

Ozon und Sommersmog: Klimawandel gefährdet heutige Erfolge

Der Ozongehalt in der Umgebungsluft hat trotz erfolgreicher Luftreinhaltemassnahmen in der Schweiz nur wenig abgenommen. Damit belastet der Sommersmog nach wie vor die menschliche Gesundheit. Mit dem Klimawandel dürften heisse Sommer wie 2003 und 2015 künftig häufiger auftreten und das Ozonproblem erneut verschärfen.

Ozonschicht und Sommersmog sind seit den 90er-Jahren in der Schweiz oft diskutierte Umweltthemen. Im Gegensatz zum hoch gelegenen stratosphärischen Ozon, das die «Ozonschicht» bildet und vor schädlicher UV-Strahlung der Sonne schützt, behandelt das vorliegende Factsheet die Ozonbelastung in Bodennähe.

Was ist Ozon und wie wirkt es?

Der Luftschadstoff Ozon wird in der Troposphäre (Luftschicht vom Boden bis etwa 10 km Höhe) gebildet, wenn bei Sonnenlicht Kohlenwasserstoffe im Beisein von Stickoxiden abgebaut werden. Um die Ozonbildung zu vermindern, muss der Ausstoss der Vorläuferschadstoffe – sowohl von Kohlenwasserstoffen als auch von Stickoxiden – gesenkt werden. Bund und Kantone haben deshalb seit Mitte der 80er-Jahre Massnahmen zur Reduktion der Emissionen dieser Ozonvorläufer erarbeitet und umgesetzt.

Ozon reizt die Schleimhäute von Augen, Nase und Atemwegen. Bei erhöhten Konzentrationen von Ozon treten vermehrt Atemwegserkrankungen auf, bei Menschen mit Allergien und Asthma kann Ozon die Symptome verstärken. Zudem nehmen bei erhöhten Ozonbelastungen Spitaleinweisungen zu und mehr Menschen sterben an Atemwegserkrankheiten. Ob dies auf die Wirkung von Ozon oder von anderen Luftschadstoffen, so genannten toxischen Photooxidantien, zurückzuführen ist, deren Konzentrationen stark mit der von Ozon schwankt,¹ ist noch unklar.

Auch wenn Ozon die menschliche Gesundheit insgesamt belastet, so hat es doch auch positive Wirkungen auf die Luftqualität. Ozon führt über komplexe chemische Prozesse zur Bildung des Hydroxyl-Radikals, welches den Abbau von verschiedenen Luftschadstoffen in der Atmosphäre beschleunigt.

¹ WHO, 2005

Sommersmog schadet Gesundheit

Die Kombination von Hitze und Sommersmog kann bei bestimmten Personengruppen ernsthafte gesundheitliche Probleme auslösen. So führte beispielsweise die Hitzewelle 2003 in Holland zu 1000 bis 1400 zusätzlichen Todesfällen. Davon konnten 400 bis 600 Todesfälle auf die erhöhte Luftverschmutzung durch Ozon und Feinstaub zurückgeführt werden.² Für die Schweiz wurde für die Hitzewelle vom Sommer 2003 eine hitzebedingte Zunahme der Todesfälle um 7 Prozent geschätzt.³

In der Landwirtschaft führt die gegenwärtige Ozonbelastung zu erheblichen Ertragseinbussen.⁴ Ausserdem ist Ozon in den unteren Luftschichten ein starkes Klimagas. Nach Kohlendioxid (CO₂) und Methan (CH₄) trägt das Ozon in der oberen Troposphäre am stärksten zum vom Menschen verursachten Klimawandel bei.⁵

Ozonvorläufer deutlich zurückgegangen

An der Ozonbildung in der Troposphäre sind einerseits Stickoxide, andererseits eine grosse Anzahl von reaktiven flüchtigen Kohlenwasserstoffen (VOC) beteiligt. Stickoxide und einzelne VOCs, wie etwa Benzol, sind für den Menschen gesundheitsgefährdend. Bei der Reduktion der Vorläuferschadstoffe des bodennahen Ozons zeigt die schweizerische Luftreinhaltepolitik grosse Erfolge (s. Bild 2). Die gegen Mitte der 80er-Jahre begonnenen Massnahmen führten zu einer Abnahme der Konzentrationen der Stickoxide um ungefähr 60 Prozent. Die VOCs (ausser Methan) sind seit Mitte der 80er-Jahre gar um rund 70 Prozent zurückgegangen.

In Europa haben die Emissionen sowie die Aussenluftkonzentrationen der Ozonvorläufer in allen Ländern abgenommen. Die Veränderungen in der Schweiz zählen zu den grössten und entsprechen etwa denjenigen von Deutschland und England.⁶

Ozongrenzwerte nach wie vor häufig überschritten

Trotz den Erfolgen bei der Senkung der Ozonvorläufer wird der Stundengrenzwert für Ozon nach wie vor häufig überschritten (s. Bild 3). Dieser Grenzwert sollte pro Jahr höchstens einmal überschritten werden. Gleichzeitig haben die Ozonspitzenwerte deutlich abgenommen. Stundenmittelwerte über 240 µg/m³ kamen in den letzten Jahren nur noch selten vor. Die Ozonbelastung sowie auch die Abnahme der Ozonwerte sind in der Südschweiz am grössten (s. Bild 5). Dies hängt vermutlich primär mit dem Einfluss der Luft aus dem stark industrialisierten Grossraum von Mailand zusammen.

Weshalb ist der Rückgang der Ozonbelastung nur relativ gering?

Die eher kleine Veränderung der Belastung durch bodennahes Ozon im Vergleich zu den Vorläuferschadstoffen hat verschiedene Ursachen: Ozon ist ein sekundärer Luftschadstoff. Die Ozonbildung hängt in komplexer Weise von den Konzentrationen der Vorläuferschadstoffe ab, zum Beispiel auch vom Verhältnis der Stickoxid- zu den VOC-Konzentrationen in der Luft. Zudem ist die Entwicklung der globalen Ozon-Konzentration von Bedeutung. Auch die Wetterverhältnisse spielen eine wichtige Rolle.

Ozonvorläufer aus Südostasien

Ein wesentlicher Grund für die geringe Abnahme des Ozons in Bodennähe im schweizerischen Mittelland dürften die ansteigenden Konzentrationen von Ozon in der freien Troposphäre sein. Diese wurden beispielsweise auf dem Jungfraujoch gemessen. Im Alpenraum beschleunigen die Berge den Austausch des Ozons zwischen höheren und tieferen Luftschichten.⁷

An der hochalpinen Messstation auf dem Jungfraujoch (3580 Meter über Meer) haben die Ozonkonzentrationen im Verlaufe der 90er-Jahre nicht ab-, sondern zugenommen (s. Bild 4).⁸ Erst nach der Jahrtausendwende ist eine leichte Abnahme festzustellen. Dies hat nicht etwa mit dem zeitlichen Verlauf der Emissionen der Ozonvorläuferschadstoffe der Schweiz oder der umliegenden europäischen Staaten zu tun, sondern hängt mit dem interkontinentalen Transport von Ozon und dessen Vorläufergasen zusammen.

2 Fischer et al., 2004

3 Grize et al., 2005

4 HTAP, 2010, Part A: Literatur siehe pp. 228ff

5 IPCC, 2013

6 EEA, 2009; EMEP, 2016

7 HTAP, 2010, Part C

8 Brönnimann et al., 2002; Cui et al., 2011

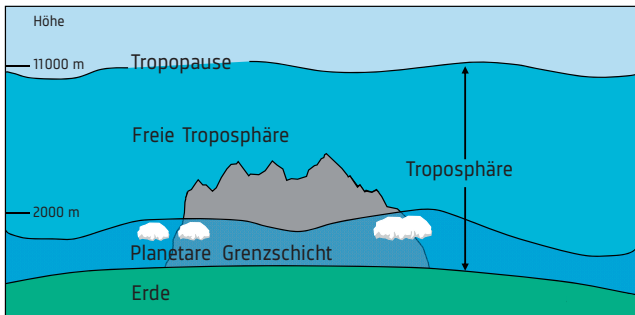


Bild 1: Schematische Darstellung der Struktur der Troposphäre. Auf der Höhe des Jungfraujochs (3580 Meter über Meer) wird meist die Luft der freien Troposphäre gemessen.

Auf dem Jungfraujoch wird meist die oberhalb des Mittellandes liegende Luftschicht erfasst, die «freie Troposphäre» genannt wird (s. Bild 1). Die Luft der freien Troposphäre bewegt sich viel rascher und wird über viel grössere Distanzen verfrachtet als die Luft des schweizerischen Mittellandes (sog. planetare Grenzschicht). Wegen des Luftaustausches zwischen der freien Troposphäre und der planetaren Grenzschicht dürfte die Zunahme von Ozon in der freien Troposphäre die Ozonabnahme im schweizerischen Mittelland vermindert haben.

Die Luft auf dem Jungfraujoch wird hauptsächlich von Nordamerika über den Atlantik nach Europa transportiert. Die Luft

über dem nordamerikanischen Kontinent stammt vorwiegend vom Pazifik. Diese Luft ist oft mit Ozonvorläuferschadstoffen aus Südostasien beladen, wo die entsprechenden Emissionen von 1990 bis 2010 stark zugenommen haben. Ein solcher interkontinentaler Transport von Ozon und dessen Vorläufergasen hat einen wichtigen Einfluss auf die Konzentration von bodennahem Ozon in Europa.⁹ Neben den genannten Vorläuferschadstoffen sind ausserdem die globalen Emissionen von Methan¹⁰ entscheidend.

Die Rolle des Ferntransports

Der Anstieg der Ozonkonzentrationen der mittleren nördlichen Breiten ist wahrscheinlich einer der Gründe, weshalb die Ozonwerte in der Schweiz trotz Abnahme der Vorläufer weniger zurückgegangen sind. Die verfügbaren Untersuchungen zum interkontinentalen Transport beruhen hauptsächlich auf atmosphärischen Chemie-Transportmodellen. Sie geben noch keine schlüssigen Antworten auf die Frage, in welchem Ausmass der interkontinentale Transport die an abgeschiedenen Standorten wie dem Jungfraujoch gefundene Entwicklung der Ozonkonzentrationen erklären kann.¹¹



9 HTAP, 2010, Part C

10 Methan ist ein langlebiger Kohlenwasserstoff, der die Ozonbildung auf regionaler Skala kaum beeinflusst aber zur Ozonbildung auf hemisphärischer Skala beiträgt

11 Derwent et al., 2015

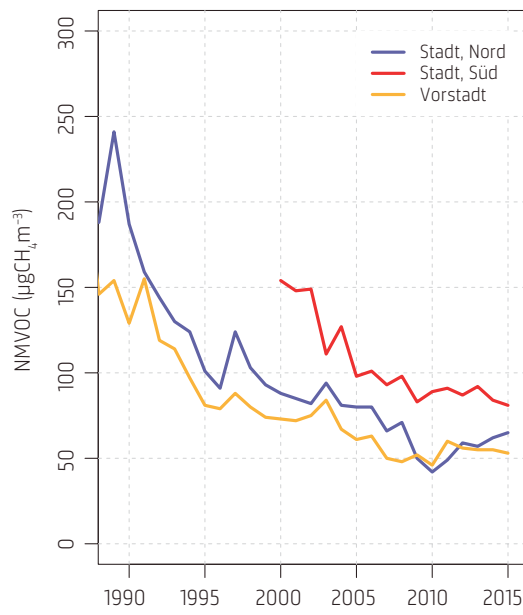
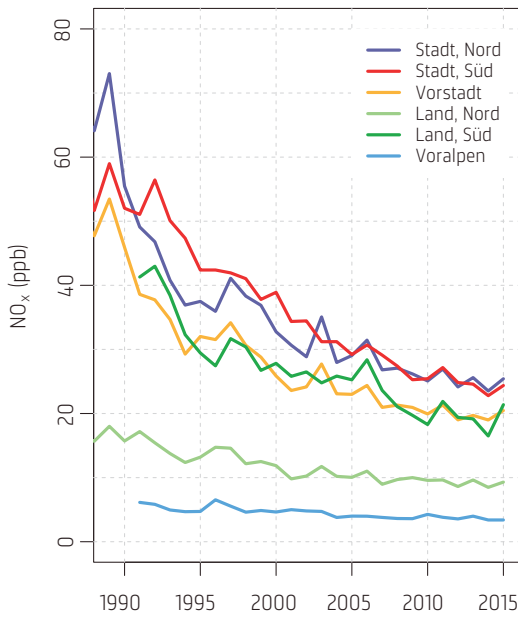


Bild 2: Aussenluftkonzentrationen von Ozonvorläufern für verschiedene Standorttypen in der Schweiz. Links: Stickoxide (NO_x: NO + NO₂), Rechts: Nichtmethan-VOC. Nord und Süd kennzeichnen Standorte auf der Alpennord- bzw. Alpensüdseite (NABEL, BAFU/ Empa).

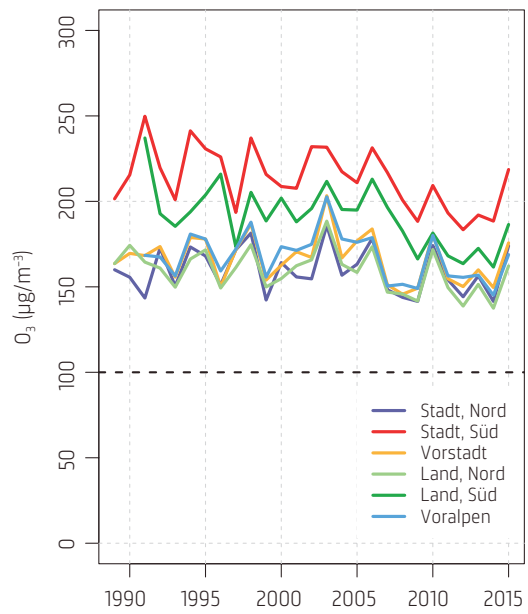
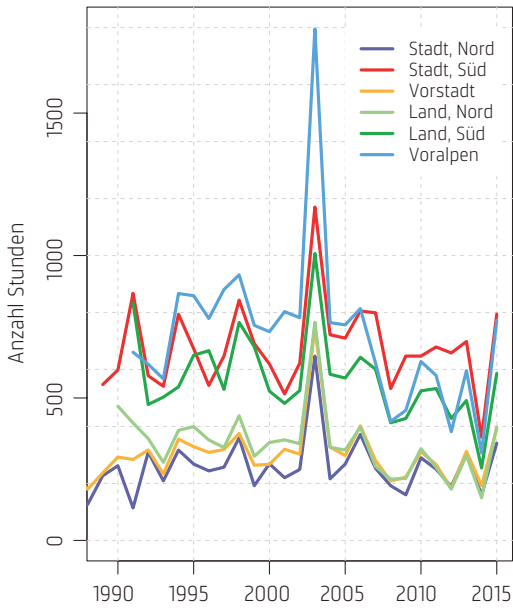


Bild 3: Ozonkonzentrationen für verschiedene Standorttypen in der Schweiz. Links: Häufigkeit der Überschreitung des Stundengrenzwertes von 120 µg/m³ (Anzahl Stunden pro Jahr). Rechts: Die höchsten Ozon-Konzentrationen ausgedrückt durch das 98-Perzentil des ozonreichsten Sommermonats. Die gestrichelte Linie kennzeichnet den zugehörigen Grenzwert der Luftreinhalteverordnung (NABEL, BAFU/ Empa).

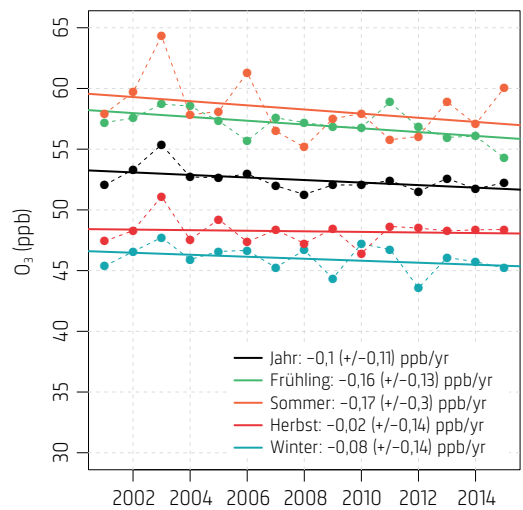
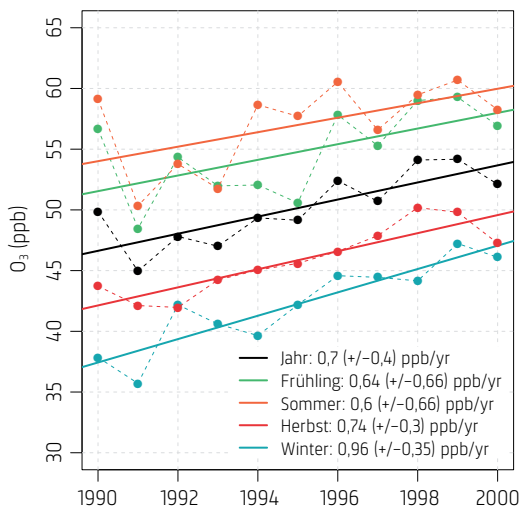


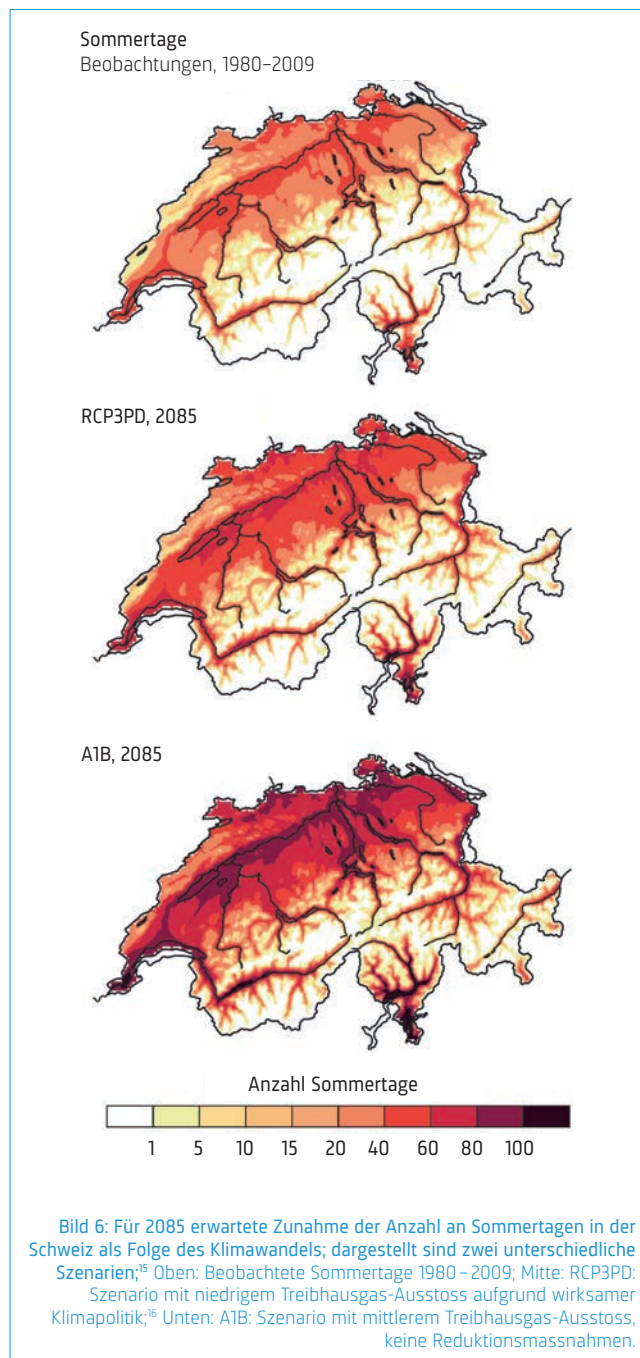
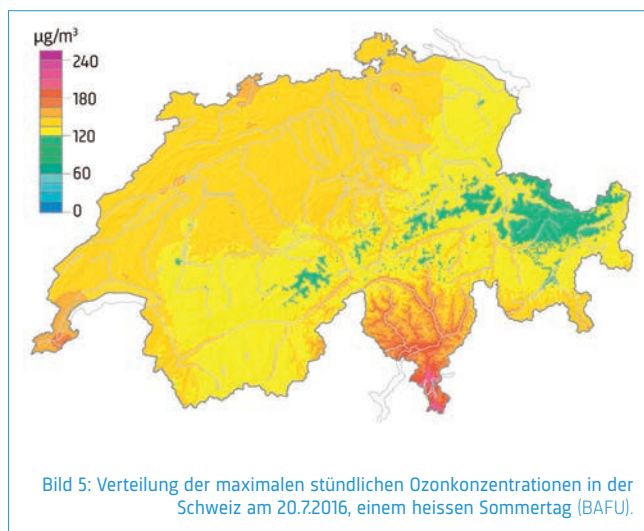
Bild 4: Ozonkonzentrationen auf dem Jungfraujoch (NABEL, BAFU/ Empa).

Der Einfluss der Witterung und des Klimawandels

Der Hitzesommer 2003 und der heisse Sommer 2015 liessen die Ozonbelastungen gegenüber den Vorjahren deutlich ansteigen. Bei anhaltenden sommerlichen Hochdrucklagen steigen die Lufttemperaturen an, Ozon bildet sich rascher¹² und nimmt in der untersten Luftschicht von Tag zu Tag zu.¹³ Hauptsächlich wegen dem Ausbleiben von Frontdurchgängen bzw. Luftmassenwechselln wird keine frische, ozonärmere Luft herangeführt und die stark ozonhaltige Luft nicht weggeführt.

In wissenschaftlichen Studien¹⁴ wurde gezeigt, dass im Hitzesommer 2003 der Kohlenwasserstoff Isopren eine zusätzliche wichtige Rolle spielte. Isopren ist ein sehr reaktiver Kohlenwasserstoff, der von vielen Pflanzen besonders an heissen, sonnigen Tagen ausgestossen wird. Dies ist der Grund, weshalb er für die Ozonbildung in Hitzeperioden besonders bedeutsam ist.

Heutige Klimamodelle sagen übereinstimmend eine Zunahme der Sommertage (Tage mit Maximaltemperaturen über 25 °C) für die Schweiz voraus (s. Bild 6). Das Ausmass hängt von der zukünftigen Entwicklung der Klimagase ab, insbesondere von Kohlendioxid (CO₂). Je nach Szenario könnte sich die Anzahl Sommertage in den Agglomerationen des Mittelands verdoppeln.



Schönwetterlagen erhöhen Ozonwerte

Die Bildung von Ozon ist stark von der Witterung abhängig. Anhaltende, warme Schönwetterlagen führen zu hohen Ozonwerten. Nehmen solche Wetterlagen zu, wie dies aufgrund des Klimawandels erwartet wird, so steigt auch die durchschnittliche Ozonbelastung an, so wie dies in den heissen Sommern wie 2003 und 2015 der Fall war.

12 Baertsch-Ritter et al., 2004

13 Ordóñez, et al., 2005

14 Solberg et al., 2008; Vieno et al., 2010

15 CH2014-Impacts, 2014, p. 44

16 Im 5. Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC als RCP2.6 bezeichnet

Empfehlungen

Damit die Schweizer Bevölkerung in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts weniger unter Sommersmog zu leiden hat, ergeben sich folgende Empfehlungen:

- 1. Klimawandel mindern:** Eine rasche Absenkung des Ausstosses von Klimagasen bremst den Klimawandel und leistet einen Beitrag zur Reduktion des Sommersmogs in der Schweiz.
- 2. Methanausstoss senken:** Die Reduktion der Emissionen von Methan senkt die globale Konzentration von Ozon und bremst den Klimawandel.
- 3. Luftreinhaltung in Südostasien verbessern:** Da Ozonvorläufer mit der Luft über Kontinente hinweg verfrachtet werden, reduziert die Verbesserung der Luftreinhaltung vorab in Südostasien, was aufgrund des

technologischen Fortschritts erwartet wird, den Sommersmog in der Schweiz. Die Schweiz könnte durch Know-How-Transfer einen Beitrag leisten.

- 4. Weniger Stickoxide:** Die maximalen Ozonwerte treten bei hochsommerlichen Hochdrucklagen auf. Bei diesen Wetterverhältnissen ist der Beitrag durch interkontinentalen Transport typischerweise klein. Eine weitere Reduktion der Stickoxide in der Schweiz ist daher notwendig, um die Ozonbelastung in Hitzeperioden wirksam zu verringern.

Um die Wirksamkeit der Massnahmen zu bestimmen und geeignete und nachhaltige Anpassungsstrategien zu entwickeln, braucht es quantitative Untersuchungen mit globalen numerischen Modellen und interdisziplinäre Studien.

- Bärtsch-Ritter N, Keller J, Dommen J, Prevot ASH (2004) Effects of various meteorological conditions and spatial emission resolution on the ozone concentration and ROG/NOx limitation in the Milan area, *Atmos. Chem. Phys.*, 4, 423-438.
- Brönnimann S, Buchmann B, Wanner H (2002) Trends in near surface ozone concentrations in Switzerland: the 1990s, *Atmos. Env.*, 36, 2841-2852.
- CH2014-Impacts (2014) *Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland*, published by OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, and ProClim, Bern, Switzerland, 136 pp (www.ch2014-impacts.ch).
- Cui J, Pandey Deolal S, Sprenger M, Henne S, Staehelin J, Steinbacher M, Nedelec P (2011) Free Tropospheric Ozone Changes Over Europe as Observed at Jungfraujoch (1990-2008): An analysis based on backward trajectories, *J. Geophys. Res.*, 116, D10304, doi:10.1029/2010JD015154.
- Derwent RG, Utembe SR, Jenkin ME, Shallcross DE (2015) Tropospheric ozone production regions and the intercontinental origins of surface ozone over Europe, *Atm. Env.*, 112, 216-224.
- EEA (2009) *Assessment of ground-level ozone in EEA member countries, with a focus on long-term trends*, European Environment Agency (EEA), Copenhagen, Technical report No 7/2009.
- EMEP (2016) *Air pollution trends in the EMEP region between 1990 and 2012*, Joint Report of the EMEP Task Force on Measurements and Modelling (TFMM), Chemical Co-ordinating Centre (CCC), Meteorological Synthesizing Centre-East (MSC-E), Meteorological Synthesizing Centre-West (MSC-W).
- Fischer PA, Brunekreef B, Lebret E (2004) Air pollution related deaths during the 2003 heat wave in the Netherlands, *Atm. Env.*, 38, 1083-1085.
- Grize L, Huss A, Thommen O, Schindler C, Braun-Fahrländer C (2005) Heat wave 2003 and mortality in Switzerland, *Swiss Medical Weekly*, 135, 200-205.
- HTAP (2010) Part A: *Hemispheric Transport of Air Pollution 2010*. Air Pollution Studies No. 17. United Nations, New York and Geneva.
- HTAP (2010) Part C: *Hemispheric Transport of Air Pollution 2010*. Part D: *Answers to Policy-Relevant Questions*, Air Pollution Studies No. 20. United Nations, New York and Geneva.
- IPCC (2013) *Climate Change 2013: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA.
- NABEL, BAFU/Empa vgl. *Messresultate des Nationalen Beobachtungsnetzes für Luftfremdstoffe (NABEL), Luftbelastung 2105*, BAFU, Bern.
- Ordóñez C, Mathis H, Furger M, Henne S, Hüglin C, Staehelin J, Prévôt ASH (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.
- Solberg S, Hov Ø, Søvde A, Isaksen ISA, Coddeville P, De Backer H, Forster C, Orsolini Y, Uhse K (2008) European surface ozone in the extreme summer 2003, *J. Geophys. Res.*, 113, D07307, doi:10.1029/2007JD009098.
- Vieno M, Dore AJ, Stevenson DS, Doherty R, Heal MR, Reis S, Hallsworth S, Tarrason L, Wind P, Fowler D, Simpson D, Sutton MA (2010) Modelling surface ozone during the 2003 heat-wave in the UK., *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 7963-7978, doi:10.5194/acp-10-7963-2010.
- WHO (2015) *WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*. Global update 2005, Summary of risk assessment, Geneva, Switzerland.

IMPRESSUM

AUTOREN: Prof. Dr. Johannes Staehelin (ETH Zürich), Dr. Christoph Hüglin (Empa), Prof. Dr. Stefan Brönnimann (Universität Bern), Prof. Dr. Nino Künzli (Swiss TPH).

REVIEWER: Prof. Dr. Jürg Fuhrer (Agroscope), Dr. Lukas Emmenegger (Empa), Dr. Ulrich Krieger (ETH Zürich), Meltem Kutlar Joss (Swiss TPH), Dr. Urs Neu (ProClim, SCNAT), Dr. André Prévôt (Paul Scherrer Institut), Dr. Dominique Ruffieux (MeteoSchweiz)

FOTOS: Bruno Neiningen/shutterstock.com: Die beiden Fotos illustrieren den Sommersmog; neben Ozon werden auch Partikel gebildet und diese erniedrigen die Sichtweite. Das erste Foto erhielten wir von Prof. Dr. Bruno Neiningen (ZHAW): Es zeigt ein Bild aus einem Forschungsflugzeug von der FORMAT-Kampagne, die im Jahre 2003 in der Südschweiz/Oberitalien stattgefunden hat. Das zweite Foto zeigt Shanghai bei Tagesanbruch im Monat August.

LAYOUT: Olivia Zwygart **GRAFIK:** Lukas Hüglin

Das Factsheet wurde unter Federführung der Schweizerischen Kommission für Atmosphärenchemie und -physik (ACP) der Akademie der Naturwissenschaften von den Autoren verfasst und von den Experten begutachtet.

Ein Projekt der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz

sc | nat 

Zitiervorschlag: Akademien der Wissenschaften Schweiz (2016) Ozon und Sommersmog: Klimawandel gefährdet heutige Erfolge. *Swiss Academies Factsheets* 11 (5).

www.akademien-schweiz.ch