

**Ozon in der Ostschweiz  
und in Graubünden:  
Entwicklung 1992-2018 und  
Prognose bis zum Ende des  
21. Jahrhunderts**

**im Auftrag von OSTLUFT**

Dr. Jürg Thudium  
Dr. Carine Chélala  
29.04.2019 / 5907.91 V3

Oekoscience AG

Postfach 452  
CH - 7001 Chur

Telefon: +4181 250 3310  
Thudium@oekoscience.ch

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2. Überblick zu den Messstationen</b>	<b>5</b>
<b>3. Vergleich der vier Ozonsommer</b>	<b>11</b>
<b>4. Einfluss von Wetterlagen-Klassen auf die Ozon-Immissionen und die Temperatur</b>	<b>21</b>
<b>5. Betrachtung von Stationspaaren</b>	<b>24</b>
<b>6. Vergleich der aktuellen Ozonsituation in Arosa mit den 50er Jahren</b>	<b>26</b>
6.1. Vergleich des jahreszeitlichen Ozonverlaufs	28
6.2. Vergleich des tageszeitlichen Ozonverlaufs	29
<b>7. Literaturzusammenstellung zur Entwicklung des troposphärischen Ozons</b>	<b>31</b>
7.1. Literatur zur NO <sub>x</sub> - und VOC-Limitierung der Ozonbildung	31
7.2. Literatur zur wissenschaftlichen Bedeutung der Ozonmessungen in Arosa GR	33
7.3. Literatur über Modelle zur Abschätzung der zukünftigen Ozonentwicklung	35
7.4. Fazit	40
<b>8. Trendanalyse: Beschreibung der Ozonentwicklungen der letzten 27 Jahre mit linearer Regression</b>	<b>42</b>
8.1. Abhängigkeit der Ozonspitzenwerte von der Temperatur	42
8.2. Abhängigkeit der Ozonspitzenwerte von den VOC-Emissionen	45
8.3. Die Methodik der verwendeten linearen Regression	46
8.4. Ergebnisse der linearen Regression für Ozon	48
8.5. Fazit der Regressionsanalyse	54
<b>9. Zur zukünftigen Entwicklung der Ozonbelastung in der Ostschweiz und in Graubünden</b>	<b>55</b>
9.1. Verwendete Klima- und VOC-Emissionsszenarien	56
9.2. Ergebnisse der Szenarien der künftigen Ozonentwicklung	62
<b>10. Literatur</b>	<b>68</b>
<b>Anhang: Dokumentation der Regressionsanalyse</b>	<b>71</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Ozonmessstationen in der Ostschweiz und Graubünden.	6
Abbildung 2.2: Standortcharakteristik der Ozonmessstationen.	9
Abbildung 2.3: Höchster Ozon-Stundenwert je Jahr für die untersuchten Standorte, 1992-2018.	10
Abbildung 3.1: Tägliches Ozon-Stundenmaximum $O_3\text{max}$ und Temperaturmaximum $T\text{max}$ von Zürich Kaserne, Tänikon und Castaneda (Meteo Grono) für die Sommermonate Juni, Juli und August 2003, 2006, 2015 und 2018. Jeder Sommer hat 92 Tage.	13
Abbildung 3.2 (letzte Seite): Trendlinien zwischen täglichem Ozon-Stundenmaximum und Temperaturmaximum je Standort für die 4 Ozonsommer 2003, 2006, 2015 und 2018 bei Zürich Kaserne, Tänikon, Castaneda (Meteo Grono), Arosa und St. Moritz (Meteo Samedan).	15
Abbildung 3.3: Gleitendes 7-Tagemittel von $O_3\text{max}$ (oben) und $T\text{max}$ (unten) für Tänikon, Sommermonate 2003, 2006, 2015 und 2018.	15
Abbildung 3.4: Gleitendes 7-Tagemittel von $O_3\text{max}$ (oben) und $T\text{max}$ (unten) für Arosa, Sommermonate 2003, 2006, 2015 und 2018.	16
Abbildung 3.5: Gleitendes 7-Tagemittel von $O_3\text{max}$ (oben) und $T\text{max}$ (unten) für Castaneda (Meteo Grono), Sommermonate 2003, 2006, 2015 und 2018.	17
Abbildung 3.6 (letzte Seiten): Monatliche Ozonkennzahlen für die 4 Ozonsommer 2003, 2006, 2015 und 2018. 98%-Wert (oben), mittleres tägliches Stundenmaximum (Mitte), 75%-Wert der täglichen Stundenmaxima (unten). Alle Ostschweizer Standorte haben graue Kurven.	20
Abbildung 4.1: Häufigkeit der CAP-Klassen (Wetterlagenklassifizierung: "Cluster Analysis of Principal Component") im Sommer (Juni-August) 1992-2018; Vergleich Ozonsommer 2003, 2006, 2015, 2018 mit den übrigen Sommern.	22
Abbildung 5.1: Mittlerer Tagesgang der Ozonkonzentration für August 2003 (ausgezogene Kurven) und Juli 2018 (gestrichelte Kurven) an sechs ausgewählten Standorten.	25
Abbildung 6.1: Saisongemitteltes, sommerliches $O_3$ -Mischungsverhältnis (a) gemessen und (c) diese Ergebnisse auf das Jahr 2000 normiert. Die Kurven in der Abbildung c sind 'least square polynomial fits' an normierte Ergebnisse von allen Standorten; diese Kurven	

beinhalten die in Abb. c notierten Jahre der Daten. Die schwarz gestrichelte Linie zeigt die linearen kleinsten Quadrate an, die zu allen Daten von 1950 bis 2000 passen. Entnommen aus: <i>Parrish et al. (2014)</i> .	27
Abbildung 6.2: Ozonverlauf in Arosa, Monatsmittel von 1950 – 2018 (ohne 2003).	28
Abbildung 6.3: Monat mit der höchsten Ozonkonzentration, Arosa 1950 – 2018.	29
Abbildung 6.4: Relative Tagesgänge der Ozonkonzentration in Arosa je Saison, 1954 – 2018 (ohne 2003). 100% = Mittelwert je Saison und Zeitfenster.	30
Abbildung 8.1: Tägliches Ozonmaximum gegen tägliche Maximaltemperatur für Tänikon und Zürich-Heubeeribüel, Sommer (Juni-August) 2003 und 2018.	43
Abbildung 8.2: Mittleres tägliches Ozonmaximum bei einer Tagesmaximumtemperatur von 25 bzw. 30 bzw. 35 °C für Tänikon, Zürich-Heubeeribüel, Arosa und Castaneda, Sommer (Juni-August) 1992-2018.	44
Abbildung 8.3: Mittleres tägliches Ozonmaximum (Stundenwert) im Sommer bei einer täglichen Maximumtemperatur von 30 °C bei Tänikon, Castaneda und Chur Kantonsspital sowie bei Lustenau Wiesenrain (AT) und relative nationale VOC-Emissionen in der Schweiz und in Österreich (100% = Emission im Jahr 2000), 1992-2018.	46
Abbildung 8.4: Abhängigkeit der Ozonkennzahlen von der Tagesmaximum-Temperatur, Ozon Hmax (mittlerer höchster Stundenwert), 98%-Wert und AOT40 je Standort.	50
Abbildung 8.5: Abhängigkeit des Logarithmus des mittleren höchsten Stundenwertes von Ozon von der Tagesmaximum-Temperatur (Ozon Hmax) je Standort.	51
Abbildung 8.6: Abhängigkeit der Ozonkennzahlen von der Zeit (1992-2004), Ozon Hmax (mittlerer höchster Stundenwert), 98%-Wert und AOT40 je Standort.	52
Abbildung 8.7: Abhängigkeit der Ozonkennzahlen von den schweiz. VOC-Emissionen (2005-2018), Ozon Hmax (mittlerer höchster Stundenwert), 98%-Wert und AOT40 je Standort.	53
Abbildung 9.1: Tagesmitteltemperatur (x-Achse) gegen Tagesmaximaltemperatur (y-Achse) für Tänikon (links) bzw. Grono (rechts) von 2010-2018 (jeweils Juni-August).	57
Abbildung 9.2: EKMA-Diagramm der Modellergebnisse mit 'RADM2' für Zürich und Umgebung. Maximale Ozonkonzentration in Abhängigkeit der Konzentration an VOC (x-Achse) bzw. NOx (y-Achse). Die resultierenden Ozonkonzentrationen 1991-2015 sind VOC-limitiert: Eine höhere VOC-Konzentration führt zu höherer Ozonkonzentration, eine	

höhere NO<sub>x</sub>-Konzentration zu tieferer Ozonkonzentration. Quelle: "Turnaround in the Ozone Trend: A Shift from VOC- to NO<sub>x</sub>-Limitation?", Flavia Gretener, ETH Zürich, 2018. 58

Abbildung 9.3: Erhöhung der mittleren täglichen Maximaltemperaturen im Sommer gemäss Klimaszenarien CH ohne Klimaschutz (RCP8.5) bzw. mit moderatem Klimaschutz (RCP4.5), Gebiete Nordostschweiz und Alpen Ost, in Bezug zum Mittel 1981-2010. Realer Verlauf der Temperatur bei Tänikon und Castaneda im 2-Sommermittel als Differenz zu 1995. Der Unterschied zwischen Tänikon und Castaneda kommt auch dadurch zustande, dass sich in Castaneda die Maximaltemperatur weniger stark von der Mitteltemperatur unterscheidet als in Tänikon. 61

Abbildung 9.4: Beispiel des Transfers von der Ozonzeitreihe in die Säulendarstellung. Aus den mittleren täglichen Ozonspitzen je Monat (hellrot) werden gleitende 3-Monatsmittel (Sommermittel) gebildet (dunkelrot). Die Säule reicht vom Minimum bis zum Maximum des Sommermittels. der schwarze Balken bezeichnet den Mittelwert aus der gesamten Zeitreihe. 62

Abbildung 9.5: Mittleres tägliches Ozonmaximum im Sommer: Messung 1992-2018; Normierung 1992-2018 auf VOC-Emissionen 2018 und Temperatur 1995. Monatswerte und gleitende 3-Monatsmittel. 63

Abbildung 9.6: Gleitende 3-Monatsmittel der mittleren täglichen Ozonmaxima im Sommer: Bereiche der Messung 1992-2018 und der Normierung 1992-2018 auf VOC-Emissionen 2018 und Temperatur 1995. Prognosebereiche für 2045-2075 und 2070-2100 für Klimaszenarien CH RCP8.5 und RCP4.5 sowie mit konstanten VOC-Emissionen (Stand 2018) und Reduktion um 10/20 %. Dunkle Balken: Mittelwerte, bei den Prognosen für unteres und oberes Limit der postulierten Temperaturzunahme. 64

Abbildung 9.7: Monatliche 98%-Werte von Ozon: Messung 1992-2018; Normierung 1992-2018 auf VOC-Emissionen 2018 und Temperatur 1995. Monatswerte und gleitende 3-Monatsmittel. 65

Abbildung 9.8: Gleitende 3-Monatsmittel der monatlichen 98%-Werte von Ozon: Bereiche der Messung 1992-2018 und der Normierung 1992-2018 auf VOC-Emissionen 2018 und Temperatur 1995. Prognosebereiche für 2045-2075 und 2070-2100 für Klimaszenarien CH RCP8.5 und RCP4.5 sowie mit konstanten VOC-Emissionen (Stand 2018) und Reduktion um 10/20 %. Dunkle Balken: Mittelwerte, bei den Prognosen für unteres und oberes Limit der postulierten Temperaturzunahme. 66

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Icons zur Charakterisierung von Ozonmessstationen (s. Abbildung 2.2).	9
Tabelle 3.1: Heisseste Monate je Standort von 1992-2018, basierend auf dem mittleren täglichen Temperaturmaximum.	11
Tabelle 4.1: Zusammenfassung der CAP-Klassen:	21
Tabelle 4.2: Temperaturzunahme 1992-2017 am Beispiel Tänikon: Aufteilung auf Erwärmung der Wetterlagen und Änderung der Wetterlagenhäufigkeiten.	23
Tabelle 8.1: Zuordnung von Temperaturmessstationen zu Ozonstationen für Regressionsrechnung:	47
Tabelle 9.1: Klimawandel und Erhöhung der mittleren täglichen Ozonspitzen im Sommer für die CH-Klimaszenarien RCP8.5 und RCP4.5. Erhöhung der Mitteltemperatur im Sommer bezogen auf die Periode 1981-2010.	59
Tabelle 9.2: Reduktion der VOC-Emissionen und Verringerung der mittleren täglichen Ozonspitzen im Sommer.	60
Tabelle A.1: Definition der Signifikanzniveaus. p: Irrtumswahrscheinlichkeit.	71
Tabelle A.2: Abhängigkeit des mittleren höchsten Stundenwerts O <sub>3</sub> H <sub>max</sub> von der Tagesmaximum-Temperatur T <sub>max</sub> , der Zeit und den nationalen VOC-Emissionen, je Standort.	71
Tabelle A.3: Abhängigkeit des Logarithmus des mittleren höchsten Stundenwerts O <sub>3</sub> H <sub>max</sub> von der Tagesmaximum-Temperatur T <sub>max</sub> , der Zeit und den nationalen VOC-Emissionen, je Standort.	72
Tabelle A.4: Abhängigkeit des monatlichen 98%-Wertes von Ozon von der Tagesmaximum-Temperatur T <sub>max</sub> , der Zeit und den nationalen VOC-Emissionen, je Standort.	72
Tabelle A.5: Abhängigkeit des AOT40-Wertes (April-September) von der Tagesmaximum-Temperatur T <sub>max</sub> , der Zeit und den nationalen VOC-Emissionen, je Standort.	73

# Zusammenfassung

**Ozon generell** Ganz generell ist beim Verlauf der Ozonbelastung in der Ostschweiz und in Graubünden von 1992 bis etwa 2009 eine Abnahme zu sehen, danach finden sich etwa konstante Ozonkonzentrationen.

In jedem Sommer zeigt sich eine starke Korrelation zwischen täglichem Ozon-Stundenmaximum und Temperaturmaximum.

Das Ozonmaximum bei einem bestimmten Temperaturmaximum (z.B. 30 °C) hat über die Jahre abgenommen, deutlich auf der Alpensüdseite und in den Bündner Bergen, nur wenig in der Ostschweiz. Dabei kam es vor allem zu einer Parallelverschiebung der Trendlinien (= grundsätzlich etwas weniger Ozon), die Neigung der Trendlinien (= Ozonzunahme bei Temperaturzunahme) hat sich nur im Engadin erkennbar verändert.

## Vier Ozonsommer

Die vier Sommer 2003, 2006, 2015 und 2018 mit stark erhöhten Ozonbelastungen wurden speziell betrachtet. Die Betrachtung monatlicher Ozonkennzahlen (98%-Wert der Halbstundenwerte, Mittelwert bzw. 75%-Wert der täglichen Ozonmaxima) für diese vier Ozonsommer brachte drei Hauptergebnisse:

- Die Ostschweizer Stationen unterscheiden sich kaum, unabhängig von ihrer Umgebung (Besiedlung, Strassenverkehr). Lediglich die Station ZH-Stampfenbach zeigte stets tiefere Werte als die anderen Zürcher Stationen, wahrscheinlich aufgrund des starken Oberflächenkontakts der Luft im Umfeld der Messstation.
- Die Bündner Bergstationen in Nord- und Mittelbünden unterscheiden sich kaum, liegen auf markant tieferem Ozonniveau als die Ostschweiz.
- Die Bündner Südalpenstationen liegen auf markant höherem Ozonniveau als die Ostschweiz, nähern sich allerdings der Ostschweiz immer mehr an.

## Chur

Die Station Chur-Kantonsspital, am Westhang oberhalb der Stadt Chur gelegen, zeigt einen Gleichlauf mit den Ostschweizer Standorten, aber stets tiefer. Der Abstand zu den Ostschweizer Standorten hat sich ab 2015 markant vergrössert, also eine markant stärkere Ozonabnahme bei Chur als in der Ostschweiz. Die Frage bleibt im Raum, weshalb.

## Arosa

Die Messungen in Arosa aus den 50er Jahren und ihre Wiederaufnahme 1989 in einer emissionsseitig wenig veränderten Umgebung haben einen hohen wissenschaftlichen Wert, erlauben sie doch zusammen mit einigen wenigen alten Ozon-

messungen an anderen europäischen Standorten die 'Antwort' der Atmosphäre auf die zunehmenden Vorläufersubstanzen zu evaluieren. Es wird empfohlen, die Ozonmessungen in Arosa weiter zu betreiben.

Die Ozonkonzentration in Arosa ist aktuell immer noch etwa doppelt so hoch wie in den 50ern; die Differenz beträgt 30-40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  im Monatsmittel. Zwischen 1955 und 1990 nahmen die NO<sub>x</sub>-Emissionen in der Schweiz um einen Faktor 4 zu, die VOC-Emissionen um einen Faktor 2.6 (BUWAL 1988). Dies erklärt die Ozonzunahme, auch im Winter, wo Ozon aus der freien Troposphäre eingemischt werden kann.

### Regressionsanalyse

Basis für eine multiple Regressionsanalyse für die Ozonkennzahlen 1992-2018 in der Ostschweiz und Graubünden war das relativ dichte Netz von langjährigen Ozonmessungen an Stationen in praktisch unveränderter Umgebung. Es ist von hohem Wert, dieses Netz weiterzuführen. Mit kurzzeitigen Messungen können keine zeitlichen Entwicklungen evaluiert werden, was z.B. regionale Emissionsreduktionen oder Klimawandel betrifft.

Die Regressionsanalyse (Kap. 8) brachte die folgenden Ergebnisse:

- Alle **Ozon**kennzahlen (Tagesmaximum, 98%-Wert, AOT1-Wert für Wald) hängen stark und hoch signifikant von der (mittleren) Tagesmaximaltemperatur und der (nationalen) VOC-Emission ab.
- Unter Weglassung der Temperatureffekte haben die Ozonspitzenwerte in den letzten 15 Jahren etwa so abgenommen, wie die VOC-Emissionen abgenommen haben, d.h. um etwa 28% seit dem Jahr 2004.
- Das mittlere Tagesmaximum an Ozon bzw. der 98%-Wert steigen um etwa 5-6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , wenn das mittlere Tagesmaximum der Temperatur um 1 °C steigt.
- Da die VOC-Emissionen in den nächsten Jahren nicht mehr sinken, gemäß Prognose für die Schweiz sogar wieder etwas ansteigen werden ("Switzerland's Informative Inventory Report 2018 (IIR), Submission under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, Submission of March 2018 to the United Nations ECE Secretariat", BAFU, 2018) muss zusammen mit der Klimaerwärmung damit gerechnet werden, dass die Ozonbelastung in den nächsten Jahren und Jahrzehnten wieder ansteigen wird.

## Ozon in der Zukunft

Die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der Ozonspitzenbelastungen – welche gesundheitlich, landwirtschaftlich und auf den Wald bezogen relevanter sind als die Ozonmittelwerte – basiert auf Folgendem:

- als theoretische Basis die Arbeit von Gretener (2018), welche modellgestützt die VOC-Limitierung der photochemischen Ozonbildung in der Ostschweiz zeigt;
- die Prognose der zukünftigen VOC-Emissionen gemäss Switzerland's Informative Inventory Report 2018 (IIR), Submission under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution sowie weiteren Überlegungen von Ostluft und BAFU;
- die schweizerischen Klimaszenarien: In "Climate Scenarios for Switzerland", National Centre for Climate Services, November 2018, wurden mögliche Erhöhungen der mittleren Sommertemperatur für jeweils dreissigjährige Phasen angegeben: Für '2060' (2045-2075) und '2085' (2070-2100) mit Bezug zur Basis '1995' (1981-2010). Im Folgenden werden die Klimaszenarien RCP8.5 (keine weiteren Klimaschutzmassnahmen) und RCP 4.5 verwendet, für die Gebiete CHNE (Nordostschweiz) und CHAE (Alpen Ost). Das Klimaszenarium RCP4.5 geht ebenfalls wie das 'optimistische' Szenario RCP 2.6 von markanten Emissionsreduktionen der Treibhausgase aus, aber weniger rasch und nicht auf null Nettoemissionen absinkend (RCP = representative concentration pathways bzgl. CO<sub>2</sub>äqu.).
- die Regressionsanalyse, welche die hohe Signifikanz der Einflussfaktoren Tagesmaximumtemperatur (relevant für den Klimawandel) und VOC-Emission (Vorläufersubstanz) zeigt und die Projektion in die Zukunft erlaubt auf Basis der ersten beiden Punkte.

Im Weiteren sind noch folgende Aspekte zu erwähnen:

- Ozon wird nicht nur photochemisch gebildet, es gelangt auch durch Austausch mit der Stratosphäre und durch Ferntransporte in die bodennahe Luftschicht. In der Höhe ist dieser Einfluss grösser. Aber bei sommerlichen Schönwetterlagen wird dieser Einfluss betragsmässig klein, bei sommerlichen Schönwetterlagen kommt die Strömung typischerweise gerade nicht vom Atlantik.
- Biogene VOC (insbesondere Isopren) spielen bei der Ozonbildung eine Rolle. Über ihren Anteil im Verhältnis zu den anthropogenen VOC gibt es unterschiedliche Angaben. Ihre Emission steigt mit zunehmender Temperatur. In der Regressionsanalyse ist der mit der Temperatur zunehmende Einfluss der biogenen VOC implizit in den Koeffizienten der Temperaturabhängigkeit der Ozonspitzenbelastungen enthalten.

Beim Klimaszenarium RCP8.5 (kein Klimaschutz) steigt die **mittlere** tägliche Ozonspitze im Sommer bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts um etwa 20-30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  an, bis zum Ende des Jahrhunderts um 30-50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Dabei gibt es nach wie vor eine grosse jährliche Variabilität aufgrund der Witterungsbedingungen.

Ohne weitere Klimaschutzmassnahmen (RCP8.5) steigt die Belastung mit photochemischen Luftschadstoffen aufgrund des Klimawandels wieder an und übertrifft im Laufe des 21. Jh. die Werte der letzten 30 Jahre deutlich, in Südbünden später als in der Ostschweiz aufgrund des stärkeren Rückgangs seit den neunziger Jahren.

Mit weiteren Klimaschutzmassnahmen mit einem moderaten Zeitablauf (RCP4.5) bleibt die Belastung mit photochemischen Luftschadstoffen trotz Klimawandel gesamthaft etwa auf dem Niveau der letzten 30 Jahre, bzw. steigt vor allem in der Ostschweiz leicht an.

In allen Fällen führt eine weitere Reduktion der VOC-Emissionen zu erkennbaren Reduktionen der Ozonbelastung.

# 1. Einleitung

Die hohen Temperaturen im Sommer 2018 haben auch die Ozonkonzentrationen wieder ansteigen lassen. Die Grundfrage dabei ist, welche Ozonkonzentrationen in Zukunft zu gewärtigen sind, welche einerseits von Vorläufersubstanzen abhängig sind und andererseits von heißeren Sommern infolge des Klimawandels beeinflusst sind.

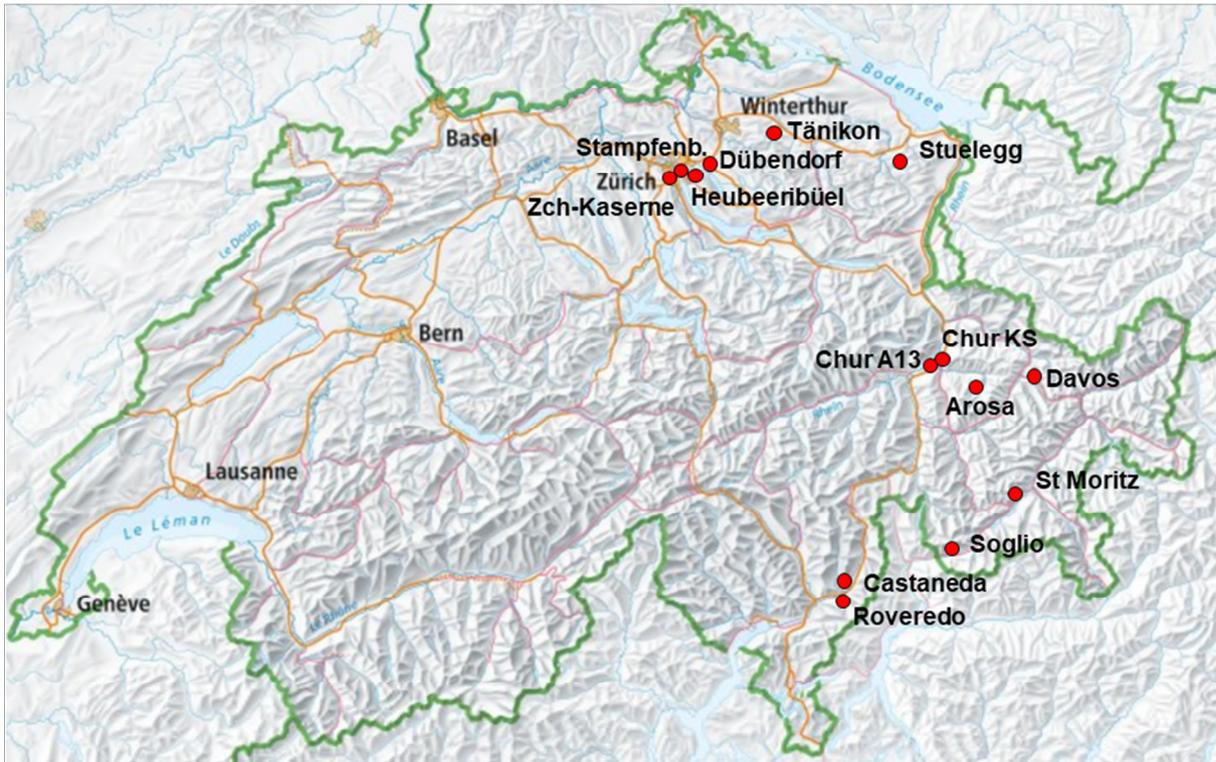
Zur Annäherung an diese komplexe Grundfrage wurden zunächst die 'Ozonsommer' 2003, 2006, 2015 und 2018 speziell betrachtet. In der Folge wurde die Abhängigkeit der mittleren täglichen Ozonspitzenkonzentrationen je Sommermonat von Einflussparametern auf der Basis multipler linearer Regression untersucht.

Auf der Basis der Regression und der Klimawandel-Prognosen für die Schweiz wurde die zukünftige Ozonbelastung für Mitte und Ende des Jahrhunderts abgeschätzt.

# 2. Überblick zu den Messstationen

Zur Untersuchung wurden 12 Ozonmessstationen herangezogen, 6 in der Ostschweiz und 6 in Graubünden. Für spezielle Fragestellungen wurden noch zwei weitere Bündner Stationen verwendet. Alle einbezogenen Messstationen waren nicht verkehrsexponiert.

Die folgende Karte zeigt einen Überblick.

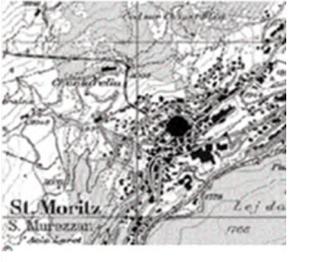


(Quelle: swisstopo JA100040).

Abbildung 2.1: Ozonmessstationen in der Ostschweiz und Graubünden.

Die folgende Auflistung zeigt die Standortcharakteristik der Ozonmessstationen.

Station	Höhe (m ü.M)	Standorttypen	Lage	Foto	
<b>Graubünden</b>					
Arosa	1840				
					
Chur Kantonsspital (KS)	665				
					

<b>Chur A13</b>	565	 			
<b>St Moritz Schulhaus</b>	1860	 			
<b>Castaneda</b>	770	 			
<b>Roveredo Municipio</b>	320	 			
<b>Soglio</b>	1100	 			

OSTLUFT					
Stuelegg (SG)	915				
					
ZH- Heuberibüel	610				
					
ZH- Stampfen- bachstrasse	445				
					
NABEL					
Tänikon	538				
					
Davos- Seehornwald	1637				
					
Dübendorf	432				
					

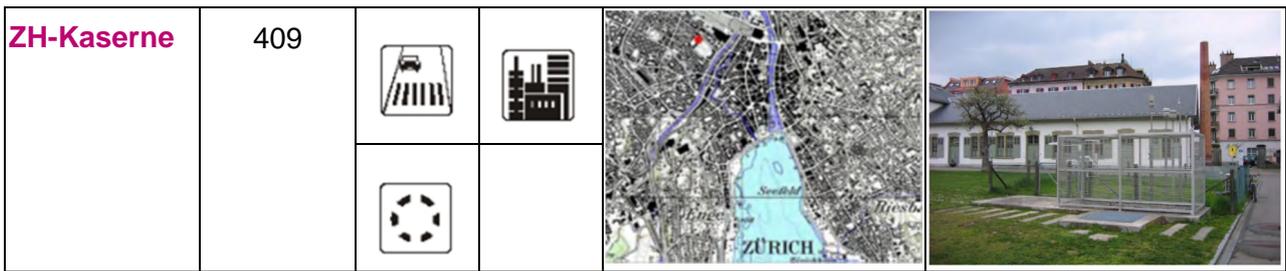


Abbildung 2.2: Standortcharakteristik der Ozonmessstationen.

Die Standorte werden mit den folgenden Icons charakterisiert:

Tabelle 2.1: Icons zur Charakterisierung von Ozonmessstationen (s. Abbildung 2.2).

nach <https://www.ostluft.ch/index.php?id=messstandorte#map=messstationen>.

Legende zu den Icons	
<p><b>Verkehr</b> Anz. Fahrzeuge / Tag. LKW's gewichtet (DTV-S)</p>	<p><b>Siedlungsgrösse</b> Bevölkerungszahl</p>
<p> <b>Hochleistungsstrasse</b> &gt;30'000</p> <p> <b>Hauptverkehrsachse</b> 10-30'000</p> <p> <b>mässiger Verkehr</b> &lt;10'000</p> <p> <b>kein Verkehr</b> abseits der Strasse</p> <p> <b>Flughafen</b></p>	<p> <b>Grossstadt</b> &gt;150'000</p> <p> <b>Stadt oder Agglomeration</b> 20-150'000</p> <p> <b>Dorf</b> 1-20'000</p> <p> <b>"Weiler"</b> &lt;1'000</p> <p> <b>ohne Siedlung</b> abseits von Siedlungen</p>
<p><b>Lage zur Siedlung</b> Zentralitätsfaktor</p>	<p><b>Spezialinformationen</b> Belüftung, Topographie</p>
<p> <b>Zentrum</b></p> <p> <b>Wohngebiete</b></p> <p> <b>Randzone</b></p>	<p> <b>Hochlagen</b> über 1000m</p> <p> <b>Hügelzone</b> Hang- und Kuppenlagen</p> <p> <b>Staulagen</b></p>

Für eine erste grobe Einschätzung der Ozonsituation an den untersuchten Standorten werden die jährlichen höchsten Stundenwerte von 1992-2018 dargestellt.

Ganz generell ist von 1992 bis etwa 2009 eine Abnahme zu sehen, danach finden sich etwa konstante Ozonkonzentrationen. Der Wiederanstieg von 2016-2018 ist deutlich zu sehen.

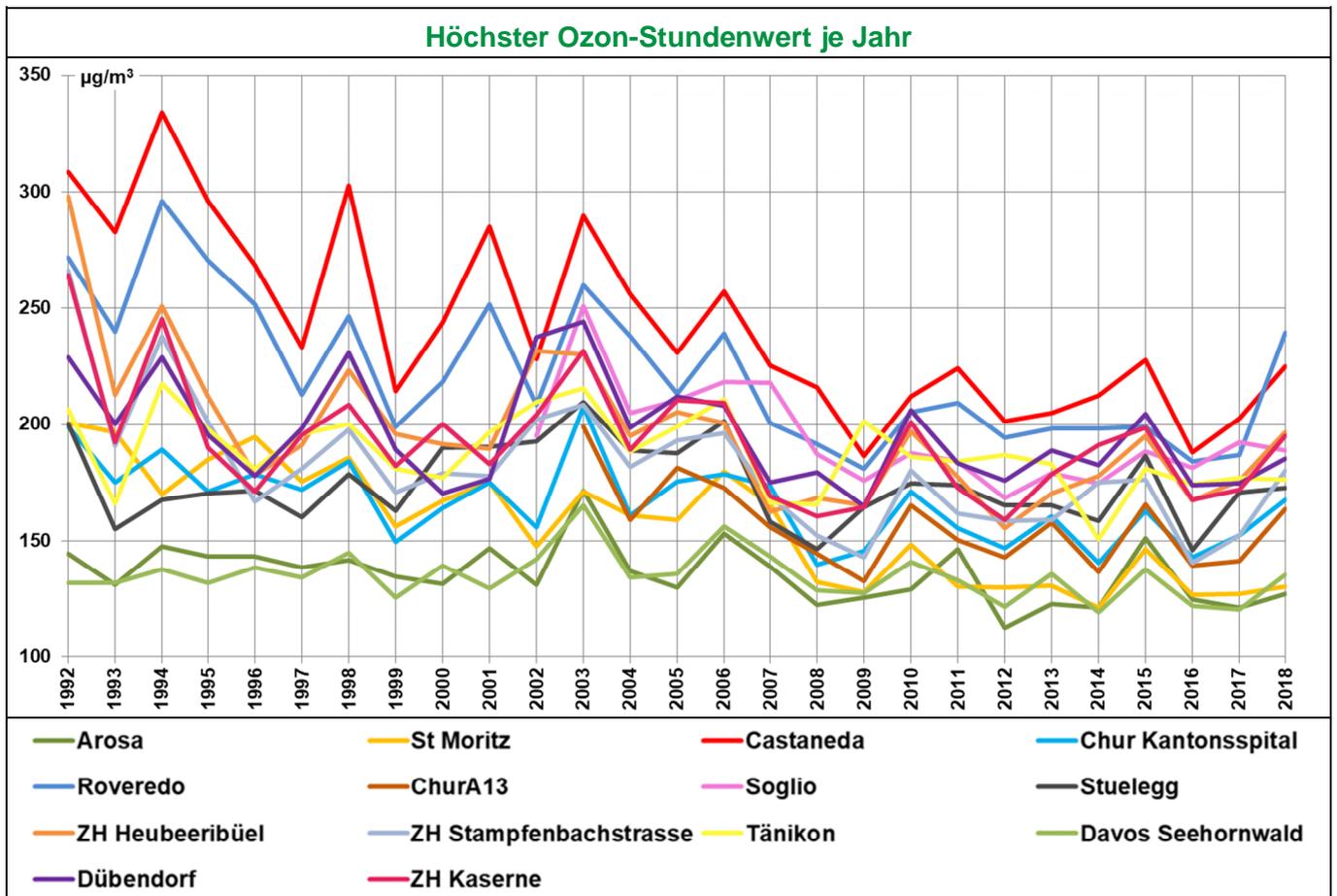


Abbildung 2.3: Höchster Ozon-Stundenwert je Jahr für die untersuchten Standorte, 1992-2018.

### 3. Vergleich der vier Ozonsommer

Von den erreichten Ozonwerten her kann man für die letzten 27 Jahre von 4 'Ozonsommern' mit besonders hoher Ozonbelastung sprechen: 2003, 2006, 2015, 2018. Der Sommer bezieht sich dabei immer auf die Monate Juni, Juli und August. In den Ozonsommern war dabei nicht unbedingt jeder Monat stark mit Ozon belastet.

Beim Ozon sind die Spitzenwerte gesundheitlich relevanter als die Mittelwerte; eine wichtige Kennzahl ist dabei das tägliche Stundenmaximum. In Analogie dazu ist das tägliche Temperaturmaximum eine Kennzahl für 'Hitze'. Bildet man über die letzten 27 Sommer (Juni-August) die entsprechenden monatlichen Kennzahlen (mittlere tägliche Maxima von Ozon und Temperatur), so kann man die folgende Reihenfolge der so definierten heissesten Monate von 1992 – 2018 festlegen (Top 15):

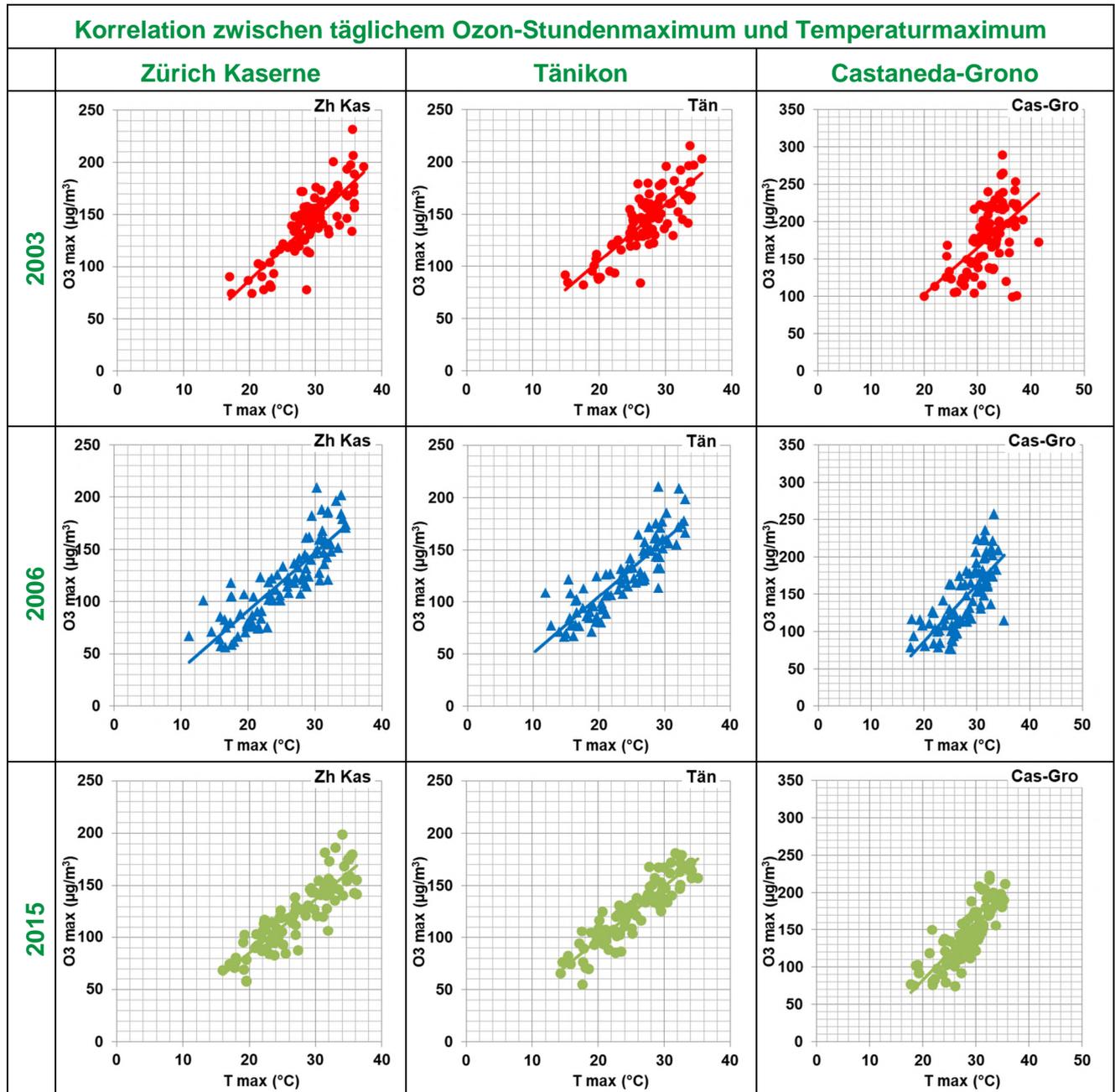
**Tabelle 3.1: Heisseste Monate je Standort von 1992-2018, basierend auf dem mittleren täglichen Temperaturmaximum.**

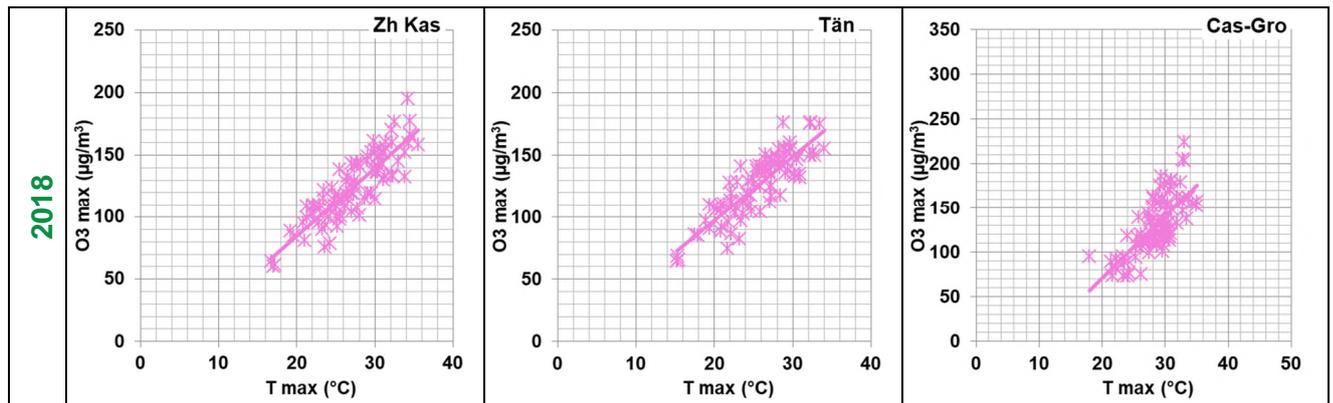
Rang	Tmax Tänikon	Tmax Arosa	Tmax Grono	Tmax Samedan
1	Jul 2006	Jul 2006	Aug 2003	Aug 2003
2	Aug 2003	Jul 2015	Jun 2003	Jul 2015
3	Jun 2003	Aug 2003	Jul 2003	Jul 2006
4	Jul 2018	Jun 2003	Jul 2015	Jul 1994
5	Jul 2015	Jul 2013	Jul 2010	Jun 2003
6	Jul 1994	Aug 2015	Jul 2018	Jul 1995
7	Aug 2015	Aug 2009	Jul 2006	Jul 2010
8	Jul 2013	Aug 2012	Aug 2012	Jul 2013
9	Aug 2018	Jul 2010	Aug 1991	Aug 1992
10	Aug 1992	Aug 2011	Jul 2013	Jul 2003
11	Jul 1995	Aug 1992	Aug 2009	Jul 2018
12	Jul 2010	Jul 1995	Jul 1994	Aug 2009
13	Aug 2009	Jul 1994	Jul 2005	Aug 2012
14	Jul 2003	Jul 2003	Jul 2012	Aug 2015
15	Aug 1997	Jun 2002	Aug 2018	Aug 1994

Es gibt deutliche regionale Unterschiede: In Tänikon (repräsentativ für die Ostschweiz) und Grono (Südalpen) kommen Juli und August 2018 in den Top 15 vor,

in Arosa keiner der beiden Monate, im Engadin (Samedan) wenigstens der Juli 2018.

In jedem Sommer zeigt sich eine starke Korrelation zwischen täglichem Ozon-Stundenmaximum und Temperaturmaximum.





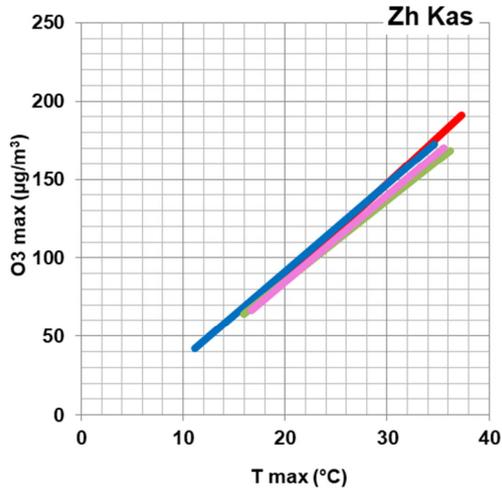
**Abbildung 3.1: Tägliches Ozon-Stundenmaximum  $O_3_{max}$  und Temperaturmaximum  $T_{max}$  von Zürich Kaserne, Tänikon und Castaneda (Meteo Grono) für die Sommermonate Juni, Juli und August 2003, 2006, 2015 und 2018. Jeder Sommer hat 92 Tage.**

Die Korrelation zwischen  $O_3_{max}$  und  $T_{max}$  ändert sich im Lauf der Jahre. Die nächste Abbildung fasst die obige Abbildung zusammen, indem nur die jeweiligen Trendlinien je Jahr gezeigt werden.

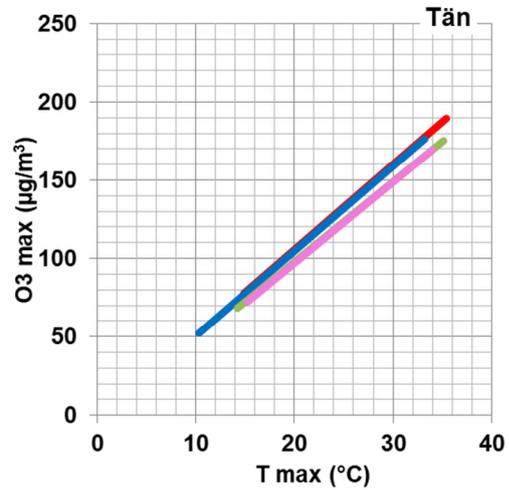
Das Ozonmaximum bei einem bestimmten Temperaturmaximum (z.B. 30 °C) hat über die Jahre abgenommen, deutlich auf der Alpensüdseite und in den Bündner Bergen, nur wenig in der Ostschweiz. Dabei kam es vor allem zu einer Parallelverschiebung der Trendlinien (= grundsätzlich etwas weniger Ozon), die Neigung der Trendlinien (= Ozonzunahme bei Temperaturzunahme) hat sich nur im Engadin erkennbar verändert.

### Korrelation zwischen täglichem Ozon-Stundenmaximum und Temperaturmaximum je Standort für die 4 Ozonsommer

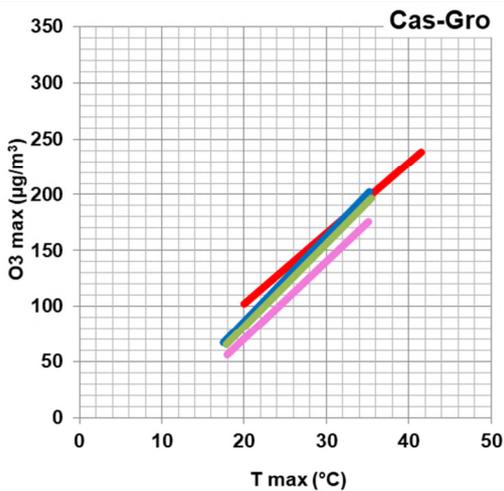
#### Zürich Kaserne



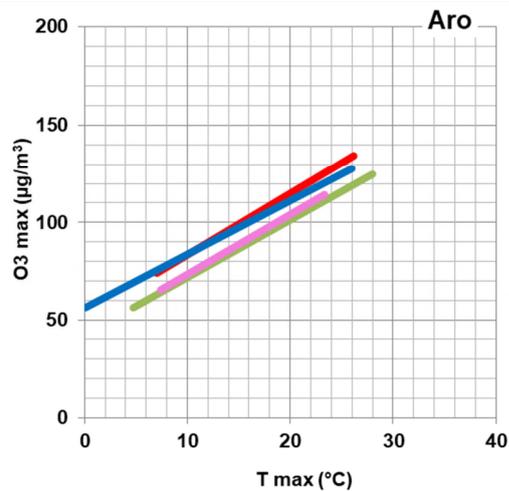
#### Tänikon



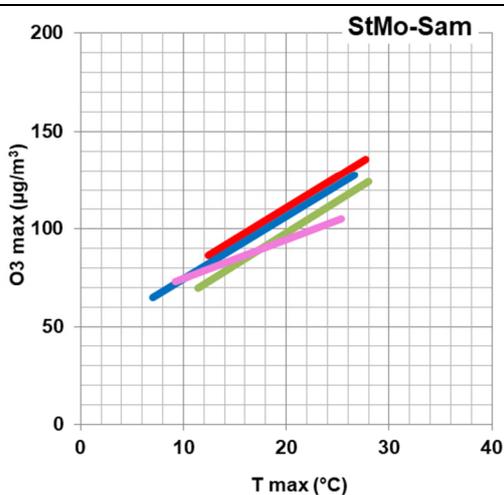
#### Castaneda-Grono



#### Arosa



#### St. Moritz-Samedan



— 2003    — 2006  
— 2015    — 2018

Abbildung 3.2 (letzte Seite): Trendlinien zwischen täglichem Ozon-Stundenmaximum und Temperaturmaximum je Standort für die 4 Ozonsommer 2003, 2006, 2015 und 2018 bei Zürich Kaserne, Tänikon, Castaneda (Meteo Grono), Arosa und St. Moritz (Meteo Samedan).

Die folgenden Grafiken zeigen den Verlauf der Tageswerte O<sub>3</sub>max (tägliches Ozonmaximum) und Tmax (tägliches Temperaturmaximum) über die Sommermonate der 4 Ozonsommer an drei ausgewählten Standorten.

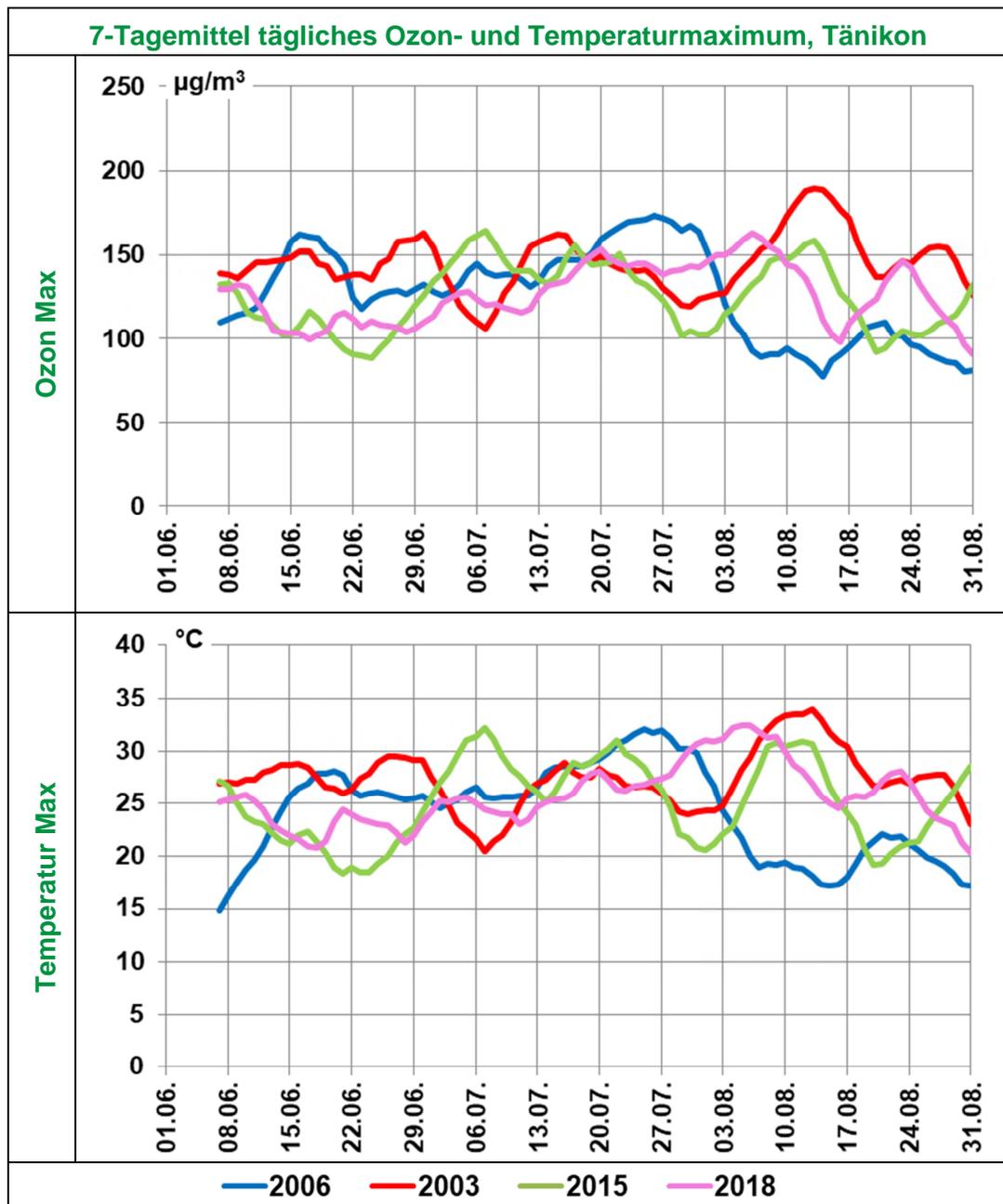


Abbildung 3.3: Gleitendes 7-Tagemittel von O<sub>3</sub>max (oben) und Tmax (unten) für Tänikon, Sommermonate 2003, 2006, 2015 und 2018.

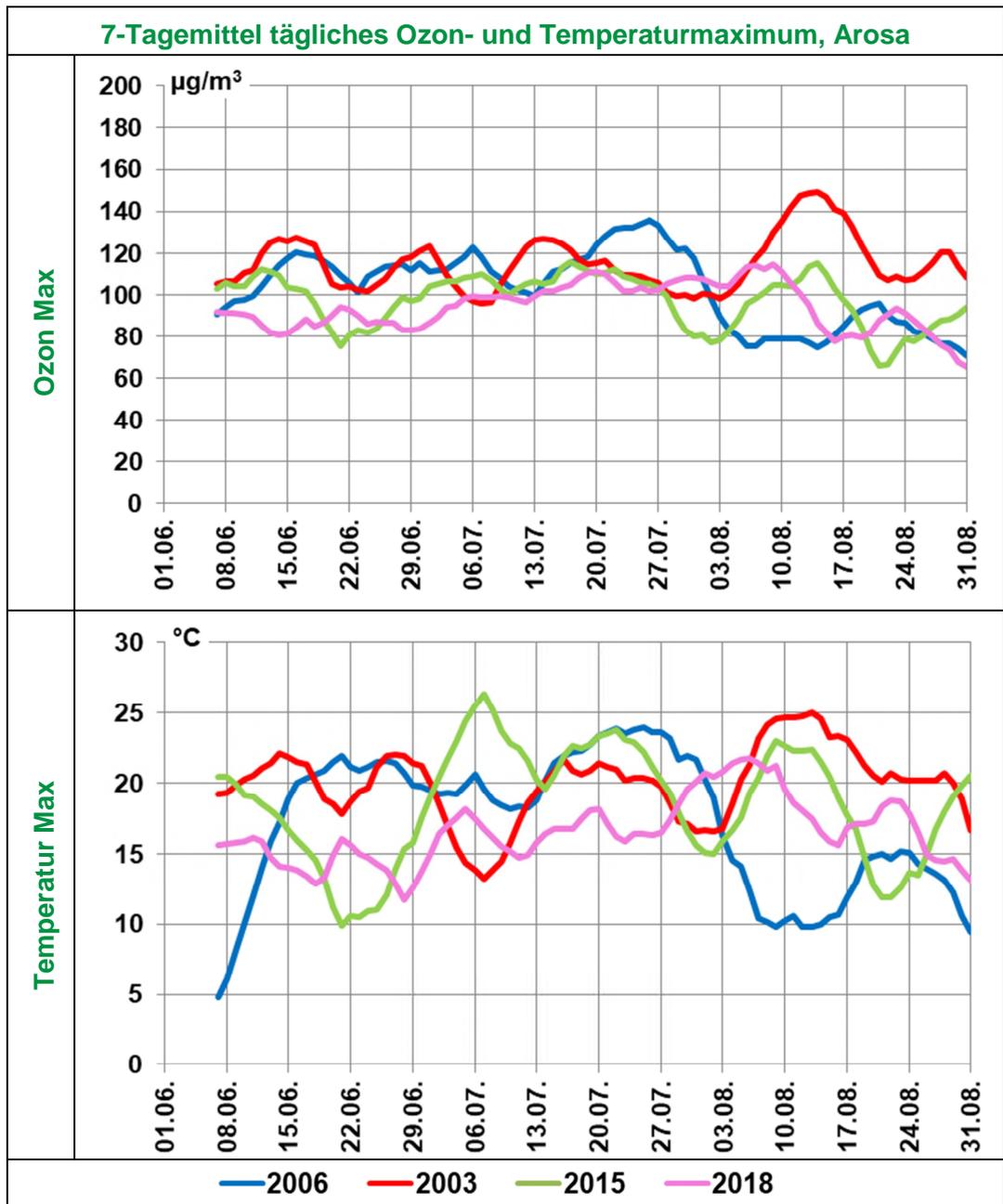
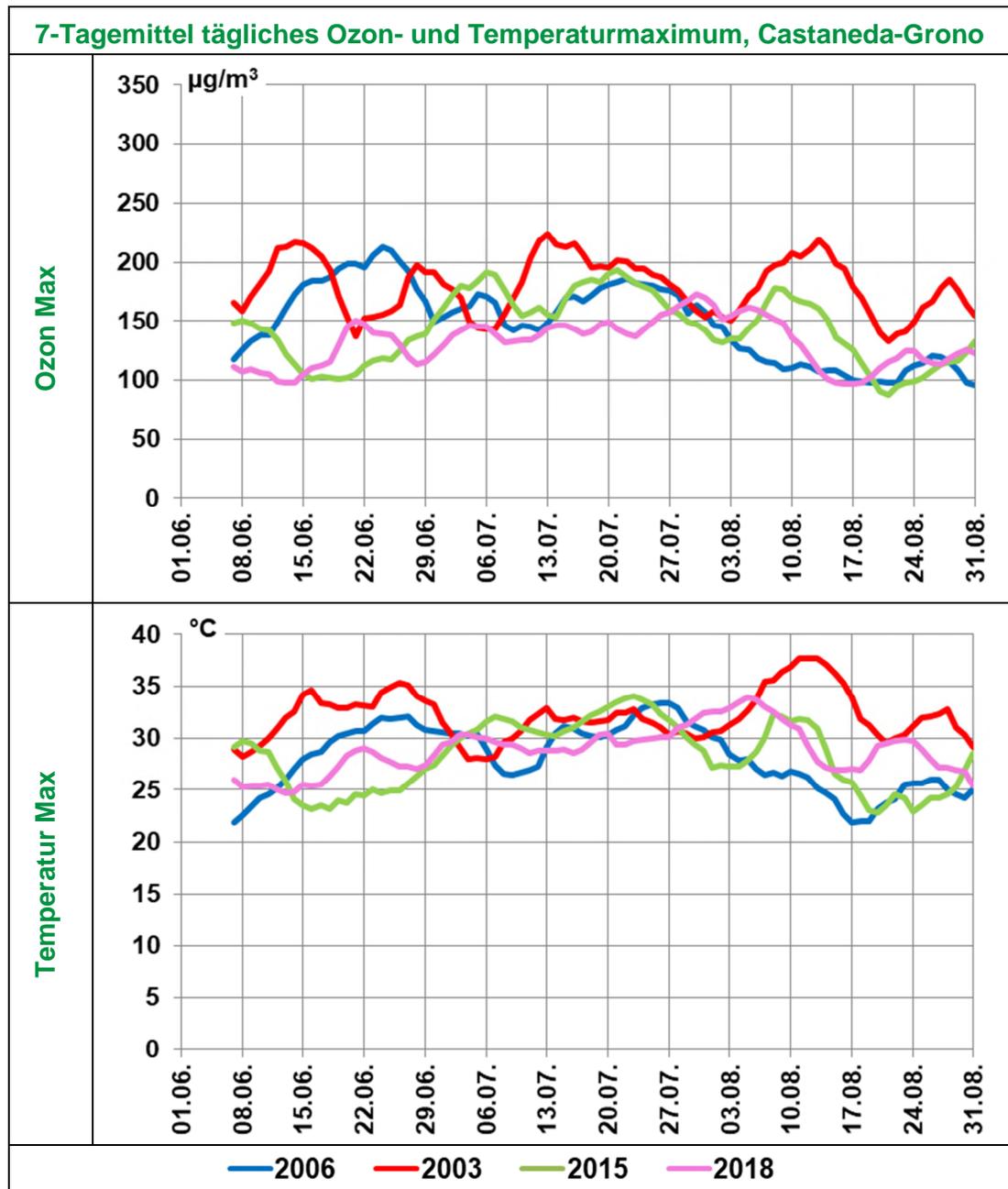


Abbildung 3.4: Gleitendes 7-Tagemittel von O<sub>3</sub>max (oben) und T<sub>max</sub> (unten) für Arosa, Sommermonate 2003, 2006, 2015 und 2018.

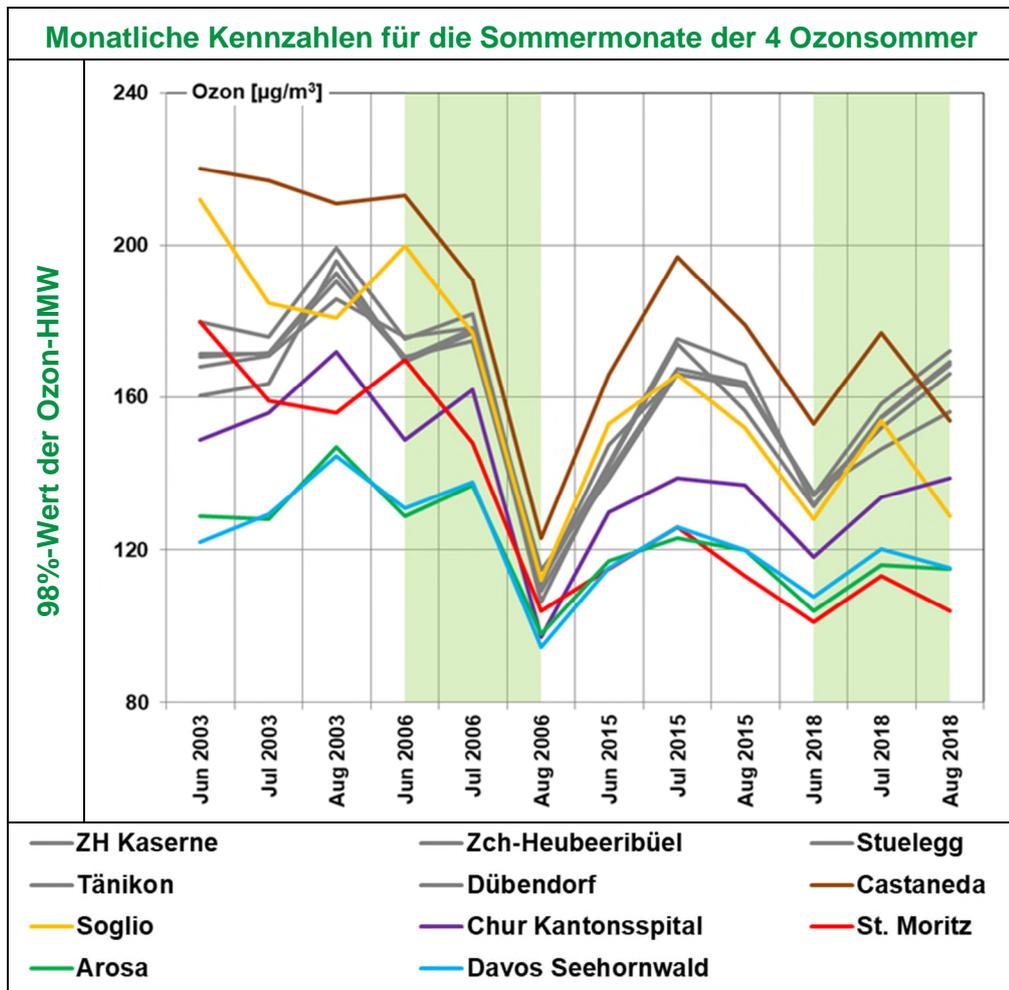


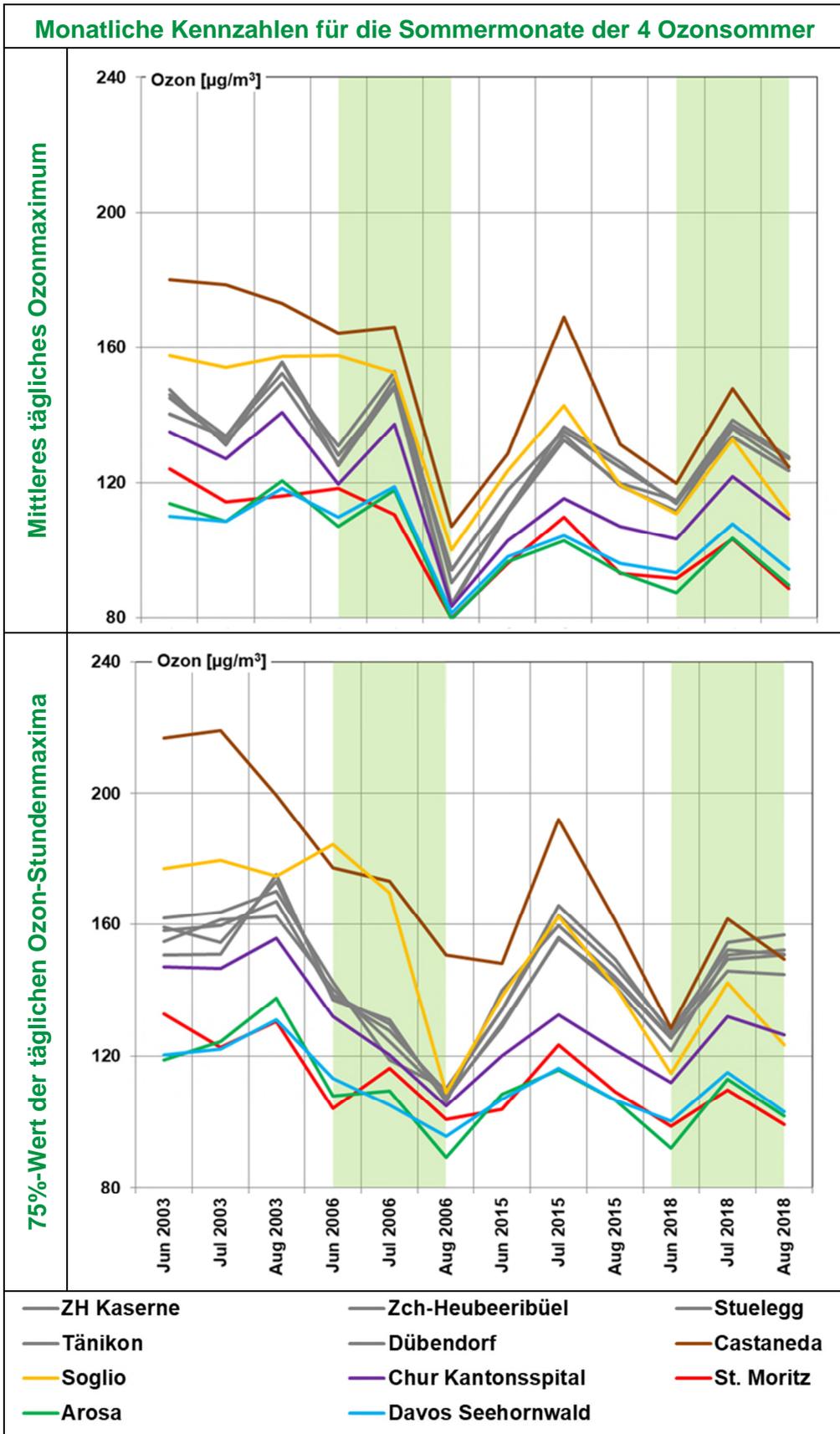
**Abbildung 3.5: Gleitendes 7-Tagemittel von O<sub>3</sub>max (oben) und T<sub>max</sub> (unten) für Castaneda (Meteo Grono), Sommermonate 2003, 2006, 2015 und 2018.**

Die Ostschweiz wie auch die Bündner Südalpen zeigen einen guten Gleichlauf zwischen Ozon- und Temperaturmaximum über alle vier Ozonsommer, wobei die Ozonwerte für 2003 jeweils ein Stück höher liegen. Nord- und Mittelbünden zeigen diesen Gleichlauf generell auch, aber eine deutlich geringere Ozonvariation im Vergleich zur doch starken Temperaturvariation.

Die Betrachtung monatlicher Ozonkennzahlen (98%-Wert der halbstundenwerte, Mittelwert bzw. 75%-Wert der täglichen Ozonmaxima) für die 4 Ozonsommer brachte drei Hauptergebnisse:

- Die Ostschweizer Stationen unterscheiden sich kaum, unabhängig von ihrer Umgebung (Besiedlung, Strassenverkehr). Lediglich die Station ZH-Stampfenbach zeigte stets tiefere Werte als die anderen Zürcher Stationen, wahrscheinlich aufgrund des starken Oberflächenkontakts der Luft im Umfeld der Messstation.
- Die Bündner Bergstationen in Nord- und Mittelbünden unterscheiden sich kaum, liegen auf markant tieferem Ozonniveau als die Ostschweiz.
- Die Bündner Südalpenstationen liegen auf markant höherem Ozonniveau als die Ostschweiz, nähern sich allerdings der Ostschweiz immer mehr an.





**Abbildung 3.6 (letzte Seiten): Monatliche Ozonkennzahlen für die 4 Ozonsommer 2003, 2006, 2015 und 2018. 98%-Wert (oben), mittleres tägliches Stundenmaximum (Mitte), 75%-Wert der täglichen Stundenmaxima (unten). Alle Ostschweizer Standorte haben graue Kurven.**

Die Station Chur-Kantonsspital, am Westhang oberhalb der Stadt Chur gelegen, zeigt einen Gleichlauf mit den Ostschweizer Standorten, aber stets tiefer. Der Abstand zu den Ostschweizer Standorten hat sich seit 2015 markant vergrößert, also eine markant stärkere Ozonabnahme bei Chur als in der Ostschweiz. Die Frage bleibt im Raum, weshalb.

Einen Sonderfall stellen das Oberengadin und das Bergell dar. Bei den täglichen Ozonmaxima war St. Moritz schon immer im Bereich von Arosa und Davos. Bei den 98%-Werten (= 14 Stunden pro Monat) war St. Moritz bis 2006 jedoch deutlich höher als in Arosa und Davos. Bei St. Moritz gab es selten, aber doch immer wieder 'Ozonschwälle' in Sommernächten; diese sind nach 2006 ausgeblieben. Es wäre interessant zu wissen, weshalb: Hat sich das Strömungsfeld geändert, oder beinhalten diese Schwälle keine im Vergleich zu Arosa und Davos erhöhten Ozonkonzentrationen mehr?

Ein ähnlich abweichendes Verhalten zeigt Soglio (Bergell): War es früher manchmal ähnlich ozonbelastet wie das untere Misox, war es im Sommer 2018 weniger ozonbelastet als die Ostschweiz. Ein Teil der Erklärung liefert sicher der Umstand, dass der Sommer 2018 in den Alpen und in der Südschweiz vergleichsweise lange nicht so heiss war wie die Alpennordseite.

## 4. Einfluss von Wetterlagen-Klassen auf die Ozon-Immissionen und die Temperatur

Bestimmte Wetterlagen könnten die Entstehung von erhöhten Ozonbelastungen begünstigen. Da sich die sogenannte CAP-Klassifizierung als Wetterlagen-Klassifizierung verschiedentlich im Zusammenhang mit Luftschadstoffen gut bewährt hat, wurden die Ozon-Konzentrationen und die Temperatur bzgl. dieser Klassifizierung untersucht.

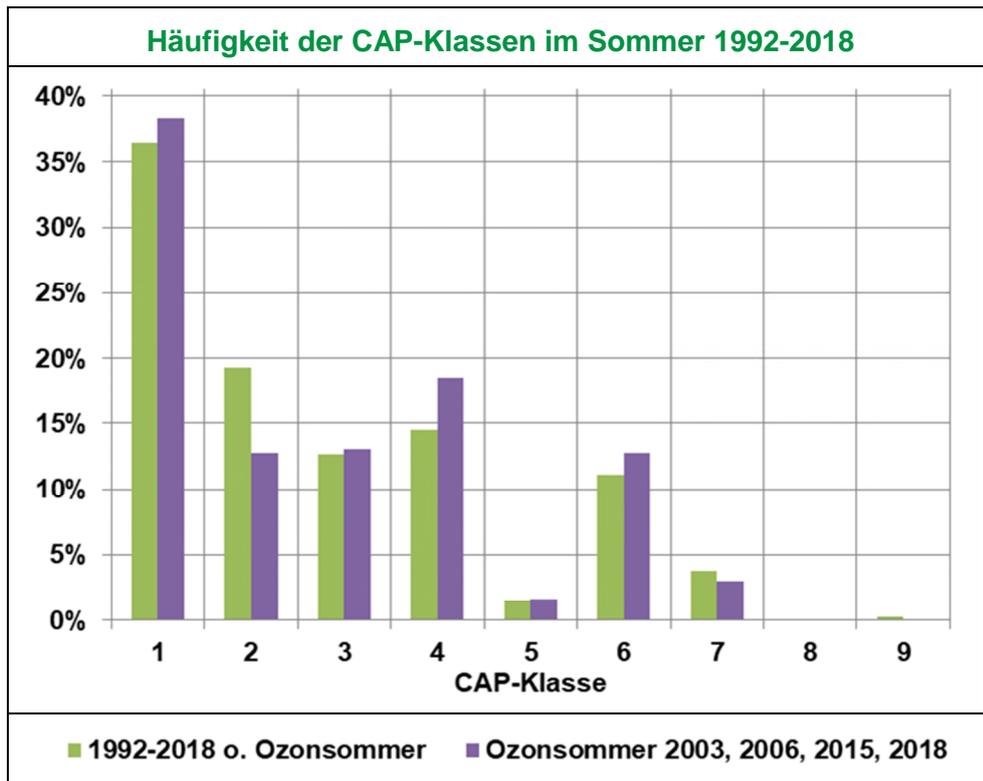
Die Wetterlagenklassen CAP ("Cluster Analysis of Principal Component") basieren auf den Analyse- und Vorhersagedaten des ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) und werden automatisch mit Hilfe der Klassifikationssoftware "cost733class" bestimmt, die im Rahmen der Cost Aktion 733 "Harmonization and Applications of Weather Type Classifications for European Regions" entwickelt wurde.

**Tabelle 4.1: Zusammenfassung der CAP-Klassen:**

<b>CAP</b>	<b>Beschreibung</b>
<b>1</b>	<b>Indifferente Nordostlage</b>
<b>2</b>	<b>Zyklonale West-Südwestlage, strömungsschwach</b>
<b>3</b>	<b>Westlage über Nordeuropa</b>
<b>4</b>	<b>Indifferente Ostlage</b>
<b>5</b>	<b>Hoch über den Alpen</b>
<b>6</b>	<b>Zyklonale Nordlage</b>
<b>7</b>	<b>Zyklonale West-Südwestlage</b>
<b>8</b>	<b>Hoch über Mitteleuropa</b>
<b>9</b>	<b>Zyklonale Westlage über Südeuropa</b>

Die 9 Klassen weisen Jahreshäufigkeiten von je 4-20% auf und treten jahreszeitlich stark unterschiedlich auf.

Werden die Häufigkeiten der CAP-Klassen während der vier Ozonsommer mit den übrigen Sommern verglichen, so treten keine grossen Unterschiede auf.



**Abbildung 4.1: Häufigkeit der CAP-Klassen (Wetterlagenklassifizierung: "Cluster Analysis of Principal Component") im Sommer (Juni-August) 1992-2018; Vergleich Ozonsommer 2003, 2006, 2015, 2018 mit den übrigen Sommern.**

Während der Ozonsommer hatte es etwas mehr indifferente (schwachwindige) Ost- und Nordostlagen und weniger strömungsschwache zyklonale West-Südwestlagen (schaueranfällig). Innerhalb der vier Ozonsommer gab es deutliche Unterschiede in den CAP-Klassenverteilungen, so dass in keiner Weise eine effektive 'CAP-Klassen-Präferenz' für Ozonsommer eruiert werden konnte.

Von 1992-2017 ist die Temperatur im Mittel angestiegen. Dieser Anstieg kann sowohl von einer Erwärmung innerhalb von CAP-Klassen herrühren als auch davon, dass wärmere CAP-Klassen häufiger geworden sind. Näherungsweise wurden diese beiden Einflüsse für jede Jahreszeit abgeschätzt: Die Erwärmung der Wetterlagen entspricht der Aufsummierung der Temperaturänderung je Wetterklasse, jeweils gewichtet mit der mittleren Häufigkeit 1992-2017. der Einfluss der Änderung der Wetterklassenhäufigkeiten entspricht der Aufsummierung der Häufigkeitsänderung je Wetterklasse multipliziert mit der jeweiligen Mitteltemperatur 1992-2017.

Der Temperaturanstieg konnte für das Beispiel Tänikon auf diese Weise wie folgt abgeschätzt werden:

**Tabelle 4.2: Temperaturzunahme 1992-2017 am Beispiel Tänikon: Aufteilung auf Erwärmung der Wetterlagen und Änderung der Wetterlagenhäufigkeiten.**

Temperaturzunahme Tänikon 1992-2017	Sommer	Herbst	Winter	Frühjahr	Jahr
	$\Delta T$ [°C]				
<b>Wärmere Wetterlagen</b>	<b>0.98</b>	<b>1.33</b>	<b>0.21</b>	<b>0.39</b>	<b>0.73</b>
<b>Änd. Wetterlagenhäufigkeit</b>	<b>-0.08</b>	<b>0.26</b>	<b>0.20</b>	<b>-0.12</b>	<b>0.07</b>
<b>TOTAL</b>	<b>0.90</b>	<b>1.60</b>	<b>0.42</b>	<b>0.27</b>	<b>0.80</b>

Im Allgemeinen hat die Änderung der Wetterlagenhäufigkeiten keinen grossen Einfluss auf die Temperaturänderung (etwa 10% des Temperaturanstiegs im Jahresmittel). Im Winter jedoch geht etwa die Hälfte der Erwärmung auf eine Änderung der Wetterlagenhäufigkeiten zurück. Am meisten abgenommen haben im Winter die CAP-Klassen 5 (Hoch über den Alpen) und vor allem 8 (Hoch über Mitteleuropa). Die CAP-Klasse 8 ist im Durchschnitt die kälteste Klasse.

Im für Ozonfragen wichtigen Sommer kommt die Erwärmung im Wesentlichen durch eine Erwärmung innerhalb der verschiedenen CAP-Klassen zustande.

## 5. Betrachtung von Stationspaaren

Stationspaare sind in dieser Untersuchung 2 Stationen, deren Lage grosse Ähnlichkeit aufweist bis auf spezifische Unterschiede, deren Effekt auf die Ozonbelastung im Vergleich gezeigt werden kann. Der Vergleich wurde zudem für zwei stark mit Ozon belastete Monate gemacht, die zeitlich weit auseinander liegen: Den August 2003 und den Juli 2018.

Der Vergleich wurde exemplarisch für die folgenden drei Paare durchgeführt:

**ZH Kaserne – ZH Stampfenbachstrasse:** Zwei Stationen in der Zürcher Innenstadt, Stampfenbachstrasse mehr verkehrsexponiert und mehr im 'Häusermeer' als Kaserne. Der Ozon-Tagesgang ist von 2003 bis 2018 deutlich flacher geworden, unterscheidet sich aber nach wie vor kaum zwischen den beiden Stadtstandorten. Der Rückgang der NO-Konzentrationen dürfte für einen geringeren Ozonabbau in der Nacht gesorgt haben.

**ZH Heubeeribüel – Chur Kantonsspital:** Beides erhöhte Stadtrandlagen, die generelle Lage (Mittelland – Alpental) und die beiden Städte allerdings unterschiedlich. ZH Heubeeribüel weist eine höhere Ozonkonzentration auf als Chur KS; der relative Tagesgang ist hier wie bei den anderen Zürcher Stationen auf 2018 flacher geworden, in Chur KS aber gleich geblieben; NO scheint da keine Rolle zu spielen. Das Tagesmaximum an Ozon tritt in Chur erst etwa um 20 Uhr ein, in ZH Heubeeribüel um ca. 15 Uhr. Dies deutet darauf hin, dass das sommerliche Ozon in Chur zu einem guten Teil herangeführt wird, mit dem Talaufwind aus der südlichen Mittellandregion.

**Roveredo – Castaneda:** Roveredo liegt im Misoxer Talboden, Castaneda im Misoxer Hangbereich gut 400 m über dem Talboden. Die Hanglage weist einen deutlich flacheren Tagesgang auf, weil der Ozonabbau in der Nacht deutlich geringer ist. Die absoluten Ozonspitzen am späten Nachmittag sind an beiden Standorten praktisch gleich. Die relativen Tagesgänge unterscheiden sich an beiden Standorten zwischen 2003 und 2018 nicht. Bildung und Abbau von Ozon verläuft also an beiden Standorten 2018 etwa gleich wie 2003, nur auf tieferem Niveau.

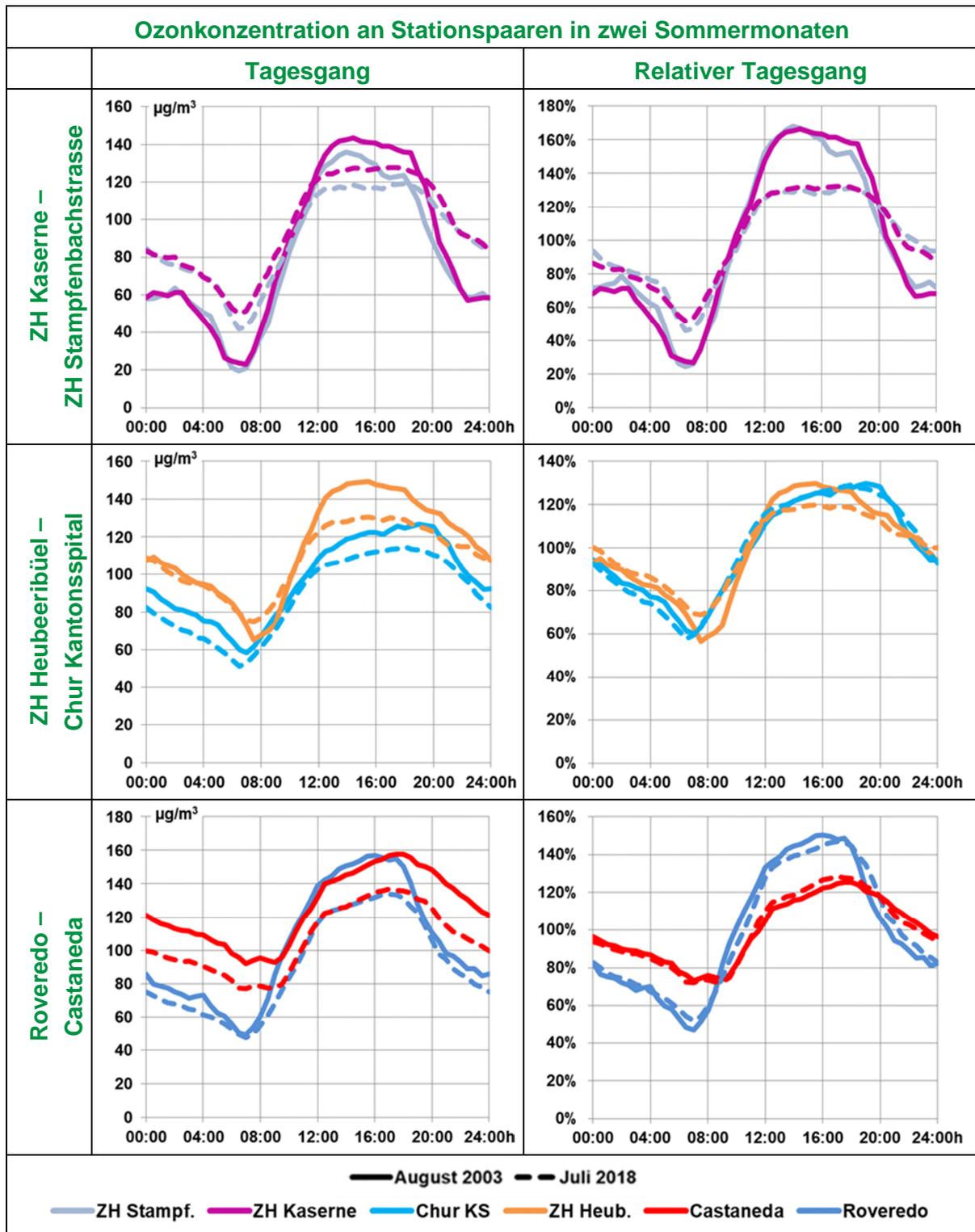


Abbildung 5.1: Mittlerer Tagesgang der Ozonkonzentration für August 2003 (ausgezogene Kurven) und Juli 2018 (gestrichelte Kurven) an sechs ausgewählten Standorten.

## 6. Vergleich der aktuellen Ozonsituation in Arosa mit den 50er Jahren

In Arosa gibt es Ozonmessungen aus den 50er Jahren (Stahelin und Thudium, 1994) am fast gleichen Ort wie die Messungen seit den neunziger Jahren im Gebiet des Tschuggen. Die Messmethode aus den 50er Jahren wurde von J. Stahelin verifiziert, die Messungen wurden von Crutzen (1988) einem Review unterzogen.

Die Messungen aus den 50er Jahren und ihre Wiederaufnahme 1989 in einer emissionsseitig wenig veränderten Umgebung haben einen hohen wissenschaftlichen Wert, erlauben sie doch zusammen mit einigen wenigen alten Ozonmessungen die 'Antwort' der Atmosphäre auf die zunehmenden Vorläufersubstanzen zu evaluieren. Eine solche Zusammenstellung wurde z.B. von Parrish et al. (2014) gegeben. Die folgende Abbildung zeigt, dass die Arosener Messungen in das Bild historischer Ozonhintergrund-Messstationen in Europa passen. Die Messungen von Arosa helfen mit, die Kurve der Ozonzunahme von 1950 (1930) bis 2000 zu stabilisieren.

Die historischen Messungen streuen zunächst ziemlich stark ((a) in der nächsten Abbildung); sie befinden sich auch in unterschiedlichen Höhenlagen. Werden Sie auf das Jahr 2000 normiert (100% = Messwert im Jahr 2000 für jede Messreihe, Abbildung (c)), liegen sie viel näher beieinander, was eine Trendkurve erlaubt. Ohne die Wiederaufnahme der Messungen gegen Ende des 20. Jh. wäre diese Normierung nicht möglich gewesen. Es wird empfohlen, die Ozonmessungen in Arosa weiter zu betreiben. Bei allfällig notwendigen Standortwechseln braucht es Parallelmessungen über eine längere Zeit, welche sorgfältig ausgewertet werden sollten.

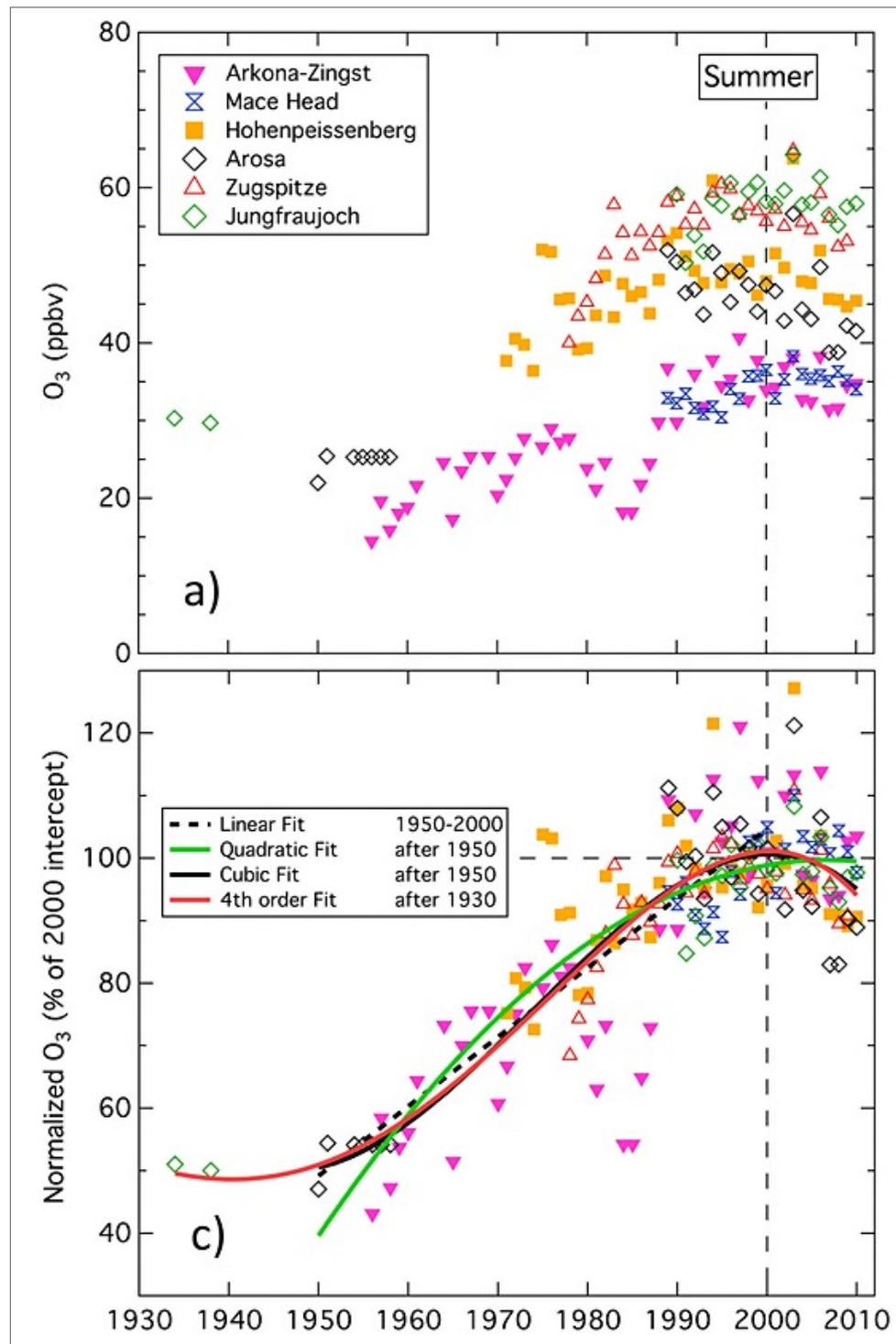


Abbildung 6.1: Saisongemitteltes, sommerliches  $O_3$ -Mischungsverhältnis (a) gemessen und (c) diese Ergebnisse auf das Jahr 2000 normiert. Die Kurven in der Abbildung c sind 'least square polynomial fits' an normierte Ergebnisse von allen Standorten; diese Kurven beinhalten die in Abb. c notierten Jahre der Daten. Die schwarz gestrichelte Linie zeigt die linearen kleinsten Quadrate an, die zu allen Daten von 1950 bis 2000 passen. Entnommen aus: Parrish et al. (2014).

Der jahreszeitliche und tageszeitliche Ozonverlauf bei Arosa wird im Folgenden mit den 50er Jahren verglichen. Es werden fünf Phasen verglichen: 1950-58, 1990-1996, 1997-2004, 2005-2011 und 2012-2018. So interessant die enorm hohen Ozonbelastungen im 2003 waren, so störend sind sie bei der Betrachtung der Entwicklung über die letzten 30 Jahre; denn sie resultierten allein aus speziellen meteorologischen Gegebenheiten, welche sich (bis dahin) nur alle paar Jahrzehnte wiederholten; sie werden deshalb in der Betrachtung dieses Kapitels weggelassen.

## 6.1. Vergleich des jahreszeitlichen Ozonverlaufs

Der jahreszeitliche Verlauf wird durch die Monatsmittel wiedergegeben.

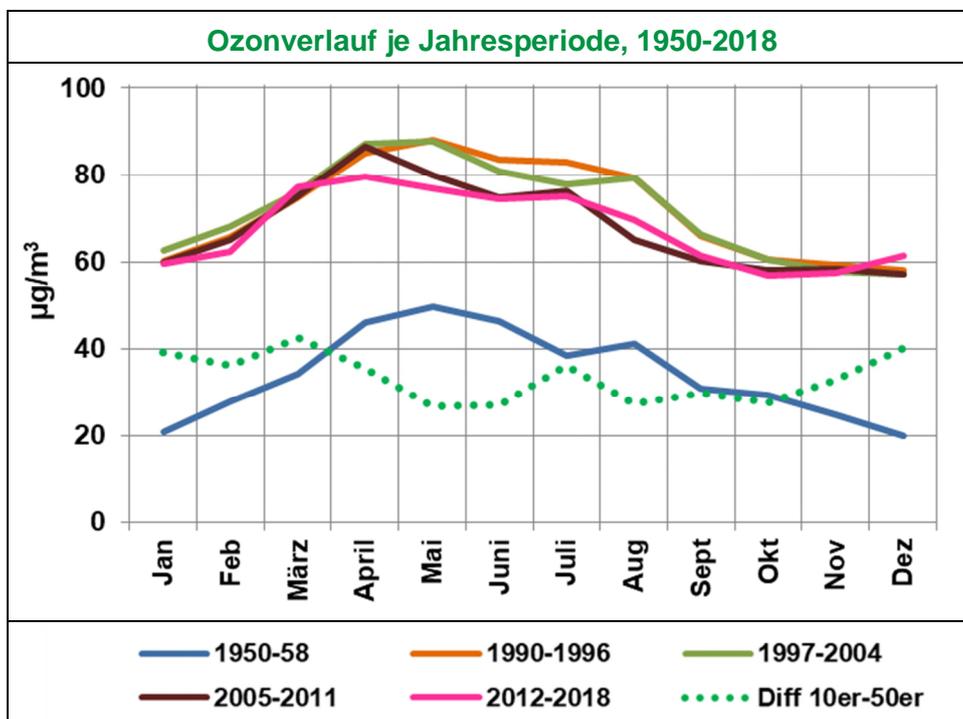
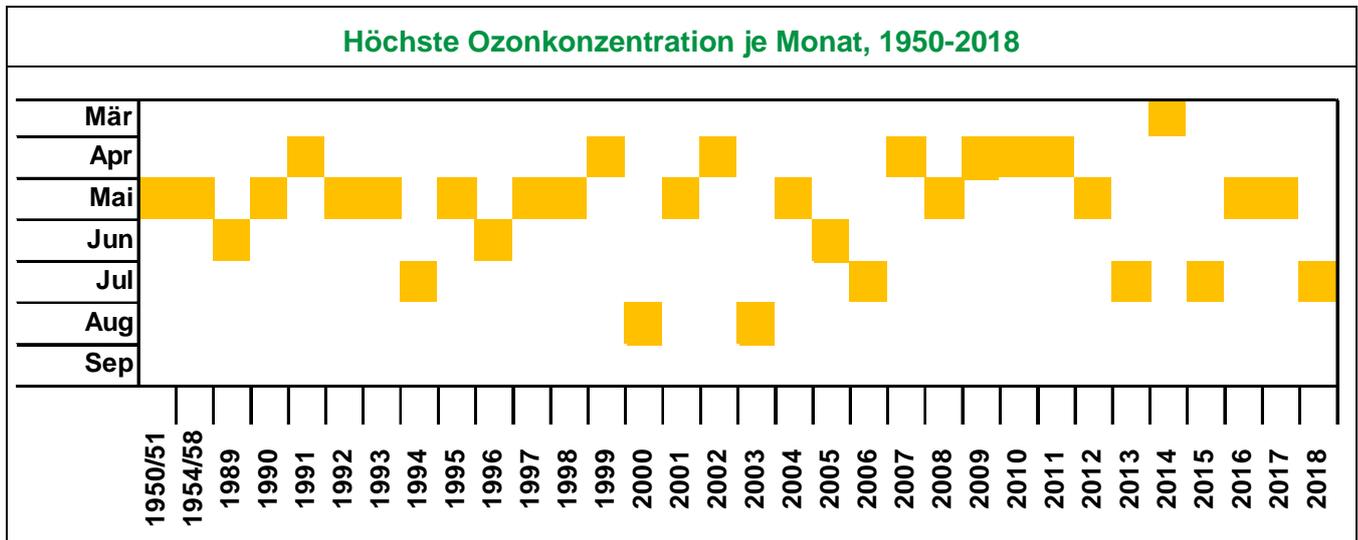


Abbildung 6.2: Ozonverlauf in Arosa, Monatsmittel von 1950 – 2018 (ohne 2003).

Innerhalb der letzten 30 Jahre lässt sich ein Ozonrückgang von April-Oktober erkennen. Von November-März sind die Unterschiede nur gering. Aber nach wie vor ist die Ozonkonzentration immer noch etwa doppelt so hoch wie in den 50ern; die Differenz beträgt 30-40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  im Monatsmittel. Zwischen 1955 und 1990 nahmen die NO<sub>x</sub>-Emissionen in der Schweiz um einen Faktor 4 zu, die VOC-Emissionen um einen Faktor 2.6 (BUWAL 1988). Dies erklärt die Ozonzunahme, auch im Winter, wo Ozon aus der freien Troposphäre eingemischt werden kann.

Die Differenz zwischen den 10er-Jahren (2010-2018) und den 50ern ist im Winter am höchsten.

Der Monat mit der höchsten Ozonkonzentration ist immer noch überwiegend der Mai (Ozoneintrag aus höheren Schichten), im 2013, 2015 und 2018 war es der Juli, im 2014 der März.



**Abbildung 6.3: Monat mit der höchsten Ozonkonzentration, Arosa 1950 – 2018.**

Der Sommer 2014 war kühl und regnerisch, das mag den März als Spitzenmonat erklären (viel Eintrag aus der Stratosphäre ist in diesem Monat zu vermuten).

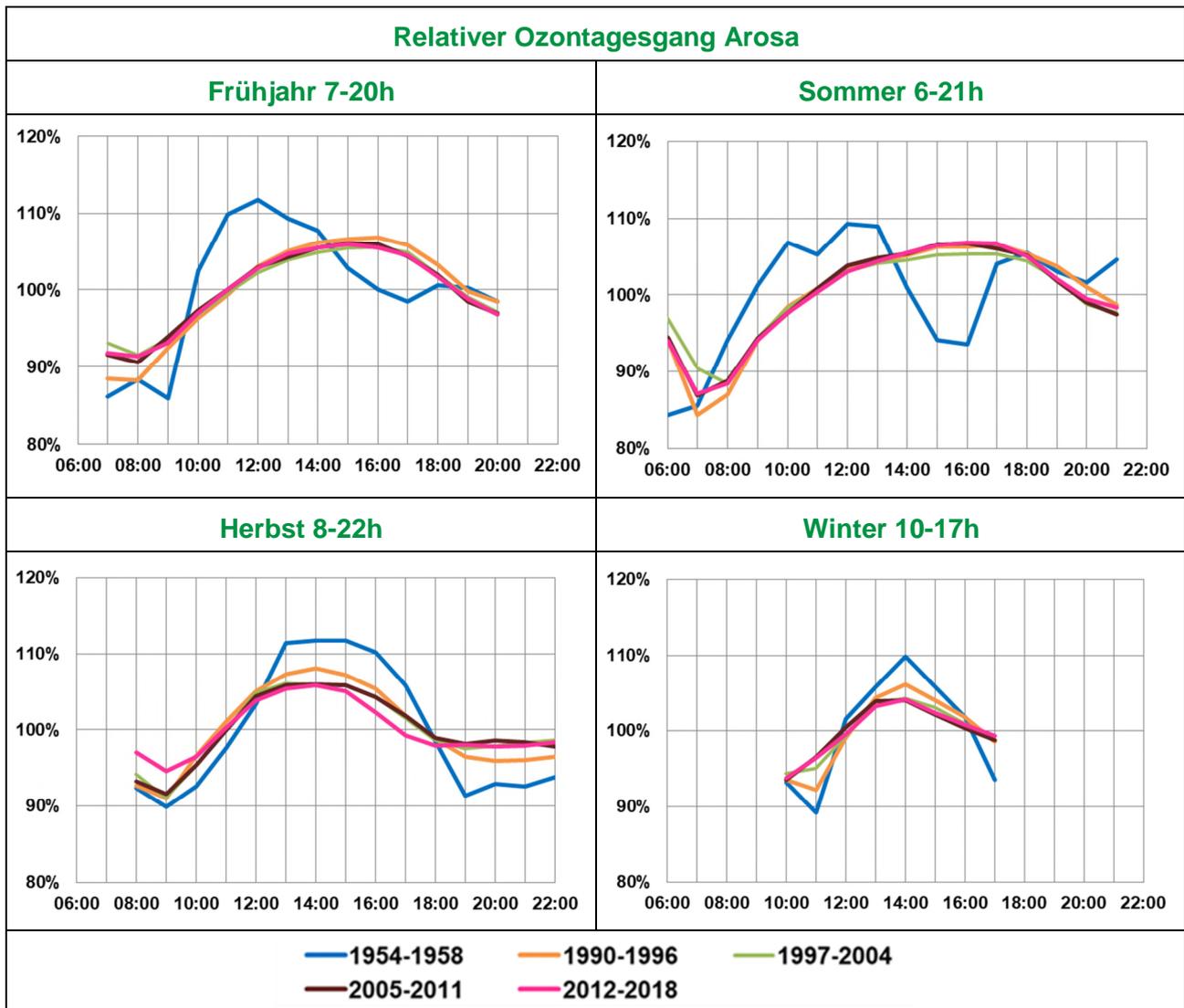
## 6.2. Vergleich des tageszeitlichen Ozonverlaufs

Bereits von 1954-58 waren die Ozonmessungen zeitlich so dicht, dass mittlere Tagesgänge je Saison gebildet werden konnten. Da es sich um Handmessungen handelte, beschränkten sich die Messungen auf die hellen Zeiten, die je nach Saison unterschiedlich lang waren. Im Folgenden werden relative Tagesgänge gezeigt; der Wert von 100% entspricht dem Mittelwert für jede Jahreszeit je Zeitfenster.

“Die mittleren Tagesgänge der Ozonkonzentration in Arosa haben sich über die letzten 50 Jahre im Frühjahr und Sommer grundlegend geändert. Das Tagesmaximum ist nun 4 Stunden später, und die beiden Maxima im Sommer, von Perl (1965) mit lokaler Konvektion (erstes Maximum) und Aufwinden im Schanfigg (zweites Maximum) erklärt, sind nun verschwunden. Heute wird der Tagesgang von photochemisch produziertem Ozon dominiert, welches mit den Talaufwinden nach Arosa transportiert wird.“ (aus Staehelin und Thudium (1994), aus dem Englischen

übersetzt). In den letzten 30 Jahren hat sich der relative Tagesgang des Ozons im Frühjahr und Sommer kaum mehr verändert.

Im Herbst und Winter ist der Tagesgang seit den 50er-Jahren deutlich und innerhalb der letzten 30 Jahre nochmals etwas flacher geworden. Dies weist darauf hin, dass das kontinental in höheren Luftschichten vorhandene Ozon etwas bedeutender geworden ist.



**Abbildung 6.4: Relative Tagesgänge der Ozonkonzentration in Arosa je Saison, 1954 – 2018 (ohne 2003).  
100% = Mittelwert je Saison und Zeitfenster.**

## 7. Literaturzusammenstellung zur Entwicklung des troposphärischen Ozons

Sowohl die Trendanalyse wie auch die Prognose für die zukünftige Entwicklung stellen stark auf die Rolle der Vorläufersubstanzen ab. Zentrale Bedeutung hatte dabei die Bachelorarbeit von Flavia Gretener (2018). Diese und weitere Arbeiten zu dieser Frage werden im Folgenden kurz diskutiert. In einem ersten Teil wird die Arbeit von Gretener anderen Arbeiten zum Einfluss der VOC auf die Ozonbildung gegenübergestellt (Kap. 7.1). Im zweiten Teil wird die wissenschaftliche Bedeutung der historischen und gegenwärtigen Ozonmessungen in Arosa GR aufgezeigt (Kap. 7.2). Im dritten Teil werden verschiedene Modelle zur Abschätzung der zukünftigen Ozonentwicklung vorgestellt (Kap. 7.3). Bei einigen Zusammenfassungen mit spezieller Relevanz für die vorliegende Studie wurde im Anschluss ein Kommentar gegeben.

### 7.1. Literatur zur NO<sub>x</sub>- und VOC-Limitierung der Ozonbildung

Von **Flavia Gretener** ("Turnaround in the Ozone Trend: A Shift from VOC- to NO<sub>x</sub>-Limitation?", ETH Zürich, **2018**) wurden Simulationsmodelle zum Ozon im Raum Zürich für 6 Jahre zwischen 1991 und 2015 berechnet. Die Ozonstationen zum Vergleich mit Messungen waren ZH-Kaserne und Dübendorf. Es ergaben sich recht gute Übereinstimmungen zwischen Messungen und Modellergebnissen: Über Zürich etwa gleichbleibende Ozonspitzenwerte und zunehmende Ozonmittel wegen höherer Konzentrationen in der Nacht, in Dübendorf (Agglomeration) leicht abnehmende Ozonspitzen. Die nur leichten Änderungen in den Ozonspitzenwerten bei abnehmenden Vorläuferkonzentrationen wurden mit zunehmender Effizienz der Ozonbildung ('production efficiency') erklärt. Diese Effizienz hatte bis etwa 2005 zugenommen. Das Regime der Ozonbildung ist nach wie vor VOC-limitiert. Weitere Ozonreduktionen würden eine weitere Reduktion der Vorläufer-VOC bedingen.

Eine wegweisende Betrachtung zur Rolle der Vorläufersubstanzen bei der Ozonbildung wurde **1991 durch den National Research Council in den USA** zusammengestellt in der Studie „Rethinking the Ozone Problem in Urban and Regional Air Pollution“. Isoplethen-Diagramme wurden analysiert. Diese Diagramme, die für städtische Gebiete mit Laborexperimenten oder Modellen erstellt wurden (entweder EKMA (empirical kinetic modeling approach) oder dreidimensionale, gitterbasierte

Modelle), zeigen, dass das Ausmaß der Reduktion von Ozonspitzen, das sich aus der Reduktion von Vorläuferemissionen ergibt, vom anfänglichen VOC / NO<sub>x</sub>-Verhältnis abhängt.

Die Isoplethen sind ein geeignetes Mittel zur Darstellung der komplexen Beziehung zwischen den Anfangskonzentrationen flüchtiger organischer Verbindungen (VOCs) und Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) und den anschließend über chemische Reaktionen in der Troposphäre gebildeten Peak-Konzentrationen von Ozon. Es wurde nachgewiesen, dass die einzige wichtige troposphärische Ozonquelle die Photolyse von NO<sub>2</sub> ist, so dass die Verringerung des verfügbaren NO<sub>x</sub> direkt zu einer Abnahme des Ozons führt. Wenn das System auf NO<sub>x</sub>-limitiert ist, sind Ozonkonzentrationen weder auf eine Reduktion von VOC bei konstantem NO<sub>x</sub> noch auf die VOC-Zusammensetzung sensitiv. Es wurde auch bekannt, dass die Senkung der VOC bei konstantem NO<sub>x</sub> zu niedrigeren Ozonspitzen führt (charakteristisch für urbane Gebiete). Es ist nicht nur die Menge an VOC und NO<sub>2</sub>, die für Ozon verantwortlich ist, weitere Punkte sind relevant, wie zum Beispiel:

- Die Empfindlichkeit gegenüber chemischen Mechanismen;
- Die Empfindlichkeit gegenüber der VOC-Zusammensetzung.

Die Vorläufersubstanzen VOC und NO<sub>x</sub> wirken auch auf andere sekundäre Luftverschmutzungen wie:

- partikuläres (anorganisches) Nitrat
- salpetrige Säure
- Peroxyacetylnitrat
- NO<sub>3</sub> und N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> und andere nitrierte Komponenten
- sekundäre organische Partikel und Säuren.

In **Martin et al. (2004)** werden Erkenntnisse aus dem satellitengestützten Remote Sensing zum Verständnis der Ozonbildung herangezogen. Danach ist das Verhältnis von Formaldehyd zu troposphärischem NO<sub>2</sub> ein Indikator für die relative Empfindlichkeit des Oberflächenozons gegenüber Emissionen von Stickoxiden und VOCs. Die Diagnose aus diesen weltraumgestützten Beobachtungen soll weitgehend mit dem gegenwärtigen (2004) Verständnis über die Ozonchemie an der Erdoberfläche basierend auf In-situ-Beobachtungen übereinstimmen. Danach ist das Oberflächenozon empfindlicher gegenüber NO<sub>x</sub>-Emissionen denn VOC in den meisten kontinentalen Regionen der Nord-Hemisphäre im Sommer. Ausnahmen waren Los Angeles und Industriegebiete Deutschlands. Im Herbst hingegen wird das Oberflächenozon weniger empfindlich gegen NO<sub>x</sub> und empfindlicher gegen VOCs.

*Kommentar: 'Industriegebiet' ist offensichtlich sehr weiträumig aufzufassen, wenn man die VOC-Limitierung der Ozonbildung in der gesamten Ostschweiz betrachtet.*

In **Steiner (2008)** wurde die Reaktivität von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) in Zentral-Kalifornien mit einem photochemischen Luftqualitätsmodell (CMAQ) und Bodenmessungen untersucht zur Evaluation des Beitrags der VOC zur photochemischen Aktivität. Die VOC wurden dabei in vier Kategorien eingeteilt: anthropogen, biogen, Aldehyde und andere mit Sauerstoff angereicherte VOC.

In Zentral-Kalifornien sind 30 - 50% der modellierten urbanen VOC-Reaktivität auf Aldehyde zurückzuführen und auf andere mit Sauerstoff angereicherte Spezies und diese gesamte Reaktivität entspricht nahezu der anthropogenen VOC-Reaktivität. In ländlichen Vegetationsregionen dominieren die biogene Reaktivität und die Aldehydreaktivität. Dies weist darauf hin, dass mehr Aufmerksamkeit bzgl. mit Sauerstoff angereicherten VOC, insbesondere Formaldehyd und andere Aldehyde, erforderlich ist, was ihre Beiträge zur Reaktivität der Atmosphäre betrifft.

## 7.2. Literatur zur wissenschaftlichen Bedeutung der Ozonmessungen in Arosa GR

Von **Stahelin, J. und Thudium, J. et al. (1994)** wurde in den Jahren 1989-1991 Ozon an vier Standorten rund um Arosa (Schweiz) gemessen. Einer dieser Standorte war identisch mit dem, an dem in den 1950er Jahren Oberflächenozon gemessen wurde (Götz und Volz, 1951; Perl, 1965). Der Vergleich alter und neuer Daten zeigt, dass die Ozonkonzentrationen an der Oberfläche von Arosa um den Faktor 2.2 gestiegen sind. Der Anstieg zeigt eine saisonale Schwankung mit einem relativen Anstieg von mehr als dem Faktor drei im Dezember und Januar. Die Ergebnisse werden im Rahmen von Messungen zu anderen Zeiten, an anderen Orten und in anderen Höhen diskutiert. Der Vergleich zeigt, dass der Anstieg der Ozonwerte bei Arosa höchstwahrscheinlich zwischen den fünfziger Jahren und heute stattgefunden hat. Die Messungen deuten zudem darauf hin, dass die photochemische Ozonproduktion in der freien Troposphäre wesentlich zu den beobachteten Ozontrends im Winter beigetragen hat.

**Lamarque, J.-F., P. Hess et al. (2005)** haben eine Reihe von Simulationen durchgeführt, um die Entwicklung des troposphärischen Ozons von 1890 bis 1990 zu be-

schreiben: Die Simulationen werden mit den verfügbaren Messungen für heutige und frühere Bedingungen verglichen. Nach unseren besten Schätzungen der Emissionen von Ozonvorläufern (basierend auf den Arbeiten von van Aardenne et al. (2001)) haben wir eine Zunahme der troposphärischen Ozonbelastung um 71 Tg zwischen 1890 und 1990 festgestellt, was einem Anstieg von ~30% entspricht. Wenn man keine anthropogenen Emissionen im Jahr 1890 berücksichtigt, erreicht diese Lasterhöhung 88 Tg. Es wird gezeigt, dass die Ozonlebensdauer um ~30% gesunken ist, besonders nach 1930. Es wird auch gezeigt, dass die Netto-Chemikalienproduktion in der unteren Troposphäre erstmals in der Periode 1950-1970 die in der freien Troposphäre übertraf. Darüber hinaus stieg die Ozonproduktion in dieser Studie zwischen 1890 und 1930 sowie zwischen 1970 und 1990 rapide an. Es wird jedoch gezeigt, dass die Effizienz der Ozonproduktion in der Troposphäre im Laufe des 20. Jahrhunderts abgenommen hat, was die Troposphäre weniger NO<sub>x</sub>-beschränkt macht. Schließlich wird ein Rückgang der OH-Belastung in der Größenordnung von 8% geschätzt, verbunden mit einer ähnlichen Erhöhung der CO-Lebensdauer.

*Kommentar: Passt gut zu den Beobachtungen in Arosa GR.*

Zwei neuere Arbeiten haben quantifizierte langfristige Ozon-Änderungen an Standorten nördlicher mittlerer Breiten beobachtet, von denen angenommen wird, dass sie die Ausgangsbedingungen für kontinentale bis hemisphärische Skalen darstellen. **Parrish, D.D. et al. (2014)** haben mit drei Chemie-Klima-Modellen (NCAR CAM-chem, GFDL-CM3 und GISS-E2-R) retrospektive troposphärische O<sub>3</sub>-Konzentrationen im Rahmen des Atmosphärischen Chemie- und Klimamodellvergleichs 'Coupled Model Intercomparison Project Phase 5' berechnet: Wir stellen einen Ansatz für quantitative Vergleiche von Modellergebnissen mit Messungen für saisonal gemittelte O<sub>3</sub>-Konzentrationen vor. Es besteht eine erhebliche qualitative Übereinstimmung zwischen den Messungen und den Modellen, aber es gibt auch erhebliche und konsistente quantitative Diskrepanzen. Insbesondere überschätzen die Modelle (1) die absoluten O<sub>3</sub>-Mischungsverhältnisse, im Durchschnitt um ~5 bis 17 ppbv im Jahr 2000, (2) erfassen nur ~50% der in den letzten fünf bis sechs Jahrzehnten beobachteten O<sub>3</sub>-Veränderungen und wenig der beobachteten saisonalen Unterschiede, und (3) erfassen ~25 bis 45% der Änderungsrate der langfristigen Veränderungen. Diese Meinungsverschiedenheiten sind signifikant genug, um darauf hinzuweisen, dass nur begrenztes Vertrauen in heutige Schätzungen des Strahlungseinflusses auf die Bildung von troposphärischem O<sub>3</sub> aus modellierten historischen Konzentrationsänderungen und auf prognostizierte zukünftige O<sub>3</sub>-Konzentrationen gesetzt werden kann. Offensichtlich ist unser Verständnis von troposphärischem O<sub>3</sub> oder der Einbeziehung von Chemie- und Transportprozessen in

aktuelle chemische Klimamodelle unvollständig. Modellerte O<sub>3</sub>-Trends etwa parallel zu den geschätzten Trends der anthropogenen Emissionen von NO<sub>x</sub>, einem wichtigen O<sub>3</sub>-Vorläufer, während gemessene O<sub>3</sub>-Veränderungen schneller zunehmen als diese Emissionsschätzungen.

*Kommentar: Im Modell-Messungen-Vergleich zeigt sich die Bedeutung der historischen Ozonmessungen in Arosa GR eindrucklich (s. Kap. zu Arosa).*

## 7.3. Literatur über Modelle zur Abschätzung der zukünftigen Ozonentwicklung

**Lacressonnière, G., Peuchc, H. et al. (2014)** haben mit einem Chemie-Transportmodell, das in zwei Richtungen verschachtelte regionale (Europa) und globale Skalen verwendet, die Auswirkungen von Klima- und Emissionsänderungen auf die Luftqualität in Europa für die 2030er und 2050er Jahre im Vergleich zu den Emissionen und dem Klima der jüngsten Vergangenheit bewertet: Wir untersuchten die Schadstoffwerte bei der Umsetzung von Reduktionen von anthropogenen Emissionen (NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, etc.) in Europa und weltweit im Rahmen des Szenarios Representative Concentrations Pathways (RCP8.5), das im Fünften Bewertungsbericht (AR5) des IPCC erstellt wurde. Die Simulationen zeigen einen Anstieg des Ozons an der Oberfläche in Nordwesteuropa und einen Rückgang in den südlichen Gebieten. In Europa steigen die durchschnittlichen O<sub>3</sub>-Werte kontinuierlich an, mit einer Rate von rund 3 µg m<sup>-3</sup> pro Jahrzehnt im Sommer. Für diesen Schadstoff wurden die Beiträge des Ferntransports über die nördliche Hemisphäre und die Klimaveränderungen bewertet und diese scheinen die Auswirkungen der europäischen Reduzierung der anthropogenen Emissionen von Vorläuferstoffen auszugleichen und sogar leicht zu überwiegen. Es wird festgestellt, dass das troposphärische Ozonbudget durch einen verstärkten Stratosphären-Troposphären-Austausch im zukünftigen Klima dominiert wird, während das chemische Budget deutlich reduziert wird. Unsere Ergebnisse zeigen, dass sich eine NO<sub>x</sub>-limitierte Ozonbildung über den größten Teil Europas erstrecken wird, insbesondere in Westfrankreich. Diese Ergebnisse ermöglichen es, effiziente Strategien zur Verringerung der Emissionen von Vorläuferstoffen zu unterstützen, um die O<sub>3</sub>-Belastung zu begrenzen und die Luftqualitätsstandards in Europa aufrechtzuerhalten oder zu verbessern.

*Kommentar: Zwar kommt das Modell auf eine ähnliche Ozonzunahme wie Oeko-science, steht aber im Widerspruch zu Gretener, 2018, wo die VOC-Limitierung der Ozonbildung basierend auf zwei Modellen dargelegt wird.*

In **Laura Watson, Gwendoline Lacressonnière et al. (2016)** wurde die Entwicklung von Ozon und Stickstoffdioxid in Europa zwischen heute und einem zukünftigen Zeitraum mit einer globalen Erwärmung von +2 °C im Vergleich zum vorindustriellen Klima anhand von vier Transportmodellen der Offlinechemie untersucht, die jeweils von einem anderen Klimamodell angetrieben werden. Angesichts des jüngsten Ergebnisses der COP21-Verhandlungen war das Verständnis der Auswirkungen des Klimawandels um den Schwellenwert von +2 °C noch nie so dringend und relevant wie heute. Eines der Ziele dieser Studie war es, aufzuzeigen, wie Veränderungen der anthropogenen Emissionen und des Klimawandels von +2 °C die zukünftige Luftqualität beeinflussen dürften, was erhebliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit haben kann. Es wurde festgestellt, dass ein Klimawandel von +2 °C allein für einen bescheidenen und nicht statistisch signifikanten Anstieg der O<sub>3</sub>-Konzentrationen an der Oberfläche (zwischen -0,1-0,8 ppb im Sommer, gemittelt über den europäischen Bereich) im Vergleich zum derzeitigen Klima verantwortlich ist. Für den zukünftigen Zeitraum wurden zwei verschiedene Emissionsszenarien verwendet, um das Ausmaß der Luftreinigungen abzuschätzen, die auftreten könnten, wenn (a) alle derzeit geplanten Luftqualitätsgesetze umgesetzt werden und (b) alle maximal technologisch machbaren Emissionsreduktionen umgesetzt werden. Die Ergebnisse zeigten, dass die Sommer-O<sub>3</sub> nach einem aktuellen Gesetzesszenario um 4 bis 5 ppb reduziert werden könnte, mit mindestens 3 ppb weiteren Reduzierungen nach dem maximal abgeschwächten Szenario. Berechnungen zur Sommer-Ozonverbesserung wurden als Metrik verwendet, um die Ergebnisse zu analysieren, nachdem die Änderungen des Hintergrund-Ozonspiegels entfernt wurden. Abschließend wurde festgestellt, dass die künftige Luftqualität auf regionaler Ebene von der Umsetzung einer wirksamen Politik zur Emissionsreduzierung abhängen wird, deren positive Auswirkungen nicht durch eine globale Erwärmung um +2 °C behindert werden sollten.

*Kommentar: Die geringe Ozonzunahme im Sommer bei +2 °C wird damit erklärt, dass die über die letzten Jahrzehnte bestehende Korrelation zwischen Temperatur und Ozon daher rührt, dass bei hoher Temperatur auch die Strahlung hoch ist und die Windgeschwindigkeit tief, Parameter die die Ozonkonzentration bestimmen würden. Dem ist entgegenzuhalten, dass die Korrelation zwischen Ozon und Tmax im Sommer wesentlich höher ist als zwischen Globalstrahlung und Ozon; dass die Windgeschwindigkeiten an ozonreichen Tagen ein breites Spektrum aufweisen; dass der Ozonbildungszyklus wie alle chemischen Reaktionen bei höherer Tempe-*

*ratur rascher ablaufen dürfte; dass die Emission natürlicher VOC mit der Temperatur ansteigt.*

Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Luftqualität werden für zwei städtische Standorte in Großbritannien, London und Glasgow, von **Maria Athanasiadou, Jonathan Baker et al. (2010)** untersucht. Stündliche meteorologische Daten wurden aus Klimasimulationen für zwei Perioden gewonnen, die das aktuelle Klima und ein plausibles Klima des späten 21. Jahrhunderts repräsentieren. Von den für die Luftqualität relevanten meteorologischen Größen wurden signifikante Veränderungen in Temperatur, spezifischer Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Wolkendecke, Sonneneinstrahlung, oberflächensensiblen Wärmefluss und Niederschlag festgestellt. Auf der Grundlage dieser Daten wurden Ausbreitungsschätzungen für eine Vielzahl von Einzelquellen vorgenommen und einige signifikante Veränderungen der Umweltauswirkungen im zukünftigen Klima festgestellt. Darüber hinaus wurden Schätzungen für zukünftige Hintergrundkonzentrationen von NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub>, Ozon und PM<sub>10</sub> gegen den Wind von London und Glasgow anhand der meteorologischen Daten in einem statistischen Modell vorgenommen. Diese zeigten für London einen Rückgang von NO<sub>x</sub> und einen Anstieg des Ozons, während ein Rückgang von NO<sub>2</sub> die größte prozentuale Veränderung für Glasgow war. Andere Änderungen waren gering. Mit diesen Hintergrundinformationen wurden die jährlichen durchschnittlichen Konzentrationen von NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub>, Ozon und PM<sub>10</sub> innerhalb der beiden städtischen Gebiete geschätzt. Für London zeigten die über eine Reihe von Standorten gemittelten Ergebnisse einen Rückgang von NO<sub>x</sub> und einen Anstieg von Ozon, aber nur geringe Veränderungen bei NO<sub>2</sub> und PM<sub>10</sub>. Für Glasgow waren die Veränderungen in allen vier chemischen Spezies gering. Großflächige Ozonhintergrundwerte aus einem globalen chemischen Transportmodell werden ebenfalls vorgestellt. Diese zeigen einen Rückgang des Hintergrund-Ozons aufgrund des Klimawandels. Um die Nettoauswirkungen sowohl großräumiger als auch lokaler Prozesse zu bewerten, sind Modelle erforderlich, die alle relevanten Größenordnungen berücksichtigen.

**Morgenstern, O., Stone, K. A. et al. (2018)** verwendeten Ozonfelder, die für die erste Phase der Chemistry-Climate Model Initiative (CCMI-1) simuliert wurden, im 6. 'Coupled Model Intercomparison Project' als Erhebungsdaten: Hier bewerten wir mit Hilfe von Referenz- und Sensitivitätssimulationen, die für CCMI-1 erstellt wurden, die Eignung der Ergebnisse des CCMI-1-Modells für diesen Prozess und untersuchen den Grad der Konsistenz zwischen den Modellen hinsichtlich ihrer Reaktionen auf Variationen in einzelnen Bereichen. Wir berücksichtigen die Einflüsse von Methan, Lachgas, einer Kombination von chlorierten oder bromierten ozonab-

bauenden Substanzen sowie einer Kombination von Kohlendioxid und anderen Treibhausgasen. Wir stellen fest, dass die Reaktionen der Modelle auf diese einzelnen Einflüsse im Ozonbereich unterschiedlich konsistent sind, einschließlich einiger erheblicher Differenzen. Insbesondere ist die Reaktion des Gesamt Ozons auf diese Verstärkungen im gesamten Multi-Modell-Ensemble weniger konsistent als Profilvergleiche.

Es wurde gezeigt, dass die Reaktionen von Gesamt Ozon, untere Stratosphäre und Oberflächen Ozon auf die hier untersuchten anthropogenen Einflüsse je nach Modell sehr unterschiedlich sind. Im Gegensatz dazu finden wir in der mittleren und oberen Stratosphäre eine konsistentere Reaktion. Dies deutet darauf hin, dass im Großen und Ganzen die Schemata der Gasphasenchemie im gesamten hier untersuchten Modell-Ensemble relativ konsistent zu sein scheinen, aber dynamische Rückkopplungen (die die Reaktionen in der unteren Stratosphäre beeinflussen) sind nicht möglich.

Wir analysieren, wie das stratosphärische Luftalter, eine häufig verwendete Variable des stratosphärischen Transports, auf die Einflüsse reagiert. Für diese Diagnose finden wir einige markante Unterschiede im Modellverhalten, die einige der Ergebnisse für Ozon erklären können. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die aus CCMI-1 abgeleiteten Ozonfelder mit erheblichen Unsicherheiten über die Auswirkungen dieser anthropogenen Einflüsse behaftet sind. Wir bieten einige Überlegungen an, wie man das Problem der Generierung einer Konsensus-Ozon-Datenbank aus einem Multi-Modell-Ensemble wie CCMI-1 am besten angeht.

Das heutige troposphärische Ozon und seine Veränderungen zwischen 1850 und 2100 wurden von **Young, Paul and Archibald, A. T. et al. (2013)** betrachtet. Sie analysieren 15 globale Modelle, die am Atmosphärenchemie- und Klimamodell-Intercomparison Project (ACCMIP) teilgenommen haben. Der Mittelwert des Ensembles ist im Vergleich zu den heutigen Beobachtungen gut. Der Saisonzyklus korreliert gut, bis auf einige Stellen in der tropischen oberen Troposphäre. Die meisten (75 %) der Modelle sind mit einer Reihe von globalen mittleren troposphärischen Ozonsäulenschätzungen aus Satellitendaten ausgestattet, aber es gibt Hinweise für eine hohe Verzerrung in der nördlichen Hemisphäre und eine niedrige Verzerrung in der südlichen Hemisphäre, was auf Wechselwirkungen mit den Ozonvorläuferemissionen hinweisen könnte. Im Vergleich zum heutigen Ensemble mit einer mittleren troposphärischen Ozonbelastung von  $337 \pm 23$  Tg ist die mittlere Belastung des Ensembles für 1850 Zeitscheiben  $\sim 30$  % niedriger. Zukünftige Veränderungen wurden anhand von Emissionen und Klimaprojektionen aus vier repräsentativen Konzentrationspfaden (RCPs) modelliert. Im Vergleich zu 2000, die rela-

tiven Veränderungen im Ensemble bedeuten troposphärische Ozonbelastung in 2030 (2100) für die verschiedenen RCPs sind: -4 % (-16 %) für RCP2,6, 2 % (-7 %) für RCP4,5, 1 % (-9 %) für RCP6,0 und 7 % (18 %) für RCP8,5. Die Modellvereinbarung über das Ausmaß der Änderung ist bei größeren Änderungen am größten. Reduzierungen der meisten Vorläuferemissionen sind in den RCPs üblich und der Rückgang des Ozons mit Ausnahme von RCP8,5, wo doppelt so viel Methan und eine 40-150 % größere stratosphärische Einmischung (geschätzt aus einer Teilmenge von Modellen) das Ozon erhöhen. Während Modelle mit einer hohen Ozonbelastung für die Gegenwart auch für die anderen Zeitbereiche eine hohe Ozonbelastung aufweisen, prognostiziert kein Modell konsistent große oder kleine Ozonänderungen; d.h. die Größen der Belastungen und Einflussänderungen scheinen nicht einfach zusammenzuhängen, und die Modelle reagieren unterschiedlich empfindlich auf Emissionen und Klimaänderungen. Räumliche Muster von Ozonveränderungen sind in den meisten Modellen gut korreliert, unterscheiden sich aber deutlich bei Modellen ohne zeitliche Entwicklung der stratosphärischen Ozonkonzentrationen. Ein vereinheitlichter Ansatz für das Ozonbudget und eine strenge Untersuchung der Faktoren, die das troposphärische Ozon antreiben, werden empfohlen, um zukünftigen Studien zu helfen, Ozonveränderungen und Intermodellunterschiede deutlicher zu beschreiben.

*Kommentar: In dieser Studie bringt der Klimawandel eine erhebliche Ozonzunahme, welche im Klimamodell RCP8,5, welches auch in der hier vorliegenden Studie verwendet wurde, den Reduktionseffekt von abnehmenden Konzentrationen an Vorläufersubstanzen deutlich überwiegt.*

Veränderungen des Klimas und der Luftschadstoffemissionen werden die zukünftige Luftqualität von globaler bis städtischer Dimension beeinflussen. In der Studie von **E. Sá, H. Martins, J. Ferreira et al. (2016)** werden mit CAMx Version 6.0 regionale Luftqualitätssimulationen für historische und zukünftige Perioden durchgeführt, um die Auswirkungen zukünftiger klimatischer und anthropogener Emissionsprognosen auf die Luftqualität über Portugal und den Großraum Porto im Jahr 2050 zu untersuchen. Das Klima und die Emissionsprognosen wurden aus dem Szenario Representative Concentrations Pathways (RCP8.5) abgeleitet. Die Modellierungsergebnisse zeigen, dass der Klimawandel die NO<sub>2</sub>-, PM10- und O<sub>3</sub>-Konzentrationen in Portugal beeinflussen wird. Die Jahresmittel für NO<sub>2</sub> und PM10 werden in Portugal und in der Gemeinde Porto steigen, und der maximale tägliche O<sub>3</sub>-Wert von 8 Stunden wird in den Vororten von Porto steigen (ca. 5%) und im Stadtgebiet sinken (ca. 2%). Bei der Betrachtung des Klimawandels und der projizierten anthropogenen Emissionen nimmt der NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwert ab (ca. 50%); der PM10-Jahresmittelwert wird in Portugal steigen und in der Gemeinde Porto sin-

ken (ca. 13%); jedoch steigen die PM10- und O<sub>3</sub>-Werte an und Extremwerte treten häufiger auf, überschreiten die derzeit gesetzlich festgelegten Jahresgrenzwerte und weisen eine höhere Häufigkeit von täglichen Überschreitungen auf. Diese Verschlechterung der Luftqualität dürfte mit den Trends für das Klima 2046-2065, das wärmere und trockenere Bedingungen voraussetzt, und mit der Zunahme der Hintergrundkonzentrationen von Ozon und Partikeln zusammenhängen. Die Ergebnisse zeigen, dass die portugiesischen Behörden und politischen Entscheidungsträger Strategien für das Management der Luftqualität entwickeln und umsetzen müssen, die den Auswirkungen des Klimawandels Rechnung tragen.

*Kommentar: In dieser Studie werden nicht nur (Sommer-)Mittelwerte betrachtet, sondern auch Kurzzeitwerte, welche deutlich zunehmen werden nach den Modellen dieser Studie.*

In der Studie von **Porter und Heald (2019)** wird die Temperatur-Ozon-Beziehung mit dem chemischen Transportmodell GEOS-Chem untersucht. Es geht dabei grossflächig um die ganzen USA und ganz Europa. Die Modellergebnisse zeigen, dass die Einflüsse von PAN-Zerlegung, Boden-NO<sub>x</sub>-Emissionen, biogene VOC-Emissionen und Trockendeposition nur etwa die Hälfte der Ozon-Temperatur-Korrelation erklären können. Die Analyse anderer meteorologischer Variablen deutet darauf hin, dass die meteorologische Kovarianz mit der Temperatur einen großen Teil der O<sub>3</sub>-Temperatur-Korrelation erklären kann - über 40% in den Vereinigten Staaten und fast 60% in Europa. Die relative Bedeutung der kovariablen atmosphärischen Dynamik deutet darauf hin, dass Simulationen, die nur Temperaturabhängigkeiten untersuchen, die gesamten O<sub>3</sub>-Einflüsse um den Faktor 2 oder mehr unterschätzen, es sei denn, temperaturbedingte Veränderungen in anderen meteorologischen Mustern werden ebenfalls einbezogen und genau dargestellt.

*Kommentar: In unserem statistischen Regressionsmodell gehen wir von der gesamthaften Beziehung zwischen Temperatur und Ozon über einen weiten Temperaturbereich und über 27 Jahre aus.*

## 7.4. Fazit

Die meisten Untersuchungen zur zukünftigen Ozonbelastung basieren auf CTM (chemischen Transportmodellen). Dabei werden überwiegend sommerliche Mittelwerte geschätzt. Ein Modell schätzt eine Zunahme kurzzeitiger Ozonbelastungen aufgrund des zukünftigen Klimawandels. Generell werden grosse Unsicherheiten in den Modellen erwähnt. Modelle, welche eine Abnahme der zukünftigen Ozonbelas-

tung abschätzen, gehen von einer NO<sub>x</sub>-Limitierung der Ozonproduktion aus, wohingegen Gretener (2018) eine anhaltende VOC-Limitierung eruiert. Auf den Ergebnissen von Gretener baut das statistische Modell der zukünftigen Ozonentwicklung in dieser Studie auf.

Hinweis: Ein Teil der zusammenfassenden Texte wurden mit [www.DeepL.com/Translator](http://www.DeepL.com/Translator) aus dem Englischen übersetzt.

## 8. Trendanalyse: Beschreibung der Ozonentwicklungen der letzten 27 Jahre mit linearer Regression

Mit Hilfe der Trendanalyse sollen die Einflüsse meteorologischer Größen von übrigen Entwicklungen und Maßnahmen getrennt werden. Im Allgemeinen werden die übrigen Entwicklungen zeitlich linear angesetzt (jedes Jahr eine bestimmte Abnahme z.B.), da man den effektiven zeitlichen Ablauf von Entwicklungen und Maßnahmen nicht kennt; so erhält man mittlere Trends.

Die atmosphärischen Bedingungen beeinflussen die Immissionen auch in den Jahresmittelwerten erheblich. Zur Ermittlung von Trends der Immissionsentwicklung mit Hilfe linearer Regression sollte dieser Einfluss explizit formuliert werden, ansonsten er sich womöglich implizit in andere Variablen einschleicht.

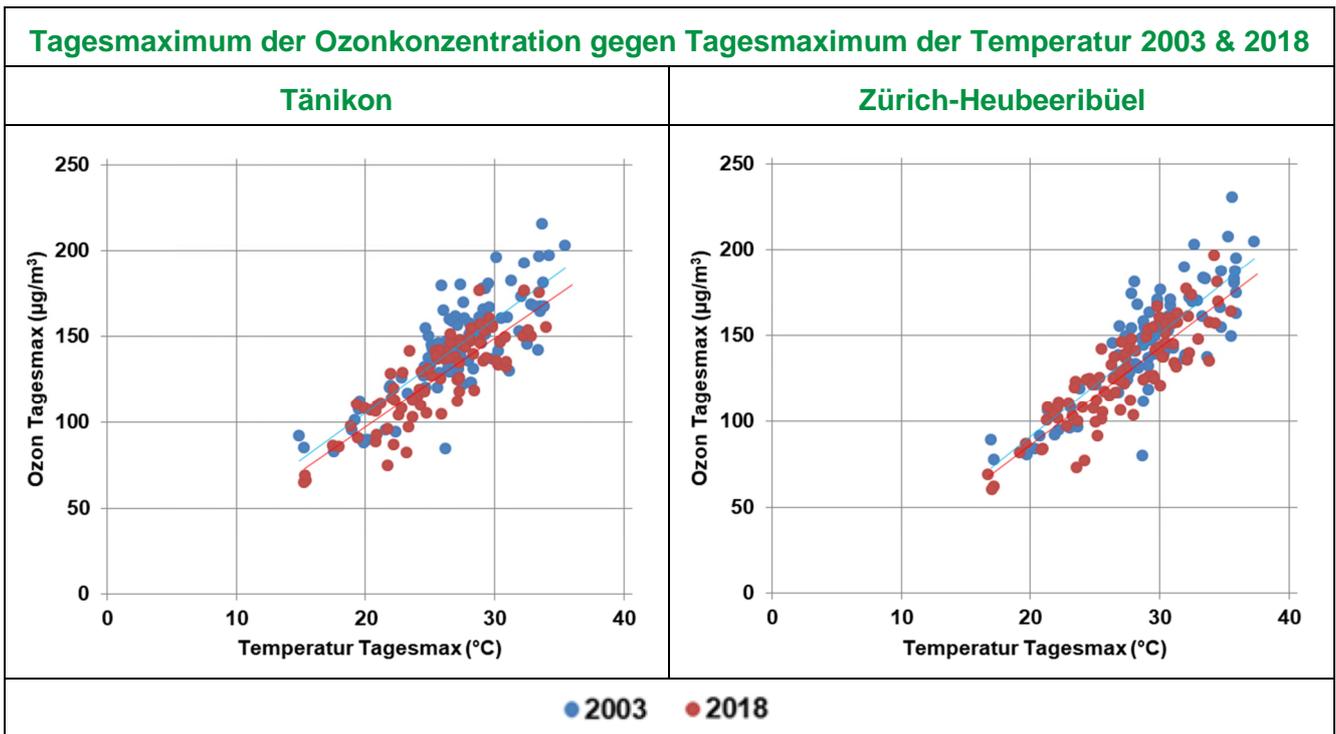
Es wurden Trends für die folgenden Kennzahlen der Ozonbelastung ermittelt:

- das mittlere tägliche Stundenmaximum von Ozon (bzw. Perzentil) je Monat im Sommer,
- die monatlichen 98%-Werte von Ozon (Grenzwert nach LRV [ $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ]) im Sommer und
- die AOT-Werte für Wald (April-September).

### 8.1. Abhängigkeit der Ozonspitzenwerte von der Temperatur

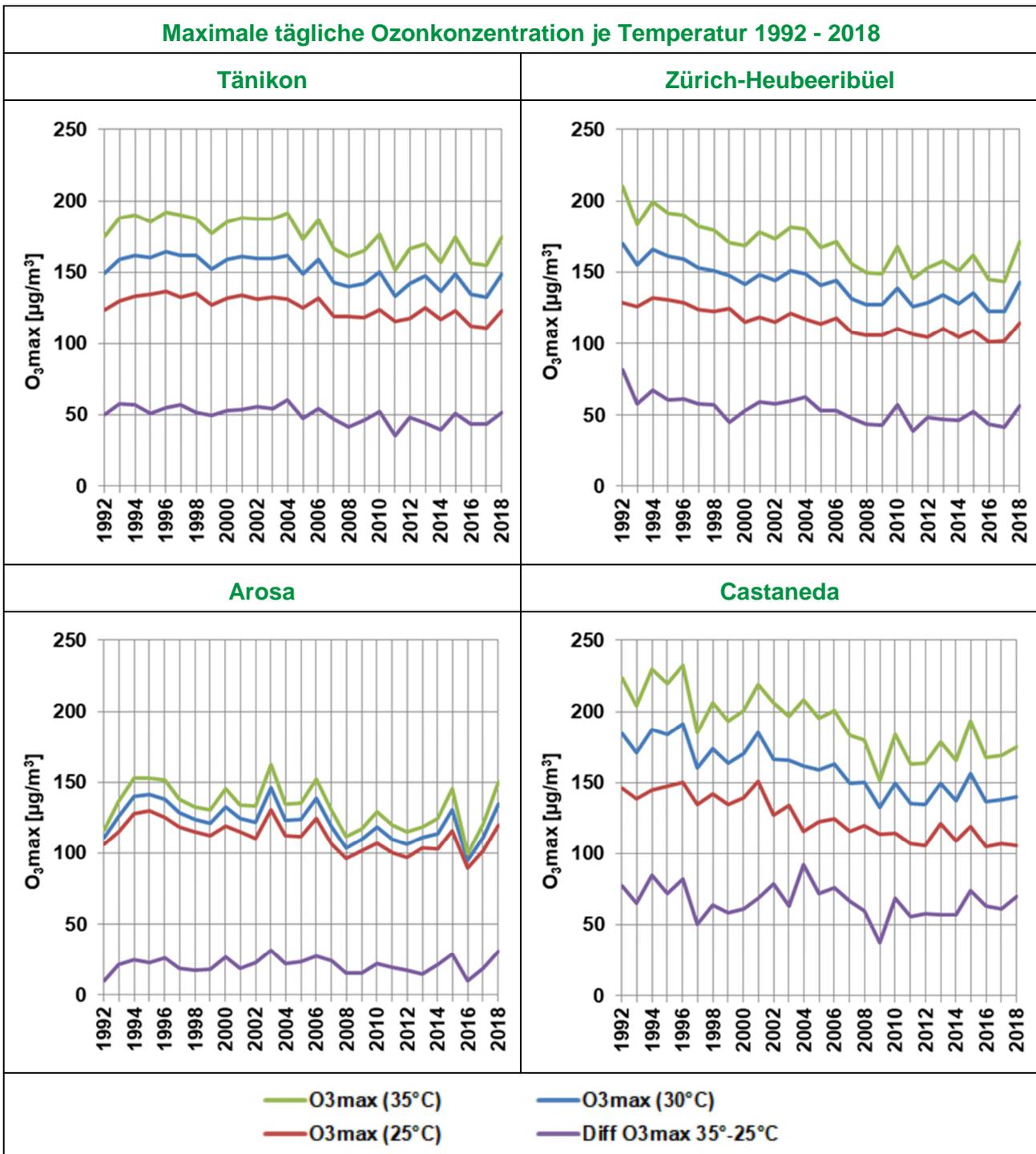
Beim Ozon wurde der Verlauf der oben angegebenen Kennzahlen untersucht. In allen Fällen besteht ein starker Bezug zu den mittleren täglichen Temperatur**maxima** im jeweiligen Sommermonat bzw. in der Phase April-September. Die Verwendung von Perzentilen statt Mittelwerten der täglichen Temperatur**maxima** führte zu deutlich schlechteren Ergebnissen und wurde deshalb verworfen.

Die Ozonbelastung ist stark vom Ausmaß der 'Sommerhitze' abhängig. Verwendet man als Mass für die Sommerhitze das mittlere tägliche Temperaturmaximum, so korreliert die mittlere tägliche Ozonspitze stark mit diesem Mass, wie die beiden folgenden Beispiele zeigen. Dies ist wenig abhängig davon, wie häufig bestimmte Temperaturbereiche in einem Sommer vorkamen, wie 'heiß' also ein Sommer insgesamt war.



**Abbildung 8.1: Tägliches Ozonmaximum gegen tägliche Maximaltemperatur für Tänikon und Zürich-Heubeeibüel, Sommer (Juni-August) 2003 und 2018.**

Die mittleren täglichen Maximalkonzentrationen an Ozon (entspricht dem Verlauf der Regressionsgeraden) je Temperaturbereich, z.B. bei 30 °C, waren im Sommer 2018 etwas geringer als 2003. Nun wurde für jedes Jahr die Beziehung zwischen O<sub>3</sub>max und TTmax abgebildet (wie oben im Beispiel für 2003 und 2018) und daraus der Verlauf von O<sub>3</sub>max (mittel) bei TTmax von 25 °C, 30 °C bzw. 35 °C hergeleitet. Diese Verläufe werden im Folgenden für vier betrachtete Ozonstationen dargestellt.



**Abbildung 8.2:** Mittleres tägliches Ozonmaximum bei einer Tagesmaximumtemperatur von 25 bzw. 30 bzw. 35 °C für Tänikon, Zürich-Heubeeibüel, Arosa und Castaneda, Sommer (Juni-August) 1992-2018.

Bei den Stationen des Mittellandes und Südbündens tauchen die Ozonsommer nicht prägnant auf, am ehesten bei Castaneda 2015. Die hohen Ozonwerte kamen also nur teilweise durch besonders viel Ozon bei einer bestimmten Temperatur zu-

stande, sondern vor allem durch besonders hohe bzw. häufig hohe Temperaturen. Anders hingegen bei Arosa (und Davos und St. Moritz): Die Ozonsommer ragen deutlich heraus, allerdings ist die Abhängigkeit von der örtlichen Temperatur nicht gross. In den höheren Lagen von Nord- und Mittelbünden sowie dem Engadin wurden die höheren Ozonkonzentrationen herangeführt, und die dortigen Temperaturen waren nicht einfach parallel zum Mittelland.

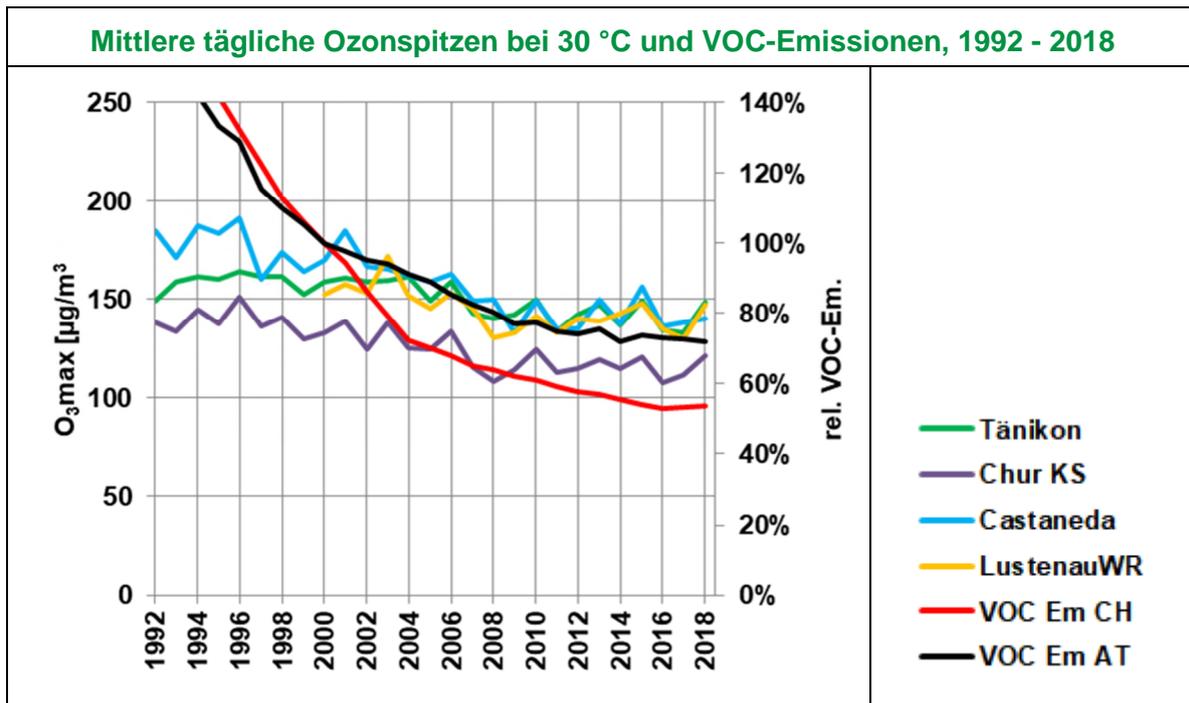
Die Ozonspitzenkonzentration bei einem bestimmten Temperatur-Tages-maximum hat über die Jahre abgenommen, in den letzten etwa 10 Jahren aber deutlich weniger als zuvor, insgesamt also nicht linear. Für die Regressionsrechnung wurde von 1992-2004 eine lineare Abhängigkeit der Ozonspitzenkonzentrationen von der Zeit postuliert.

## 8.2. Abhängigkeit der Ozonspitzenwerte von den VOC-Emissionen

Ausgehend von den Ergebnissen von Gretener (2018) – s. Kap. 7 - konnte angenommen werden, dass die Ozonbelastung ab 2005 grundsätzlich mit der regionalen VOC-Emission einhergeht, zuvor aber einem Wechselspiel von abnehmenden VOC-Emissionen und zunehmender Bildungseffizienz unterlag. Die obige Abbildung legt nahe, dass für die Phase bis 2004 eine zeitlich lineare Abnahme der Ozonspitzenkonzentration bei einer bestimmten Temperatur postuliert werden kann.

In dem Bericht "Switzerland's Informative Inventory Report 2018 (IIR), Submission under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, Submission of March 2018 to the United Nations ECE Secretariat", BAFU, 2018, können Angaben zur VOC-Emission der Schweiz seit 1990 entnommen werden. Danach hat sich die VOC-Emission zunächst stark reduziert, seit 2004 ist der Rückgang deutlich abgeschwächt, seit 2016 nehmen die VOC-Emissionen wieder leicht zu. Dies zeigt einen Gleichlauf zu den Ozonspitzenkonzentrationen seit 2005, so dass die VOC-Abhängigkeit der Ozonspitzenkonzentrationen für die Regressionsrechnung von 2005-2018 postuliert wurde.

Die folgende Abbildung zeigt die schon bekannten Verläufe der mittleren täglichen Ozonspitzen bei einer Maximumtemperatur von 30 °C und dazu den relativen Verlauf der jährlichen VOC-Emissionen der Schweiz und Österreichs.



**Abbildung 8.3: Mittleres tägliches Ozonmaximum (Stundenwert) im Sommer bei einer täglichen Maximumtemperatur von 30 °C bei Tänikon, Castaneda und Chur Kantonsspital sowie bei Lustenau Wiesenrain (AT) und relative nationale VOC-Emissionen in der Schweiz und in Österreich (100% = Emission im Jahr 2000), 1992-2018.**

Die Vorarlberger Stationen (gezeigtes Beispiel von Lustenau) passen gut in den Verlauf der Ostschweizer Stationen. Bis zum Jahr 2000 ist der Verlauf der VOC-Emissionen in der Schweiz und Österreich ähnlich, deren Abnahme ist viel stärker als beim Ozon (wegen der 'zunehmender Effizienz der Ozonbildung'). Danach korreliert der Ozonverlauf stark mit dem VOC-Verlauf im Falle Österreichs, im Falle der Schweiz ist die Korrelation erst nach 2004 hoch (nahezu paralleler Verlauf). Dies kann im Rahmen dieser Studie nicht weiter diskutiert werden.

### 8.3. Die Methodik der verwendeten linearen Regression

Für die linearen Regressionen wurden als abhängige Variable verwendet:

- das mittlere tägliche Stundenmaximum von Ozon (bzw. Perzentil) je Monat im Sommer,
- die monatlichen 98%-Werte von Ozon (Grenzwert nach LRV [100 µg/m³]) im Sommer und
- die AOT-Werte für Wald (April-September).

Es wurden also Trends und Abhängigkeiten dieser drei Größen untersucht. Basierend auf den in den beiden letzten Unterkapiteln zusammengefassten Erkenntnis-

sen wurden folgende Parameter als unabhängige (erklärende) Variablen verwendet:

**Tmax:** Mittlere tägliche Maximaltemperatur in den Sommermonaten (Juni-August), bzw. von April-September für die AOT-Werte. Dabei galt folgende Entsprechung zwischen Ozonstation und Temperaturmessstation:

**Tabelle 8.1: Zuordnung von Temperaturmessstationen zu Ozonstationen für Regressionsrechnung:**

Ozonmessstation	Temperaturmessstation
ZH-Stampfenbachstrasse	ZH-Kaserne (NABEL)
ZH-Kaserne	ZH-Kaserne (NABEL)
ZH-Heubeeribüel	ZH-Kaserne (NABEL)
Dübendorf	ZH-Kaserne (NABEL)
Tänikon	Tänikon (NABEL)
Stuelegg	Tänikon (NABEL)
Arosa	Arosa (MeteoSchweiz)
St. Moritz	Samedan (MeteoSchweiz)
Castaneda	Grono (MeteoSchweiz)
Roveredo	Grono (MeteoSchweiz)
Chur-Kantonsspital	Chur (MeteoSchweiz)
Davos-Seehornwald	Davos-Seehornwald (NABEL)

**Zeit (1992 – 2004):** Anzahl Monate seit Beobachtungsbeginn (Januar 1992).

In diesem Zeitraum ist der Ozonrückgang teilweise kompensiert worden durch eine erhöhte Effektivität der Ozonproduktion (s. Gretener 2018). Der Verlauf kann am besten zeitlich linear angesetzt werden.

**VOC Em CH (2005-2018):** Die jährlichen VOC-Emissionen der Schweiz.

Die Ozonkennzahlen verlaufen weitgehend parallel zu den VOC-Emissionen; die Effektivität der Ozonproduktion erhöht sich nicht weiter.

Es wurde auch überprüft, ob es zu weiter erhöhten Ozonkonzentrationen kam, wenn eine Hitzeperiode über zumindest 3 Tage anhielt. Die Anzahl von Sommertagen je Monat mit zumindest zwei vorangegangenen Sommertagen wurde deshalb ebenfalls als erklärende Variable eingesetzt; es zeigte sich aber, dass damit kein höherer Erklärungsgrad erreicht werden konnte. Vielmehr gab es Multikollinearität mit Tmax, weil offenbar eine höhere Anzahl von Sommertagen mit vorangegangenen Sommertagen praktisch stets mit einem höheren TTmax einherging. Diese Variable wurde also verworfen.

Die Ausgangsformel für alle linearen Regressionen kann somit geschrieben werden als:

$$C = \alpha * TT_{max} + \beta * VOC_{Em} CH + \gamma * Zeit + \varepsilon$$

mit C = Immissionskennzahl (Höchster Stundenwert, 98%-Wert oder AOT40);  
 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\varepsilon$ : Regressionskoeffizienten.

Der 'Sockel'  $\varepsilon$  (Konstante) darf keinesfalls mit irgendeiner Art von "Hintergrund" verwechselt werden.

Die Regressionen wurden mit dem Modell SYSTAT berechnet. Es wurde stets auf Normalverteilung mit dem Shapiro-Wilk-Test und auf allfällige Kollinearität geprüft (Abhängigkeit unter erklärenden Variablen). Sets mit Kollinearität wurden verworfen, die den Variablen zugeordneten Koeffizienten haben dann einen zufälligen Anteil.

## 8.4. Ergebnisse der linearen Regression für Ozon

Die ermittelten Regressionskoeffizienten geben die Abhängigkeit von Einflussvariablen (z.B. VOC-Emissionen, Zeit, Temperatur) an. Eine zentrale Beurteilungsbasis für eine allfällige Signifikanz der gefundenen Abhängigkeiten bildete dabei die Irrtumswahrscheinlichkeit. Sie gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit die 'Nullhypothese' (ermittelte Abhängigkeit von der betreffenden Variablen ist nur zufällig) verworfen werden kann. Nur wenn diese Wahrscheinlichkeit sehr klein ist, kann von einer *signifikanten* Abhängigkeit (z.B. von einer signifikanten Abnahme im Laufe der Zeit) gesprochen werden.

Die untersuchten 12 Stationen wurden in den grafischen Darstellungen farblich in vier Regionen zusammengefasst:

Farblegende	
	Ostschweiz
	Ostschweiz-Randgebiet
	Berggebiet GR
	Alpensüdseite GR

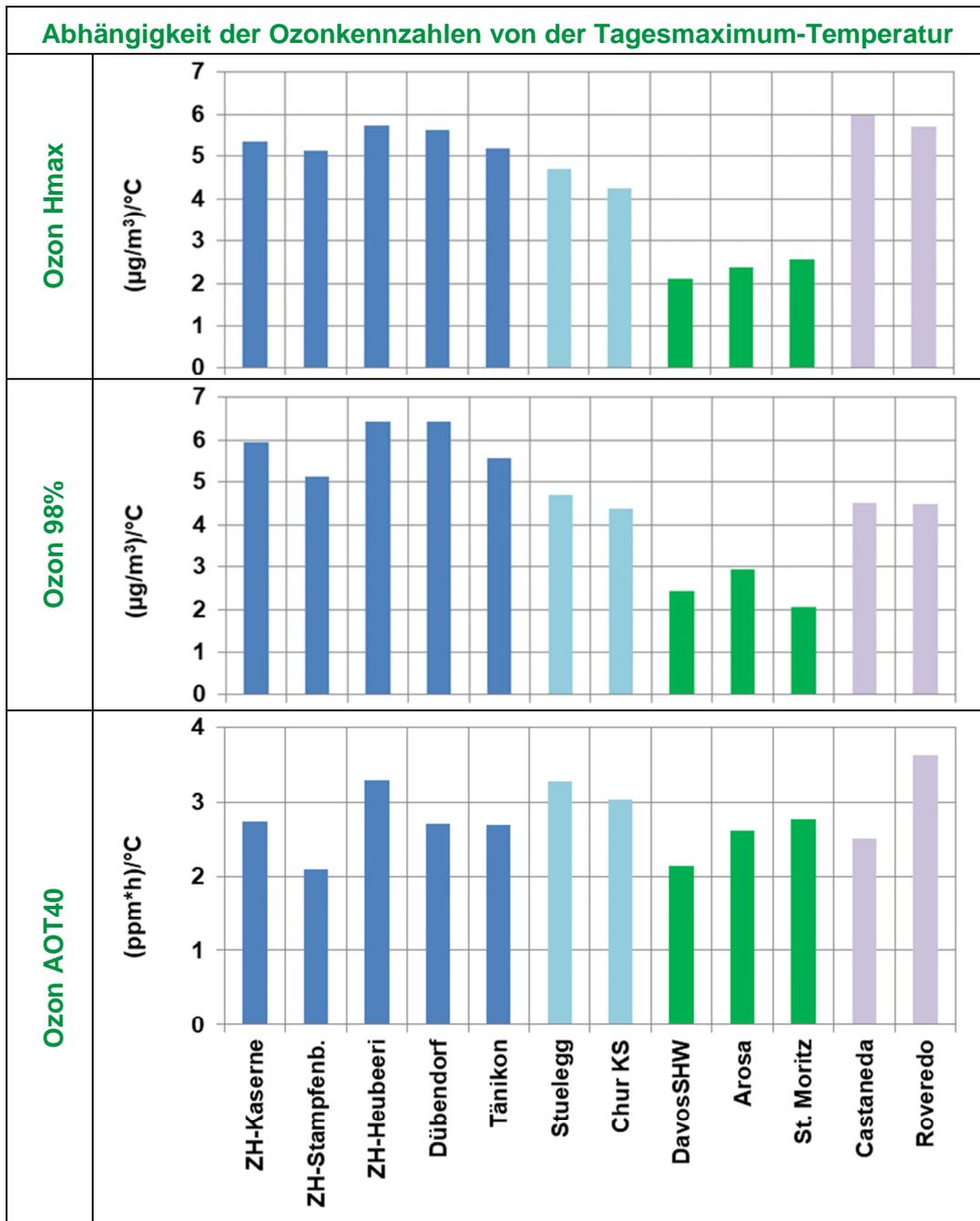
Das herausragende Ergebnis der Regression ist, dass alle drei untersuchten Ozonkennzahlen an allen Stationen hoch signifikant von der mittleren Tagesmaximumtemperatur und der VOC-Emission der Schweiz abhängen, teilweise auch von der Zeit (bis 2004).

Das Tagesmaximum an Ozon nimmt in der Ostschweiz etwa um  $5.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  zu pro Grad Celsius Erhöhung der Tagesmaximumtemperatur, in den Randgebieten etwa um  $4.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , in den Bündner Bergen etwa um  $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . In den Bündner Südalpen beträgt die Zunahme etwa  $6 (\mu\text{g}/\text{m}^3)/^\circ\text{C}$ , das sind aber etwa 4.5% wie in der Ostschweiz.

Diese Änderungen pro  $^\circ\text{C}$  Temperaturerhöhung gelten im Wesentlichen auch für die monatlichen 98%-Werte der Halbstundenwerte.

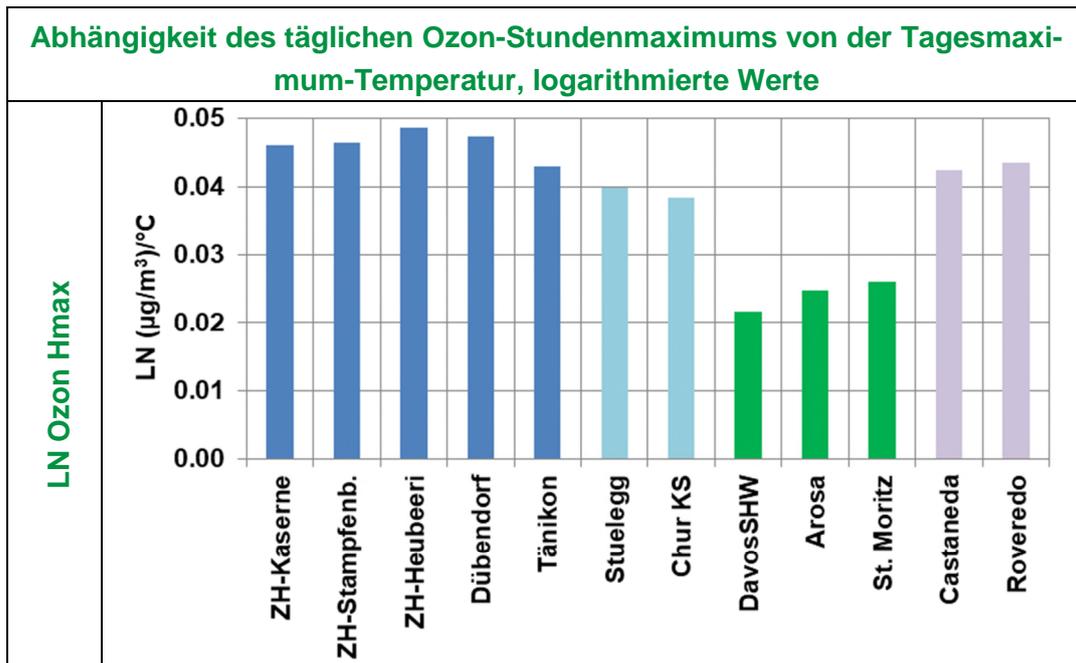
Die AOT40-Werte nehmen um  $2\text{-}3 \text{ ppm}\cdot\text{h}$  zu pro Grad Celsius Erhöhung der Tagesmaximumtemperatur, hier sind die Schwankungen auch innerhalb der einzelnen Regionen. Der kritische Level des AOT40-Wertes für Waldbäume liegt bei  $5 \text{ ppm}\cdot\text{h}$  (Empfehlungen zur Immissionsmessung von Luftfremdstoffen', BUWAL, 2004).

Die folgenden Grafiken zeigen die Ergebnisse im Überblick. Es werden nur signifikante Abhängigkeiten gezeigt.



**Abbildung 8.4: Abhängigkeit der Ozonkennzahlen von der Tagesmaximum-Temperatur, Ozon Hmax (mittlerer höchster Stundenwert), 98%-Wert und AOT40 je Standort.**

Die Regressionen wurden im Falle des mittleren Stundenmaximums an Ozon auch für die logarithmierten Werte gemacht. Die Ergebnisse waren sehr ähnlich und von der Signifikanz nicht besser als mit den nicht logarithmierten Werten. Es zeigte sich, dass die Ozonzunahme pro Grad Zunahme der Tagesmaximumtemperatur in Südbünden relativ sehr ähnlich ist wie in der Ostschweiz (um die 4.5%), wenngleich absolut ein deutlicher Unterschied bestand.



**Abbildung 8.5: Abhängigkeit des Logarithmus des mittleren höchsten Stundenwertes von Ozon von der Tagesmaximum-Temperatur (Ozon Hmax) je Standort.**

Die auch prozentual deutlich geringere Abhängigkeit des mittleren täglichen Ozonmaximums von der Tagesmaximum-Temperatur bei den Bergstationen Graubündens dürfte auf den dort bedeutenderen Anteil des Ozons aus der Reservoirschicht und aus dem Austausch mit der Stratosphäre zurückzuführen sein.

Eine lineare Zeitabhängigkeit wurde nur für die Jahre 1992-2004 postuliert (s. Kap. 6.2). Sie erwies sich nur teilweise als signifikant, stets negativ (Abnahme) mit Ausnahme der Stuelegg (?). Von den Stationen in der Stadt und Agglomeration Zürich zeigte Heubeeribüel eine deutlich stärkere Abnahme, weil dort der gegenläufige Effekt durch eine NO-Abnahme viel geringer war. Die Stationen in Südbünden zeigten die stärksten zeitlichen Abnahmen.

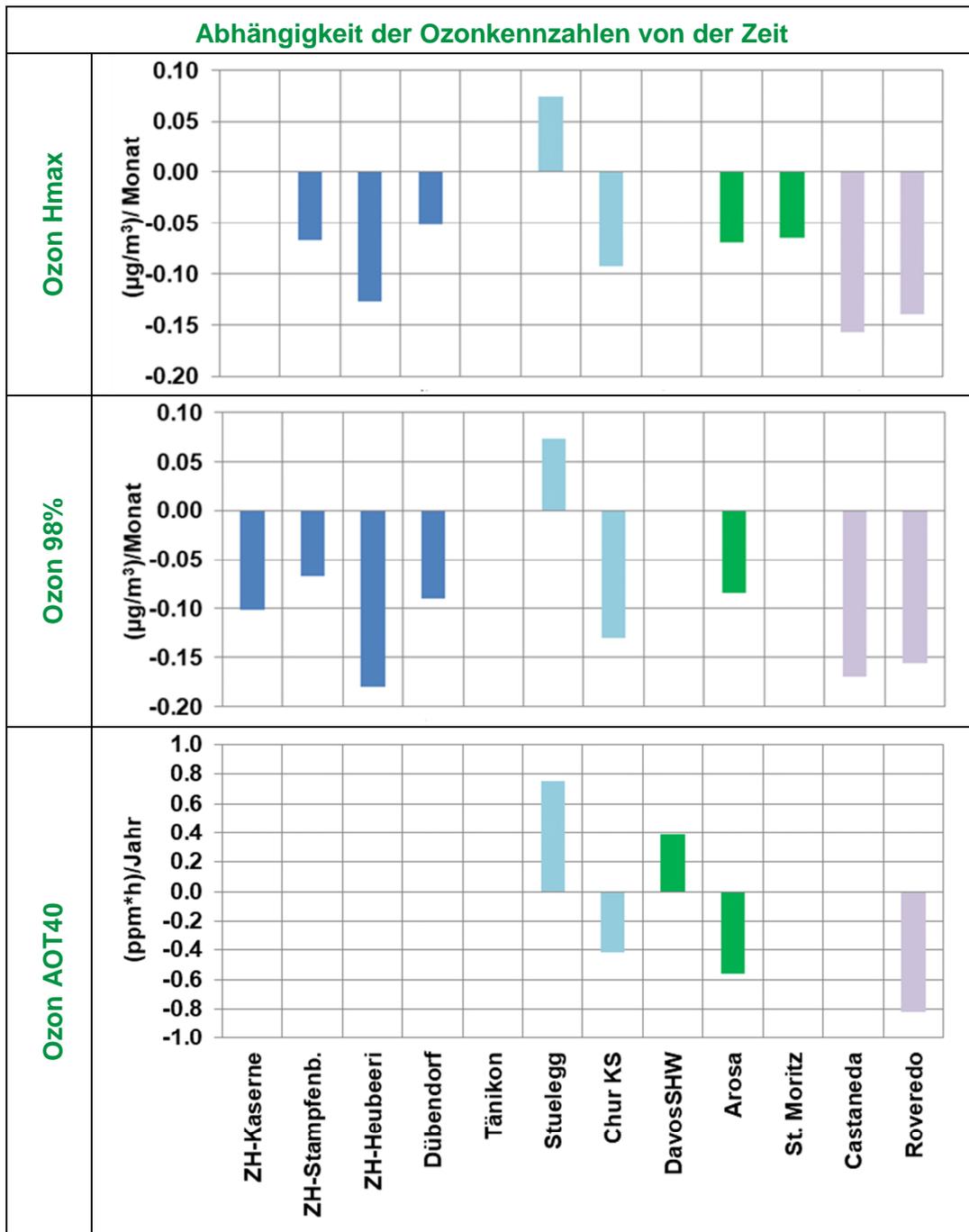


Abbildung 8.6: Abhängigkeit der Ozonkennzahlen von der Zeit (1992-2004), Ozon Hmax (mittlerer höchster Stundenwert), 98%-Wert und AOT40 je Standort.

Die Abhängigkeit der Ozonkennzahlen von den schweizerischen VOC-Emissionen ist für alle Kennzahlen und alle Standorte hoch signifikant. Das Tagesmaximum an Ozon nimmt in der Ostschweiz etwa um  $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  zu pro kt (Kilotonne) Zunahme der jährlichen nationalen VOC-Emissionen. In den Bündner Südalpen ist es ein Stück mehr.

Diese Änderungen pro kt Emissionsänderung gelten im Wesentlichen auch für die monatlichen 98%-Werte der Halbstundenwerte.

Die AOT40-Werte ändern etwa um 0.3 ppm\*h zu pro kt nationale VOC-Emissionsänderung.

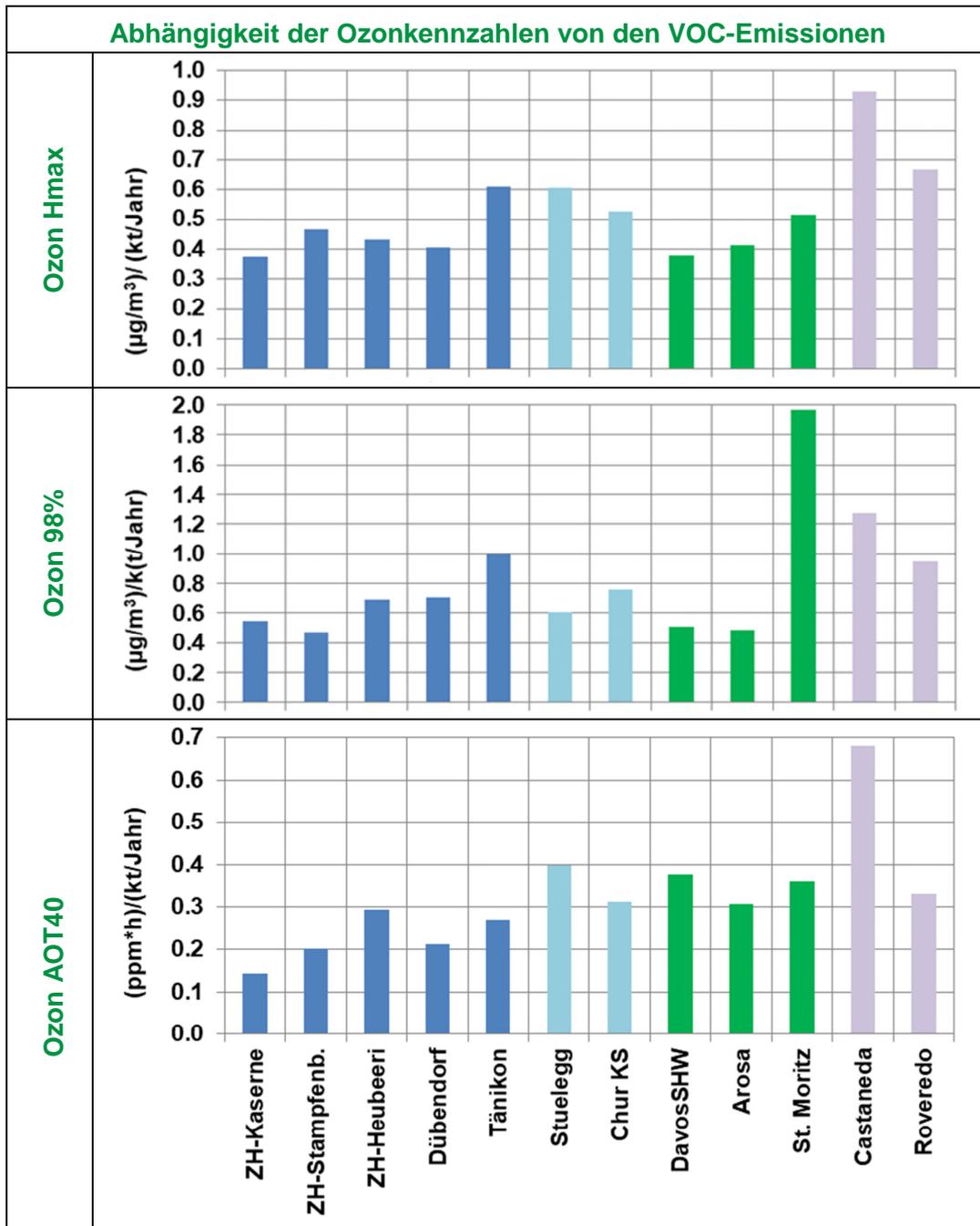


Abbildung 8.7: Abhängigkeit der Ozonkennzahlen von den schweiz. VOC-Emissionen (2005-2018), Ozon Hmax (mittlerer höchster Stundenwert), 98%-Wert und AOT40 je Standort.

## 8.5. Fazit der Regressionsanalyse

Basis für die Regression war das relativ dichte Netz von langjährigen Ozonmessungen an Stationen in praktisch unveränderter Umgebung. Es ist von hohem Wert, dieses Netz weiterzuführen. Mit kurzzeitigen Messungen können keine zeitlichen Entwicklungen evaluiert werden, was z.B. regionale Emissionsreduktionen oder Klimawandel betrifft.

- Alle **Ozon**kennzahlen (Tagesmaximum, 98%-Wert, AOT1-Wert) hängen stark und hoch signifikant von der (mittleren) Tagesmaximaltemperatur und der (nationalen) VOC-Emission ab.
- Unter Weglassung der Temperatureffekte haben die Ozonspitzenwerte in den letzten 15 Jahren etwa so abgenommen, wie die VOC-Emissionen abgenommen haben, d.h. um etwa 28% seit dem Jahr 2004.
- Das mittlere Tagesmaximum an Ozon bzw. der 98%-Wert steigen um etwa 5-6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , wenn das mittlere Tagesmaximum der Temperatur um 1 °C steigt.
- Da die VOC-Emissionen in den nächsten Jahren nicht mehr sinken, gemäß Prognose für die Schweiz sogar wieder etwas ansteigen werden ("Switzerland's Informative Inventory Report 2018 (IIR), Submission under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, Submission of March 2018 to the United Nations ECE Secretariat", BAFU, 2018) muss zusammen mit der Klimaerwärmung damit gerechnet werden, dass die Ozonbelastung in den nächsten Jahren und Jahrzehnten wieder ansteigen wird.

## 9. Zur zukünftigen Entwicklung der Ozonbelastung in der Ostschweiz und in Graubünden

Um die zukünftige Entwicklung der Ozonspitzenbelastungen – welche gesundheitlich, landwirtschaftlich und auf den Wald bezogen relevanter sind als die Ozonmittelwerte – im Lichte des Klimawandels abschätzen zu können, braucht es dreierlei:

- als theoretische Basis die Arbeit von Gretener (2018), welche modellgestützt die VOC-Limitierung der photochemischen Ozonbildung in der Ostschweiz zeigt;
- die Prognose der zukünftigen VOC-Emissionen gemäss Switzerland's Informative Inventory Report 2018 (IIR), Submission under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution sowie weiteren Überlegungen von Ostluft und BAFU;
- die Regressionsanalyse (Kap. 8), welche die hohe Signifikanz der Einflussfaktoren Tagesmaximumtemperatur (relevant für den Klimawandel) und VOC-Emission (Vorläufersubstanz) zeigt und die Projektion in die Zukunft erlaubt auf Basis der ersten beiden Punkte.

Im Weiteren sind noch folgende Aspekte zu erwähnen:

- Ozon wird nicht nur photochemisch gebildet, es gelangt auch durch Austausch mit der Stratosphäre und durch Ferntransporte in die bodennahe Luftschicht. In der Höhe ist dieser Einfluss grösser (s. Kommentar zu Abbildung 8.5). Aber bei sommerlichen Schönwetterlagen wird dieser Einfluss betragsmässig klein, der Einfluss auf Ozonspitzenbelastungen ist also nicht gross. Es kommt hinzu, dass bei sommerlichen Schönwetterlagen die Strömung typischerweise gerade nicht vom Atlantik kommt, also die Rolle des Ferntransportes von Amerika bzw. Südostasien dann nicht relevant sein kann. In unserem Zukunftsmodell wird davon ausgegangen, dass sich der aktuell bestehende Einfluss von Ferntransport und Stratosphärenaus-tausch auf die Ozonspitzenbelastungen nicht ändert.
- Biogene VOC (insbesondere Isopren) spielen bei der Ozonbildung eine Rolle. Über ihren Anteil im Verhältnis zu den anthropogenen VOC gibt es unterschiedliche Angaben. Ihre Emission steigt mit zunehmender Temperatur. In der Regressionsanalyse (Kap. 8) ist der mit der Temperatur zunehmende Einfluss der biogenen VOC implizit in den Koeffizienten der Temperaturabhängigkeit der Ozonspitzenbelastungen enthalten. Wir gehen davon aus, dass die Waldfläche in Mitteleuropa in etwa konstant bleibt und des-

halb der Einfluss des Isoprens auch weiterhin implizit in der Temperaturabhängigkeit enthalten bleibt.

Im Factsheet "Ozon und Sommersmog: Klimawandel gefährdet heutige Erfolge" der Akademien der Wissenschaften Schweiz von 2016 wird auf eine mögliche höhere Ozonbelastung infolge des Klimawandels hingewiesen. In zwei wichtigen Punkten kommt die vorliegende Studie allerdings zu anderen Schlussfolgerungen:

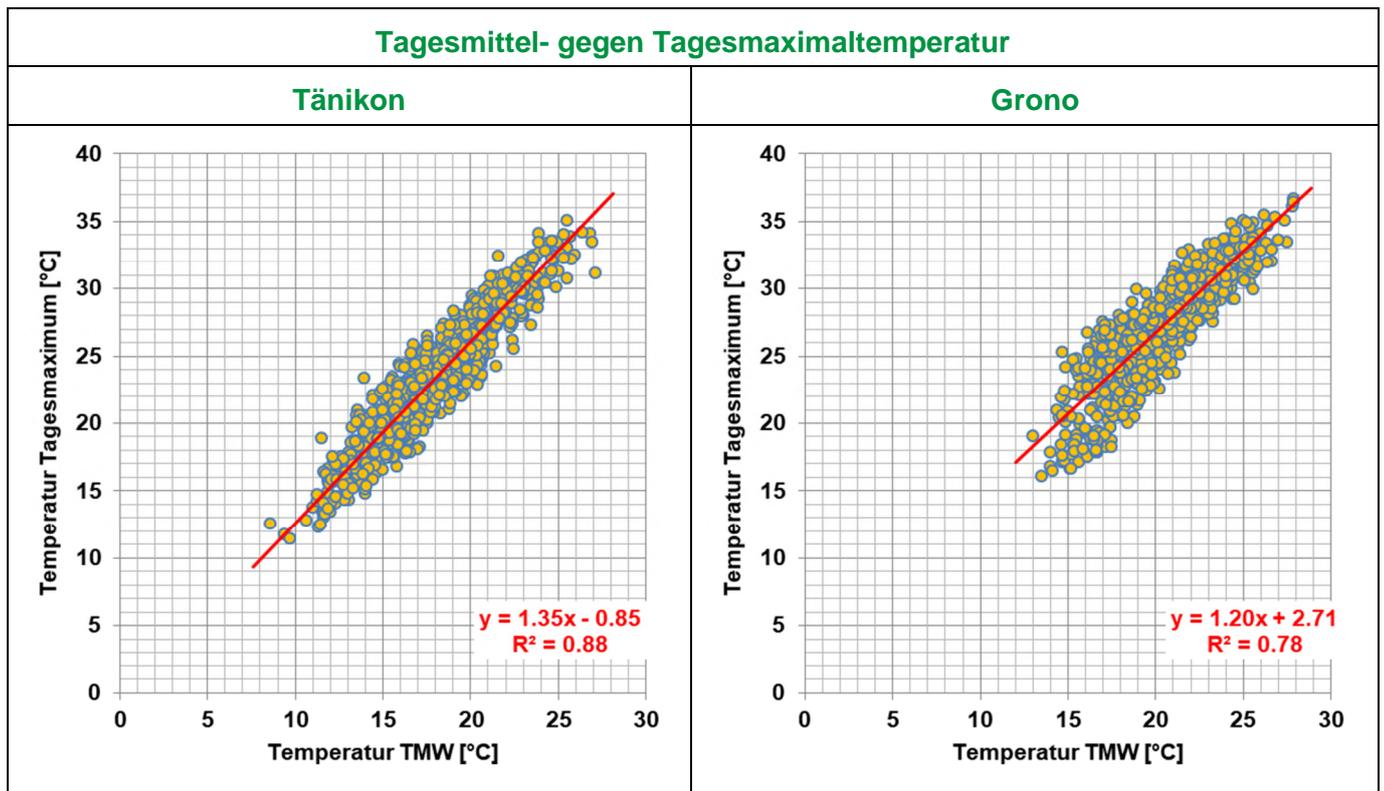
- Die langsamere Abnahme des Ozons im Vergleich zu den Vorläufersubstanzen wird im Wesentlichen mit dem Import von Ozon und Vorläufersubstanzen aus Südostasien erklärt. Für den Herbst und Winter mag dies eine Rolle spielen, und tendenziell für Ozon-Mittelwerte, aber Wetterlagen mit Ozonspitzenbelastungen sind typischerweise keine Westlagen. Gretener (2018) führt die im Vergleich mit dem Rückgang der Vorläufersubstanzen langsamere Reduktion der Ozonspitzenbelastungen von 1991-2004 auf eine zunehmende Effektivität der Ozonbildung zurück. In den letzten 14 Jahren verliefen die Ozonspitzenbelastungen weitgehend parallel zu den VOC-Emissionen (s. Regressionsanalyse Kap. 8), im Einklang mit den Ergebnissen von Gretener.
- Es wird die weitere Reduktion von Stickoxiden empfohlen. Dem ist natürlich nichts entgegenzuhalten, jedoch können sich dadurch die Ozonbelastungen bei gleichbleibenden VOC-Emissionen sogar erhöhen. Infolge der VOC-Limitierung der Ozonbildung (zumindest) in der Ostschweiz, offensichtlich dominiert vom urbanen Wirtschaftsraum des Mittellandes, ist eine Reduktion der VOC-Emissionen für eine Ozonminderung notwendig.

## 9.1. Verwendete Klima- und VOC-Emissionsszenarien

Um den Einfluss des Klimawandels auf die Ozonbildung im Laufe des 21. Jahrhunderts abzuschätzen, werden zwei Szenarien der zukünftigen Temperaturentwicklung verwendet. In "Climate Scenarios for Switzerland", National Centre for Climate Services, November 2018 wurden mögliche Erhöhungen der mittleren Sommer-temperatur für jeweils dreissigjährige Phasen angegeben: Für '2060' (2045-2075) und '2085' (2070-2100) mit Bezug zur Basis '1995' (1981-2010). Im Folgenden werden die **Klimaszenarien RCP8.5** (keine weiteren Klimaschutzmassnahmen) und RCP 4.5 verwendet, für die Gebiete CHNE (Nordostschweiz) und CHAE (Alpen Ost). Das **Klimaszenarium RCP4.5** geht ebenfalls wie das 'optimistische' Szenario RCP 2.6 von markanten Emissionsreduktionen der Treibhausgase aus, aber weniger rasch und nicht auf null Nettoemissionen absinkend. (RCP = representative concentration pathways bzgl. CO<sub>2</sub>äqu.)

Aus der möglichen Erhöhung der mittleren Sommertemperatur muss auf die Erhöhung der mittleren täglichen **Maximal**temperatur geschlossen werden. Da die generellen physikalischen Gegebenheiten erhalten bleiben, kann empirisch aus den bisherigen Verhältnissen zwischen Tagesmittel- und Tagesmaximaltemperaturen auf die zukünftigen mittleren Tagesmaximaltemperaturen geschlossen werden.

Die folgende Abbildung zeigt den Zusammenhang zwischen Tagesmittel- und Tagesmaximaltemperatur für Tänikon und Castaneda von 2010-2018 (jeweils Juni-August). Mit Tänikon und Castaneda wurden zwei typische Vertreter der Ostschweiz bzw. Südbündens ausgesucht.

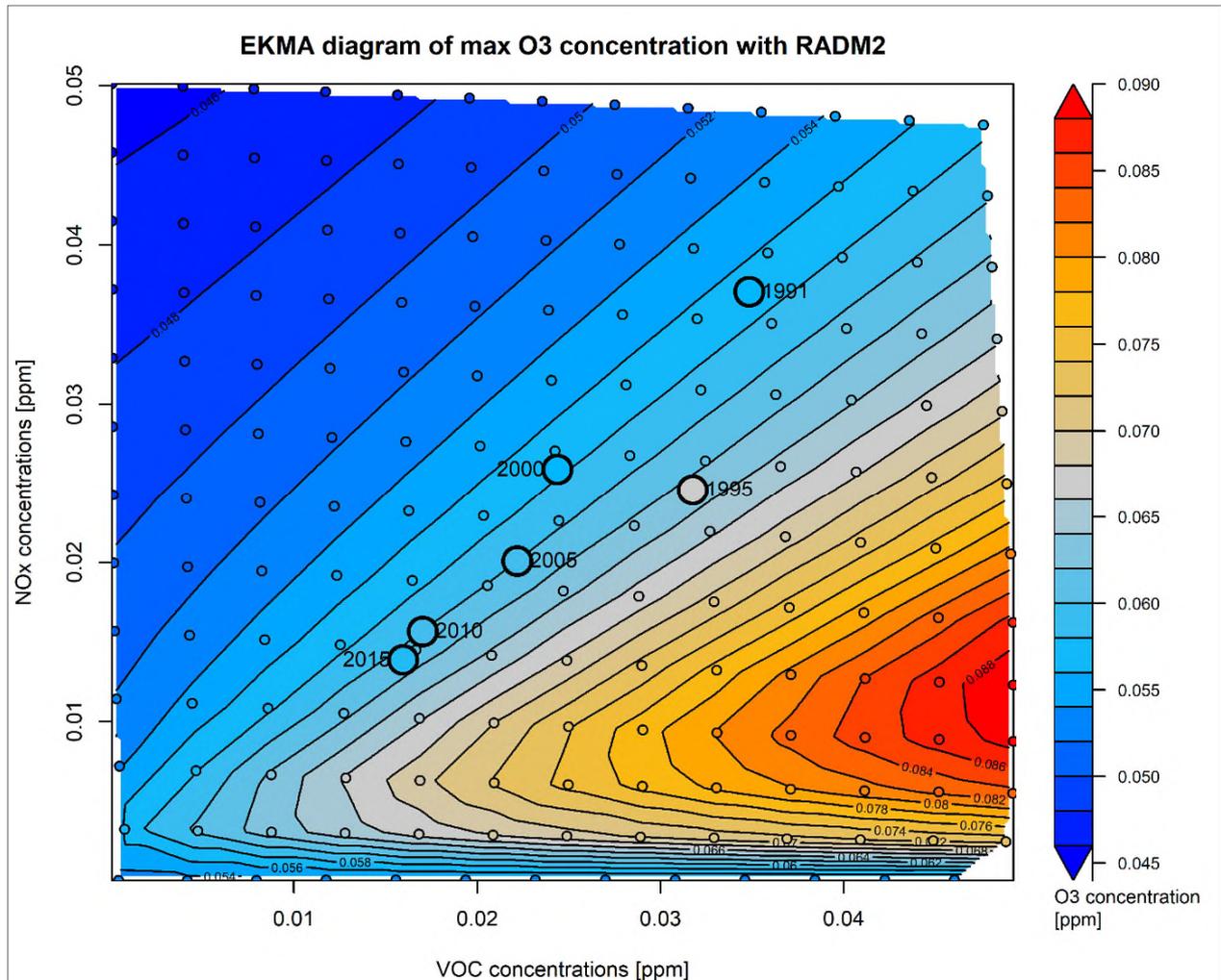


**Abbildung 9.1: Tagesmitteltemperatur (x-Achse) gegen Tagesmaximaltemperatur (y-Achse) für Tänikon (links) bzw. Grono (rechts) von 2010-2018 (jeweils Juni-August).**

Die Korrelation ist ansprechend, und im Mittel steigt die Tagesmaximaltemperatur bei Tänikon um 1.35 °C wenn das Tagesmittel um 1 °C steigt, bei Grono (Misox) um 1.2 °C. bei Grono dürfte der geringere Wert damit zusammenhängen, dass es nachts weniger auskühlt als im Mittelland. Daraus lässt sich die klimawandelbedingte Erhöhung der mittleren Tages**maximal**temperatur abschätzen.

Um daraus wiederum die Erhöhung der mittleren täglichen Ozonspitzen im Sommer ableiten zu können, wird wiederum die Arbeit von Gretener (s. Kap. 7.1) herangezogen: Die Ozonproduktion ist nach wie vor VOC-limitiert, und ein Blick auf das EKMA-Diagramm ("Empirical kinetic modeling approach") der Modellergebnis-

se legt nahe, dass dies bei realistischen NO<sub>x</sub>-Konzentrationen (> 2 ppb) auch in Zukunft so sein wird. Bei gleichbleibenden oder sogar wieder etwas ansteigenden VOC-Emissionen (Switzerland's Informative Inventory Report 2018) müsste sogar wieder mit einem Ozonanstieg bei einer bestimmten Maximaltemperatur gerechnet werden.



**Abbildung 9.2: EKMA-Diagramm der Modellergebnisse mit 'RADM2' für Zürich und Umgebung. Maximale Ozonkonzentration in Abhängigkeit der Konzentration an VOC (x-Achse) bzw. NO<sub>x</sub> (y-Achse). Die resultierenden Ozonkonzentrationen 1991-2015 sind VOC-limitiert: Eine höhere VOC-Konzentration führt zu höherer Ozonkonzentration, eine höhere NO<sub>x</sub>-Konzentration zu tieferer Ozonkonzentration. Quelle: "Turnaround in the Ozone Trend: A Shift from VOC- to NO<sub>x</sub>-Limitation?", Flavia Gretener, ETH Zürich, 2018.**

In der **Prognose der zukünftigen Ozonentwicklung im Untersuchungsgebiet** dieser Studie wurde davon ausgegangen, dass sich die maximale Ozonkonzentration bei einer bestimmten Maximaltemperatur auf einer Isoplethe (Kurve gleicher Konzentration) bewegen würde, ab 2018 also nur von der Temperatur abhängt

und sich nicht erhöhe aufgrund abnehmender NO<sub>x</sub>-Konzentrationen. Dies ist der günstigste Fall.

Ein anderer Pfad der Änderung der Ozonkonzentration besteht eben in der **Änderung der VOC-Konzentration** und damit ursächlich in der VOC-Emission. In Rücksprache mit Ostluft und dem BAFU wurde ein VOC-Reduktionsszenarium von -10% bis '2060' und von -20% bis '2085' postuliert.

Damit wurden für Tänikon als Vertreter des östlichen Mittellandes und für Castaneda als Vertreter der südlichen Bündner Alpen vier Szenarien gerechnet: RCP8.5 und RCP4.5 jeweils mit und ohne Reduktion der VOC-Emissionen.

Somit ergeben sich aus den infolge des Klimawandels postulierten Temperaturanstiegen im Sommer in der östlichen Landeshälfte (s. Fig. 4.4 in Climate Scenarios for Switzerland, 2018) je nach Szenarium die folgenden Erhöhungen der mittleren täglichen Ozonspitzen:

**Tabelle 9.1: Klimawandel und Erhöhung der mittleren täglichen Ozonspitzen im Sommer für die CH-Klimaszenarien RCP8.5 und RCP4.5. Erhöhung der Mitteltemperatur im Sommer bezogen auf die Periode 1981-2010.**

RCP8.5	Periode	Erhöhung Mitteltemperatur im Sommer [°C]		Erhöhung mittlere Tagesmaximaltemperatur im Sommer [°C]		Erhöhung mittlere tägliche Ozonspitze im Sommer [µg/m <sup>3</sup> ]	
		von	bis	von	bis	von	bis
Tänikon (CHNE)	2045-2075	2.1	4.1	2.8	5.5	15	29
	2070-2100	3.4	7	4.6	9.5	24	49
Grono/ Castaneda (CHAE)	2045-2075	2.5	4.8	3.0	5.8	18	34
	2070-2100	4.1	7.2	4.9	8.6	29	52

RCP4.5	Periode	Erhöhung Mitteltemperatur im Sommer [°C]		Erhöhung mittlere Tagesmaximaltemperatur im Sommer [°C]		Erhöhung mittlere tägliche Ozonspitze im Sommer [µg/m <sup>3</sup> ]	
		von	bis	von	bis	von	bis
Tänikon (CHNE)	2045-2075	1.4	2.9	1.9	3.9	10	20
	2070-2100	1.6	3.6	2.2	4.9	11	25
Grono/ Castaneda (CHAE)	2045-2075	1.6	3.4	1.9	4.1	11	24
	2070-2100	1.9	4.2	2.3	5.0	14	30

Das Reduktionsszenarium bzgl. der VOC-Emissionen führt zu folgenden Verringerungen der mittleren täglichen Ozonspitzen im Sommer:

**Tabelle 9.2: Reduktion der VOC-Emissionen und Verringerung der mittleren täglichen Ozonspitzen im Sommer.**

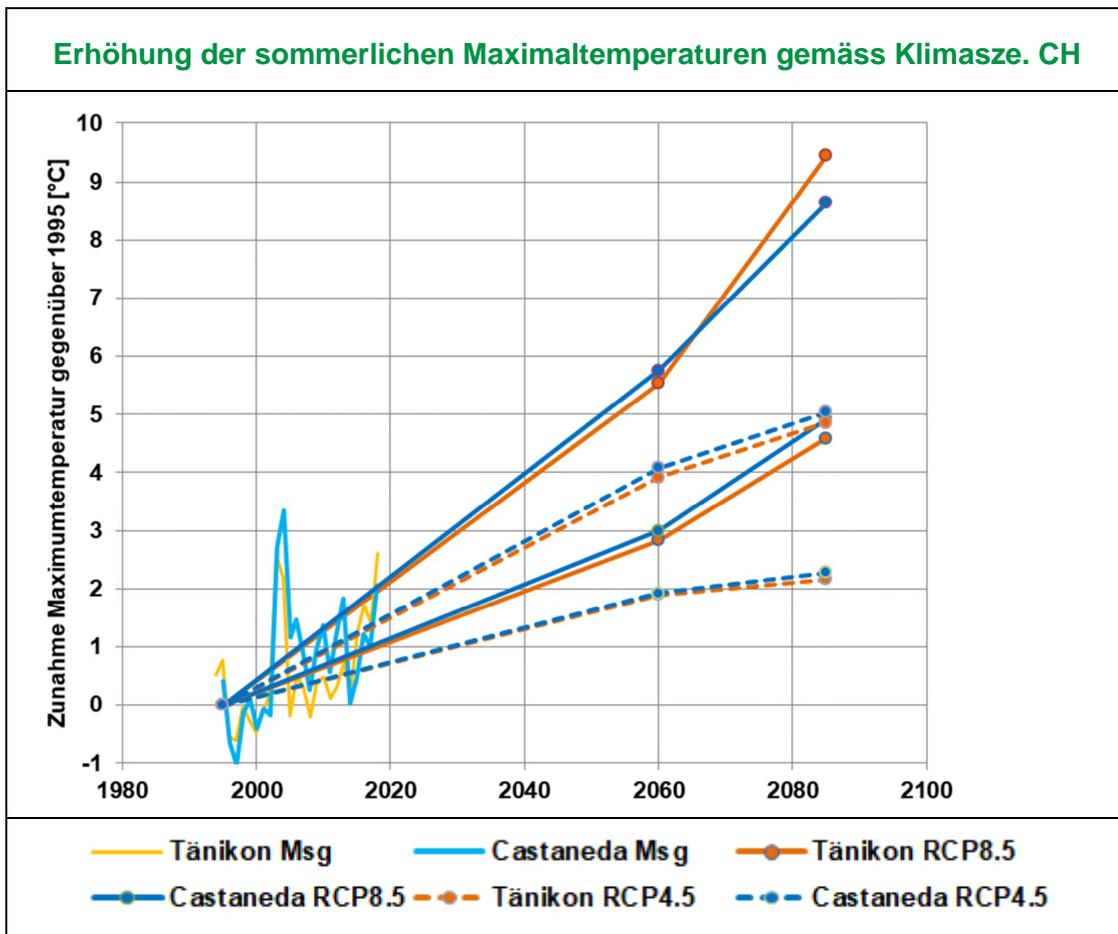
Reduktion VOC-Emissionen	Periode	Reduktion	Verringerung mittlere tägliche Ozonspitze im Sommer [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
Tänikon (CHNE)	2045-2075	-10%	-4
	2070-2100	-20%	-9
Castaneda (CHAE)	2045-2075	-10%	-7
	2070-2100	-20%	-13

Diese Erhöhungen betreffen die mittleren täglichen Ozonspitzen, die natürlich nach wie vor stark witterungsabhängig sein werden. Zur Veranschaulichung möglicher sommerlicher Variationen der Ozonbelastung wurden folgende Simulationen für Tänikon und Castaneda gewählt:

- Der gemessene Verlauf (Monatswerte Sommer 1992-2018) wird normiert auf die VOC-Emission von 2018 (die in Zukunft konstant gehalten wird bzw. um -10% bis -20% reduziert wird) und die Temperatur im Sommer 1995 (aus der Temperaturregression, nicht die konkrete Temperatur im 1995; 1995 liegt in der Mitte der Vergleichsbasis 1981-2010 der Klima-szenarien CH). Diese normierten Kurven haben keinen zeitlichen Trend mehr, zeigen aber die gleiche Variabilität wie die Messkurven.
- Die Variabilität der normierten Kurven ergibt sich vor allem aus den jährlich variierenden Sommertemperaturen (um die Trendlinie herum), aber auch aus variierenden Strömungsmustern im Sommer und aus raumzeitlichen Variabilitäten der VOC-Emissionen. Diese Variabilität bleibt auch in den Zukunftsszenarien erhalten.
- Für jedes 30-Jahre-Intervall wird die 'erwartete' Temperaturzunahme gemäss Klimaszenarien CH und die VOC-Emission gemäss Szenarium bestimmt und die damit einhergehende Änderung der mittleren Ozonspitzen bzw. der 98%-Werte errechnet (auf Basis der Regressionsanalyse; insgesamt 4 Szenarien).
- Die Temperaturzunahme je Klimaszenarium und 30-Jahre-Intervall wird in einem Bereich (zwischen x und y) angegeben. Dieser Bereich überträgt sich auf die Ozonkennzahlen (mittlere Ozonspitzen bzw. 98%-Werte).
- Die Ozonkennzahlen in den Zukunftsszenarien werden also in einem Bereich angegeben, der einerseits durch ihre jährliche Variabilität bedingt ist und andererseits durch die Unsicherheit in den Klimaszenarien.

- Die postulierten Zeiträume waren 2045-2075 (ca. + 55 Jahre) und 2070-2100 (ca. +80 Jahre). Sie sollen die gleiche Ozon-Variabilität wie die Messkurven aufweisen, die VOC-Emissionen von 2018 ('no VOCred') oder reduziert um 10/20 % und überlagert von der Temperaturerhöhung infolge des Klimawandels gemäss Klimaszenarien CH.

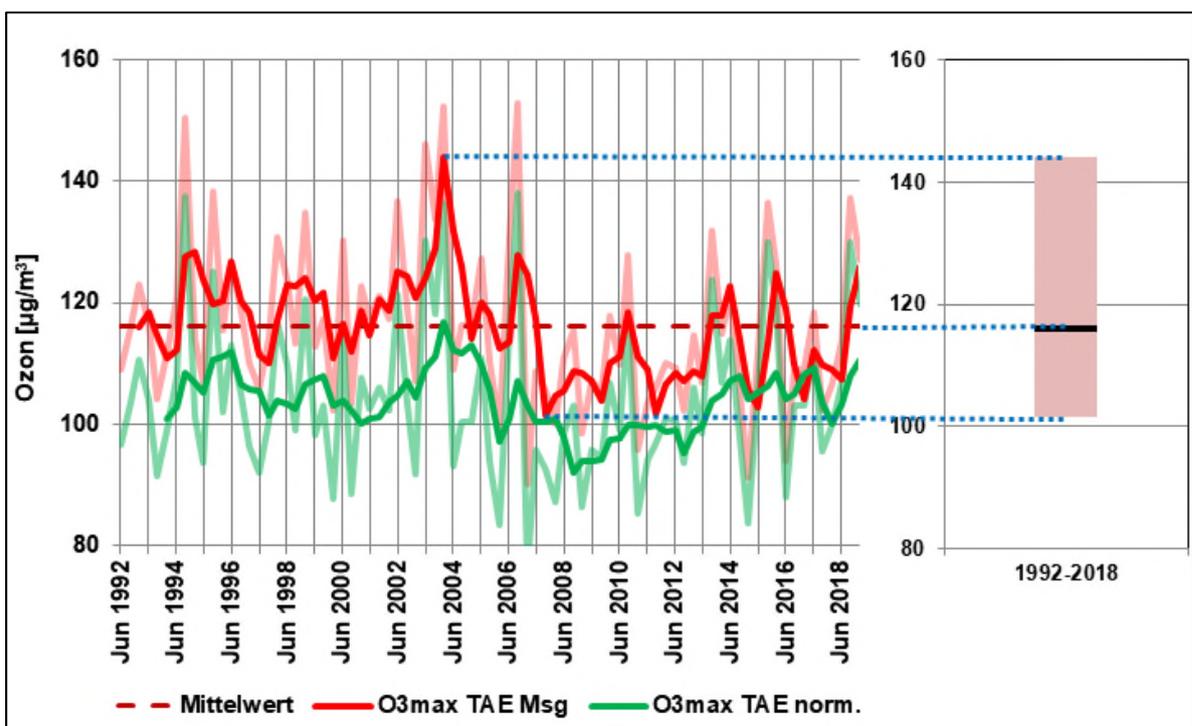
Die folgende Abbildung zeigt die Erhöhung der täglichen Maximaltemperatur im Sommer für Tänikon und Castaneda basierend auf den Klimaszenarien CH für '2060' und '2085', sowie der reale Verlauf der täglichen Maximaltemperatur im Sommer (als Differenz zu 1995 im 2-Sommermittel).



**Abbildung 9.3: Erhöhung der mittleren täglichen Maximaltemperaturen im Sommer gemäss Klimaszenarien CH ohne Klimaschutz (RCP8.5) bzw. mit moderatem Klimaschutz (RCP4.5), Gebiete Nordostschweiz und Alpen Ost, in Bezug zum Mittel 1981-2010. Realer Verlauf der Temperatur bei Tänikon und Castaneda im 2-Sommermittel als Differenz zu 1995. Der Unterschied zwischen Tänikon und Castaneda kommt auch dadurch zustande, dass sich in Castaneda die Maximaltemperatur weniger stark von der Mitteltemperatur unterscheidet als in Tänikon.**

## 9.2. Ergebnisse der Szenarien der künftigen Ozonentwicklung

Die Szenarienergebnisse werden als Säulen dargestellt, welche den möglichen Bereich der künftigen Ozonkonzentration (mittlere Ozonspitzen bzw. 98%-Werte) abbildet. Dieser Bereich kommt einerseits durch die Variabilität der Ozonkonzentration zustande, welche in den letzten 27 Jahren herrschte und welche erhalten bleiben soll. Dabei handelt es sich also nicht um eine Berechnungs- bzw. Modellunsicherheit. Eine solche kommt allerdings noch infolge der Unsicherheit über die zukünftige Erwärmung hinzu (s. oben). Ein Beispiel des Transfers von der Ozonzeitreihe in die Säulendarstellung wird im Folgenden gegeben.



**Abbildung 9.4: Beispiel des Transfers von der Ozonzeitreihe in die Säulendarstellung. Aus den mittleren täglichen Ozonspitzen je Monat (hellrot) werden gleitende 3-Monatsmittel (Sommermittel) gebildet (dunkelrot). Die Säule reicht vom Minimum bis zum Maximum des Sommermittels. der schwarze Balken bezeichnet den Mittelwert aus der gesamten Zeitreihe.**

Auf Basis der normierten Verläufe des Ozons können Prognosen der zukünftigen Entwicklung aufgesetzt werden, unter Voraussetzung der oben diskutierten Bedingungen. Im Folgenden werden Messkurven und normierte Verläufe als Zeitreihen und sodann als Säulen zusammen mit Prognosen für 2045-2075 bzw. 2070-2100 der Sommermittel gezeigt.

Zunächst werden die Prognosen für das mittlere tägliche Ozonmaximum gezeigt.

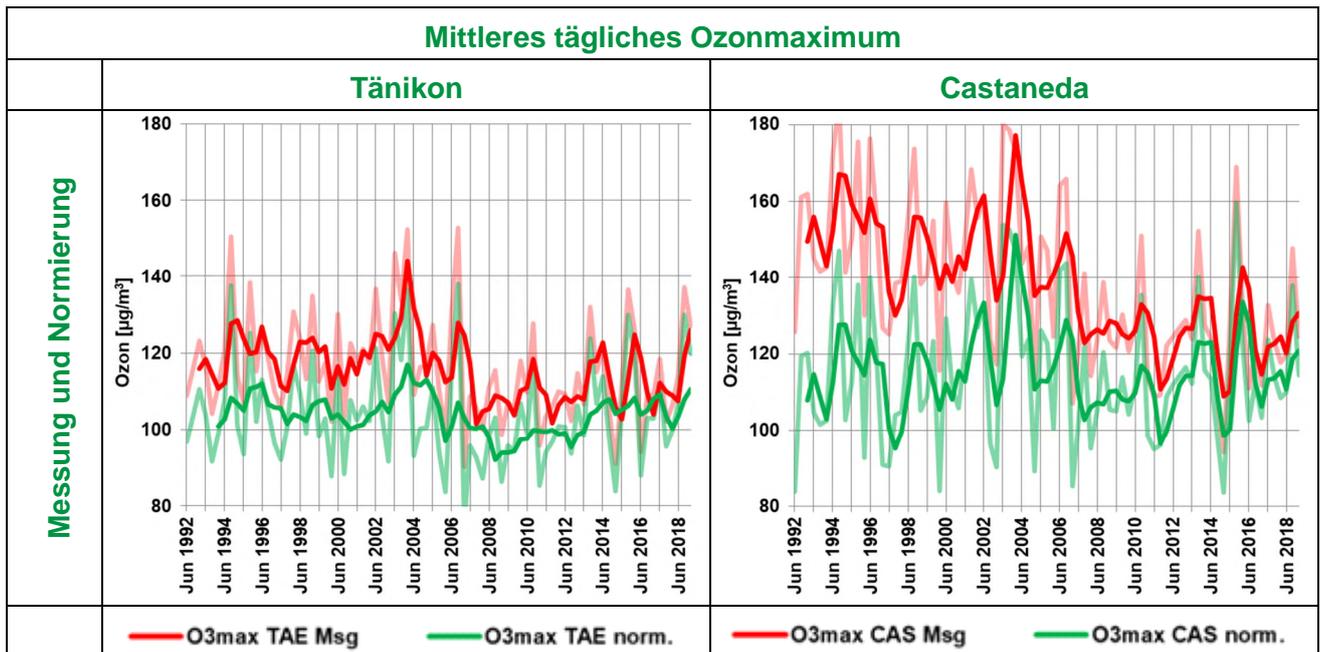


Abbildung 9.5: Mittleres tägliches Ozonmaximum im Sommer: Messung 1992-2018; Normierung 1992-2018 auf VOC-Emissionen 2018 und Temperatur 1995. Monatswerte und gleitende 3-Monatsmittel.

Die folgenden Grafiken zeigen:

**Ohne weitere Klimaschutzmassnahmen** (RCP8.5) würden in der Ostschweiz die früheren Ozonwerte bis zur Mitte des Jahrhunderts übertroffen, bei einer Erwärmung im prognostizierten oberen Bereich deutlich übertroffen werden. Gegen Ende des Jahrhunderts würden die Werte von 2003 auch in 'gewöhnlichen' Sommern erreicht und immer wieder massiv übertroffen werden.

In Castaneda würde es wegen des starken Ozonrückgangs in den letzten 30 Jahren bis zur Mitte des Jahrhunderts dauern, je nach Temperaturerhöhung, bis die Werte der 90er-Jahre wieder erreicht würden. In der Folge könnten diese Werte aber ebenfalls massiv übertroffen werden.

**Mit moderaten Klimaschutzmassnahmen** (RCP4.5) könnten hingegen die Ozonbelastungen im Mittel etwa auf dem Stand der letzten 30 Jahre belassen werden, bei Castaneda sogar etwas gesenkt werden. Bei einer Erwärmung im prognostizierten oberen Bereich hätten Spitzensommer allerdings etwas höhere Ozonbelastungen als bisher zur Folge.

In allen Fällen hätten **Reduktionen der VOC-Emissionen** erkennbar geringere Ozonbelastungen zur Folge, bei Castaneda mehr als bei Tänikon.

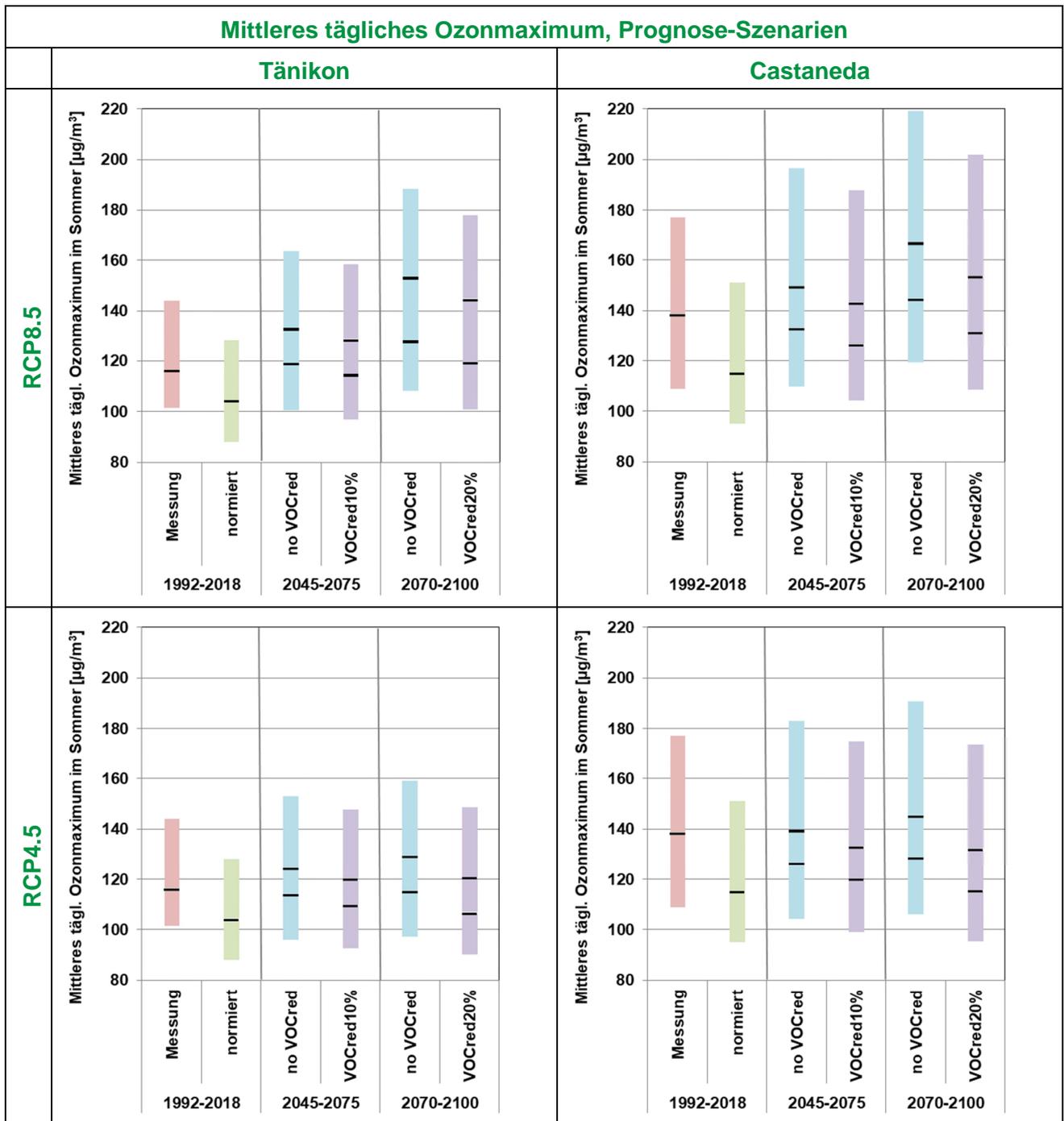


Abbildung 9.6: Gleitende 3-Monatsmittel der mittleren täglichen Ozonmaxima im Sommer: Bereiche der Messung 1992-2018 und der Normierung 1992-2018 auf VOC-Emissionen 2018 und Temperatur 1995. Prognosebereiche für 2045-2075 und 2070-2100 für Klimaszenarien CH RCP8.5 und RCP4.5 sowie mit konstanten VOC-Emissionen (Stand 2018) und Reduktion um 10/20 %. Dunkle Balken: Mittelwerte, bei den Prognosen für unteres und oberes Limit der postulierten Temperaturzunahme.

Im Folgenden werden die Prognosen für die monatlichen 98%-Werte des Ozons gezeigt.

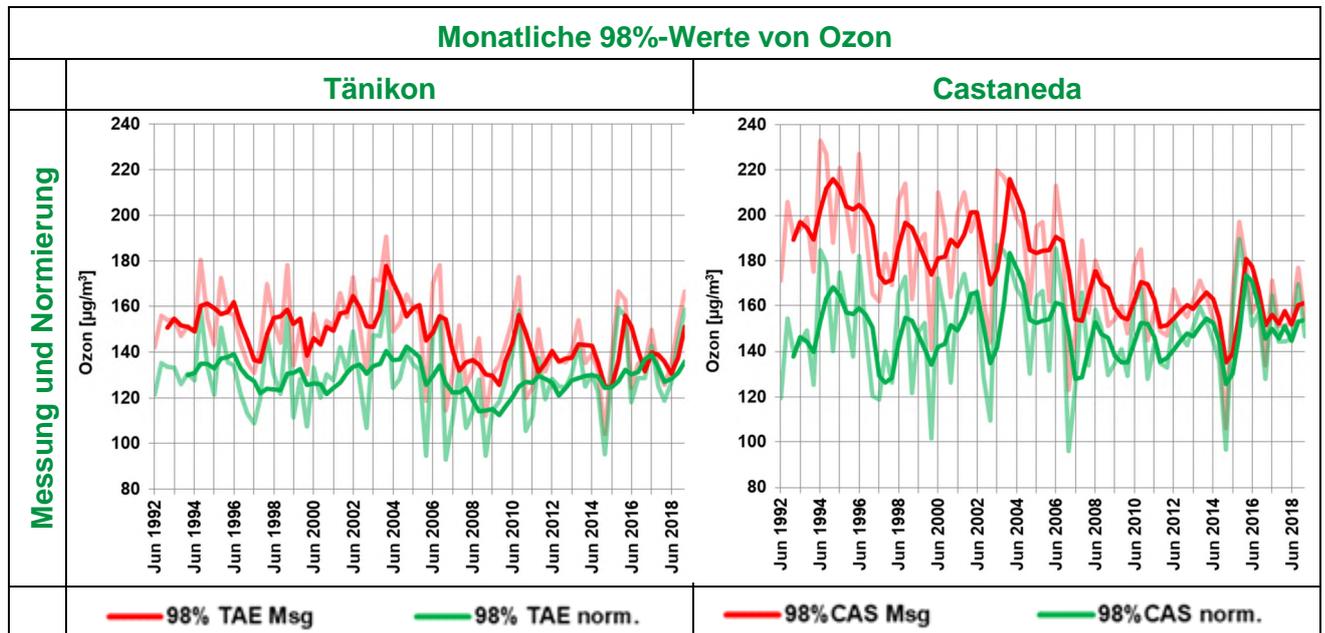


Abbildung 9.7: Monatliche 98%-Werte von Ozon: Messung 1992-2018; Normierung 1992-2018 auf VOC-Emissionen 2018 und Temperatur 1995. Monatswerte und gleitende 3-Monatsmittel.

Die folgenden Grafiken zeigen:

**Ohne weitere Klimaschutzmassnahmen** (RCP8.5) käme es in der Ostschweiz bis zum Ende des Jahrhunderts zu deutlichen erhöhten 98%-Werten, in Südbünden würden gegen Ende des Jahrhunderts die früheren Werte wieder erreicht. Es muss allerdings gesagt werden, dass die 98%-Werte nur die 14 höchsten Ozonstundenwerte betreffen und hier die Variabilitäten grundsätzlich höher sind, in einzelnen Sommern also deutliche Abweichungen vorkommen können. Im Mittel allerdings basieren die Prognosen auf der Regressionsanalyse, welche sehr hohe Signifikanzen bzgl. Temperaturabhängigkeiten hervorgebracht hat.

**Mit moderaten Klimaschutzmassnahmen** (RCP4.5) würden die 98%-Werte bei Tänikon etwa stabil bleiben, bei Castaneda weiter leicht abnehmen.

In allen Fällen hätten **Reduktionen der VOC-Emissionen** auch bei den 98%-Werten erkennbar geringere Ozonbelastungen zur Folge, bei Castaneda mehr als bei Tänikon.

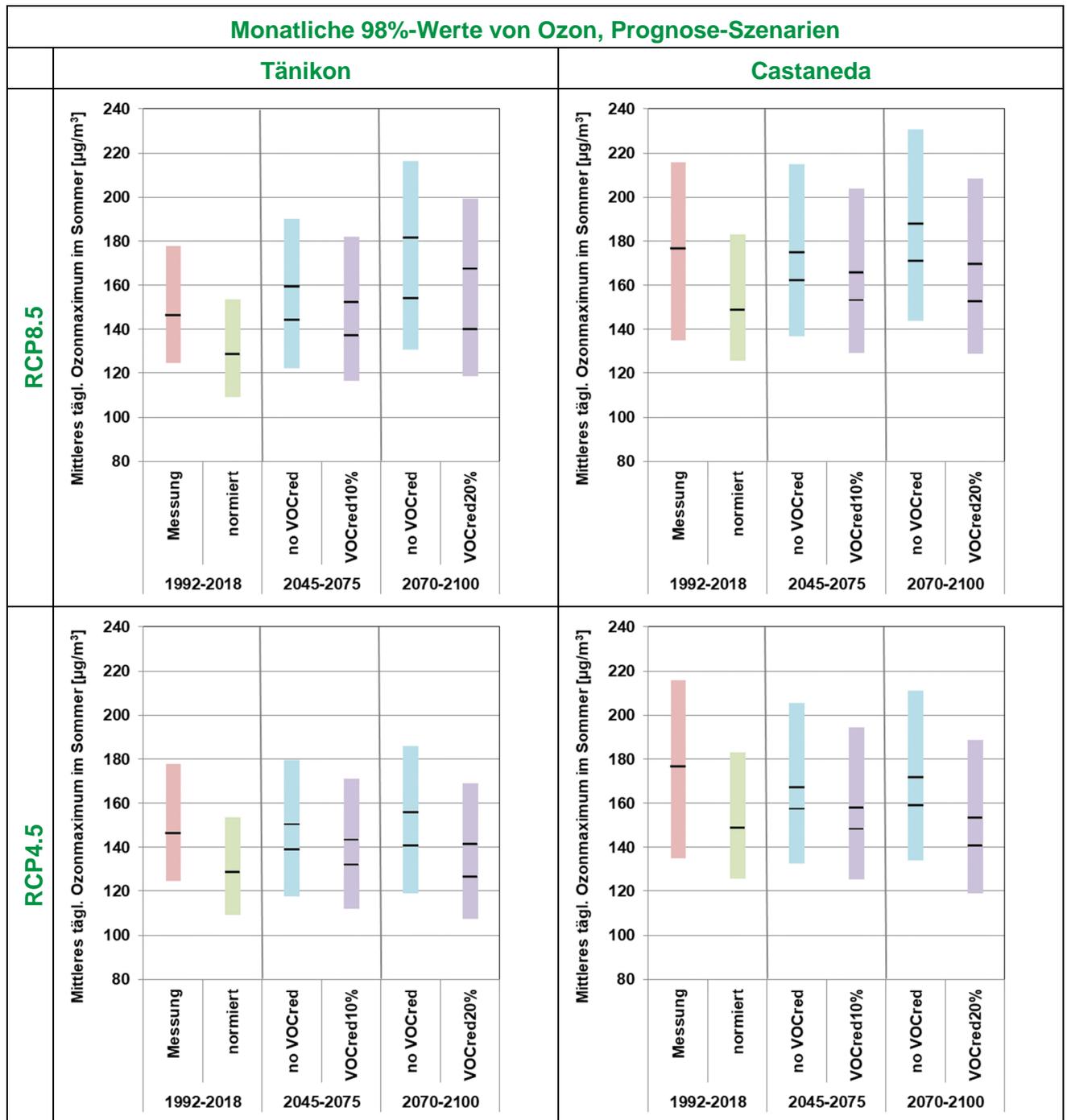


Abbildung 9.8: Gleitende 3-Monatsmittel der monatlichen 98%-Werte von Ozon: Bereiche der Messung 1992-2018 und der Normierung 1992-2018 auf VOC-Emissionen 2018 und Temperatur 1995. Prognosebereiche für 2045-2075 und 2070-2100 für Klimaszenarien CH RCP8.5 und RCP4.5 sowie mit konstanten VOC-Emissionen (Stand 2018) und Reduktion um 10/20 %. Dunkle Balken: Mittelwerte, bei den Prognosen für unteres und oberes Limit der postulierten Temperaturzunahme.

**Ohne weitere Klimaschutzmassnahmen (RCP8.5) steigt die Belastung mit photochemischen Luftschadstoffen aufgrund des Klimawandels wieder an und übertrifft im Laufe des 21. Jh. die Werte der letzten 30 Jahre deutlich, in Südbünden später als in der Ostschweiz aufgrund des stärkeren Rückgangs seit den neunziger Jahren.**

**Mit weiteren Klimaschutzmassnahmen (mit einem moderaten Zeitablauf; RCP4.5) bleibt die Belastung mit photochemischen Luftschadstoffen trotz Klimawandel gesamthaft etwa auf dem Niveau der letzten 30 Jahre, bzw. steigt vor allem in der Ostschweiz leicht an.**

**In allen Fällen führt eine weitere Reduktion der VOC-Emissionen zu erkennbaren Reduktionen der Ozonbelastung.**

## 10. Literatur

Gretener, F.: Turnaround in the Ozone Trend: A Shift from VOC- to NO<sub>x</sub>-Limitation?, Bachelor thesis, ETH Zurich, 2018.

Guicherit, R., and M. Roemer (2000), Tropospheric ozone trends, *Chemosphere - Global Change Science*, 2(2), 167-183.

Martin, R. V., A. M. Fiore, and A. Van Donkelaar (2004), Space-based diagnosis of surface ozone sensitivity to anthropogenic emissions, *Geophysical Research Letters*, 31(6).

National Research Council (1991), Rethinking the Ozone Problem in Urban and Regional Air Pollution. , *National Research Council. Washington, DC: The National Academies Press. doi: 10.17226/1889.*

Knote, C., et al. (2015), Influence of the choice of gas-phase mechanism on predictions of key gaseous pollutants during the AQMEII phase-2 intercomparison, *Atmospheric Environment*, 115, 553-568.

Blanchard, C. and Hidy, G.: Ozone response to emission reductions in the southeastern United States. *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 8183–8202, 2018.

Steiner, A.L. et al. (2008): VOC reactivity in central California: comparing an air quality model to ground-based measurements. *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 351–368.

Switzerland's Informative Inventory Report 2018 (IIR), Submission under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, Submission of March 2018 to the United Nations ECE Secretariat", BAFU, 2018.

Austria's National Inventory Report 2018, Submission under the United Nations Framework. Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol, Umweltbundesamt Wien.

CH2018 (2018), CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp.

Lamarque, J.-F., P. Hess et al. (2005), Tropospheric ozone evolution between 1890 and 1990, *J. Geophys. Res.*, 110, D08304.

Lacressonnière, G., Peuchc, H. et al. (2014), European air quality in the 2030s and 2050s: Impacts of global and regional emission trends and of climate change, *Atmospheric Environment*, Volume 92, p. 348-358.

Laura Watson, Gwendoline Lacressonnière et al. (2016), Impact of emissions and +2 °C climate change upon future ozone and nitrogen dioxide over Europe, *Atmospheric Environment*, Volume 142, p. 271-285.

Maria Athanassiadou, Jonathan Baker et al. (2010), An assessment of the impact of climate change on air quality at two UK sites, *Atmospheric Environment*, Volume 44, Issue 15, p. 1877-1886.

Morgenstern, O., Stone, K. A. et al. (2018), Ozone sensitivity to varying greenhouse gases and ozone-depleting substances in CCMI-1 simulations, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, p. 1091-1114.

Young, Paul and Archibald, A. T. et al. (2013), Pre-industrial to end 21st century projections of tropospheric ozone from the Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13 (4). pp. 2063-2090.

E. Sá, H. Martins, J. Ferreira et al. (2016), Climate change and pollutant emissions impacts on air quality in 2050 over Portugal, *Atmospheric Environment*, Volume 131, p. 209-224.

Johannes Staehelin, Jürg Thudium et al. (1994), Trends in surface ozone concentrations at Arosa (Switzerland), *Atmospheric Environment*, Volume 28, Issue 1, p. 75-87.

BUWAL (1988), Vom Menschen verursachte Schadstoff-Emissionen in der Schweiz 1950-2010, Nachtrag September 1988, *Schr. reihe Umweltsch. 76*, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.

Crutzen P.J. (1988), Tropospheric ozone: an overview. In *Tropospheric Ozone* (edited by Isksen I.S.A.), p. 3-32, D. Reidel, Dordrecht.

Parrish, D. D., et al. (2014), Long-term changes in lower tropospheric baseline ozone concentrations: Comparing chemistry-climate models and observations at northern midlatitudes, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119, p. 5719–5736.

Akademien der Wissenschaften Schweiz (2016), Ozon und Sommersmog: Klimawandel gefährdet heutige Erfolge, swiss academies factsheets, Vol. 11, No. 5.

William C. Porter, Colette L. Heald (2019), The mechanisms and meteorological drivers of the ozone-temperature relationship, Atmos. Chem. Phys. Discuss., <https://doi.org/10.5194/acp-2019-140>.

## Anhang: Dokumentation der Regressionsanalyse

Die Ergebnisse der multiplen linearen Regressionsanalyse werden im Kap. 6.4 aufgezeigt. In diesem Anhang werden die Zahlenwerte aufgelistet.

Die Signifikanzniveaus wurden dabei wie folgt definiert:

**Tabelle A.1: Definition der Signifikanzniveaus. p: Irrtumswahrscheinlichkeit.**

p	Signifikanz	Farbcode
< 1 %	hoch signifikant	
1 – 5 %	signifikant	
> 5%	keine Signifikanz	

**Tabelle A.2: Abhängigkeit des mittleren höchsten Stundenwerts O3 Hmax von der Tagesmaximum-Temperatur Tmax, der Zeit und den nationalen VOC-Emissionen, je Standort.**

Station	Norm.test	adj. R <sup>2</sup>	Tmax (µg/m <sup>3</sup> )/°C	p Tmax	Zeit bis 2004 (µg/m <sup>3</sup> )/ Monat	p Zeit	VOC ab 2005 (µg/m <sup>3</sup> )/ (kt/Jahr)	p VOC
<b>O3 Hmax</b>								
ZH-Kaserne	Passed	0.710	5.33	<0.001			0.38	<0.001
ZH-Stampfenb.	Passed	0.746	5.12	<0.001	-0.07	0.002	0.47	<0.001
ZH-Heubeeri	Passed	0.791	5.73	<0.001	-0.13	<0.001	0.43	<0.001
Dübendorf	Passed	0.742	5.63	<0.001	-0.05	0.026	0.41	0.001
Tänikon	Passed	0.710	5.17	<0.001			0.61	<0.001
Stuelegg	Passed	0.603	4.70	<0.001	0.07	0.004	0.61	<0.001
Chur KS	Passed	0.656	4.24	<0.001	-0.09	<0.001	0.53	<0.001
DavosSHW	Passed	0.372	2.12	<0.001			0.38	<0.001
Arosa	Passed	0.462	2.39	<0.001	-0.07	0.003	0.41	0.001
St. Moritz	Passed	0.431	2.57	<0.001	-0.07	0.021	0.52	<0.001
Castaneda	Passed	0.594	5.98	<0.001	-0.16	<0.001	0.93	<0.001
Roveredo	Passed	0.570	5.71	<0.001	-0.14	<0.001	0.67	0.001

**Tabelle A.3: Abhängigkeit des Logarithmus des mittleren höchsten Stundenwerts O<sub>3</sub> Hmax von der Tagesmaximum-Temperatur Tmax, der Zeit und den nationalen VOC-Emissionen, je Standort.**

Station	Norm.test	adj. R <sup>2</sup>	Tmax	p Tmax	Zeit bis 2004	p Zeit	VOC ab 2005	p VOC
<b>LN O<sub>3</sub> Hmax</b>			(µg/m <sup>3</sup> )/°C		(µg/m <sup>3</sup> )/ Monat		(µg/m <sup>3</sup> )/ (kt/Jahr)	
ZH-Kaserne	Passed	0.695	0.046	<0.001			0.0031	<0.001
ZH-Stampfenb.	Passed	0.739	0.047	<0.001	-0.00065	0.001	0.0042	<0.001
ZH-Heubeeri	Passed	0.783	0.049	<0.001	-0.00110	<0.001	0.0036	<0.001
Dübendorf	Passed	0.731	0.047	<0.001	-0.00050	0.013	0.0032	0.004
Tänikon	Passed	0.698	0.043	<0.001			0.0051	<0.001
Stuelegg	Passed	0.584	0.040	<0.001	0.00061	0.006	0.0050	<0.001
Chur KS	Passed	0.645	0.038	<0.001	-0.00086	<0.001	0.0048	<0.001
DavosSHW	Passed	0.366	0.022	<0.001			0.0040	<0.001
Arosa	Passed	0.463	0.025	<0.001	-0.00076	0.002	0.0044	0.001
St. Moritz	Passed	0.430	0.026	<0.001	-0.00065	0.024	0.0054	<0.001
Castaneda	Passed	0.596	0.043	<0.001	-0.00113	<0.001	0.0067	<0.001
Roveredo	Passed	0.566	0.044	<0.001	-0.00111	<0.001	0.0050	0.001

**Tabelle A.4: Abhängigkeit des monatlichen 98%-Wertes von Ozon von der Tagesmaximum-Temperatur Tmax, der Zeit und den nationalen VOC-Emissionen, je Standort.**

Station	Norm.test	adj. R <sup>2</sup>	Tmax	p Tmax	Zeit bis 2004	p Zeit	VOC ab 2005	p VOC
<b>98%-Wert Ozon</b>			(µg/m <sup>3</sup> )/°C		(µg/m <sup>3</sup> )/ Monat		(µg/m <sup>3</sup> )/ (kt/Jahr)	
ZH-Kaserne	Passed	0.591	5.96	<0.001	-0.10	0.006	0.55	0.006
ZH-Stampfenb.	Passed	0.746	5.12	<0.001	-0.07	0.002	0.47	<0.001
ZH-Heubeeri	Passed	0.659	6.43	<0.001	-0.18	<0.001	0.69	0.001
Dübendorf	Passed	0.659	6.44	<0.001	-0.09	0.009	0.70	<0.001
Tänikon	Passed	0.597	5.58	<0.001			0.99	<0.001
Stuelegg	Passed	0.603	4.70	<0.001	0.07	0.004	0.61	<0.001
Chur KS	Passed	0.564	4.38	<0.001	-0.13	<0.001	0.76	<0.001
DavosSHW	Passed	0.327	2.45	<0.001			0.51	<0.001
Arosa	Passed	0.439	2.94	<0.001	-0.08	0.004	0.48	0.003
St. Moritz	Failed	0.468	2.06	0.048			1.97	<0.001
Castaneda	Passed	0.436	4.50	<0.001	-0.17	0.006	1.28	<0.001
Roveredo	Passed	0.386	4.49	<0.001	-0.16	0.006	0.95	0.002

**Tabelle A.5: Abhängigkeit des AOT40-Wertes (April-September) von der Tagesmaximum-Temperatur Tmax, der Zeit und den nationalen VOC-Emissionen, je Standort.**

Station	Norm.test	adj. R <sup>2</sup>	Tmax	p Tmax	Zeit bis 2004	p Zeit	VOC ab 2005	p VOC
<b>AOT40</b>			(ppm*h)/°C		(ppm*h)/ Jahr		(ppm*h)/ (kt/Jahr)	
ZH-Kaserne	Passed	0.572	2.73	<0.001			0.14	0.01
ZH-Stampfenb.	Passed	0.484	2.09	<0.001			0.20	<0.001
ZH-Heubeeri	Passed	0.459	3.30	<0.001			0.29	0.001
Dübendorf	Passed	0.527	2.70	<0.001			0.21	<0.001
Tänikon	Passed	0.555	2.68	<0.001			0.27	<0.001
Stuelegg	Passed	0.507	3.29	<0.001	0.75	0.007	0.40	<0.001
Chur KS	Passed	0.706	3.03	<0.001	-0.42	0.028	0.31	<0.001
DavosSHW	Passed	0.598	2.14	<0.001	0.39	0.021	0.38	<0.001
Arosa	Passed	0.555	2.61	0.003	-0.56	0.050	0.31	0.003
St. Moritz	Passed	0.599	2.77	<0.001			0.36	<0.001
Castaneda	Passed	0.643	2.50	0.008			0.68	<0.001
Roveredo	Passed	0.578	3.63	<0.001	-0.82	0.014	0.33	0.004