nord et de 6 à 10% au Sud des Alpes. Une diminution supplémentaire de moitié des polluants précurseurs permettrait d'atteindre une baisse de 10 à 18% des concentrations de pics au Nord et même de 20% au Sud des Alpes (Andreani-Aksoyoglu et al. 2008).

L'ozone de fond (couche réservoir) reflète la concentration d'ozone **dans la troposphère libre**. Celle-ci est influencée par les émissions à grande échelle de NO<sub>x</sub> et de COV, mais aussi de CH<sub>4</sub> et de CO. Des travaux de modélisations et des mesures ont montré que l'ozone de fond augmente à l'échelle planétaire d'environ 0,5 ppb par an en même temps qu'augmentent les émissions de NO<sub>x</sub>, de CH<sub>4</sub> et de CO (Derwent 2006). De plus, la formation d'ozone dépend aussi des températures et de l'ensoleillement. La hausse des températures dans le monde due aux gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et O<sub>3</sub> notamment) et à l'ensoleillement accru (ultraviolets) causé par la destruction de l'ozone stratosphérique (CFC) peut également jouer un rôle. Il convient de noter aussi que les avions rejettent des précurseurs qui polluent directement la troposphère libre.

## **Efforts scientifiques au niveau hémisphérique**

Un nouveau groupe d'experts scientifiques a été constitué au sein de la Convention LRTAP consacré aux aspects du transport à l'échelle hémisphérique. Une de ses tâches principales est de quantifier les impacts du transport intercontinental, ainsi que l'évolution des concentrations de CH<sub>4</sub> et CO, actuellement en augmentation, sur les concentrations d'ozone troposphérique et leur conséquence sur les concentrations proches du sol (par ex. Auvray et al. 2007). Les premiers résultats de ces travaux ont été publiés dans le cadre d'un rapport préliminaire (UNECE 2008) et les résultats finaux sont attendus pour la fin 2009.

## **Poursuite des réductions au-delà de 2010**

Du fait que les efforts entrepris jusqu'à maintenant ne sont pas suffisants pour ramener les charges en ozone au niveau requis, des mesures supplémentaires devront être adoptées pour réduire encore plus les émissions de précurseurs (CFHA 2004).

Des travaux sont en cours, aussi bien en Suisse, qu'au sein de la CEE-ONU et de l'UE, en vue de renforcer les engagements pour la période au-delà de 2010 avec de nouveaux plafonds pour les NO<sub>x</sub>, les COV et les PM pour 2020 et des mesures de mises en oeuvre appropriées en terme de réduction des émissions. Ces mesures s'orienteront vers des renforcements des prescriptions sur les gaz d'échappement des véhicules à moteurs et des machines, des valeurs limites d'émissions plus sévères pour les installations industrielles et les chauffages, ainsi que sur des mesures structurelles en matière d'habitat (aménagement du territoire) et de la politique des transports de voyageurs et des marchandises.

La directive NEC sera aussi révisée afin de permettre la mise en oeuvre de la Stratégie thématique de lutte contre la pollution de l'air (TSAP) adoptée par le Conseil européen en 2005. Cette directive révisé tiendra également compte des futurs scénarios énergétiques (-20% des émissions de CO<sub>2</sub>, +20% des énergies renouvelables) prévus pour 2020 afin de limiter les changements climatiques. Ces nouveaux engagements permettront de limiter les émissions de polluants précurseurs de l'ozone et du smog estival. Par ailleurs, le Protocole de Kyoto prévoit d'ores et déjà de réaliser les premières réductions d'émissions de méthane à l'échelle mondiale d'ici à 2012. Il devrait à l'avenir également prendre en compte l'ozone et ses précurseurs.

## **Conclusions**

Pour assurer une protection plus efficace des êtres humains et de la végétation contre les effets néfastes de l'ozone et du smog estival, de nouvelles mesures durablement efficaces de réduction des émissions de polluants précurseurs devront être adoptées en Suisse et à l'étranger en cherchant autant que possible à optimiser les synergies possibles entre la lutte contre les changements climatiques et la protection de l'air. Cela passera par des mesures techniques renforcées pour les installations stationnaires et les véhicules à moteur (en diminuant notamment la différence entre moteur à essence et diesel), par des mesures structurelles en matière de politique des transports de voyageurs et de marchandises et par de nouvelles normes énergétiques dans l'habitat, ainsi surtout par un moindre recours aux carburants et combustibles.

## Bibliographie

- Andreani-Aksoyoglu S., Keller, J., Ordonez, C., Tinguely M., Schultz, M., Prévôt A, Influence of various emission scenarios on ozone in Europe, *Ecological modelling*, 217, 209-218, 2008
- Auvray, M., Bey, I., Llull, E., Schultz, M.G., and Rast, S., A model investigation of tropospheric ozone chemical tendencies in long-range transported pollution plumes; *J. Geophys. Res.* 112, D05304, doi:10.1029/2006JD007137, 2007
- Beck, J.P., Krzyzanowski, M., Koffi, B. et al. Tropospheric Ozone in the European Union: the consolidated report, 1999
- Brönnimann S, Ozon in der Atmosphäre, Haupt Verlag; 2002
- CFHA 1989. L'ozone en Suisse. Rapport de la Commission fédérale de l'hygiène de l'air. Cahier de l'environnement OFEFP n° 101
- CFHA 2004, Le smog estival, Prise de position de la CFHA, disponible sur le site : <http://www.bafu.admin.ch/luft/00575/00577/index.html?lang=fr>
- Derwent R. G., Simmonds, P.G., O'Doherty, S., Stevenson, D.S., Collins, W.J., Sanderson, M.G. Johnson, C.E., Dentener, F., Cofala, J., Mechler, R., Amann, M., External influences on Europe air quality: baseline methane, carbon monoxide and ozone from 1990 to 2030 at Mace Head, Ireland. *Atmos. Environ.* 40, 844-855, 2006
- Fiore A, Jacob D, Field B, Streets D, Fernandes S, Jang C. Linking ozone pollution and climate change: The case for controlling for methane. *Geophys. Res. Lett.* 2002; 8. Oct, 10.1029
- Neftel A., Spirig C., 2003. EUROTRAC-2 Subproject LOOP, Final Report. EUROTRAC-2, ISS, Munich.
- OFEFP 1996 a) POLLUMET : Pollution de l'air et météorologie en Suisse. Document environnement n° 63
- OFEFP 1996 b) L'ozone troposphérique: résultats des recherches actuelles. Conséquences pour la lutte contre la pollution de l'air, Cahier de l'environnement N° 277
- OFEFP 2005, Stratégie de lutte contre la pollution de l'air : bilan et actualisation, Cahier de l'environnement, N° 379.
- Rapport 99.077 du Conseil fédéral sur les mesures d'hygiène de l'air adoptées par la Confédération et les cantons, FF n° 38, p. 6983 - 7005, 1999
- Roemer M. Trends of ozone and precursors in Europe, status report TOR-2. TNO report R2001/244
- UNECE, Hemispheric Transport of Air Pollution, Air Pollution Studies No. 16, 2007
- Volz-Thomas, A. et al., 2003. Tropospheric Ozone and its Control. Extrait de: P.M. Midgley and M. Reuther (Editors), *Towards Cleaner Air for Europe - Science, Tools and Applications*. Margraf Publishers, Weikersheim, Germany.