

Ozon und Sommersmog: Klimawandel gefährdet heutige Erfolge

Prof. Dr. Johannes Staehelin¹, Dr. Christoph Hüglin², Prof. Dr. Stefan Brönnimann³, Prof. Dr. Nino Künzli⁴

¹ETH Zürich, ²Empa, ³Universität Bern, ⁴Swiss TPH

Ozonschicht und Sommersmog sind seit den 1990er-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 dieser Artikel 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 1980er-Jahre Maßnahmen zur Reduktion der Emissionen dieser Ozonvorläufer erarbeitet und umgesetzt.

In der Landwirtschaft führt die gegenwärtige Ozonbelastung zu erheblichen Ertragseinbußen.¹ Außerdem ist Ozon in den unteren Luftschichten ein starkes Klimagas. Nach Kohlendioxid und Methan trägt das Ozon in der oberen Troposphäre am stärksten zum vom Menschen verursachten Klimawandel bei.²

Auch wenn Ozon die menschliche Gesundheit insgesamt belastet (s. unten), 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.

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.

Sommersmog schadet Gesundheit

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 Krankenhauseinweisungen zu und mehr Menschen sterben an Atemwegserkrankungen.

Ob dies auf die Wirkung von Ozon oder von anderen Luftschadstoffen, so genannten toxischen Photooxidantien, zurückzuführen ist, deren Konzentrationen stark mit der von Ozon schwankt³, ist noch unklar.

Die Kombination von Hitze und Sommersmog kann bei bestimmten Personengruppen ernsthafte gesundheitliche Probleme auslösen. So führte beispielsweise die Hitzewelle 2003 in Holland zu 1.000 bis 1.400 zusätzlichen Todesfällen. Davon konnten 400 bis 600 Todesfälle auf die erhöhte Luftverschmutzung durch Ozon und Feinstaub zurückgeführt werden.⁴ Für die Schweiz wurde für die Hitzewelle vom Sommer 2003 eine hitzebedingte Zunahme der Todesfälle um 7% geschätzt.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 (siehe Abbildung 1). Die gegen Mitte der 1980er-Jahre begonnenen Maßnahmen führten zu einer Abnahme der Konzentrationen der Stickoxide um ungefähr 60% (Abbildung 1 oben). Die VOCs (außer Methan) sind seit Mitte der 1980er-Jahre gar um rund 70% zurückgegangen (Abbildung 1 unten). In Europa haben die Emissionen sowie die

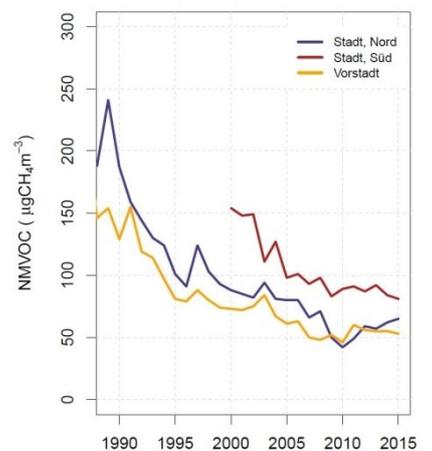
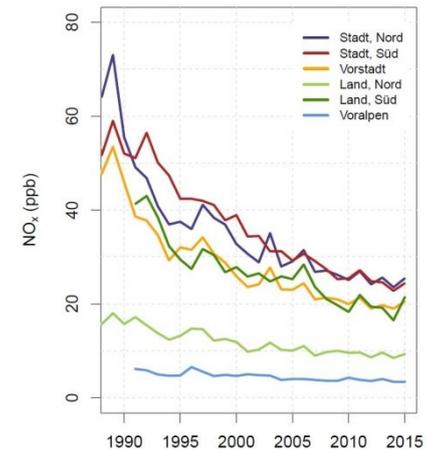


Abb 1: Außenluftkonzentrationen von Ozonvorläufern für verschiedene Standorttypen in der Schweiz.

Oben: Stickoxide (NOx: NO + NO₂),

Unten: Nichtmethan-VOC.

Nord und Süd kennzeichnen Standorte auf der Alpennord- bzw. Alpensüdseite (NABEL, BAFU/Empa).

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 der Erfolge bei der Senkung der Ozonvorläufer wird der Stundengrenzwert für Ozon nach wie vor häufig überschritten (siehe Abbildung 2 oben). 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 (siehe Abbildung 2 unten). Die Ozonbelastung sowie auch die Abnahme der Ozonwerte sind in der Südschweiz am größten (siehe Abbildung 3). 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 Verlauf der 1990er-Jahre nicht ab-, sondern zugenommen (siehe Abbildung 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.

Auf dem Jungfraujoch wird meist die oberhalb des Mittellandes liegende Luftschicht erfasst, die „freie Troposphäre“ genannt wird (siehe Abbildung 5). Die Luft der freien

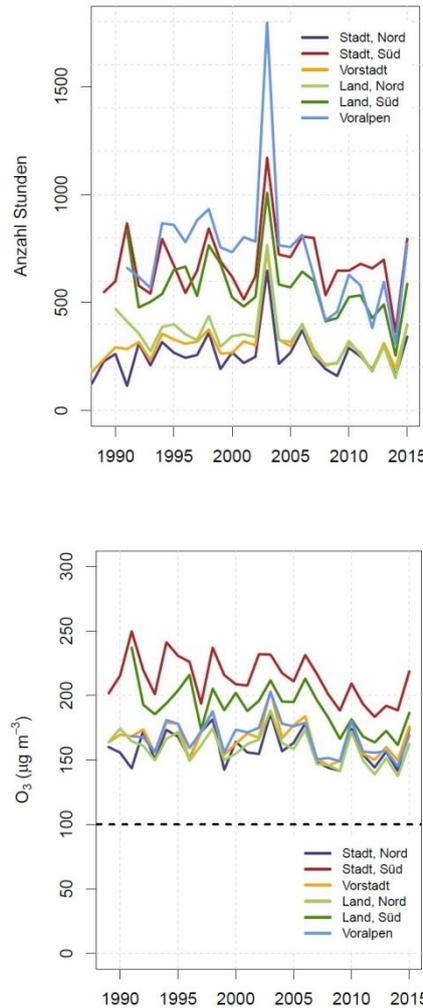


Abb. 2: Ozonkonzentrationen für verschiedene Standorttypen in der Schweiz.
 Oben: Häufigkeit der Überschreitung des Stundengrenzwertes von 120µg/m³ (Anzahl Stunden pro Jahr).
 Unten: Die höchsten Ozon-Konzentrationen ausgedrückt durch das 98-Perzentil des ozonreichsten Sommermonats. Die gestrichelte Linie kennzeichnet den zugehörigen Grenzwert der Luftreinhalteverordnung (NABEL, BAFU/Empa).

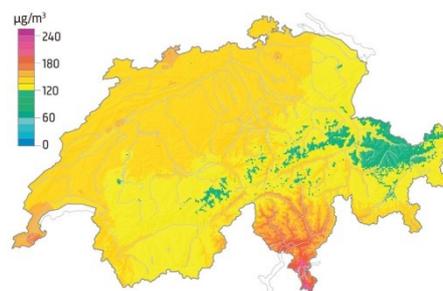


Abb. 3: Verteilung der maximalen stündlichen Ozonkonzentrationen in der Schweiz am 20.7.2016, einem heißen Sommertag (BAFU)

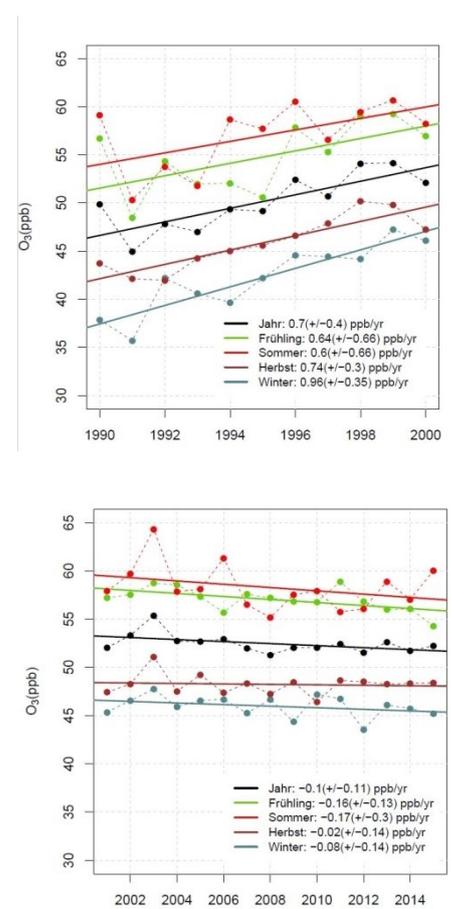


Abb. 4: Ozonkonzentrationen auf dem Jungfraujoch (NABEL, BAFU/Empa)

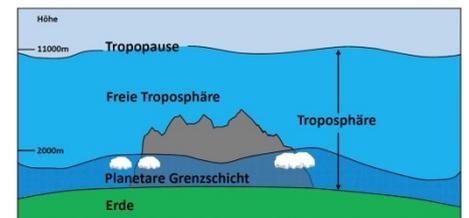


Abb. 5: Schematische Darstellung der Struktur der Troposphäre. Auf der Höhe des Jungfraujochs (3580 Meter über Meer) wird meist die Luft der freien Troposphäre gemessen.

Troposphäre bewegt sich viel rascher und wird über viel größere Distanzen verfrachtet als die Luft des schweizerischen Mittellandes (sogenannte 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 Vorläufersgasen hat einen wichtigen Einfluss auf die Konzentration von bodennahem Ozon in Europa.⁷ Neben den genannten Vorläuferschadstoffen sind außerdem die globalen Emissionen von Methan⁹ 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 abgegrenzten Standorten wie dem Jungfrauoch gefundene Entwicklung der Ozonkonzentrationen erklären kann¹⁰.

Das bodennahe Ozon

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 rascher¹¹ und nimmt in der untersten Luftschicht von Tag zu Tag zu.¹² Hauptsächlich wegen des Ausbleibens von Frontdurchgängen bzw. Luftmassenwechseln wird keine frische, ozonärmere Luft herangeführt und die stark ozonhaltige Luft nicht weggeführt.

In wissenschaftlichen Studien¹³ 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.

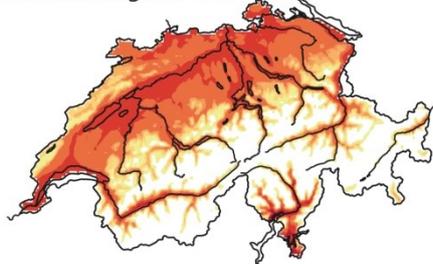
Einfluss des Klimawandels auf das bodennahe Ozon

Heutige Klimamodelle sagen übereinstimmend eine Zunahme der Sommertage (Tage mit Maximaltemperaturen über 25°C) für die Schweiz voraus (siehe Abbildung 6). Das Ausmaß hängt von der zukünftigen Entwicklung der Klimagase ab, insbesondere von Kohlendioxid. Je nach Szenario könnte sich die Anzahl Sommertage in den Agglomera-

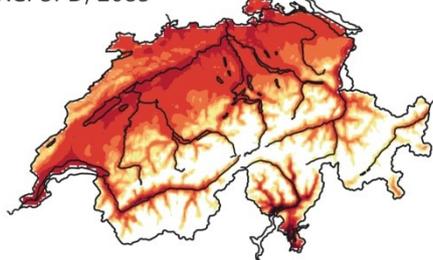
tionen des Mittellands verdoppeln. Weil anhaltende, warme Schönwetterlagen zu hohen Ozonwerten führen und weil solche Wetterlagen häufiger werden wie dies aufgrund des Klimawandels erwartet wird, steigt auch die durchschnittliche Ozonbelastung an, so wie dies in den heißen Sommern wie 2003 und 2015 der Fall war.

Sommertage

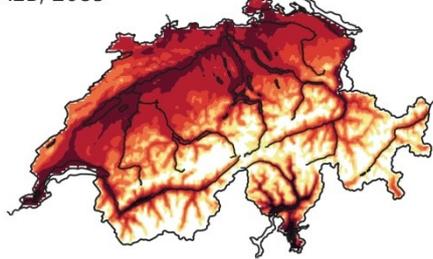
Beobachtungen, 1980-2003



RCP3PD, 2085



A1B, 2085



Anzahl Sommertage

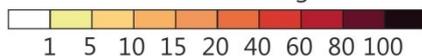


Abb. 6: Für 2085 erwartete Zunahme der Anzahl an Sommertagen in der Schweiz als Folge des Klimawandels; dargestellt sind zwei unterschiedliche Szenarien¹⁴.

Oben: Beobachtete Sommertage 1980 – 2009;

Mitte: RCP3PD: Szenario mit niedrigem Treibhausgas-Ausstoß aufgrund wirksamer Klimapolitik¹⁵;

Unten: A1B: Szenario mit mittlerem Treibhausgas-Ausstoß, keine Reduktionsmaßnahmen.

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.

Dieser Text basiert auf einem "Fact Sheet", der Akademie der Wissenschaften Schweiz (2016) Ozon und Sommersmog: Klimawandel gefährdet heutige Erfolge. Swiss Academies Factsheets 11 (5).

Literatur

(1) HTAP (2010) **Part A: Hemispheric Transport of Air Pollution 2010**. Air Pollution Studies No.17. United Nations, New York and Geneva.

(2) 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.

(3) WHO (2015) **WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide Global update 2005**, Summary of risk assessment, Geneva, Switzerland.

(4) Fischer PA, Brunekreef B, Lebret E (2004) **Air pollution related deaths during the 2003 heat wave in the Netherlands**, *Atm. Env.*, 38, 1083-185.

- (5) 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.
- (6) 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).
- (7) 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.
- (8) Brönnimann S, Buchmann B, Wanner H (2002) **Trends in near surface ozone concentrations in Switzerland: the 1990s**, Atmos. Env., 36, 2841-2852.
- 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.
- (9) Methan ist ein langlebiger Kohlenwasserstoff, der die Ozonbildung auf regionaler Skala kaum beeinflusst aber zur Ozonbildung auf hemisphärischer Skala beiträgt.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) Ordóñez C, Mathis H, Furger M, Henne S, Huglin C, Staehelin J, Prevot 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.
- (13) Solberg S, Hov O, Sovde 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.
- 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.
- (14) **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.
- (15) Im 5. Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC als RCP2.6 bezeichnet.