

Ozone – A simple molecule with enduring impact on climate, air quality and health

Despite political efforts, the recovery of the stratospheric ozone layer is progressing only slowly, and ground-level concentrations regularly exceed regulatory limits. Further measures are needed to reduce the negative impacts on health, vegetation and climate. Global monitoring remains necessary. Switzerland contributes with the World's longest record of ozone observations that began 100 years ago in Arosa on 23 July 1926 and continue now in Davos.

Natural sunscreen and respiratory irritant

Ozone consists of three oxygen atoms bound together. It was discovered in 1839 by the German chemist Christian Friedrich Schönbein, who was working in the newly established Chemical Laboratory of the University of Basel. He later wrote to Justus von Liebig – another pioneer at the time – that he 'tends to believe that atmospheric ozone plays an important role in the Earth system.'¹

The 'good' ozone

In the stratosphere (between about 15 and 50 km above ground, cf. fig. 1), the formation of ozone molecules removes dangerous incoming solar short-wave ultraviolet (UV-C) radiation. The resulting ozone layer absorbs further UV-B radiation and is a natural sunscreen that protects the Earth surface. Without ozone, terrestrial life as we know it could not have developed.

Over Antarctica, this protective shield is destroyed every year after polar sunrise in September. An 'ozone hole' forms due to a unique combination of cold temperatures, polar stratospheric clouds, and the remains of human-made chemicals,

such as chlorofluorocarbons (CFC) that were mostly produced and used between 1950 and 1990. Ozone can also be depleted above Europe when Arctic air with low ozone concentrations reaches to mid-latitudes.^{2,3} Then, higher UV radiation can cause unexpected sunburns.

The dominant ozone-depleting substance today is nitrous oxide (N_2O). Of it, 64% is emitted from natural sources (e.g. natural soils, oceans, wetlands), while 36% is of anthropogenic origin, mostly from food production.⁴

The 'bad' ozone

Some of the ozone in the troposphere (from the ground up to about 15 km above us, cf. fig. 1) mixes in from the stratosphere, but most of it is produced photochemically at ground-level when air pollutants react with sunlight. Ozone is a respiratory irritant, harmful to plants and a greenhouse gas. However, due to its reactivity, it also cleanses the atmosphere of other pollutants. Ground-level ozone can only be reduced indirectly by targeting the emissions of precursor substances.

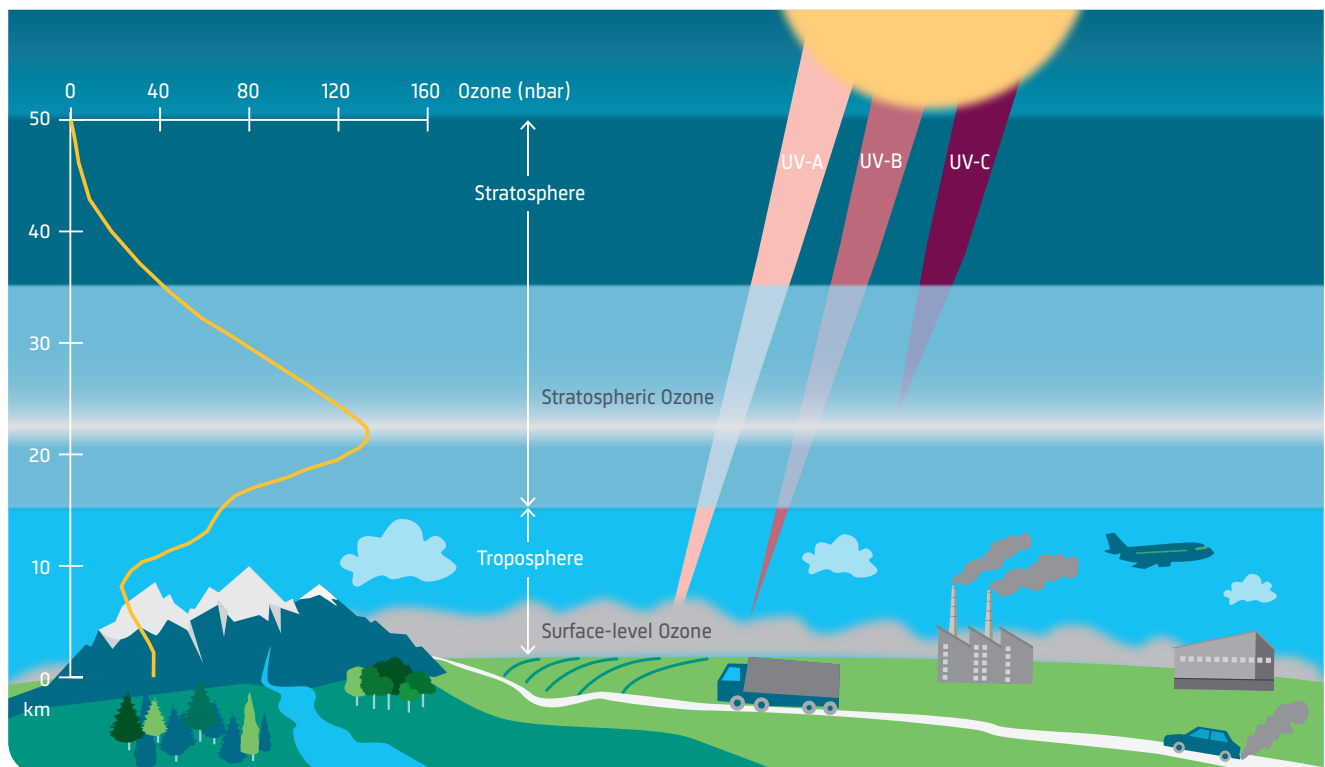


Figure 1: The mean ozone profile measured by balloon sondes and microwave radiometer in Payerne (VD) shows the stratospheric ozone layer between roughly 15 km and 35 km, with a maximum of ozone at about 22 km above ground. There, it is formed by highly energetic solar UV-C radiation. The ozone layer then absorbs most of the UV-B radiation, leaving the UV-A radiation to reach the Earth surface. Near the surface, ozone is formed photochemically from air pollutants. Sources: MeteoSwiss, adapted from: NASA

Impact of ozone

Air quality

At ground level, ozone forms when nitrogen oxides (NO_x), methane and other volatile organic compounds (VOCs) react in complex ways in sunny conditions. The anthropogenic emissions of such ozone precursors have dropped significantly in Switzerland and neighbouring countries, thanks to stricter regulations on combustion processes, the incentive tax on VOCs, solvent substitution, and improved exhaust gas treatment (cf. fig. 2a).

Unfortunately, the impact of such policies on ozone concentrations has been relatively small. This is mainly due to natural emissions of ozone precursors, long-range transport of ozone and complex and nonlinear photochemical ozone formation. For example, in relatively clean environments (rural locations), ozone decreases slightly with decreasing NO_x emissions. However, under polluted conditions (traffic and urban locations), NO_x reductions actually cause increase in ozone (cf. fig. 2b).

The number of exceedances of the Swiss air quality standard in rural and (sub)urban areas has decreased over the last 25 years due to precursor emission reductions. At the same time, these gains from air quality policies are threatened by increasing temperatures, which promote higher ground level ozone.⁵ Above 25 °C, at traffic locations – in line with figure 2b – the probability of exceeding the limits nowadays is actually higher (cf fig. 3). The need for additional ozone reducing measures thus persists and will become

even more urgent in view of rising temperatures caused by climate change.

Health

UV radiation is a major risk factor for sunburn, skin cancer, and cataracts. Switzerland has among the highest incidence (cases per 100,000) of melanoma skin cancer: 11.1 vs. 2.9 globally for women, and 15.7 vs. 3.7 globally for men.⁶ Higher incidence, particularly among outdoor workers and in younger populations, correlates with higher UV exposure – typical at higher altitudes and in unshaded areas.⁷ Although the ozone layer has stabilised above Switzerland (cf. fig. 5) and may be gradually recovering,⁸ a rapid decline in skin cancer incidence is unlikely because of long latency periods. In fact, incidence rates in Switzerland are still rising due to increased recreational UV exposure, clothing styles with more skin exposure, but also earlier detection. Fortunately, better and earlier detection have helped improve treatment, so mortality has decreased.

Ground-level ozone enters the body primarily through the lungs and affects the airway epithelium – the protective lining of the respiratory tract.⁹ The oxidative stress triggers inflammation, damages the cells, and increases the permeability of the airway barrier. This makes the lungs more vulnerable to pathogens, allergens, and other airborne pollutants.

Short-term exposure to elevated ozone levels has been linked to decreased lung function, respiratory symptoms like coughing and shortness of breath, and a rise in emergency

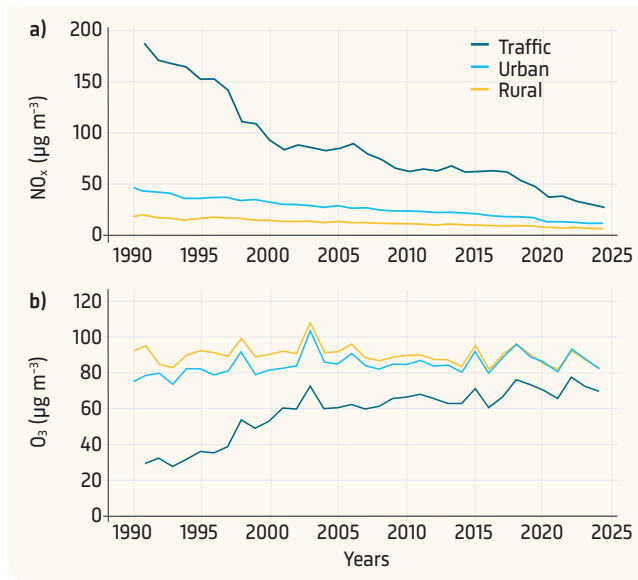


Figure 2: Summer daytime concentrations of a) nitrogen oxides (NO_x), and b) ground-level ozone (O₃) under different conditions as measured by the Swiss National Air Pollution Monitoring Network (NABEL). Figure adapted from ⁵

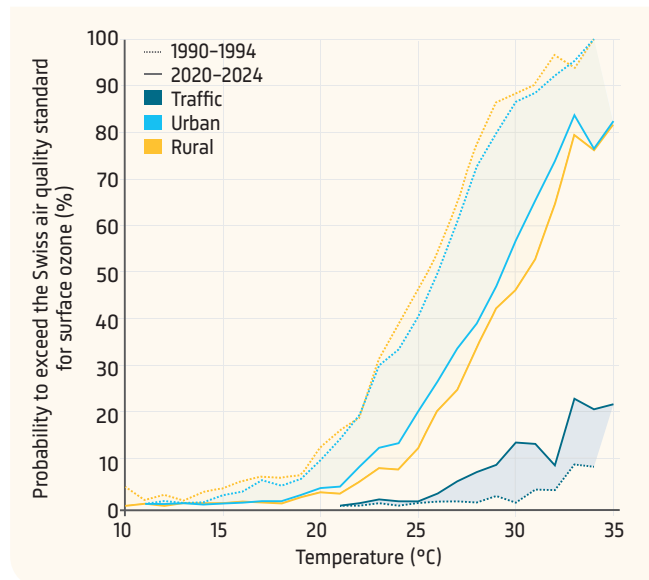


Figure 3: Changes of the probability to exceed the Swiss air quality standard for hourly surface ozone concentrations of 120 μg/m³ for 1990–1994 and for 2020–2024 as a function of temperature. Figure adapted from ⁵

room visits and hospitalizations.¹⁰ Most at risk are children, older adults, outdoor workers, and individuals with pre-existing conditions such as asthma or chronic obstructive pulmonary disease (COPD). Epidemiological evidence suggests increased all-cause and respiratory-related mortality.¹¹

Long-term exposure to ozone is associated with accelerated lung aging and decline in lung function, exacerbated allergic responses and increased severity of asthma or COPD. However, attribution of any health impact to ozone exposure is challenging because of its co-existence with other air pollutants and heat stress.

Vegetation and food production

Plants suffer from increased UV radiation due to stratospheric ozone depletion. Reducing the emissions of anthropogenic ozone depleting substances (e.g. through more targeted use of fertilisers) would benefit the stratospheric ozone layer and thus reduce harmful incoming UV radiation.

Ground-level ozone harms plants by entering through the surface of leaves. Ozone damage of plants has a significant impact on crop yields, reducing global annual yields by several percent (cf. fig. 4).^{12, 13, 14} For Europe, these losses amounted to 6.7 megatons worth 1300 M€ for wheat, and 3.2 megatons worth 680 M€ for potatoes in 2022.¹⁵

Finally, natural ecosystems also suffer from elevated ground-level ozone concentrations. Foliage discoloration on trees and bushes in the summer denotes stress and impaired photosynthesis. Such injury in the foliage of forest species is systematically assessed at forest sites in Switzerland and across Europe.^{16, 17} As with health effects, the attribution to ozone is not straightforward, as temperature, precipitation and soil humidity are important confounding factors.

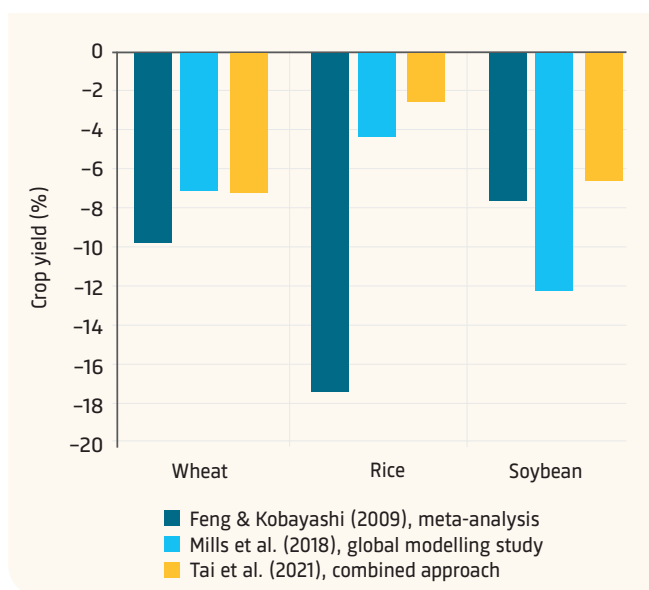


Figure 4: Estimated impact of ground-level ozone exposure on global yields of selected crops. Figure combined from ^{12, 13, 14}

Ozone and climate change

Stratospheric ozone

The stratospheric ozone recovery is determined by the balance of photochemical production, loss-reactions and transport. The year-to-year variability is mostly driven by transport. Since the international adoption of the Montreal Protocol (cf. box 2), halogens from ozone-depleting substances have declined in the stratosphere (cf. fig. 5). At the same time, increasing greenhouse gas concentrations lead to changes in ozone chemistry and atmospheric dynamics with contrasting effects at different levels of the atmosphere and in different geographical regions.¹⁸

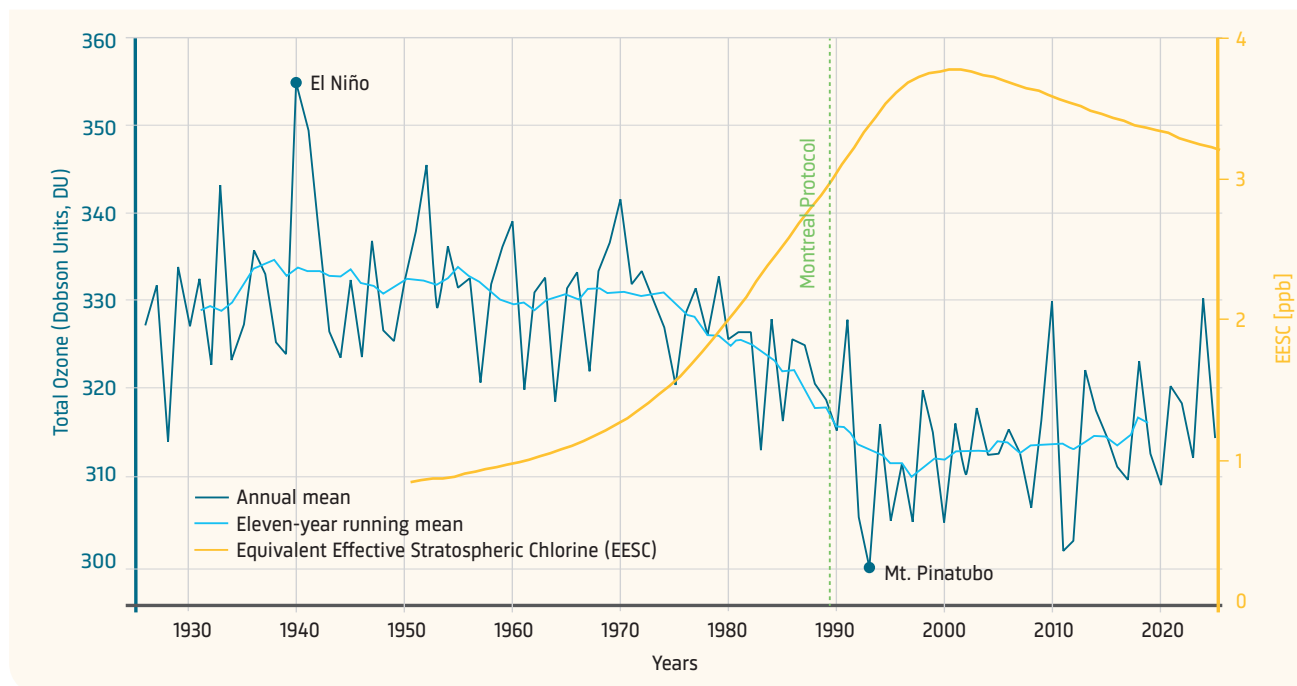


Figure 5: The world's longest ground-based total column ozone (cf. box 1) observation time series from Arosa/Davos started in 1926. Higher ozone concentrations at the beginning are followed by rapid decline because of chlorine-containing ozone depleting substances. These were mainly emitted between the mid-1970s and the mid-1990s leading to a maximum of the Equivalent Effective Stratospheric Chlorine (EESC) around 2000.^{29, 30, 31} Ozone levels stabilized afterwards thanks to the effects of the Montreal Protocol and its amendments after 1989. Besides the long-term monitoring for trend analyses, such a long time series also captures rare weather anomalies like the extremely strong El Niño event in 1940/1941 or the effect of the volcanic eruption of Mt. Pinatubo in 1993. Figure adapted from MeteoSwiss

Over Antarctica, an ozone hole still forms each austral spring, but its severity varies from year to year, depending on the temperatures and wind conditions in the polar regions.^{19, 8, 20} This affects the ozone distribution across much of the Southern Hemisphere.²¹

The stratosphere over the Arctic is generally warmer and has less stable winds due to surrounding landmasses. Consequently, ozone depletion is usually less pronounced than in Antarctica. However, exceptionally cold, persistent conditions can still produce ozone-hole-like events (e.g., 2011 and 2020).²²

Since about 2000, between roughly 60°S–60°N, a slow recovery of the upper-stratospheric ozone at a rate of 1%–3% per decade has been observed.²³ In the lower stratosphere outside the polar regions, ozone abundances tend to decrease since about 1998.^{24, 25} At mid-latitudes to date, there is no significant trend of total column ozone after 1995 (cf. fig. 5).

Ground-level ozone

Ground-level ozone trends vary depending on the location on Earth.²⁶ The recently updated climate scenarios for Switzerland predict more warm or hot days.²⁷ Sunny, often drier weather in a warmer climate²⁸ promotes the formation of ozone, and stagnant conditions prevent fresh air from mixing in. This is a health risk for humans and stresses flora and fauna. Thus, the positive effects of precursor emission reductions will be partly jeopardized by the rise in frequency, intensity and duration of heatwaves (cf. fig. 3). Then, ozone levels remain elevated during the warmer seasons.

Box 1: How is stratospheric ozone measured?

Ozone absorbs light at specific wavelengths. Various ground-based and satellite instruments have been constructed that can isolate narrow bands of the solar spectrum. The total column ozone (the integrated amount of ozone from the ground to the stratosphere) and the vertical distribution of ozone in the atmosphere are measured either by looking into the sun and measuring the intensity of certain spectral bands where ozone absorbs, or by measuring radiation scattered by ozone molecules. This is called spectrophotometry or radiometry. An alternative are Lidars using laser-light; and balloon-borne instruments that measure ozone in the atmosphere using an electrochemical reaction.

The Dobson instrument (cf. fig. 7) has been the backbone of a global network of stations for many decades.³⁵ Satellites provide coverage of the global ozone distribution. These instruments are regularly verified to ensure the quality of the measurements. The resulting datasets are stored in international data centres. This is the basis for scientific assessments of long-term trends, the effects of mitigating ozone depleting substances, and of climate change.

Box 2: Montreal Protocol and protection of the ozone layer

The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer is a global treaty adopted in 1987. It responded to evidence from the 1970s that human-made chemicals were destroying stratospheric ozone³³ and to the first observation in 1985 of an Antarctic 'ozone hole'.³⁴ These chemicals, such as chlorofluorocarbons (CFCs) and related halogenated compounds, were commonly used in refrigerators and air conditioners, aerosol sprays, foam products, and fire-suppression systems. The protocol entered into force in 1989 and has since achieved universal ratifi-

cation. It regulates the production, consumption and trade of major ozone-depleting substances. Its impact has been substantial: controlled production/consumption of ozone-depleting substances has fallen by over 98%, concentrations of these chemicals in the atmosphere are declining, and the ozone layer is expected to recover mid-century if we continue to comply. As an important side-effect, by reducing CFCs, all of which are potent greenhouse gases, the Montreal protocol has contributed significantly to the mitigation of climate change.

Box 3: History of ozone observations in Switzerland

The world's longest continuous time series of total column ozone (cf. fig. 5) began in 1926 as an assignment from the tourism association (Kur- und Verkehrsverein) at the Lichtklimatisches Observatorium (LKO) in Arosa, Switzerland by physicist F.W. Paul Götz. He was motivated by the scientific need to understand solar ultraviolet radiation and its effects on health and climate. Götz soon established a close collaboration with Gordon Dobson from the University of Oxford. Arosa was thus one of the first stations to operate predecessors of the so-called Dobson spectrophotometer (cf. fig. 6). The Dobson instruments have become the backbone of systematic global ozone monitoring serving international atmospheric research and policy decisions until the present day.^{35, 36} With time, additional Dobson instruments were installed at LKO to ensure continuity and consistency of the data through parallel measurements. The program was later maintained jointly by ETH Zurich and MeteoSwiss and taken over entirely by MeteoSwiss in 1988. In 1988, automated Brewer spectrophotometers – another type of

instrument – were added to further enhance data quality and availability. Since 2010, the Dobson instruments have been gradually automated. Their measurement principle and spectral range have remained unchanged, to ensure a homogeneous time series from the first observations in 1926 to this day.

Between 2011 and 2019, the desire to guarantee continuity of the observations for the future led to the transfer of the instruments from Arosa to the Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/World Radiation Center (PMOD/WRC). This relocation was accompanied by rigorous quality assurance efforts. These efforts continue and help understand and compensate for potential subtle differences in local conditions, which might manifest only over decades. Today, the time series is based on three automated Dobson and three Brewer instruments (cf. title photo) in a joint effort of MeteoSwiss and PMOD/WRC, providing a unique high-quality dataset that underpins international assessments of ozone recovery.



Figure 6: Daniel Chalonge, colleague of F.W. Paul Götz, on the terrace of the 'Firnlicht' house in Arosa in the early 1930s, between the Fabry-Buisson (predecessor of the Dobson spectrophotometer), the Chalonge, and the Féry spectrographs. Photo: unknown. Source: Photo archive MeteoSwiss

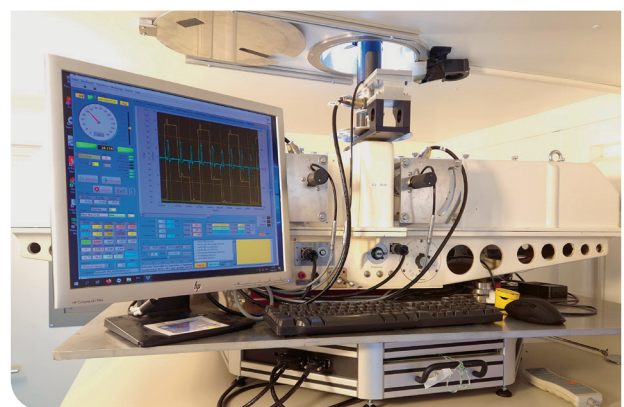


Figure 7: Automated Dobson instrument in Davos today. Photo: Franz Zeilinger

Ozone monitoring in support of science-for-policy

Long term, high-quality observations proved crucial when dramatic ozone depletion above Antarctica was discovered in 1985 (cf. fig. 5). Following the implementation of the Montreal Protocol and its amendments (cf. box 2), this depletion was halted and the stratospheric ozone concentration has stabilized. However, the long term recovery is fragile in the light of climate change, and the topic is subject to active research. For the Arosa/Davos measurements, the

trend after 1995 has been unclear and non-significant so far (cf. fig. 5). Given the immense importance of stratospheric ozone for life on Earth, continued global monitoring remains essential to guide policy, particularly in the context of ongoing climate change.

As the host of the longest timeseries of stratospheric ozone measurements at Arosa/Davos, Switzerland has assumed a key role in the global ground-based monitoring of the ozone layer and carries a special responsibility to continue these high-quality observations into the future.

Conclusions and recommendations

The stratospheric ozone layer protects life from harmful UV radiation. It has generally been on a path to recovery since the implementation of the Montreal protocol. However, nitrous oxide (N_2O , not to be confused with the ground-level ozone precursor NO_x) – presently the most important ozone-depleting substance and a strong greenhouse gas with natural and anthropogenic sources – is still on the rise. More targeted use of fertilizers would help reduce anthropogenic emissions. Moreover, the ongoing climate change also impacts the dynamics of the atmosphere, and the recovery is expected to be weaker over the tropics and stronger over the extratropical regions. The long-term monitoring of stratospheric ozone through high quality

measurements of the vertical ozone profile and of the total column ozone – as pioneered in Arosa in 1926 – is the basis for regular future assessments. Anthropogenic activity has threatened the ozone layer once before, and it is critical to identify undesired developments at an early stage.

Tropospheric ozone near the surface is harmful to humans, animals and plants. Continuous efforts to reduce emissions of primary pollutants (ozone precursors and greenhouse gases) help mitigate both, temperature increases and ground-level ozone production. This must be a global effort implemented locally, as ozone is transported over long distances, and local mitigation alone has only a limited effect.

SDGs: The UN International Sustainable Development Goals

With this publication, the Swiss Academy of Sciences contributes to SDGs 3, 13 and 15: 'Good health and well-being', 'Climate Action' and 'Life on Land'.

> sdgs.un.org
> agenda-2030.eda.admin.ch



1-36 References are included in the online version at scnat.ch/ozone

ABOUT THIS PUBLICATION

PUBLISHER AND CONTACT

Swiss Academy of Sciences (SCNAT)
Swiss Commission for Atmospheric Chemistry and Physics (ACP)
House of Academies · Laupenstrasse 7 · P.O. Box · 3001 Bern · Switzerland
joerg.klausen@meteoswiss.ch · acp.scnat.ch ·  SCNAT

RECOMMENDED FORM OF CITATION

Klausen J et al. (2026) Ozone – A simple molecule with enduring impact on climate, air quality and health. Swiss Academies Factsheets 21 (2)

DOI: doi.org/10.5281/zenodo.21060689

AUTHORS

Marloes Eeftens (Swiss TPH) · Luca Egli (PMOD/WRC) · Anina Gilgen (Agroscope) · Jörg Klausen (MeteoSwiss, lead) · Eliane Maillard-Barras (MeteoSwiss) · Clara Nussbaumer (ETH Zurich) · Rolf Rüfenacht (MeteoSwiss) · Patrick Schleppe (WSL) · Martin Steinbacher (Empa)

REVIEW

Hugo Amacker (FOEN) · Christoph Hüglin (Empa) · Ulrich Krieger (ETH Zurich) · André Prévôt (Paul Scherrer Institute) · Matthew B. Tully (Bureau of Meteorology, Melbourne, Australia)

EDITING

Andres Jordi (SCNAT) · Caroline Reymond (SCNAT)

LAYOUT AND GRAPHICS

Olivia Zwygart (SCNAT)

COVER PHOTO

Fabrizio Vignali (PMOD/WRC)

ISSN (print): 2297-8283

ISSN (online): 2297-1831



creativecommons.org/licenses/by/4.0
This publication is licensed under CC BY 4.0.

L'ozone – Une molécule simple aux effets durables sur le climat, la qualité de l'air et la santé

Malgré les efforts politiques, la reconstitution de la couche d'ozone stratosphérique ne progresse que lentement, et les concentrations au niveau du sol dépassent régulièrement les limites réglementaires. Des mesures supplémentaires restent nécessaires pour réduire les impacts négatifs sur la santé, la végétation et le climat de même qu'une surveillance mondiale. La Suisse y contribue grâce à la plus longue série d'observations de l'ozone au monde initiée il y a 100 ans à Arosa, le 23 juillet 1926, et poursuivie aujourd'hui à Davos.

Protection solaire naturelle et irritant respiratoire

L'ozone est constitué de trois atomes d'oxygène liés entre eux. Il a été découvert en 1839 par le chimiste allemand Christian Friedrich Schönbein au laboratoire de chimie de l'Université de Bâle. Il écrivit plus tard à Justus von Liebig – un autre pionnier de l'époque – qu'il « avait tendance à croire que l'ozone atmosphérique jouait un rôle important dans le système terrestre ».¹

Le « bon » ozone

Dans la stratosphère (entre environ 15 et 50 km au-dessus du sol, fig. 1), la formation de molécules d'ozone arrête les dangereux rayons ultraviolets à ondes courtes (UV-C) du soleil. La couche d'ozone qui en résulte absorbe également les rayons UV-B et constitue un écran solaire naturel protégeant la surface de la Terre. Sans l'ozone, la vie terrestre telle que nous la connaissons n'aurait pas pu se développer.

Chaque année, après le lever du soleil polaire en septembre, ce bouclier se désagrège au-dessus de l'Antarctique. Un « trou dans la couche d'ozone » se forme sous l'effet conjugué de températures froides, de nuages stratosphériques polaires et des résidus de produits chimiques anthropiques appauvrissant la

couche d'ozone, tels les chlorofluorocarbures (CFC), principalement produits et utilisés entre 1950 et 1990. Le phénomène peut aussi survenir au-dessus de l'Europe lorsque de l'air arctique pauvre en ozone atteint les latitudes moyennes,^{2,3} provoquant un rayonnement UV intense et des coups de soleil inattendus.

Aujourd'hui, la principale substance appauvrissant la couche d'ozone est le protoxyde d'azote (N_2O). Environ 64% des émissions proviennent de sources naturelles (sols, océans, zone humides), tandis que 36% sont d'origine anthropique, principalement issus de la production alimentaire.⁴

Le « mauvais » ozone

Une partie de l'ozone présent dans la troposphère (du sol à environ 15 km d'altitude, fig. 1) provient de la stratosphère, mais la majeure partie est produite par des réactions photochimiques au niveau du sol, lorsque les polluants atmosphériques réagissent à la lumière du soleil. L'ozone est un irritant respiratoire, nocif pour les plantes et un gaz à effet de serre. Par sa réactivité, il purifie cependant l'atmosphère de certains autres polluants. Sa quantité dans la troposphère ne peut être réduite qu'indirectement, en ciblant les émissions de substances précurseurs.

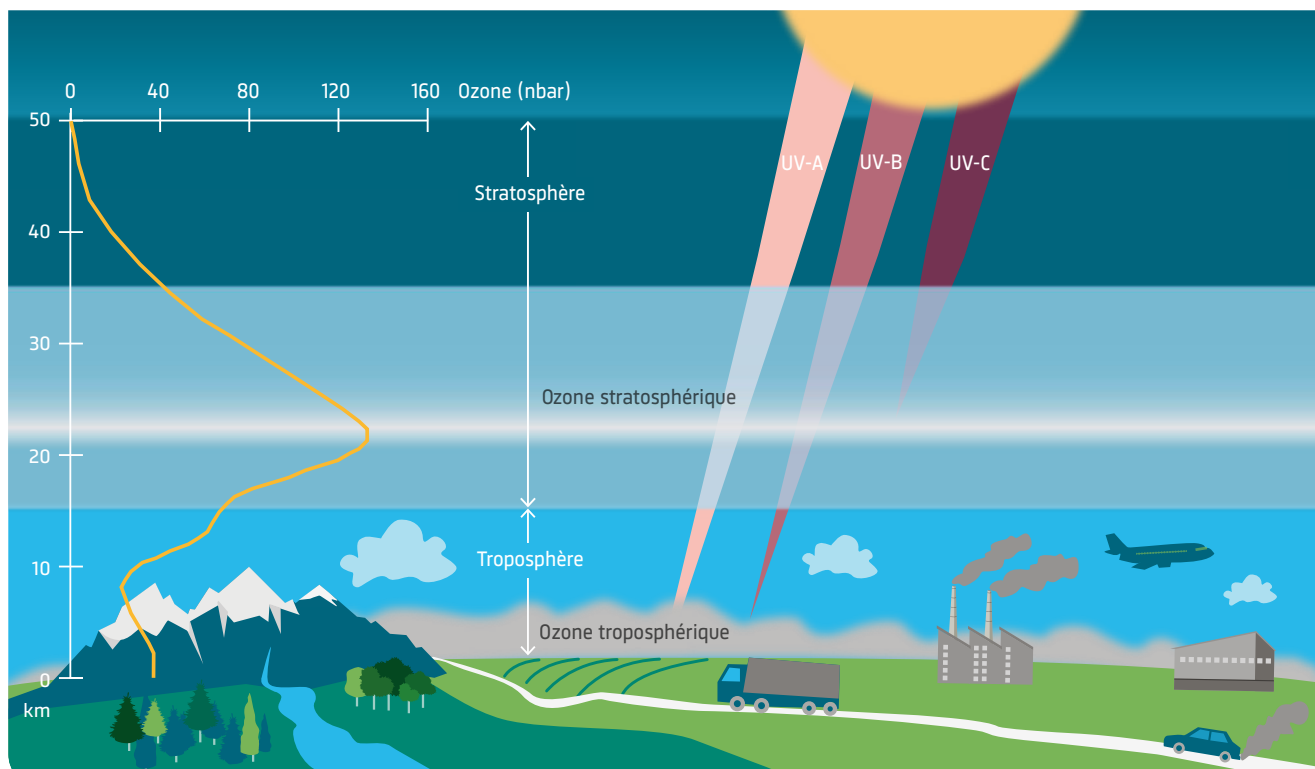


Figure 1: Le profil moyen de l'ozone mesuré par des ballons-sondes et un radiomètre micro-ondes à Payerne (VD) montre que la couche d'ozone stratosphérique se situe entre environ 15 km et 35 km, avec un maximum d'ozone à environ 22 km au-dessus du sol. Elle est formée par le rayonnement UV-C solaire hautement énergétique, elle absorbe ensuite la majeure partie du rayonnement UV-B, laissant le rayonnement UV-A atteindre la surface de la Terre. Près de la surface, l'ozone est formé par photochimie à partir de polluants atmosphériques. Sources: MétéoSuisse, adapté de: NASA

Impact de l'ozone

Qualité de l'air

Au niveau du sol, l'ozone se forme par réactions chimiques complexes d'oxydes d'azote (NO_x), de méthane et d'autres composés organiques volatils (COV) par temps ensoleillé. Les émissions anthropiques de ces précurseurs ont considérablement diminué en Suisse et dans les pays voisins, grâce à une réglementation stricte de la combustion, à la taxe incitative sur les COV, au remplacement des solvants et à un meilleur traitement des gaz d'échappement (fig. 2a).

Malheureusement, l'impact de ces mesures sur les concentrations d'ozone a été relativement faible, principalement à cause de l'émission naturelle des précurseurs, du transport à longue distance de l'ozone et de sa formation photochimique complexe et non linéaire. Ainsi, en milieu peu pollué (zones rurales), l'ozone diminue légèrement à mesure que les émissions de NO_x baissent, tandis que, dans des conditions plus polluées (trafic routier dense et zones urbaines), les réductions de NO_x entraînent en réalité une augmentation des concentrations d'ozone (fig. 2b).

Le nombre de dépassements de la norme suisse de qualité de l'air en zones rurales et urbaines a baissé au cours des 25 dernières années grâce à la réduction des émissions de précurseurs. Toutefois, ces progrès issus des politiques de qualité de l'air sont menacés par la hausse des températures (fig. 2b), qui favorise la formation d'ozone troposphérique.⁵ La probabilité de dépassement est aujourd'hui plus élevée au-delà de 25 °C dans les zones plus polluées (fig. 3). Le

besoin de mesures supplémentaires persiste et deviendra encore plus urgent face à la hausse des températures due au changement climatique.

Santé

Le rayonnement UV est un facteur de risque majeur de coups de soleil, de cancer de la peau et de cataractes. La Suisse affiche l'une des incidences (nombre de cas pour 100 000 habitants) de mélanomes les plus élevées: 11,1 contre 2,9 au niveau mondial pour les femmes, et 15,7 contre 3,7 pour les hommes.⁶ Une incidence accrue, en particulier chez les personnes travaillant en plein air et les jeunes, est corrélée à une exposition aux UV plus importante – typiquement dans les zones en altitude ou peu ombragées.⁷ Bien que la couche d'ozone se soit stabilisée au-dessus de la Suisse (fig. 5) et qu'elle semble se reconstituer progressivement,⁸ un recul rapide du nombre de cancers de la peau est peu probable du fait d'une longue période de latence. En effet, les taux d'incidence en Suisse continuent d'augmenter en raison d'une exposition accrue aux UV lors d'activités de loisirs, de styles vestimentaires laissant davantage la peau exposée, mais aussi d'un dépistage plus précoce lequel a, de façon encourageante, amélioré les traitements et fait baisser la mortalité.

L'ozone de surface pénètre dans l'organisme principalement par les poumons et affecte l'épithélium respiratoire, la muqueuse protectrice des voies respiratoires.⁹ Le stress oxydatif qu'il provoque déclenche une inflammation, endommage les cellules et accroît la perméabilité de cette barrière, rendant les poumons plus vulnérables aux agents pathogènes, allergènes et autres polluants atmosphériques.

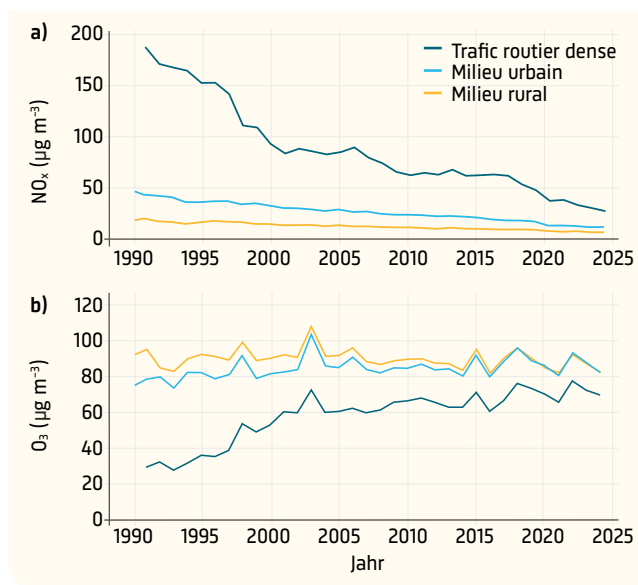


Figure 2: Concentrations estivales diurnes a) d'oxydes d'azote (NO_x) et b) d'ozone de surface (O₃) dans différentes conditions, telles que mesurées par le Réseau national d'observation des polluants atmosphériques (NABEL). Source adaptée de ⁵

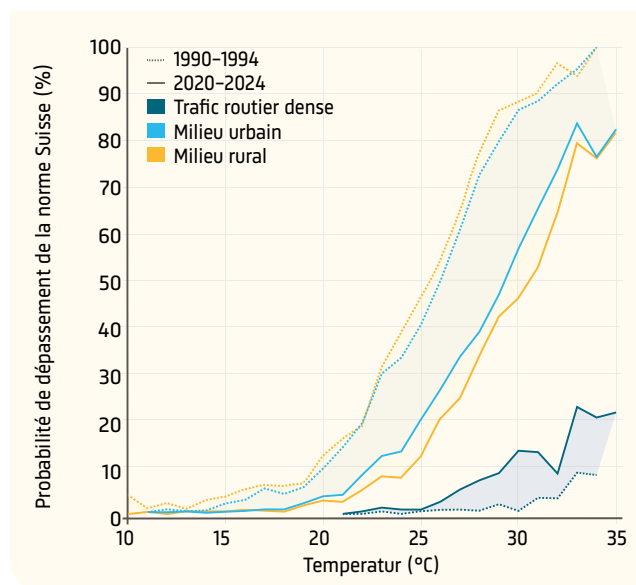


Figure 3: Évolution de la probabilité de dépasser la norme suisse de qualité de l'air pour la concentration horaire d'ozone de surface (120 µg/m³), pour les périodes 1990-1994 et 2020-2024, en fonction de la température. Source adaptée de ⁵

Une exposition temporaire à des niveaux élevés d'ozone peut réduire la fonction pulmonaire et provoquer des symptômes respiratoires tels que la toux et l'essoufflement, entraînant une hausse des consultations aux urgences et des hospitalisations.¹⁰ Les personnes les plus à risque sont les enfants, les personnes âgées, celles qui travaillent en plein air et celles souffrant de pathologies préexistantes telles que l'asthme ou la bronchopneumopathie chronique obstructive (BPCO). Des données épidémiologiques suggèrent une hausse de la mortalité toutes causes confondues et de la mortalité liée aux maladies respiratoires.¹¹

Une exposition prolongée à l'ozone est associée à un déclin de la fonction pulmonaire, à une exacerbation des réactions allergiques et à une aggravation de l'asthme ou de la BPCO. Il reste toutefois difficile d'attribuer clairement ces effets à l'ozone du fait de la coexistence d'autres polluants atmosphériques et du stress thermique.

Végétation et production alimentaire

Les plantes souffrent de l'augmentation du rayonnement UV due à l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique ; réduire les émissions anthropiques nocives pour l'ozone leur serait donc bénéfique, par exemple via une utilisation plus ciblée des engrais.

L'ozone de surface nuit aux plantes en pénétrant par la surface des feuilles. Ces dommages affectent fortement les rendements agricoles, entraînant des pertes annuelles mondiales de plusieurs pour cent (fig. 4).^{12, 13, 14} En Europe, elles ont atteint 6,7 mégatonnes en 2022, soit environ 1,3 milliards d'euros pour le blé, et 3,2 mégatonnes, soit environ 680 millions d'euros, pour les pommes de terre.¹⁵

Enfin, les écosystèmes naturels souffrent aussi de fortes concentrations d'ozone de surface. La décoloration estivale des feuilles des arbres et arbustes est le signe d'un stress et d'une photosynthèse altérée. Ces atteintes au feuillage des

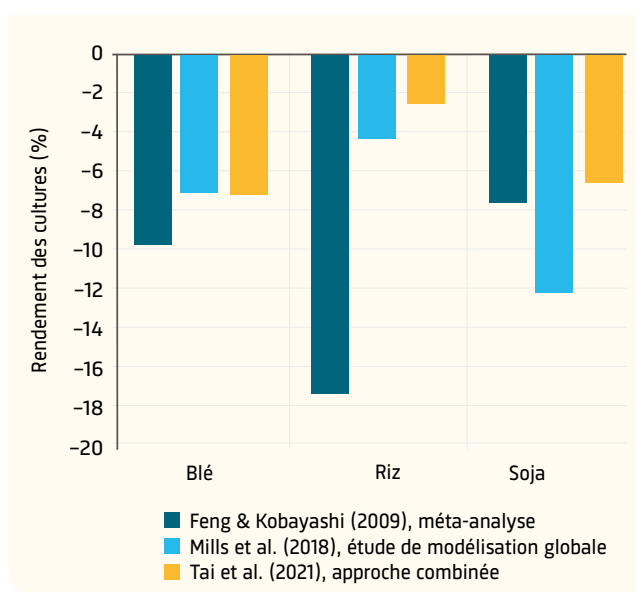


Figure 4: Impact estimé de l'exposition à l'ozone de surface sur les rendements mondiaux de certaines cultures. Figure combinée à partir de ^{12, 13, 14}

espèces forestières sont systématiquement évaluées dans des sites en Suisse et à travers l'Europe.^{16, 17} Comme pour les effets sur la santé, l'attribution directe à l'ozone n'est pas évidente, car d'autres facteurs tels que la température, les précipitations et l'humidité du sol jouent également un rôle important.

Ozone et changement climatique

Ozone stratosphérique

La reconstitution de l'ozone stratosphérique résulte de l'équilibre entre la production photochimique, les réactions de destruction et le transport, ce dernier étant le facteur principal de la variabilité interannuelle. Depuis l'adoption du Protocole de Montréal (encadré 2), les concentrations

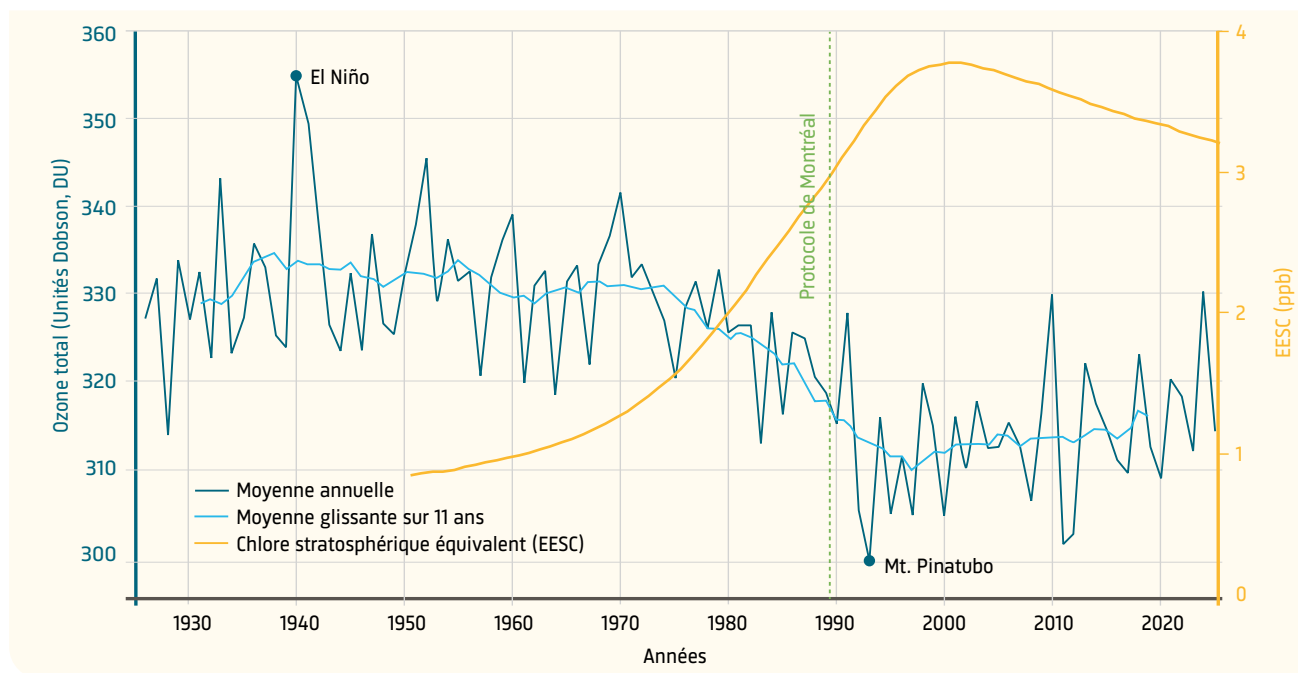


Figure 5: La plus longue série temporelle au monde de mesures au sol de la colonne totale d'ozone (TCO, encadré 1), à Arosa/Davos, a débuté en 1926. Les concentrations élevées d'ozone du début ont été suivies d'un déclin rapide dû aux substances chlorées appauvrissant la couche d'ozone. Ces substances ont été principalement émises entre le milieu des années 1970 et le milieu des années 1990, conduisant à un maximum du chlore stratosphérique équivalent (EESC) vers 2000.^{29, 30, 31} Les niveaux d'ozone se sont ensuite stabilisés grâce aux effets du Protocole de Montréal et de ses amendements postérieurs à 1989. Outre la surveillance à long terme et l'analyse des tendances, une telle série temporelle permet de saisir des anomalies météorologiques rares, comme l'épisode El Niño extrêmement intense de 1940/1941 ou l'effet de l'éruption volcanique du mont Pinatubo en 1993. Figure adaptée de MétéoSuisse

d'halogènes appauvrissant la couche d'ozone ont diminué dans la stratosphère. Parallèlement, la hausse des concentrations de gaz à effet de serre modifie la chimie de l'ozone et la dynamique atmosphérique, avec des effets différents selon l'altitude et les régions géographiques.¹⁸

Au-dessus de l'Antarctique, un trou dans la couche d'ozone se forme chaque printemps austral. Son ampleur varie d'une année à l'autre en fonction des températures et des vents polaires,^{19, 8, 20} influençant ainsi la répartition de l'ozone sur une grande partie de l'hémisphère sud.²¹

La stratosphère au-dessus de l'Arctique est généralement plus chaude et les vents y sont moins stables du fait des masses continentales environnantes. Par conséquent, l'appauvrissement de la couche d'ozone y est généralement moins prononcé. Des conditions exceptionnellement froides et persistantes peuvent toutefois entraîner des épisodes comparables à un trou dans la couche d'ozone, comme en 2011 et 2020.²²

Depuis les années 2000, entre environ 60°S et 60°N, on observe une lente reconstitution de la couche d'ozone dans la haute stratosphère.²³ Dans la basse stratosphère, en revanche, hors régions polaires, les concentrations d'ozone tendent à diminuer depuis 1998.^{24, 25} Aux latitudes moyennes, aucune tendance significative n'a été observée après 1995 pour la colonne totale d'ozone (fig. 5).

Ozone de surface

L'évolution de l'ozone de surface varie selon les régions du globe.²⁶ Les scénarios climatiques pour la Suisse prévoient davantage de journées chaudes ou caniculaires.²⁷ Un temps ensoleillé et souvent plus sec dans un climat plus chaud²⁸ favorise la formation d'ozone, et les conditions de stagnation

empêchent les mélanges d'air frais. Cela menace la santé humaine et stresse la faune et la flore. Les effets positifs de la réduction des émissions de précurseurs seront ainsi en partie annulés par des vagues de chaleur plus fréquentes, plus intenses et plus longues (fig. 3) qui maintiennent des niveaux d'ozone élevés pendant les saisons chaudes.

Encadré 1: Comment mesure-t-on l'ozone stratosphérique?

L'ozone absorbe la lumière solaire à des longueurs d'onde spécifiques. Divers instruments au sol et à bord de satellites isolent des bandes étroites du spectre solaire. La colonne totale d'ozone (TCO, quantité d'ozone du sol à la stratosphère) et la distribution verticale de l'ozone dans l'atmosphère sont obtenues en mesurant soit l'intensité de certaines bandes spectrales, soit le rayonnement diffusé par les molécules d'ozone. D'autres techniques existent, comme les lidars utilisant la lumière d'un laser, et les ballons-sondes qui mesurent l'ozone par réaction électrochimique.

L'instrument Dobson (fig. 7) est depuis plusieurs décennies la colonne vertébrale d'un réseau mondial de stations de mesure. Les instruments satellitaires permettent d'observer la distribution globale de l'ozone.³² Ces instruments sont régulièrement vérifiés afin de garantir la qualité des mesures. L'ensemble des données est stocké dans des centres internationaux et constitue la base des évaluations scientifiques des tendances à long terme, des effets de la réduction des substances appauvrissant la couche d'ozone et du changement climatique.

Encadré 2 : Le Protocole de Montréal et la protection de la couche d'ozone

Le Protocole de Montréal relatif aux substances qui appauvrissent la couche d'ozone, ratifié par l'ensemble des États en 1987, est un traité mondial entré en vigueur en 1989. Il a été adopté en réponse aux preuves apparues dans les années 1970, que des produits chimiques d'origine humaine détruisaient l'ozone stratosphérique³³ et suite à la première observation, en 1985, d'un trou dans la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique.³⁴ Ces produits chimiques, tels que les CFC et les composés halogénés apparentés, étaient couramment utilisés dans les réfrigérateurs, les climatiseurs, les bombes aérosols,

ou les mousses d'extinction d'incendie. Le Protocole de Montréal régit la production, la consommation et le commerce de ces substances. Son impact a été considérable : leur production et leur consommation ont chuté de plus de 98 %. Les concentrations de ces composés dans l'atmosphère sont en baisse et, si le Protocole est respecté, la couche d'ozone devrait se reconstituer d'ici le milieu du siècle. Effet secondaire bénéfique important : en réduisant les CFC, puissants gaz à effet de serre, le Protocole de Montréal a fortement contribué à l'atténuation du changement climatique.

Encadré 3 : Historique des observations de l'ozone en Suisse

La plus longue série temporelle continue au monde de la colonne totale d'ozone (fig. 5) a débuté en 1926 au Lichtklimatisches Observatorium (LKO) d'Arosa, en Suisse, sous la direction du physicien F. W. Paul Götz. Il désirait comprendre le rayonnement ultraviolet solaire et ses effets sur la santé et le climat. Götz a développé une étroite collaboration avec Gordon Dobson de l'Université d'Oxford. Arosa a ainsi été l'une des premières stations à utiliser les instruments précurseurs du spectrophotomètre Dobson (fig. 6). Les instruments Dobson sont devenus le pilier de la surveillance systématique de l'ozone à l'échelle mondiale, au service de la recherche atmosphérique internationale et des décisions politiques jusqu'à aujourd'hui.^{35, 36} Au fil du temps, d'autres instruments Dobson ont été installés au LKO afin d'assurer la continuité et la cohérence des données grâce à des mesures parallèles. Initialement géré conjointement par l'ETH Zurich et MétéoSuisse, le programme a été repris par MétéoSuisse en 1988, année où des spectrophotomètres Brewer automatisés – un autre type d'instrument – ont été ajoutés afin d'améliorer encore la qualité et la disponibilité des données. Depuis

2010, les instruments Dobson ont été progressivement automatisés (fig. 7) en conservant leur principe de mesure et leur domaine spectral afin de garantir une série temporelle homogène des premières observations en 1926 jusqu'à aujourd'hui.

Entre 2011 et 2019, la volonté de garantir la continuité des observations pour l'avenir a conduit au transfert des instruments d'Arosa vers le Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos/World Radiation Center (PMOD/WRC). Ce déménagement s'est accompagné d'efforts rigoureux d'assurance qualité permettant de comprendre et de compenser les éventuelles différences dans les conditions locales, qui pourraient n'être détectables qu'au bout de plusieurs décennies. Aujourd'hui, la série de mesures repose sur trois instruments Dobson et trois instruments Brewer automatisés (cf. photo de couverture) dans le cadre d'une collaboration entre MétéoSuisse et le PMOD/WRC. Elle constitue un ensemble de données unique et de haute qualité étayant les évaluations internationales de la reconstitution de la couche d'ozone.



Figure 6 : Le Dr Daniel Chalonge, collègue de F.W. Paul Götz, sur la terrasse de la maison « Firnelicht » à Arosa au début des années 1930, entre les spectrographes Fabry-Buisson (précurseur du spectrophotomètre Dobson), Chalonge et Féry. Photo : auteur inconnu. Source : Archives photographiques de MétéoSuisse

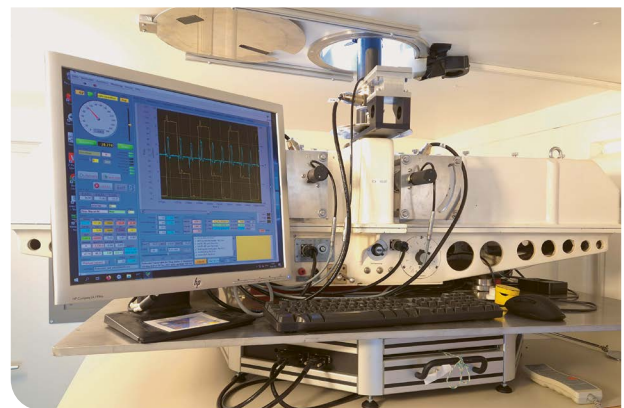


Figure 7 : Instrument Dobson automatisé à Davos aujourd'hui. Photo : Franz Zeillinger

La surveillance de l'ozone, un appui scientifique au service de la politique

Les observations de haute qualité et à long terme se sont avérées cruciales lors de la découverte, en 1985, d'un appauvrissement spectaculaire de la couche d'ozone au-dessus de l'Antarctique (fig. 5). Grâce à la mise en œuvre du Protocole de Montréal (encadré 2), cet appauvrissement a été enrayé et la concentration d'ozone stratosphérique s'est stabilisée. Sa reconstitution à long terme demeure toutefois fragile sous l'effet du changement climatique et fait toujours l'objet de recherches actives. Pour les mesures d'Arosa/Davos, la ten-

dance de la colonne totale d'ozone depuis 1995 n'est pas significative (fig. 5). Vu l'importance capitale de l'ozone stratosphérique pour la vie sur Terre, la poursuite de la surveillance mondiale reste essentielle pour orienter les stratégies politiques, particulièrement face au changement climatique.

Pays hôte de la plus longue série temporelle de mesures de l'ozone stratosphérique à Arosa/Davos (encadré 3), la Suisse occupe un rôle clé dans la surveillance mondiale de la couche d'ozone et porte une responsabilité particulière pour garantir la poursuite de ces observations de haute qualité à l'avenir.

Conclusions et recommandations

La couche d'ozone stratosphérique protège la vie sur Terre des rayons UV nocifs. Elle est globalement en voie de régénération depuis la mise en œuvre du Protocole de Montréal. Cependant, le protoxyde d'azote (N_2O , à ne pas confondre avec le précurseur de l'ozone troposphérique NO_x) – aujourd'hui principale substance appauvrissant la couche d'ozone et puissant gaz à effet de serre d'origine naturelle et anthropique – continue d'augmenter. Une utilisation plus ciblée des engrais contribuerait à réduire les émissions anthropiques. De plus, le changement climatique en cours modifie la dynamique atmosphérique, et la reconstitution s'annonce plus faible dans les régions tropicales et plus forte dans les régions extratropicales. La surveillance à long terme de l'ozone stratosphérique par des mesures de haute

qualité du profil vertical de l'ozone et de la colonne totale d'ozone – telle qu'initiée à Arosa en 1926 – constitue la base des futures évaluations régulières. L'activité humaine ayant déjà menacé la couche d'ozone par le passé, il est essentiel d'identifier les évolutions indésirables à un stade précoce.

L'ozone troposphérique près de la surface est nocif pour les humains, les animaux et les plantes. Les efforts continus de réduction des émissions de polluants (précurseurs de l'ozone et gaz à effet de serre) agissent à la fois sur les hausses de température et sur la production d'ozone troposphérique. L'effort doit être mondial mais mis en œuvre localement, car l'ozone est transporté sur de longues distances et les mesures d'atténuation locales ont à elles seules un effet limité.

ODD : les objectifs internationaux de développement durable des Nations unies

Avec cette publication l'Académie suisse des sciences naturelles contribue aux ODD 3, 13 et 15 :

« Bonne santé et bien-être », « Action pour le climat » et « Vie terrestre ».

> sdgs.un.org

> agenda-2030.eda.admin.ch



1-36 Les références bibliographiques se trouvent sur la version en ligne de la fiche d'information sur scnat.ch/ozone

MENTIONS LÉGALES

ÉDITRICE ET CONTACT

Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT)
Commission suisse pour la chimie et la physique de l'atmosphère (ACP)
Maison des Académies · Laupenstrasse 7 · Case postale · 3001 Berne · Suisse
joerg.klausen@meteoswiss.ch · acp.scnat.ch · SCNAT

PROPOSITION DE CITATION

Klausen J et al. (2026) L'ozone – Une molécule simple aux effets durables sur le climat, la qualité de l'air et la santé.
Swiss Academies Factsheets 21 (2)

DOI: doi.org/10.5281/zenodo.21061203

AUTEURS ET AUTEURES

Marloes Eeftens (Swiss TPH) · Luca Egli (PMOD/WRC) · Anina Gilgen (Agroscope) · Jörg Klausen (MétéoSuisse, responsable) · Eliane Maillard Barras (MétéoSuisse) · Clara Nussbaumer (ETH Zurich) · Rolf Rüfenacht (MétéoSuisse) · Patrick Schleppi (WSL) · Martin Steinbacher (Empa)

REVIEW

Hugo Amacker (OFEV) · Christoph Hüglin (Empa) · Ulrich Krieger (ETH Zurich) · André Prévôt (Paul Scherrer Institute) · Matthew B. Tully (Bureau of Meteorology, Melbourne, Australia)

RÉDACTION

Andres Jordi (SCNAT) · Caroline Reymond (SCNAT)

TRADUCTION

Eliane Maillard Barras · Caroline Reymond

MISE EN PAGE ET GRAPHIQUES

Olivia Zwygart (SCNAT)

PHOTO DE COUVERTURE

Fabrizio Vignali (PMOD/WRC)

ISSN (print): 2297-1602
ISSN (online): 2297-1610



creativecommons.org/licenses/by/4.0

Cette publication est publiée sous licence CC BY 4.0.

Ozon – ein simples Molekül mit nachhaltiger Wirkung auf Klima, Luftqualität und Gesundheit

Trotz politischer Bemühungen erholt sich die Ozonschicht in der Stratosphäre nur langsam, und die Ozon-Konzentrationen am Boden überschreiten regelmässig die Grenzwerte. Um die negativen Auswirkungen auf Gesundheit, Vegetation und Klima zu verringern, braucht es weitere Massnahmen und ein kontinuierliches globales Monitoring. Die Schweiz trägt dazu mit der weltweit längsten Messreihe von Gesamttozon bei. Sie begann vor 100 Jahren am 23. Juli 1926 in Arosa und wird heute in Davos fortgesetzt.

Natürlicher Sonnenschutz und Reizstoff für die Atemwege

Ozon besteht aus drei Sauerstoffatomen. Es wurde 1839 vom deutschen Chemiker Christian Friedrich Schönbein am Chemischen Labor der Universität Basel entdeckt. Später schrieb er an Justus von Liebig – einen weiteren Pionier jener Zeit –, dass er «geneigt ist zu glauben, dass atmosphärisches Ozon eine wichtige Rolle im System Erde spielt».¹

Das nützliche Ozon

In der Stratosphäre (Schicht in etwa 15 bis 50 km Höhe, Abb. 1) bildet sich durch photochemische Reaktionen Ozon. Die so entstehende Ozonschicht hält gefährliche kurzwellige ultraviolette Sonnenstrahlung (UV-C) von der Erde fern und absorbiert einen grossen Teil der UV-B-Strahlung. Ohne diesen natürlichen Sonnenschutz hätte sich das Leben, wie wir es kennen, auf unserem Planeten nicht entwickeln können.

Über der Antarktis wird dieser Schutzschild nach dem polaren Sonnenaufgang jedes Jahr im September zerstört. Das «Ozonloch» entsteht aufgrund einer Kombination aus tiefen Temperaturen, polaren stratosphärischen Wolken und anthropoge-

nen Chemikalien wie Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW), die grösstenteils zwischen 1950 und 1990 emittiert wurden. Auch aus der Arktis kann ozonarme Luft in mittlere Breiten und bis nach Europa gelangen und zu unerwarteten Sonnenbränden führen.^{2,3}

Die heute vorherrschende ozonabbauende Substanz ist Distickstoffmonoxid (N_2O). Davon stammen 64 % aus natürlichen Quellen (z. B. aus Böden, Ozeanen, Feuchtgebieten), während 36 % anthropogenen Ursprungs sind, hauptsächlich aus dem Einsatz von Düngern.⁴

Das schädliche Ozon

Ein Teil des Ozons in der Troposphäre (vom Boden bis etwa 15 km Höhe, Abb. 1) stammt aus der Stratosphäre, der grösste Teil entsteht aber photochemisch in Bodennähe, wenn Luftschadstoffe mit Sonnenlicht reagieren. Ozon reizt die Atemwege, schädigt Pflanzen und ist ein Treibhausgas. Aufgrund seiner Reaktivität reinigt es jedoch auch die Atmosphäre von anderen Schadstoffen. Bodennahes Ozon kann nur indirekt reduziert werden, indem man die Emissionen der Vorläufersubstanzen reduziert.

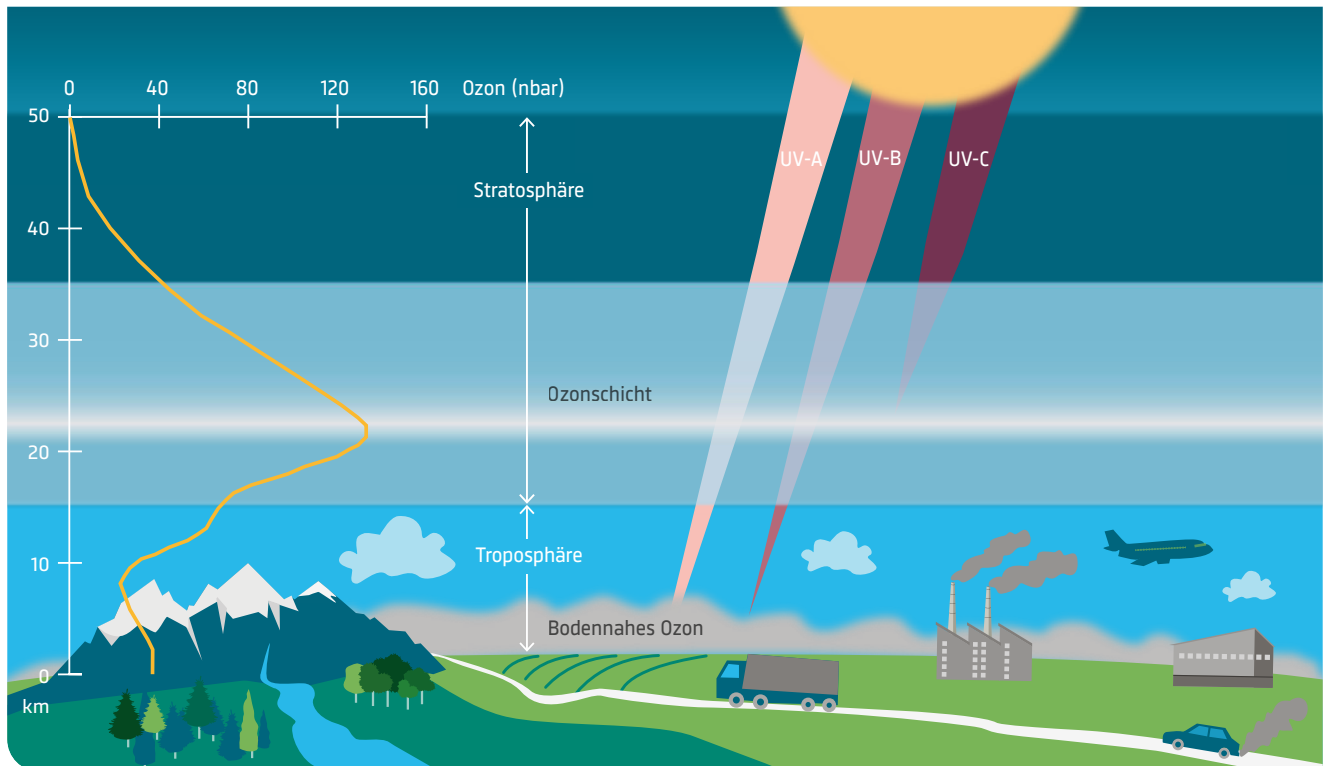


Abbildung 1: Das von Ballonsonden und Mikrowellenradiometern in Payerne (VD) gemessene Profil zeigt die Ozonschicht in einer Höhe von etwa 15 bis 35 km, mit einem Maximum in etwa 22 km Höhe. Ozon entsteht durch hochenergetische UV-C-Strahlung der Sonne. Die Ozonschicht absorbiert den Grossteil der UV-B-Strahlung, sodass hauptsächlich die UV-A-Strahlung die Erdoberfläche erreicht. Am Boden entsteht Ozon photochemisch aus Luftschadstoffen. Quellen: MeteoSchweiz, adaptiert nach: NASA

Wirkungen von Ozon

Luftqualität

Am Boden entsteht Ozon, wenn Stickoxide (NO_x), Methan und andere flüchtige organische Verbindungen (VOC) bei sonnigem Wetter miteinander reagieren. Der anthropogene Ausstoss solcher Ozonvorläufer ist in der Schweiz und den Nachbarländern dank strenger Vorschriften für Verbrennungsprozesse, der Lenkungsabgabe auf VOC, dem Ersatz von Lösungsmitteln und der verbesserten Nachbehandlung von Abgasen deutlich zurückgegangen (Abb. 2a).

Diese Massnahmen beeinflussen die Ozonkonzentrationen jedoch relativ wenig. Dies ist hauptsächlich auf den natürlichen Ausstoss von Ozonvorläufern, den Ferntransport von Ozon und die komplexe photochemische Bildung zurückzuführen. So nimmt der Ozongehalt in Regionen mit guter Luftqualität (ländliche Gebiete) mit sinkenden NO_x -Emissionen leicht ab, während er in verkehrsreichen und urbanen Gebieten mit hoher Luftverschmutzung ansteigt (Abb. 2b).

Die Überschreitungen des Schweizer Luftqualitätsstandards in ländlichen und urbanen Gebieten sind in den letzten 25 Jahren dank geringerem Ausstoss von Vorläufersubstanzen zurückgegangen. Diese Erfolge werden aber durch steigende Temperaturen, die zu höheren bodennahen Ozonbelastungen führen, unterlaufen.⁵ An verkehrsreichen Standorten ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Grenzwert überschritten wird, heutzutage ab bestimmten Temperaturen sogar höher (Abb. 3). Der Bedarf an zusätzlichen Massnahmen zur Ozonreduktion bleibt deshalb bestehen und wird angesichts des Klimawandels noch dringlicher werden.

Gesundheit

UV-Strahlung ist ein wesentlicher Risikofaktor für Sonnenbrand, Hautkrebs und Grauen Star. Die Schweiz weist eine der höchsten Inzidenzen (Fälle pro 100 000) an Melanom-Hautkrebs auf: 11,1 gegenüber 2,9 weltweit bei Frauen und 15,7 gegenüber 3,7 weltweit bei Männern.⁶ Eine höhere Inzidenz, insbesondere bei im Freien arbeitenden Personen und in jüngeren Bevölkerungsgruppen, korreliert mit einer höheren UV-Exposition, wie sie typisch ist für höhere Lagen und sonnenexponierte Gebiete.⁷ Obwohl sich die Ozonschicht über der Schweiz stabilisiert hat (Abb. 5) und sich tendenziell allmählich erholt,⁸ ist ein rascher Rückgang der Hautkrebsinzidenz aufgrund langer Latenzzeiten unwahrscheinlich. Tatsächlich steigt die Inzidenz in der Schweiz, weil sich mehr Personen in der Freizeit im Freien aufhalten und weniger sonnenabweisende Kleider tragen, aber auch dank besserer und früherer Erkennung. Diese wiederum hat dazu beigetragen, die Behandlung zu verbessern und die Sterblichkeit zu senken.

Das Ozon am Boden belastet die Atemwege und beeinträchtigt ihre Schutzschicht (Epithel).⁹ Oxidativer Stress löst Entzündungen aus, schädigt die Zellen und macht die Atemwegsbarriere durchlässiger. Dadurch werden die Lungen anfälliger für Krankheitserreger, Allergene und Luftschadstoffe.

Kurzzeitig erhöhte Ozonkonzentrationen können die Lungenfunktion vermindern, Atemwegsbeschwerden wie Husten und Atemnot verursachen und führen zu mehr Notaufnahmen und Krankenhausaufenthalten.¹⁰ Am stärksten gefährdet sind Kinder, ältere und im Freien arbeitende Personen

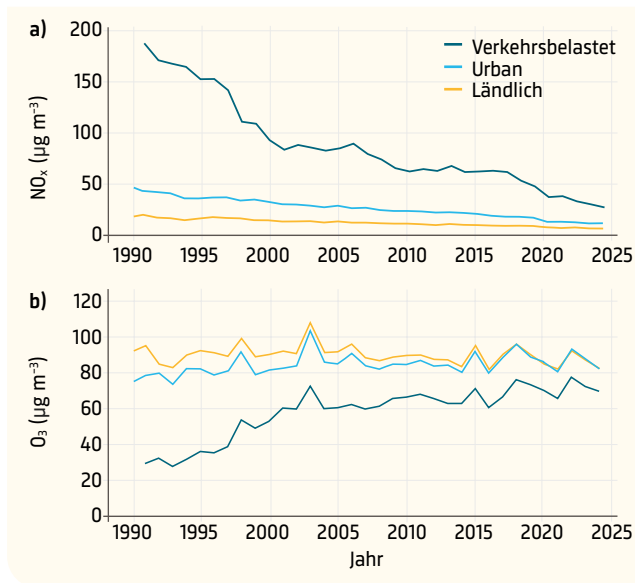


Abbildung 2: Tageskonzentrationen im Sommer von a) Stickoxiden (NO_x) und b) bodennahem Ozon (O₃) unter verschiedenen Bedingungen, gemessen vom Nationalen Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe (NABEL). Adaptiert nach ⁵

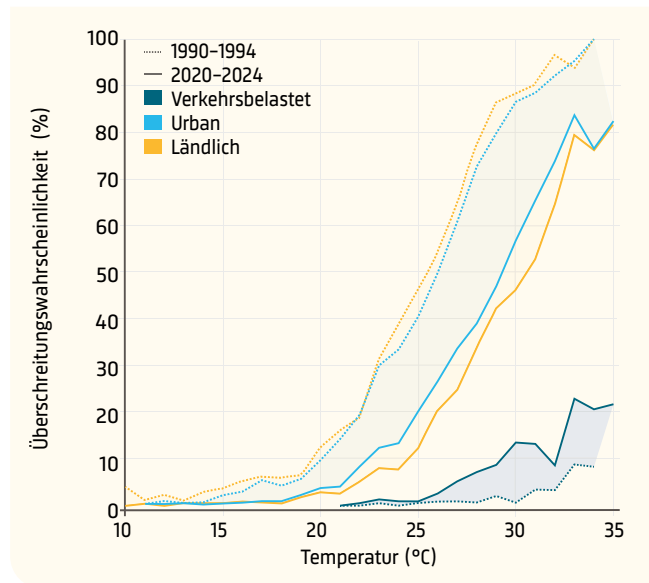


Abbildung 3: Wahrscheinlichkeit, den Schweizer Luftqualitätsstandard für bodennahes Ozon von 120 µg/m³ zu überschreiten, abhängig von der Temperatur vor (1990–1994) und nach (2020–2024) der Einführung entsprechender Vorschriften. Adaptiert nach ⁵

sowie Menschen mit Vorerkrankungen wie Asthma oder einer chronisch obstruktiven Lungenerkrankung (COPD).

Eine langfristige Ozonbelastung kann die Lungenalterung beschleunigen, die Lungenfunktion vermindern, allergische Reaktionen auslösen und Asthma oder COPD verschlimmern. Epidemiologische Belege deuten auf eine erhöhte Gesamtmortalität und eine erhöhte Mortalität aufgrund von Atemwegserkrankungen hin.¹¹ Gesundheitliche Auswirkungen eindeutig der Ozonbelastung zuzuordnen ist jedoch schwierig, da diese zusammen mit anderen Luftschadstoffen und Hitzestress auftritt.

Vegetation und Nahrungsmittelproduktion

Pflanzen leiden unter der erhöhten UV-Strahlung, die aufgrund der ausgedünnten Ozonschicht in der Stratosphäre auf die Erde gelangt. Würden weniger anthropogene ozonschädigende Substanzen ausgestossen (z. B. durch einen gezielteren Einsatz von Dünger), würde dies die Ozonschicht stabilisieren.

Bodennahes Ozon dringt über die Blattoberfläche in Pflanzen ein und schädigt diese. Ozonschäden verringern die Jahreserträge weltweit um mehrere Prozent (Abb. 4).^{12, 13, 14} Im Jahr 2022 beliefen sich diese Verluste in Europa auf 6,7 Megatonnen im Wert von 1300 Mio. Euro bei Weizen und 3,2 Megatonnen im Wert von 680 Mio. Euro bei Kartoffeln.¹⁵

Auch die natürlichen Ökosysteme leiden unter erhöhten Ozonkonzentrationen am Boden. Verfärbungen der Blätter an Bäumen und Sträuchern im Sommer zeigen Stress und eine beeinträchtigte Photosynthese an. Schäden am Laub von Waldbäumen werden in der Schweiz und in Europa systematisch erfasst.^{16, 17} Wie beim Menschen ist auch bei Pflanzen nicht einfach zuzuordnen, ob Schäden durch Ozon verursacht werden oder durch andere Faktoren wie Temperatur, Niederschlag oder Bodenfeuchte.

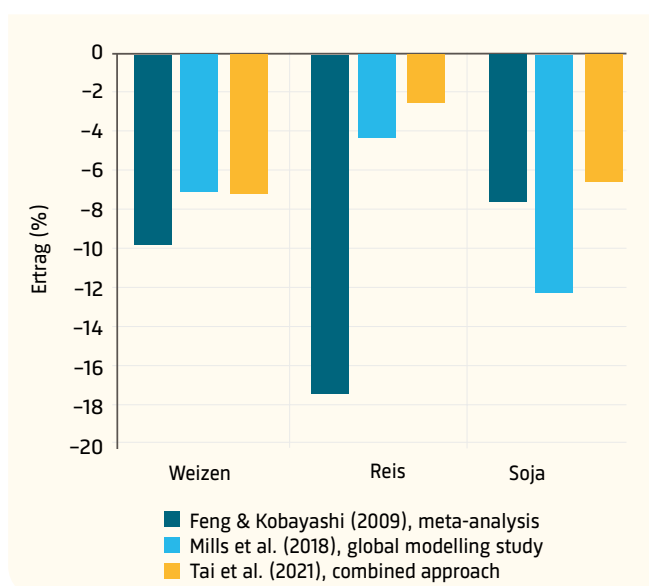


Abbildung 4: Geschätzte Ertragsverluste durch bodennahes Ozon weltweit bei ausgewählten Kulturpflanzen. Adaptiert nach ^{12, 13, 14}

Ozon und Klimawandel

Stratosphärisches Ozon

Die Regeneration der Ozonschicht wird durch das Gleichgewicht zwischen photochemischer Bildung, Abbaureaktionen und Transport bestimmt. Die jährlichen Schwankungen werden hauptsächlich durch den Transport verursacht. Seit der Ratifizierung des Montrealer Protokolls (Box 2) sind die ozonabbauenden Substanzen in der Stratosphäre zurückgegangen. Gleichzeitig verändern steigende Treibhausgaskonzentrationen die Ozonchemie und die atmosphärische Dynamik, was sich je nach Atmosphärenschicht und geografischer Region unterschiedlich auswirkt.¹⁸

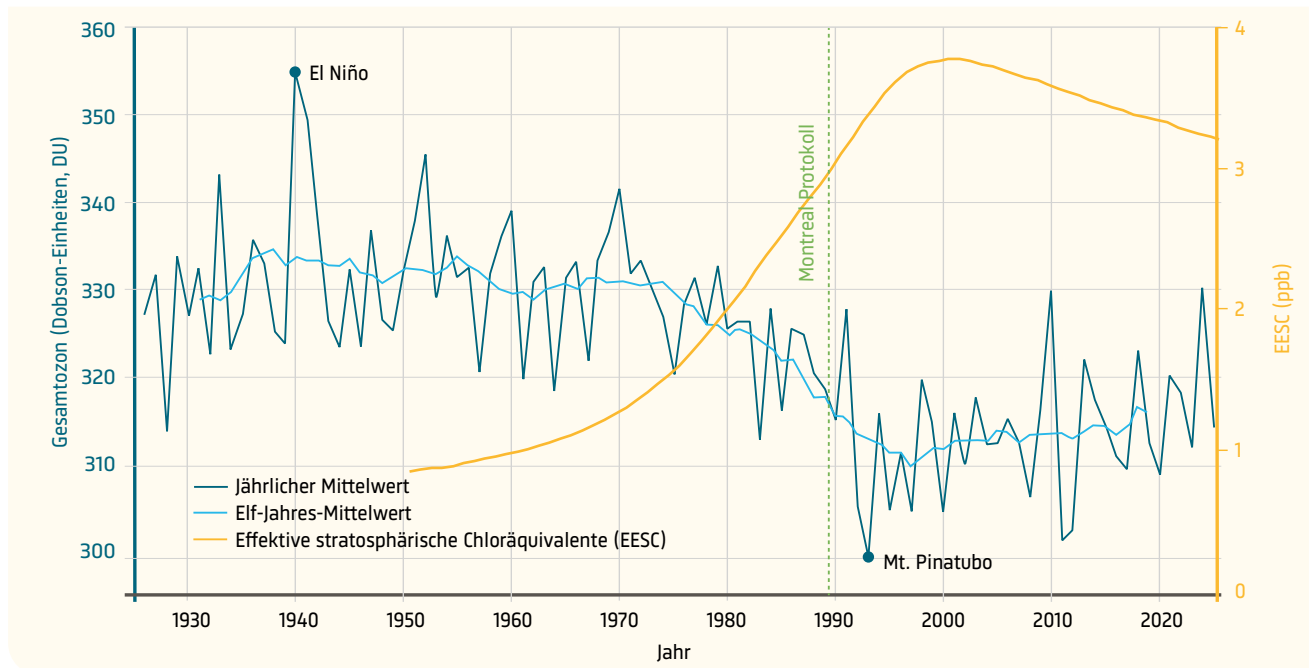


Abbildung 5: Die Gesamt Ozonmessungen von Arosa/Davos begannen 1926. Sie stellen die weltweit längste bodengestützte Zeitreihe dar. Die Ozonkonzentration ging mit steigendem Einsatz chlorhaltiger ozonabbauender Substanzen (ODS) rasch zurück. ODS wurden hauptsächlich zwischen Mitte der 1970er und Mitte der 1990er Jahre ausgestossen, was in der Stratosphäre zu einer maximalen Konzentration von effektiven Chloräquivalenten (EESC) um das Jahr 2000.^{29, 30, 31} führte. Dank dem Montrealer Protokoll stabilisierten sich die Ozonwerte nach 1989. Neben der langfristigen Überwachung erfasst eine derart lange Zeitreihe auch seltene Wetteranomalien wie das extrem starke El-Niño-Ereignis 1940/1941 oder die Auswirkungen des Vulkanausbruchs des Mount Pinatubo im Jahr 1993. Adaptiert nach MeteoSchweiz

Über der Antarktis bildet sich nach wie vor jedes südliche Frühjahr ein Ozonloch. Dessen Grösse variiert von Jahr zu Jahr abhängig von den Temperaturen und Winden in den Polregionen.^{19, 8, 20} Dies beeinflusst die Ozonverteilung in der südlichen Hemisphäre.²¹

Die Stratosphäre über der Arktis ist in der Regel wärmer als über der Antarktis und weist aufgrund der umgebenden Landmassen weniger stabile Winde auf. Folglich ist der Ozonabbau dort grundsätzlich schwächer. Dennoch kann aussergewöhnlich kaltes Wetter, das über längere Zeit anhält, einen ozonlochlähnlichen Zustand hervorrufen (z. B. 2011 und 2020).²²

Seit etwa 2000 erholt sich die Ozonschicht in der oberen Stratosphäre zwischen rund 60° S und 60° N langsam und nimmt um 1 bis 3 % pro Jahrzehnt zu.²³ In der unteren Stratosphäre ausserhalb der Polregionen nimmt die Ozonkonzentration seit etwa 1998 tendenziell ab.^{24, 25} In den mittleren Breiten ist seit 1995 kein signifikanter Trend zu erkennen (Abb. 5).

Bodennahe Ozon

Die Entwicklung des Ozons am Boden variiert je nach Standort.²⁶ Die Klimaszenarien sagen für die Schweiz mehr warme oder heisse Tage und eine abgeschwächte Luftzirkulation (Stagnation) voraus.²⁷ Sonntages, oft trockeneres Wetter in einem wärmeren Klima²⁸ begünstigt die Ozonbildung, stagnierende Bedingungen verhindern das Einmischen frischer Luft. Dies stellt ein Gesundheitsrisiko für den Menschen dar und belastet Flora und Fauna. Die positiven Effekte, welche die Reduktion von Vorläufersubstanzen gebracht hat, werden durch häufiger erwartbare, intensivere und längere Hitzewellen teilweise zunichte gemacht (Abb. 3). Die Ozonwerte bleiben somit während der wärmeren Jahreszeiten erhöht.

Box 1: Wie wird stratosphärisches Ozon gemessen?

Die Konzentration von Ozon in der Stratosphäre kann gemessen werden, weil es bestimmte Anteile des Sonnenlichts (Spektralbänder) absorbiert. Messgeräte am Boden oder auf Satelliten erfassen das eintreffende Licht und analysieren, welche Wellenlängen wie stark absorbiert oder gestreut werden. Anhand dieser charakteristischen Muster lässt sich berechnen, wie viel Ozon sich insgesamt in der Atmosphäre befindet und wie es sich in verschiedenen Höhen verteilt. Die Technik heisst Spektralphotometrie oder Radiometrie. Daneben gibt es weitere Methoden: Mit sogenannten Lidars wird Laserlicht in die Atmosphäre geschickt und das zurückgestreute Licht ausgewertet. Ballonsonden messen mittels elektrochemischer Reaktion, wie viel Ozon in der Atmosphäre vorhanden ist. Messreihen wie jene von Arosa/Davos geben meist die mittlere Dichte von Gesamt Ozon vom Boden bis zur Stratosphäre an.

Spektralphotometer wie das Dobson-Instrument (Abb. 7) bilden seit vielen Jahrzehnten das Rückgrat eines globalen Netzwerks von Messstationen.³² Satelliten liefern Daten zur globalen Ozonverteilung. Diese Instrumente werden regelmässig überprüft, um die Qualität der Messungen sicherzustellen. Die Daten werden in internationalen Datenzentren gespeichert. So kann wissenschaftlich bewertet werden, wie sich die Ozonkonzentrationen langfristig entwickeln, ob Massnahmen zur Reduktion ozonabbauender Stoffe greifen oder wie sich der Klimawandel auswirkt.

Box 2: Das Montrealer Protokoll zum Schutz der Ozonschicht

Das Montrealer Protokoll über Substanzen, die zum Abbau der Ozonschicht führen, ist ein 1987 verabschiedeter globaler Vertrag. Er entstand nach Erkenntnissen in den 1970er Jahren, wonach gewisse anthropogene Chemikalien das stratosphärische Ozon zerstören,³³ und der Beobachtung eines «Ozonlochs» über der Antarktis im Jahr 1985.³⁴ Diese Chemikalien – FCKW und verwandte Verbindungen – wurden häufig in Kühlschränken und Klimaanlage, Aerosolsprays, Schaumstoffprodukten und Feuerlöschern verwendet. Das Protokoll trat 1989 in Kraft und

wurde seitdem weltweit ratifiziert. Es regelt die Produktion, den Verbrauch und den Handel mit den wichtigsten ozonabbauenden Substanzen (ODS). Seine Auswirkungen sind bedeutsam: Die kontrollierte Produktion und der Verbrauch von ODS sind um über 98 % zurückgegangen. Ihre Konzentrationen in der Atmosphäre nehmen ab, und es wird erwartet, dass sich die Ozonschicht bis Mitte des Jahrhunderts erholt. Weil FCKW auch starke Treibhausgase sind, hat deren Verbot zudem zur Eindämmung des Klimawandels beigetragen.

Box 3: Geschichte der Ozonmessung in der Schweiz

Die weltweit längste durchgehende Zeitreihe von Gesamt-ozon vom Boden bis zur Stratosphäre (Abb. 5) begann der Physiker F. W. Paul Götz 1926 im Auftrag des Kur- und Verkehrsvereins am Lichtklimatischen Observatorium (LKO) in Arosa. Er wollte die ultraviolette Sonnenstrahlung und ihre Auswirkungen auf Gesundheit und Klima verstehen. Götz pflegte bald eine enge Zusammenarbeit mit Gordon Dobson von der Universität Oxford. Arosa wurde damit eine der ersten Stationen, an denen Prototypen des Dobson-Spektralphotometers zum Einsatz kamen (Abb. 6). Dobson-Geräte sind bis heute das Rückgrat der systematischen globalen Ozonüberwachung. Sie sind für die internationale Atmosphärenforschung unentbehrlich, und ihre Daten liefern die Grundlagen für umweltpolitische Entscheidungen.^{35, 36} Im Laufe der Zeit wurden am LKO mehrere Dobson-Geräte installiert, um durch parallele Messungen die Kontinuität und Konsistenz der Daten zu sichern. Später führten die ETH Zürich und MeteoSchweiz das Programm weiter, bis es MeteoSchweiz 1988 vollständig übernommen hat. 1988 wurden auto-

matisierte Brewer-Spektralphotometer – ein modernerer Instrumententyp – hinzugefügt, um die Datenqualität und -verfügbarkeit weiter zu verbessern. Seit 2010 hat man die Dobson-Instrumente schrittweise automatisiert (Abb. 7). Im Kern blieben sie unverändert, um eine homogene Zeitreihe von den Anfängen bis heute zu gewährleisten.

Um die Kontinuität der Beobachtungen langfristig zu sichern, wurden die Instrumente zwischen 2011 und 2019 von Arosa ans Physikalisch-Meteorologische Observatorium Davos/World Radiation Center (PMOD/WRC) verlegt. Strenge Massnahmen zur Qualitätssicherung tragen dazu bei, mögliche subtile Messunterschiede, die auf die unterschiedlichen lokalen Gegebenheiten von Arosa und Davos zurückzuführen sind und sich erst über Jahrzehnte hinweg zeigen, zu erkennen und auszugleichen. Heute schreiben drei automatisierte Dobson- und drei Brewer-Instrumente (siehe Titelbild) die weltweit einzigartige, qualitativ hochwertige Datenreihe fort. Sie untermauert internationale Bewertungen der Entwicklung der Ozonschicht.



Abbildung 6: Daniel Chalonge, ein Forscherkollege von F. W. Paul Götz, auf der Terrasse des Hauses «Firnlicht» in Arosa in den frühen 1930er Jahren, zwischen dem Fabry-Buisson-Spektrophotometer (dem Vorläufer des Dobson-Spektralphotometers), dem Chalonge-Spektrografen und dem Féry-Spektrografen. Quelle: Fotoarchiv MeteoSchweiz

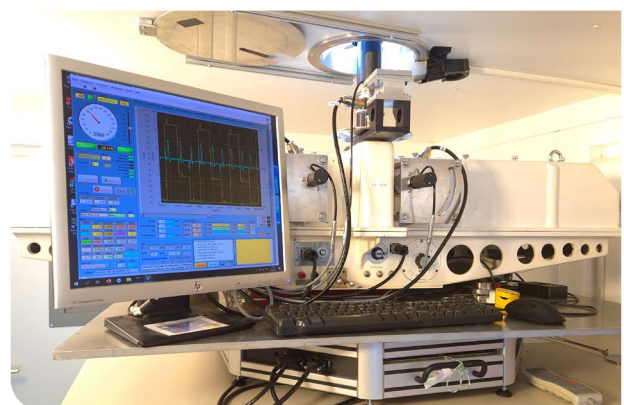


Abbildung 7: Automatisierte Dobson-Instrumente in Davos heute. Foto: Franz Zeilinger

Ozonmessungen zur Unterstützung der Politik

Langfristige, qualitativ hochwertige Messungen erwiesen sich als entscheidend, als 1985 der dramatische Abbau der Ozonschicht über der Antarktis entdeckt wurde (Abb. 5). Dank dem Montrealer Protokoll (Box 2) hat sich die Ozonkonzentration in der Stratosphäre stabilisiert. Angesichts des Klimawandels bleibt die langfristige Erholung jedoch fragil und wird intensiv erforscht. Die Messungen in Arosa/Davos zeigen nach 1995 bislang keinen klaren und signifi-

kanten Trend (Abb. 5). Angesichts der immensen Bedeutung des stratosphärischen Ozons für das Leben auf der Erde bleibt eine kontinuierliche globale Überwachung deshalb für politische Entscheidungen unerlässlich.

Mit Arosa/Davos als Standort der längsten Zeitreihe von stratosphärischen Ozonmessungen hat die Schweiz eine Schlüsselrolle bei der globalen bodengestützten Überwachung der Ozonschicht übernommen. Sie trägt eine besondere Verantwortung, diese hochwertigen Beobachtungen auch in Zukunft fortzusetzen.

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die Ozonschicht der Stratosphäre schützt das Leben vor schädlicher UV-Strahlung. Seit der Umsetzung des Montrealer Protokolls erholt sie sich langsam. Allerdings nimmt der Gehalt der Atmosphäre an Distickstoffmonoxid N_2O (nicht zu verwechseln mit NO_x , dem Vorläufer des bodennahen Ozons) weiter zu. Der heute wichtigste ozonabbauende Stoff ist ein starkes Treibhausgas und stammt aus natürlichen und anthropogenen Quellen wie zum Beispiel Dünger. Ein gezielterer Düngereinsatz würde dazu beitragen, die N_2O -Emissionen zu senken. Dass der Klimawandel die Dynamik der Atmosphäre verändert, wirkt sich auch auf die Ozonschicht aus. Es wird erwartet, dass sie sich über den Tropen weniger und über den aussertropischen Regionen stärker erholt. Hochwertige Messreihen zur vertikalen Ozon-

verteilung und von Gesamt Ozon vom Boden bis zur Stratosphäre stellen die langfristige Überwachung sicher und bilden die Grundlage für regelmässige Bewertungen. Denn es ist von entscheidender Bedeutung, unerwünschte Entwicklungen frühzeitig zu erkennen. Mit ihrer Messinfrastruktur trägt die Schweiz entscheidend dazu bei.

Ozon in Bodennähe ist schädlich für Menschen, Tiere und Pflanzen. Massnahmen, den Ausstoss von Ozonvorläufern und Treibhausgasen zu reduzieren, tragen dazu bei, sowohl die Bildung von bodennahem Ozon als auch den Temperaturanstieg zu mindern. Dies muss eine globale Anstrengung sein, da Ozon über grosse Entfernungen transportiert wird und lokale Massnahmen allein nur begrenzt wirken.

SDGs: Die internationalen Ziele für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen

Mit dieser Publikation leistet die Akademie der Naturwissenschaften einen Beitrag zu den SDGs 3, 13 und 15:

«Gesundheit und Wohlergehen», «Klimamassnahmen» und «Leben an Land».

> sdgs.un.org

> agenda-2030.eda.admin.ch



1-36 Literaturangaben finden sich in der Onlineversion des Faktenblatts unter scnat.ch/ozon

IMPRESSUM

HERAUSGEBER UND KONTAKT

Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT)
Schweizerische Kommission für Atmosphärenchemie und -physik (ACP)
Haus der Akademien · Laupenstrasse 7 · Postfach · 3001 Bern · Schweiz
joerg.klausen@meteowiss.ch · acp.scnat.ch ·  SCNAT

ZITIERVORSCHLAG

Klausen J et al. (2026) Ozon – Ein simples Molekül mit nachhaltiger Wirkung auf Klima, Luftqualität und Gesundheit.
Swiss Academies Factsheets 21 (2)

DOI: doi.org/10.5281/zenodo.21060212

AUTORINNEN UND AUTOREN

Marloes Eeftens (Swiss TPH) · Luca Egli (PMOD/WRC) · Anina Gilgen (Agroscope) · Jörg Klausen (MeteoSchweiz, Leitung) · Eliane Maillard-Barras (MeteoSchweiz) · Clara Nussbaumer (ETH Zürich) · Rolf Rüfenacht (MeteoSchweiz) · Patrick Schleppi (WSL) · Martin Steinbacher (Empa)

REVIEW

Hugo Amacker (BAFU) · Christoph Hüglin (Empa) · Ulrich Krieger (ETH Zürich) · André Prévôt (Paul Scherrer Institute) · Matthew B. Tully (Bureau of Meteorology, Melbourne, Australia)

REDAKTION

Andres Jordi (SCNAT) · Caroline Reymond (SCNAT)

ÜBERSETZUNG

Jörg Klausen · Martin Steinbacher · Andres Jordi

LAYOUT UND GRAFIK

Olivia Zwygart (SCNAT)

TITELBILD

Fabrizio Vignali (PMOD/WRC)

ISSN (print): 2297-1580

ISSN (online): 2297-1599



creativecommons.org/licenses/by/4.0

Diese Publikation ist unter CC BY 4.0 lizenziert.

Bibliography

- 1 Swiss Academy of Sciences SCNAT Platform Chemistry: Chemical Landmarks. scnat. swiss academy of sciences. https://chem.scnat.ch/en/chemical_landmarks/chemical_landmark_2017
- 2 Stick C, Krüger, K, Schade N, Sandmann H, Macke A (2006) Episode of unusual high solar ultraviolet radiation over central Europe due to dynamical reduced total ozone in May 2005. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 6(7): 1771–1776. <https://acp.copernicus.org/articles/6/1771/2006>
- 3 Antón M, Cancillo ML, Serrano A, Vaquero JM, García JA (2007) Ozone mini-hole over southwestern Spain during January 2004: Influence over ultraviolet radiation. *Geophysical Research Letters* 34(10). <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2007GL029689>
- 4 Tian H, Pan N, Thompson RL, Canadell JG, Suntharalingam P, Regnier P, Davidson EA, Prather M, Ciais P, Muntean M, Pan S, Winiwarter W, Zaehle S, Zhou F, Jackson RB, Bange HW, Berthet S, Bian Z, Bianchi D, Bouwman AF, Buitenhuis ET, Dutton G, Hu M, Ito A, Jain AK, Jeltsch-Thömmes A, Joos F, Kou-Giesbrecht S, Krummel PB, Lan X, Landolfi A, Lauerwald R, Li Y, Lu C, Maavara T, Manizza M, Millet DB, Mühle J, Patra PK, Peters GP, Qin X, Raymond P, Resplandy L, Rosentreter JA, Shi H, Sun Q, Tonina D, Tubiello FN, van der Werf GR, Vuichard N, Wang J, Wells KC, Western LM, Wilson C, Yang J, Yao Y, You Y, Zhu Q (2024) Global nitrous oxide budget (1980–2020). *Earth System Science Data* 16(6): 2543–2604. <https://essd.copernicus.org/articles/16/2543/2024>
- 5 Nussbaumer CM, Heald CL, Häne AM, Hüglin C (2026) Multi-decadal ozone air quality and the role of temperature in Switzerland during summertime. *ACP* 26: 5355–5373. <https://doi.org/10.5194/acp-26-5355-2026>
- 6 WHO IARC International Agency for Research on Cancer (2022) Age-Standardized Rate (World) per 100 000, Incidence, Both sexes, in 2022. *Cancer Today*. <https://gco.iarc.who.int/today/en/dataviz/maps-heatmap?mode=population&cancers=16&types=0>
- 7 Boz SB (2022) A prospective cohort analysis of residential radon and UV exposures and malignant melanoma mortality in the Swiss population.. *Environment international* 169: 107437. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160410222003646?via%3Diuhub>
- 8 WMO (2025) WMO Ozone and UV Bulletin No. 3 – September 2025. Geneva: World Meteorological Organization. <https://wmo.int/publication-series/wmo-ozone-and-uv-bulletin-no-3-september-2025>
- 9 Goodman J, Prueitt R, Sax S, Pizzurro D, Lynch H, Zu K, Venditti F (2015) Ozone exposure and systemic biomarkers: Evaluation of evidence for adverse cardiovascular health impacts.. *Critical reviews in toxicology* 45(5): 412–452.
- 10 Ji M, Cohan D, Bell M (2011) Meta-analysis of the association between short-term exposure to ambient ozone and respiratory hospital admissions.. *Environmental Research Letters* 6(2): 024006.
- 11 Huangfu P, Atkinson R (2020) Long-term exposure to NO₂ and O₃ and all-cause and respiratory mortality: A systematic review and meta-analysis.. *Environment international* 144: 105998.
- 12 Feng Z, Kobayashi K (2009) Assessing the impacts of current and future concentrations of surface ozone on crop yield with meta-analysis. *Atmospheric Environment*. 43(8): 1510–1519. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.11.033>
- 13 Mills G, Sharps K, Simpson D, Pleijel H, Frei M, Burke K, Emberson L, Uddling J, Broberg M, Feng Z, Kobayashi K, Agrawal M (2018) Closing the global ozone yield gap: Quantification and cobenefits for multistress tolerance. *Global Change Biology*. 24(10). <https://doi.org/10.1111/gcb.14381>
- 14 Tai AP, Sadiq M, Pang JY, Yung DH, Feng Z (2021) Impacts of Surface Ozone Pollution on Global Crop Yields: Comparing Different Ozone Exposure Metrics and Incorporating Co-effects of CO₂. *Front. Sustain. Food Syst.* 5. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.534616>
- 15 Schucht S, Tognet F, Létinois L (2024) Wheat and potato yield loss in 2022 in Europe due to ozone exposure (Eionet Report– ETC HE 2024/9). https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-he/products/etc-he-products/etc-he-reports/etc-he-report-2024-9-wheat-and-potato-yield-loss-in-2022-in-europe-due-to-ozone-exposure/@download/file/ETC-HE-Report-2024_Crop-Loss-Ozone_fv_cleaned_FI-NAL_29-11-2024.pdf
- 16 Vollenweider P, Haeni M, Gisler J, Trotsiuk V, Zhu J, Schaub M (2025) L'ozone et ses effets en forêt. *Schweiz Z Forstwesen*. 176(2).
- 17 Ferretti M, Cailleret M, Haeni M, Trotsiuk V, Apuhtin V, Araminienė V, Buriánek V, Cecchini S, Dalstein-Richier L, Hůnová I, Jakovljević T, Kaou K (2024) The fingerprint of tropospheric ozone on broadleaved forest vegetation in Europe. *Ecological Indicators*. 158(111486).
- 18 Li F, Stolarski RS, Newman PA (2009) Stratospheric ozone in the post-CFC era. *Atmos. Chem. Phys.* 9: 2207–2213. <https://doi.org/10.5194/acp-9-2207-2009>
- 19 Kessenich HE, Seppälä A, Rodger CJ (2023) Potential drivers of the recent large Antarctic ozone holes. *Nature Communications* 14: 7259. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42637-0>
- 20 Hu Y, Tian W, Zhang J, Wang Z, Li D, Yang Q (2025) Recent sea surface temperature trends hinder Antarctic stratospheric ozone recovery. *Commun Earth Environ* 6: 1050. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-03042-1>
- 21 Banerjee A, Fyfe JC, Polvani LM, Waugh D, Chang K-L (2020) A pause in Southern Hemisphere circulation trends due to the Montreal Protocol.. *Nature* 579: 544–548. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2120-4>
- 22 Manney G, Santee M, Rex M, al. (2011) Unprecedented Arctic ozone loss in 2011. *Nature* 478: 469–475. <https://www.nature.com/articles/nature10556>
- 23 WMO (2022) Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022, GAW Report No. 278. Chapter 5. Stratospheric ozone changes and climate. Geneva: World Meteorological Organization. 509 pp.. <https://ozone.unep.org/science/assessment/sap>
- 24 Ball WT, Alsing J, Mortlock DJ, Staehelin J, Haigh JD, Peter T, Tummon F, Stübi R, Stenke A, Anderson J, Bourassa A, Davis SM, Degenstein D, Frith S, Froidevaux L, Roth C, Sofieva V, Wang R, Wild J, Yu P, Ziemke JR, Rozanov EV (2018) Evidence for a continuous decline in lower stratospheric ozone offsetting ozone layer recovery. *Atmos. Chem. Phys.* 18: 1379–1394. <https://doi.org/10.5194/acp-18-1379-2018>
- 25 Sofieva VF, Szelag ME, Kramarova N, Damadeo R, Steinbrecht W, Petropavlovskikh I, Vigouroux C, Maillard Barras E, Zawada D, Tourpali K, Frith SM, Wild JD, Davis SM, Arosio C, Weber M, Rozanov A, Auffarth B, Froidevaux L, Fuller R, Degenstein D, Dube K, Effertz P, Leblanc T, Ancellet G, Godin-Beekman S, McConville G, Querel R, Smale D, DeBacker M-R, Mahieu E, Sussmann R (2025) Updated global and regional trends of stratospheric ozone profiles. *EGUsphere* [preprint]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-5963>
- 26 Van Malderen R, Thompson AM, Kollonige DE, Stauffer RM, Smit HG, Maillard Barras E, Vigouroux C, Petropavlovskikh I, Leblanc T, Thouret V, Wolff P, Effertz P, Tarasick DW, Poyraz D, Ancellet G, De Backer M-R, Evans S, Flood V, Frey MM, Hannigan JW, Hernandez JL, Iarlori M, Johnson BJ, Jones N, Kivi R, Mahieu E, McConville G, Müller K, Nagahama T, Notholt J, Piters A, Prats N, Querel R, Smale D, Steinbrecht W, Strong K, Sussmann R (2025) Global ground-based tropospheric ozone measurements: reference data and individual site trends (2000–2022) from the TOAR-II/HEGIFTOM project. *Atmos. Chem. Phys.* 25: 7187–7225. <https://doi.org/10.5194/acp-25-7187-2025>
- 27 MeteoSwiss, ETH Zurich (2025) Climate CH2025: Switzerland's Future Climate. Zurich Airport: MeteoSwiss.
- 28 Seneviratne S, Zhang X, Adnan M, Badi W, Dereczynski C, Di Luca A, Ghosh S, Iskandar I, Kossin J, Lewis S, Otto F, Pinto I, Satoh M, Vicente-Serrano S, Wehner M, Zhou B (2021) 2021: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1513–1766. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-11>

- 29 Newman PA, Daniel JS, Waugh DW, and Nash ER (2007) A new formulation of equivalent effective stratospheric chlorine (EESC). *Atmos. Chem. Phys.* 7: 4537–4552. <https://doi.org/10.5194/acp-7-4537-2007>
- 30 Montzka SA, Dutton G, Vimont I (2024) The NOAA Ozone Depleting Gas Index: Guiding Recovery of the Ozone Layer. NOAA Global Monitoring Laboratory. <https://gml.noaa.gov/odgi>
- 31 NASA (2026) NASA Ozone Watch. https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/facts/eesc_SH.html
- 32 Komhyr W, Evans RD (1980, rev. 2006) Operations Handbook – Ozone observations with a Dobson spectrophotometer. Geneva: World Meteorological Organization. 91 pp. <https://www.o3soft.eu/dobson-web/messages/reviseNo6NewFigsA.pdf>
- 33 Rowland MJ (1974) Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature* 249: 810–812. <https://www.nature.com/articles/249810a0>
- 34 Farman J, Gardiner B, Shanklin J (1985) Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. *Nature* 315(1 May): 207–210. <https://www.nature.com/articles/315207a0>
- 35 Staehelin J, Viatte P, Stübi R, Tummon F, Peter T (2018) Ozone measurements at Arosa (Switzerland): History and scientific relevance. *Atmos. Chem. Phys.* 18: 6567–6584.
- 36 Läubli M, Staehelin J, Viatte P (2019) The Light Climatic Observatory Arosa: . Haupt Verlag. ISBN 978–3–258–08113–7.