

# **Klimatische Entwicklung in Vorarlberg**

**Temperatur, Niederschlag, Trockenheit  
und Ozon**

Dr. Jürg Thudium  
Dr. Carine Chélala

24.01.2022 / 5556.20

Oekoscience AG

Postfach 452  
CH - 7001 Chur

Telefon: +4181 250 3310  
[science@oekoscience.ch](mailto:science@oekoscience.ch)



# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Einleitung</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2. Verwendete Messstationen</b>                                    | <b>2</b>  |
| <b>3. Temperatur und Niederschlag in Vorarlberg und Umgebung</b>      | <b>4</b>  |
| <b>4. Trends der Temperatur (T) und des Niederschlags (RR)</b>        | <b>6</b>  |
| <b>5. Trockenheit</b>   | <b>11</b> |
| 5.1. Klimatische Trockenheit  | 11        |
| 5.2. Bodentrockenheit   | 14        |
| 5.3. Rheinabfluss   | 15        |
| <b>6. Zur zukünftigen Entwicklung der Ozonbelastung in Vorarlberg</b> | <b>17</b> |
| <b>7. Zusammenfassung</b>   | <b>23</b> |
| <b>8. Klimawandel und Lufthygiene</b>                                 | <b>26</b> |
| 8.1. Klimateffekte und Luftqualität im AR6 von IPCC                   | 26        |
| 8.2. Ozon   | 29        |
| 8.3. Stickoxide NO <sub>x</sub>                                       | 32        |
| 8.4. Sulfate  | 32        |

# Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 2.1: Karte der Messstationen ( <i>Kartenquelle: SwissTopo, 2022</i> ).  | 3  |
| Abbildung 3.1: Normwerte 1981-2010 je Monat (links) und Jahr (rechts) für Temperatur (T; oben) und Niederschlag (RR; unten).  | 4  |
| Abbildung 3.2: Verlauf von Niederschlag (Monatssummen, RR) und Temperatur (T) im 3-Jahresmittel sowie der Sonnenscheindauer (Monatssummen, SSD) im 5-Jahresmittel in Feldkirch, 1890-2021.  | 5  |
| Abbildung 4.1: Trends der Mitteltemperatur je Monat an vier Stationen. Die gepunkteten Balken zeigen die Standardabweichung des Trends gemäß linearer Regression.   | 7  |
| Abbildung 4.2: Trends der Temperatur ( $\Delta T$ ) und des Niederschlags ( $\Delta RR$ ) je Monat, Vorarlberg und Umgebung 1905-2020. MW: Mittelwert.  | 8  |
| Abbildung 4.3: Verteilung der höchsten und tiefsten Monatsmittel (5% Quantile = 81 Monate) der Temperatur auf 20-Jahr-Zeiträume, Januar 1886 – August 2021. Insgesamt 1628 Monate.  | 9  |
| Abbildung 4.4: Verteilung der höchsten und tiefsten Monatsmittel (5% Quantile = 81 Monate) des Niederschlags auf 20-Jahr-Zeiträume, Januar 1886 – August 2021. Insgesamt 1628 Monate.   | 10 |
| Abbildung 5.1: Nasse und trockene Vegetationsperioden 1886-2021. Mittelwerte der vier Niederschlagsmessstationen Bregenz, Feldkirch, Sargans und Langen. Unten: Niederschlagssumme [RR] während der Vegetationsperiode April-August. Oben: Auftreten von Jahren mit trockener ( $RR < 75\%$ der Norm) bzw. nasser ( $RR > 125\%$ der Norm) Vegetationsperiode. Norm: Mittlerer RR während April-August von 1981-2010. | 12 |
| Abbildung 5.2: Nasse und trockene Vegetationsperioden 1886-2021 in Langen. Unten: Niederschlagssumme [RR] während der Vegetationsperiode April-August. Oben: Auftreten von Jahren mit trockener ( $RR < 75\%$ der Norm) bzw. nasser ( $RR > 125\%$ der Norm) Vegetationsperiode. Norm: Mittlerer RR während April-August von 1981-2010.   | 13 |
| Abbildung 5.3: Nasse und trockene Vegetationsperioden 1886-2021 beim Säntis. Unten: Niederschlagssumme [RR] während der Vegetationsperiode April-August. Oben: Auftreten von Jahren mit trockener ( $RR < 75\%$ der Norm) bzw. nasser ( $RR > 125\%$ der Norm) Vegetationsperiode. Norm: Mittlerer RR während April-August von 1981-2010.   | 14 |
| Abbildung 5.4: Abfluss des Rheins bei Diepoldsau 1919-2019. Oben: Jahresmittel (links) und Monatsmittel 1919-1938 und 2000-2019 (rechts). Unten: Verlauf der Monatsmittel für   |    |

den Februar 1919-2019 (links) und Änderung der monatlichen Abflüsse in 100 Jahren (Trend mit Standardabweichung; rechts). 15

Abbildung 6.1: 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.* 18

Abbildung 6.2: Tagesmitteltemperatur (x-Achse) gegen Tagesmaximaltemperatur (y-Achse) für Dornbirn ARA von 2010-2020 (jeweils Juni-August). 21

Abbildung 8.1: Zeitreihe der über Arosa gemessenen mittleren jährlichen Gesamtozonmenge (in Dobsonunits). *Quelle: MeteoSchweiz.* 31

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Messstationen in Vorarlberg und der Schweiz: 2

Tabelle 5.1: Speicherseen mit Entwässerung in den Rhein in Vorarlberg, Graubünden und St. Gallen (*Quellen: Seite „Liste der Speicherseen in der Schweiz“. In: Wikipedia – Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 11. Juni 2020, 21:38 UTC. Seite „Liste der Stauseen in Österreich“. In: Wikipedia – Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 16. Juli 2021, 22:05 UTC.*) 16

Tabelle 6.1: Klimawandel und Erhöhung der mittleren täglichen Ozonspitzen im Sommer für die CH-Klimaszenarien RCP8.5 und RCP4.5 für die Klimazone CHNE (Nordostschweiz), Temperatur von Dornbirn ARA. Erhöhung der Mitteltemperatur im Sommer bezogen auf die Normperiode 1981-2010. 22

# 1. Einleitung

Die konkrete klimatische Entwicklung in Vorarlberg bezüglich Temperatur, Niederschlag und Trockenheit wird anhand von langjährigen meteorologischen Messstationen dargestellt. Es wird eine einfache Ozonprognose für Vorarlberg erstellt, welche aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Ozons stark vom Klimageschehen abhängt.

Zwischen Klimaänderungen und Luftschadstoffen gibt es umfassende Wechselwirkungen, welchen in Anlehnung zum Sachstandsbericht Nr. 6 (Assessment Report 6) des IPCC im Schlusskapitel nachgegangen wird. Dabei werden die Luftschadstoffe Ozon, NO<sub>x</sub> und Sulfate speziell betrachtet.

Die in dieser Studie verwendeten Daten stammen vom Land Vorarlberg, sind öffentlich zugänglich, wurden für diese Studie von staatlichen Stellen außerhalb Vorarlbergs überlassen oder wurden von Oekoscience gekauft.

## 2. Verwendete Messstationen

Für die vorliegende Studie wurden die folgenden Messreihen von HISTALP (HISTORICAL INSTRUMENTAL CLIMATOLOGICAL SURFACE TIME SERIES OF THE GREATER ALPINE REGION), ein Projekt des österreichischen Wetterdienstes (ZAMG) für Vorarlberg bzw. von MeteoSchweiz für die Schweiz verwendet:

**Tabelle 2.1: Messstationen in Vorarlberg und der Schweiz:**

| Station                  | Stationshöhe<br>m ü.M. | Messbeginn<br>Temperatur<br>T | Messbeginn<br>Niederschlag<br>RR | Messbeginn Son-<br>nenscheindauer<br>SSD | Messbeginn<br>Abfluss und<br>Wasserstand |
|--------------------------|------------------------|-------------------------------|----------------------------------|--|--|
| Bregenz                  | 424                    | 1869                          | 1874                             | ---                                      | ---                                      |
| Feldkirch                | 438                    | 1875                          | 1876                             | 1936                                     | ---                                      |
| Langen<br>Am Arlberg     | 1221                   | ---                           | 1881                             | ---                                      | ---                                      |
| Bad Ragaz                | 497                    | 1886                          | ---                              | ---                                      | ---                                      |
| Sargans                  | 585                    | ---                           | 1886                             | ---                                      | ---                                      |
| Säntis                   | 2501                   | 1886                          | 1886                             | ---                                      | ---                                      |
| Diepoldsau<br>Rietbrücke | 410                    | ---                           | ---                              | ---                                      | 1919                                     |

Der folgende Kartenausschnitt zeigt die Lage der Messstationen.

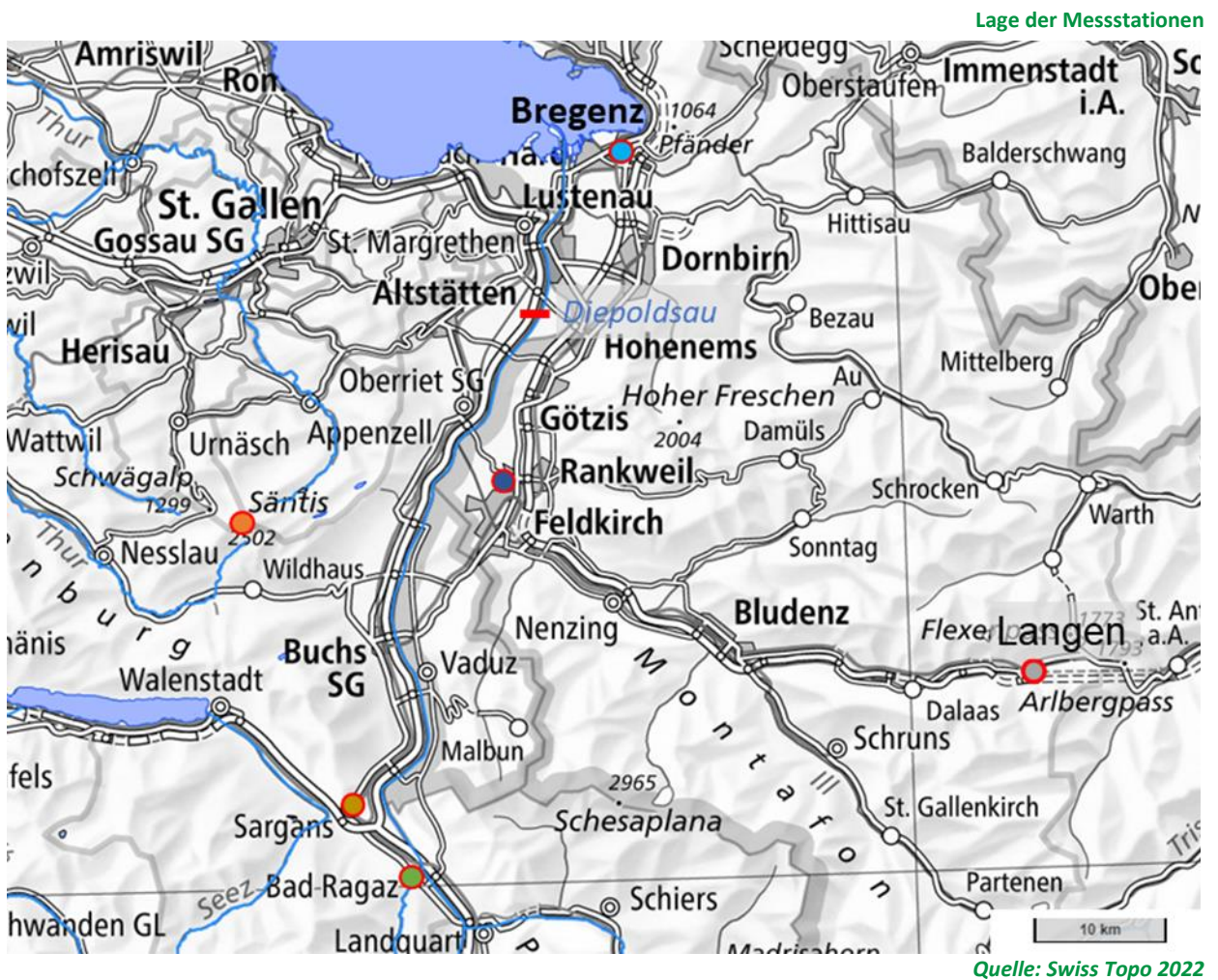


Abbildung 2.1: Karte der Messstationen (Kartenquelle: SwissTopo, 2022).



### 3. Temperatur und Niederschlag in Vorarlberg und Umgebung

In diesem Kapitel wird die klimatische Situation in Vorarlberg dargestellt. Zunächst werden Normwerte von Temperatur und Niederschlag gezeigt. Dies sind die Mittelwerte über den Zeitraum 1981 - 2010. Dabei weisen die 3 Stationen Feldkirch Bregenz und Bad Ragaz praktisch die gleichen Monatsmittelwerte der Temperatur auf. Der Säntis ist natürlich deutlich kälter. Beim Niederschlag sind die Variationen unter den Stationen auch im 30-jährigen Mittel grösser. Überall fallen die größten Niederschlagsmengen im Sommer (Juni-August); diese sind Größenordnungsmäßig doppelt so groß wie im Winter Jahr. Die Bergstation Säntis weist demgegenüber auch im Winterhalbjahr ähnliche Niederschlagsmengen auf wie im Sommer.

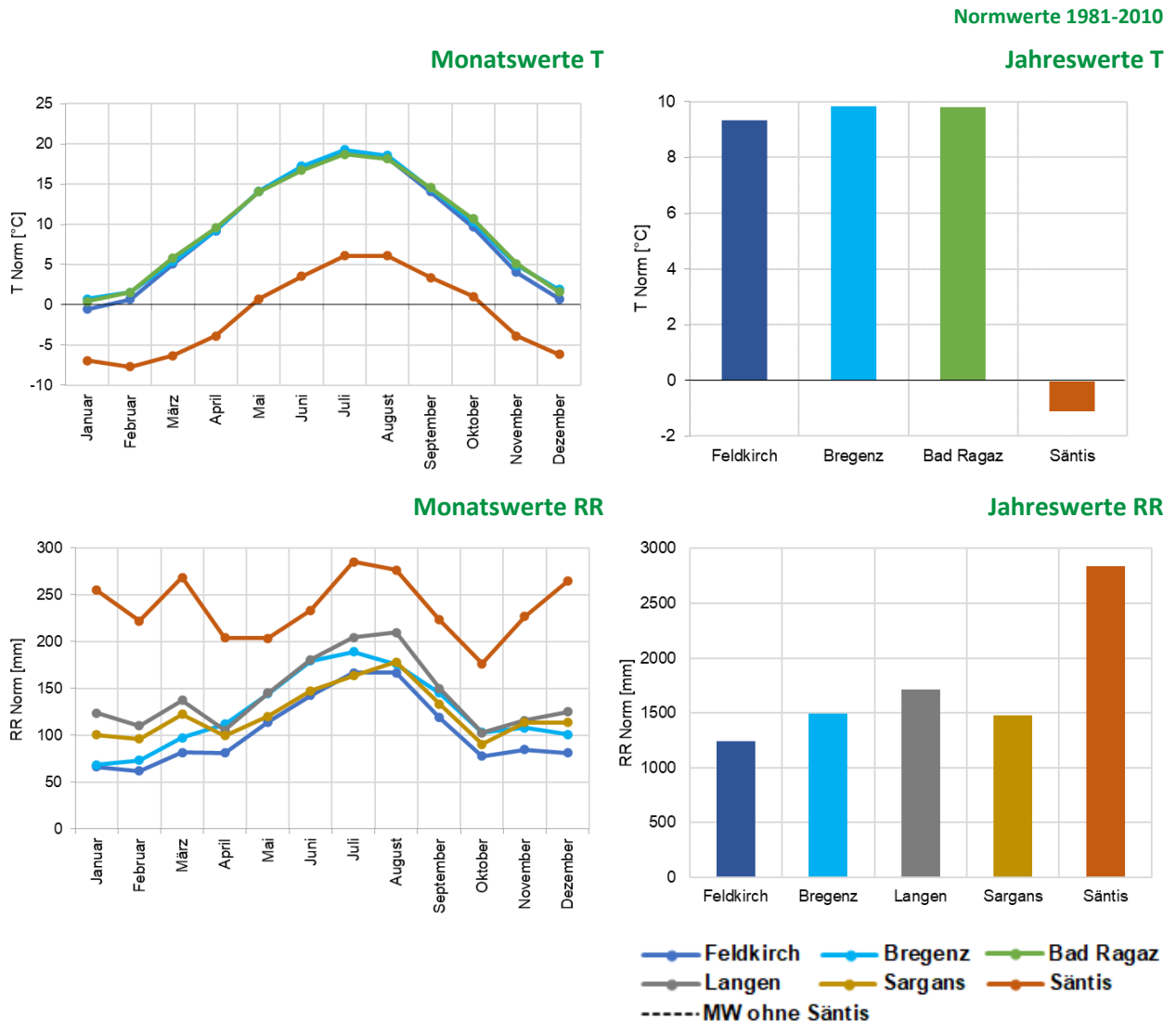
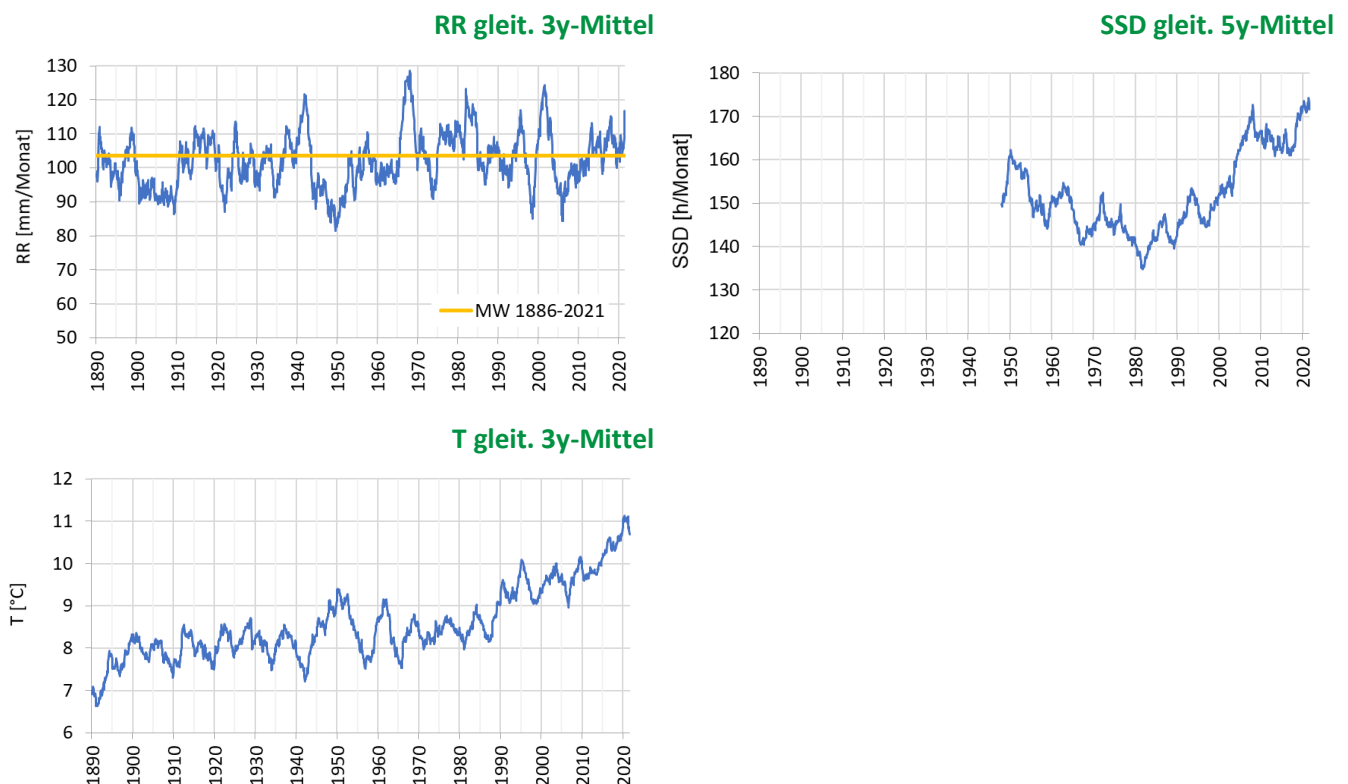


Abbildung 3.1: Normwerte 1981-2010 je Monat (links) und Jahr (rechts) für Temperatur (T; oben) und Niederschlag (RR; unten).

Die klimatische Entwicklung über die letzten 130 Jahre wird am Beispiel von Feldkirch aufgezeigt. Dabei kommen gleitende Dreijahresmittel von Niederschlag und Temperatur zur Darstellung.

Der Niederschlag ist über die gesamte Zeit konstant geblieben mit erheblichen Schwankungen auch im Dreijahresmittel. Phasen mit deutlich zu viel oder deutlich zu wenig Niederschlag sind also unserem Klima immanent und keine Folge des Klimawandels. Längere trockene Phasen gab es zu Beginn und in der Mitte des 20. Jahrhunderts und am Anfang des 21. Jahrhunderts.

Verlauf von RR, SSD und T in Feldkirch, 1890-2021



**Abbildung 3.2: Verlauf von Niederschlag (Monatssummen, RR) und Temperatur (T) im 3-Jahresmittel sowie der Sonnenscheindauer (Monatssummen, SSD) im 5-Jahresmittel in Feldkirch, 1890-2021.**

Die Temperatur zeigt einen beständigen Anstieg. Dazwischen kam es zwischen etwa 1950 und 1980 zu einer leichten Abkühlung, danach zu einem verstärkten Anstieg. In der Phase von 1950 – 1980 reduzierte sich die Sonneneinstrahlung am Erdboden (global dimming), danach bis heute nahm sie wieder zu (global brightening). Dies wirkte sich auf die Temperatur aus. Das gleitende 5-Jahresmittel der Sonnenscheindauer für Feldkirch zeigt diese beiden Phasen deutlich.

Generell werden global dimming und global brightening als Folgen zunehmender und wieder abnehmender Luftverschmutzung angesehen, vor allem durch Sulfate. Allerdings hat die Luftverschmutzung durch Sulfate schon vor 1950 eingesetzt.

## 4. Trends der Temperatur (T) und des Niederschlags (RR)

Die Betrachtungen zu den Trends von Temperatur und Niederschlag in Vorarlberg und Umgebung sowie zur Trockenheit lehnen sich an die wissenschaftliche Publikation "Klimawandel in Graubünden und Umgebung", Thudium J. und Chélala C., Jahresbericht 121 der Naturforschenden Gesellschaft Graubünden, 2020 an:

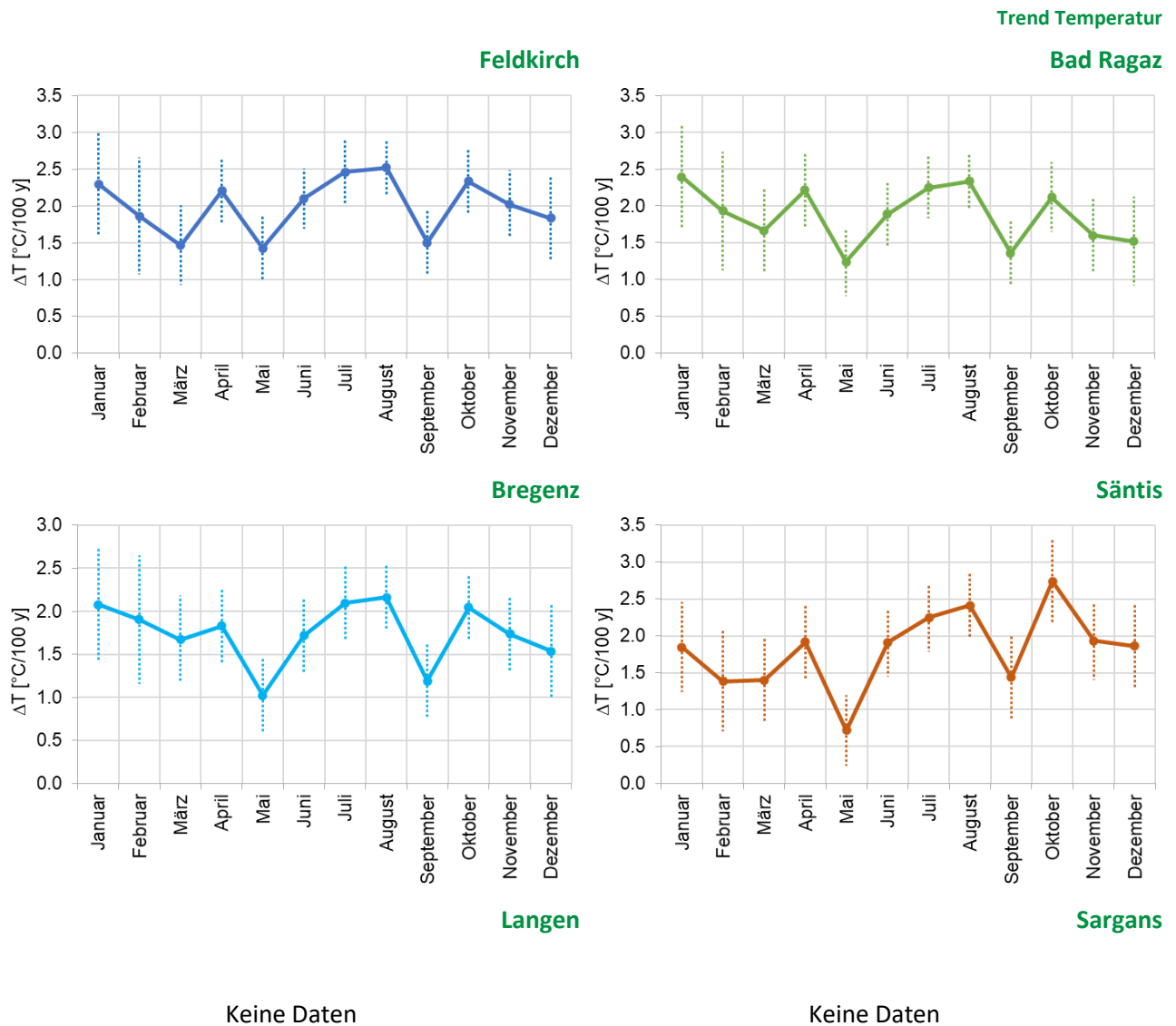
<https://www.e-periodica.ch/digbib/view?pid=ngg-002%3A2020%3A121#51>

Für diese Arbeit wurden monatliche Messwerte der Stationen Bregenz, Feldkirch, Langen, Säntis, Sargans und Bad Ragaz verwendet (s. Kap. 2). Für Temperatur und Niederschlag umfassen die Daten den Zeitraum von 1905 bis 2020. Bei allen Messreihen handelt es sich um homogenisierte Datenreihen bzgl. Temperatur und Niederschlag (die Auswirkungen allfällig unterschiedlicher Messbedingungen über die Jahrzehnte wurden ermittelt und bereinigt), die zum Zwecke der Vergleichbarkeit von ZAMG im Rahmen des HISTALP-Projektes bzw. von MeteoSchweiz erarbeitet wurden.

Die Datenbasis besteht aus Monatsmitteln (Temperatur) bzw. Monatssummen (Niederschlag). Die jahreszeitlichen Effekte konnten präzisiert werden, indem für jeden einzelnen Monat der Trend von 1905 bis 2020 mittels linearer Regression bestimmt wurde (Ermittlung der durchschnittlichen Änderung der Monatswerte pro Jahr).

Ein signifikanter bzw. hochsignifikanter Trend wird postuliert, wenn die statistische Irrtumswahrscheinlichkeit  $p$ , dass also die gefundene zeitliche Änderung nur zufällig ist, kleiner als 5% bzw. 1% ist. Zudem wurde der Shapiro-Wilk-Test durchgeführt, d.h. es wurde die Normalverteilung der Residuen geprüft. Dies entspricht einer Prüfung, ob der Trend über den gesamten Zeitraum linear ist (und nicht etwa z. B. immer mehr zunimmt). Signifikante Trends über das ganze Jahr betrachtet durften in höchstens zwei Monaten von diesem Test abweichen.

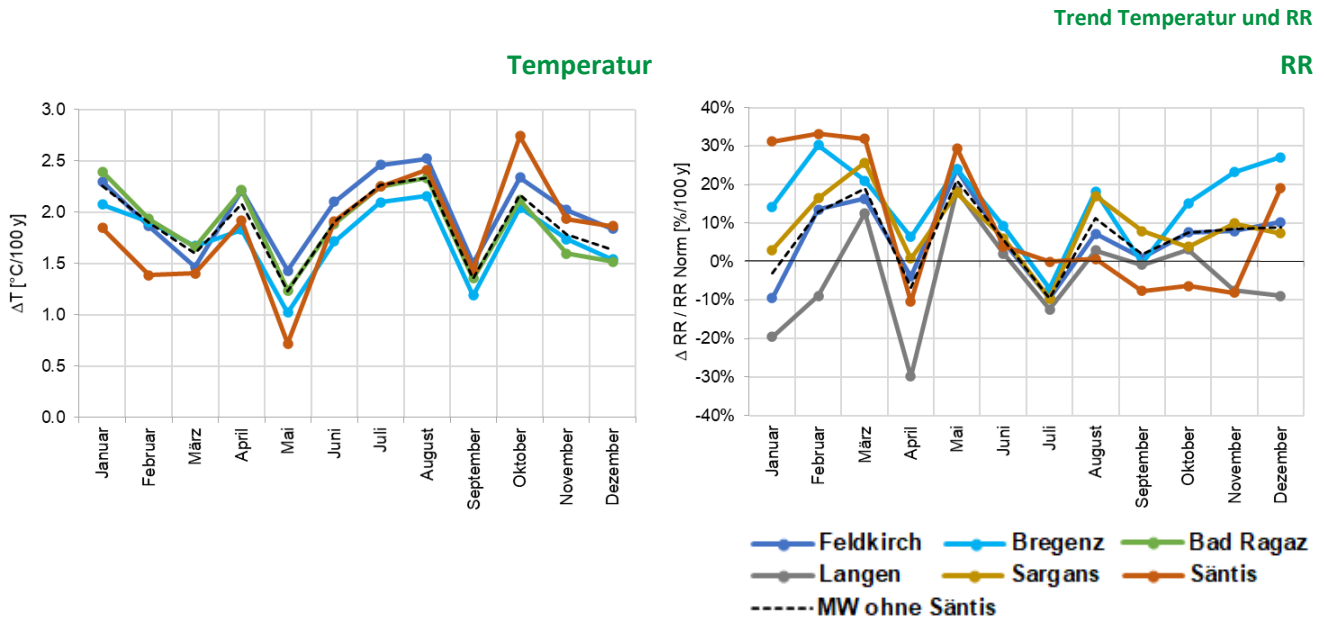
Die **durchwegs hochsignifikanten Trends der Temperaturen** liegen deutlich im positiven Bereich (Abbildung 4.1). Das heißt, es wurde an allen Orten und in jedem Monat wärmer. In der Region Vorarlberg und Umgebung wurde es pro 100 Jahre teilweise monatlich bis zu 2.5°C wärmer.



**Abbildung 4.1: Trends der Mitteltemperatur je Monat an vier Stationen. Die gepunkteten Balken zeigen die Standardabweichung des Trends gemäß linearer Regression.**

Die Trends beim Niederschlag waren an keiner Station und in keinem Monat signifikant. Es gibt also in Vorarlberg und Umgebung keine statistisch gesicherte Änderung des Niederschlags in den letzten 116 Jahren. Die gefundenen Trends können, vor allem wenn sie sich an mehreren Stationen zeigen, gewisse Tendenzen angeben. Da aber die Balken der Standardabweichungen fast immer über die Nulllinie gehen, wird auf eine Darstellung der einzelnen Stationen verzichtet.

Die Zusammenschau des Trends der Temperatur (hoch signifikant) und des Niederschlags (nicht signifikant) über alle untersuchten Stationen gibt einen guten Überblick.



**Abbildung 4.2: Trends der Temperatur ( $\Delta T$ ) und des Niederschlags ( $\Delta RR$ ) je Monat, Vorarlberg und Umgebung 1905-2020. MW: Mittelwert.**

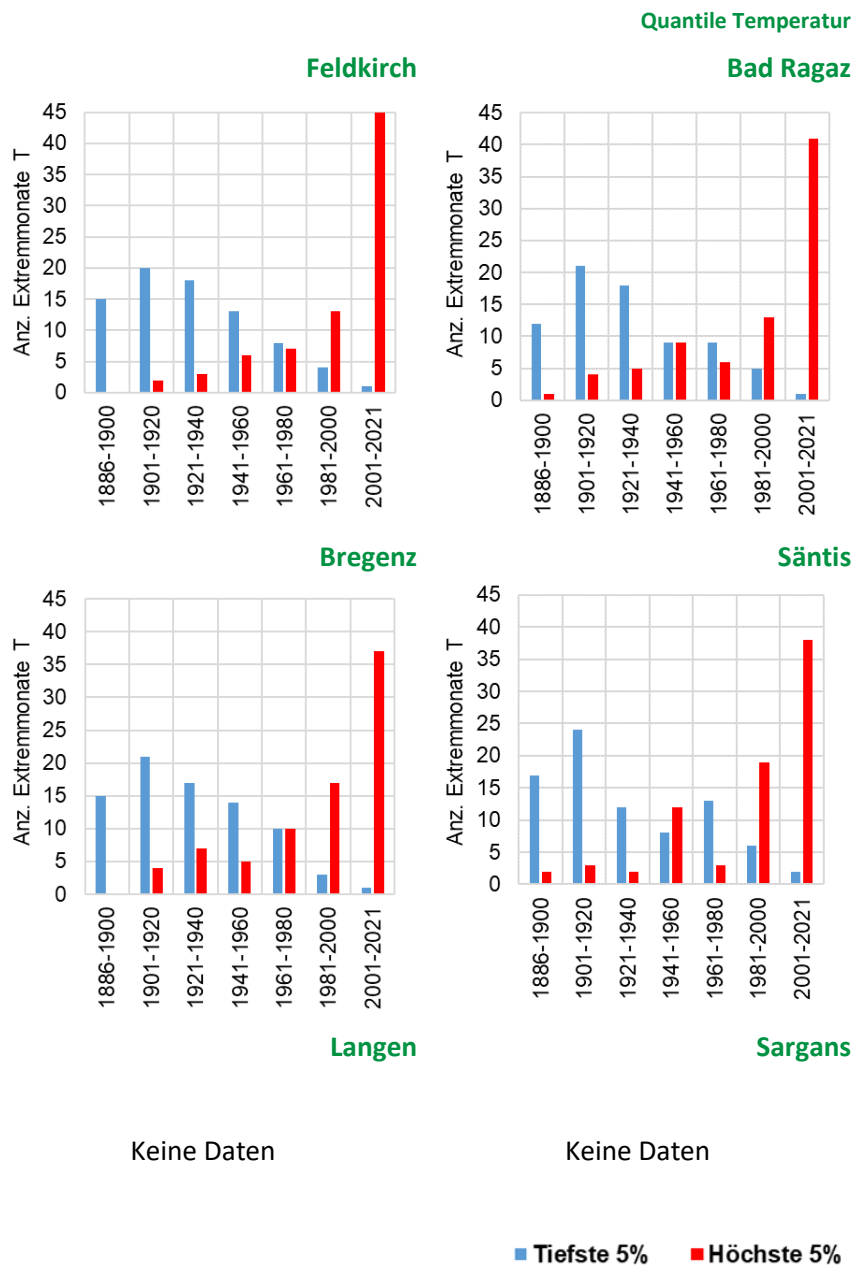
**Trend der Temperatur:** Der bei allen Stationen ziemlich parallele Jahresverlauf ist überraschend, vor allem der wellige Verlauf von April bis Dezember. Mai und September weisen deutlich geringere Erwärmungen auf als die benachbarten Monate. Die Erwärmung hängt offenbar stark vom jeweiligen Monat ab, und es gibt systematisch im Mittel über 116 Jahre große Unterschiede zwischen aufeinander folgenden Monaten. Über alle Stationen zusammengenommen ist die Erwärmung im Mai und September am geringsten, im Juli, August und Oktober am größten.

**Trend des Niederschlags:** Um die Änderung der Niederschlagsmengen in den letzten 116 Jahren grafisch gut vergleichbar darzustellen, wurde die absolute Änderung in mm durch die Normwerte von 1981 bis 2010 dividiert. Dadurch entstanden Kurven, die die relative Änderung (in %) in den letzten 116 Jahren darstellen. Wie erwähnt ergeben sich keine signifikanten Niederschlagsänderungen. Eine Tendenz für mehr Niederschlag zeigt sich für Februar, März und Mai.

Aufschlussreich ist die zeitliche Verteilung von Monaten, welche bezüglich Temperatur oder Niederschlag extrem waren. Dazu wurden Quantile betrachtet, nämlich die 5% aller Monate von 1886 - 2021 welche besonders hohe beziehungsweise tiefe Temperaturen aufwiesen, oder besonders viel oder besonders wenig Niederschlag. Die Verteilung der Anzahl solcher Extremmonate wird im Folgenden in Intervallen von Doppeldekaden dargestellt.

Bei der Temperatur ist die Situation klar. Kalte Monate kommen ganz überwiegend am Anfang des Beobachtungszeitraums vor, warme am Ende. Der Klimawandel ist deutlich zu sehen.

Beim Niederschlag gibt es keine Trends. Zwei Stationen wiesen in der letzten Doppeldekade besonders viele nasse Monate auf, zwei Stationen in der vorletzten, Feldkirch weder noch. Dieses Bild passt zum Ergebnis der Trendanalyse für den Niederschlag.



**Abbildung 4.3: Verteilung der höchsten und tiefsten Monatsmittel (5% Quantile = 81 Monate) der Temperatur auf 20-Jahr-Zeiträume, Januar 1886 – August 2021. Insgesamt 1628 Monate.**

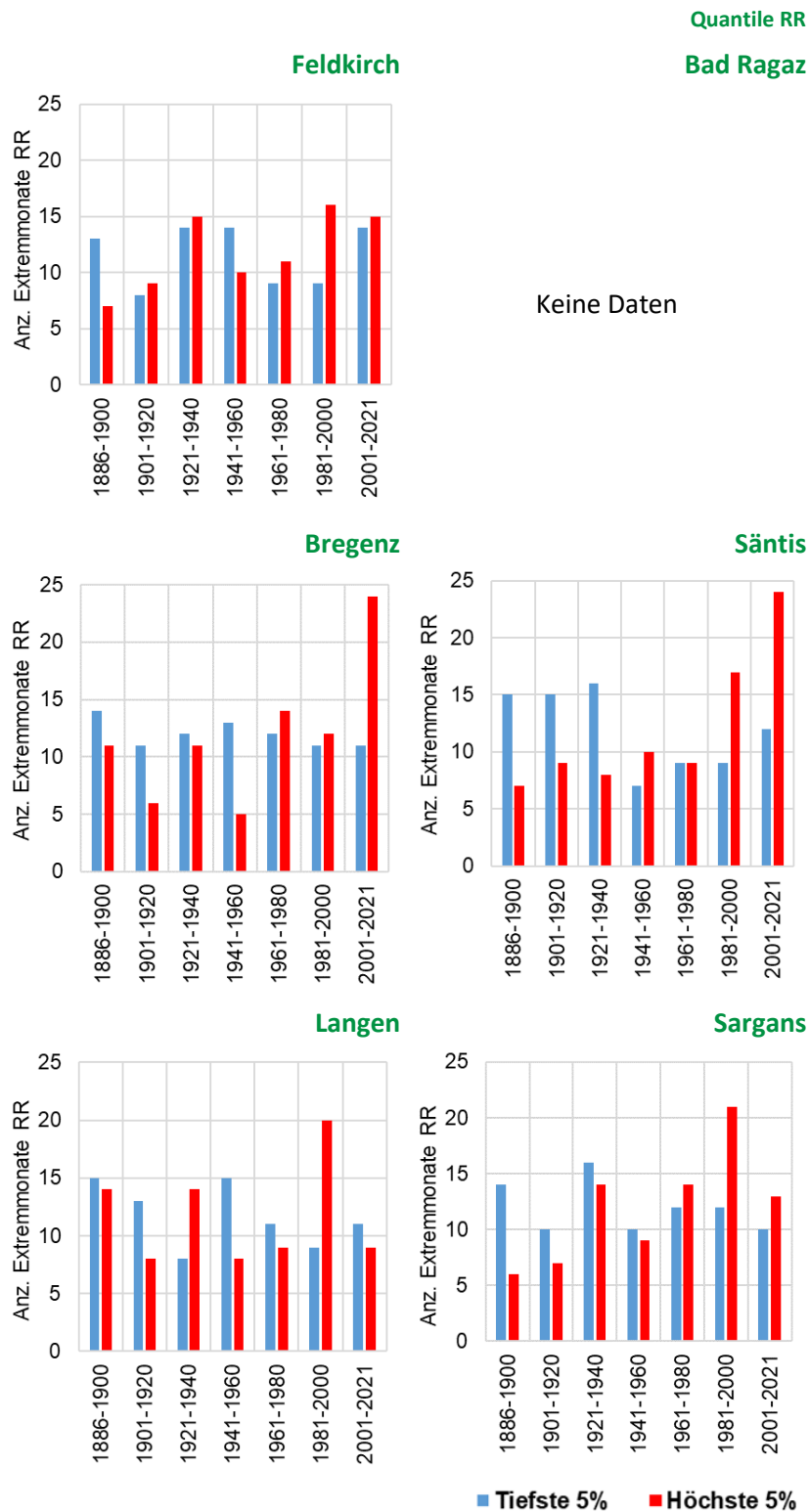


Abbildung 4.4: Verteilung der höchsten und tiefsten Monatsmittel (5% Quantile = 81 Monate) des Niederschlags auf 20-Jahr-Zeiträume, Januar 1886 – August 2021. Insgesamt 1628 Monate.

## 5. Trockenheit

Trockenheit kann eine Folge des Klimawandels sein. Sie kann sich in verschiedenen Sphären unterschiedlich auswirken. Eine **klimatische Trockenheit** kommt durch zu wenige Niederschläge zustande. **Bodentrockenheit** ist für Pflanzen inkl. Wald bedeutsam. Schließlich sind auch verminderte Abflüsse in Flüssen und damit verbundene Trockenheit möglich. Alle drei Aspekte von Trockenheit werden im Folgenden behandelt.

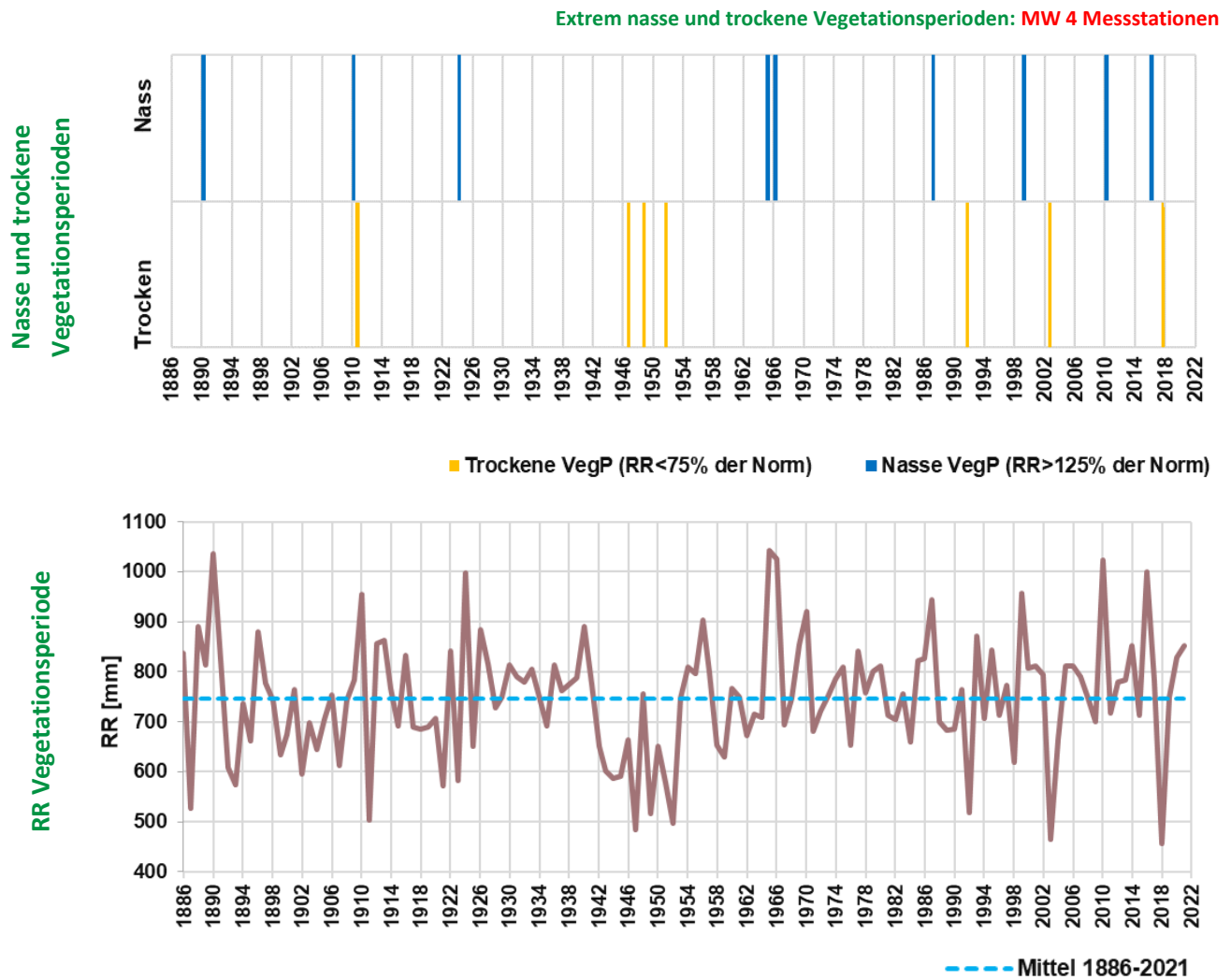
### 5.1. Klimatische Trockenheit

Grundsätzlich wird klimatische Trockenheit als eine bestimmte über einen gewissen Zeitraum anhaltende negative Abweichung von der Niederschlagsnorm (siehe Kap. 3) definiert. Da Niederschläge lokal sehr unterschiedlich ausfallen können, wurden für diese Trendbetrachtung Mittelwerte der vier Niederschlagsmessstationen Bregenz, Feldkirch, Sargans und Langen gebildet zur Repräsentation der 'mittleren Verhältnisse' in Vorarlberg.

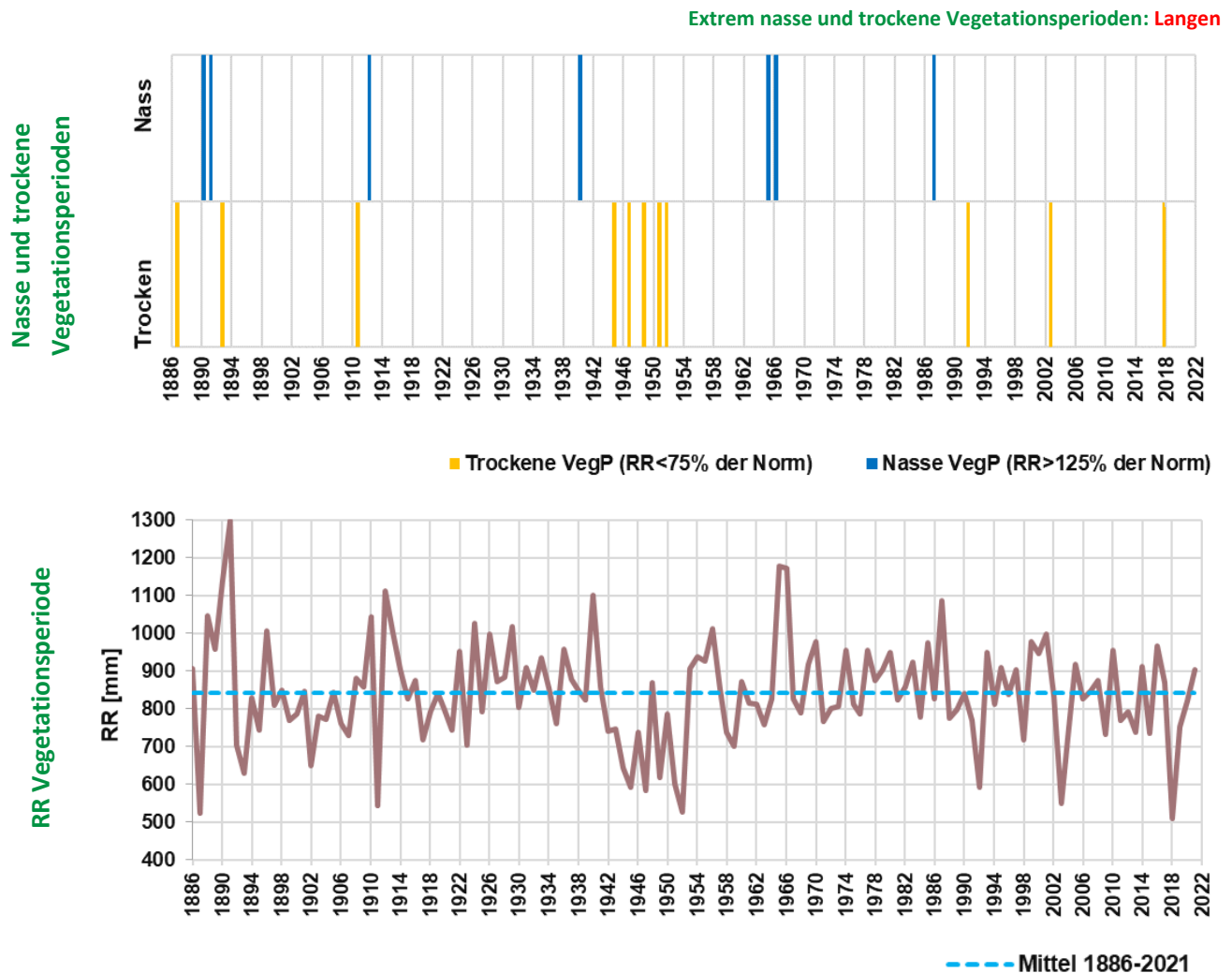
Von besonderem Interesse ist allfällige klimatische Trockenheit während der Vegetationsperiode von April bis August, weil dann die Flora wesentlich empfindlicher reagiert als zu den übrigen Zeiten. Als nasse bzw. trockene Vegetationsperiode wird für diese Studie definiert, wenn die Niederschlagssumme von April bis August mehr als 25% nach oben bzw. unten von der Norm abweicht. Die folgenden Abbildungen zeigen jeweils unten die Zeitreihe der Niederschlagssumme während der Vegetationsperiode von 1886 – 2021, oben die daraus folgenden nassen bzw. trockenen Vegetationsperioden. Neben der Zusammenfassung der vier Messstationen (s. oben) werden auch Langen (Alpental in 1200 m ü.M.) und Säntis (Alpengipfel mit 2500 m ü.M.) einzeln gezeigt.

Auch im Mittel über 4 Stationen schwankten die jährlichen Niederschläge während der Vegetationsperiode um etwa einen Faktor 2.5. Immer wieder gab es nasse und trockene Vegetationsperioden, die trockenen in letzter Zeit waren 1992, 2003 und 2018. Eine Häufung trockener Vegetationsperioden gab es in der Mitte des 20. Jahrhunderts. Langen und Säntis allein zeigen ein grundsätzlich ähnliches Bild. Nasse und trockene Vegetationsperioden kamen überwiegend jeweils in ganz Vorarlberg vor. Unterschiede waren am ehesten durch lokale Gewitterregen bedingt.



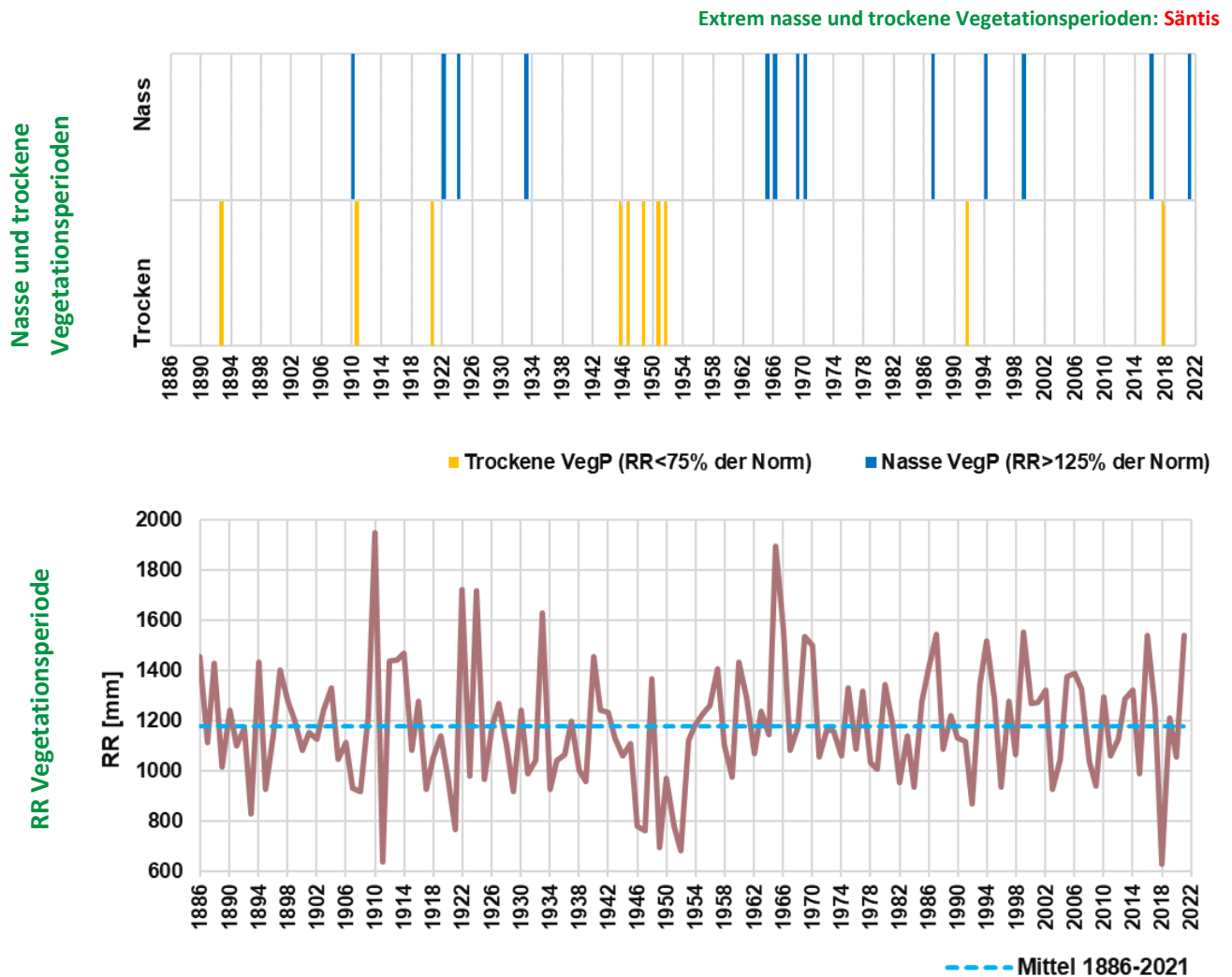


**Abbildung 5.1: Nasse und trockene Vegetationsperioden 1886-2021. Mittelwerte der vier Niederschlagsmessstationen Bregenz, Feldkirch, Sargans und Langen. Unten: Niederschlagssumme [RR] während der Vegetationsperiode April-August. Oben: Auftreten von Jahren mit trockener (RR < 75% der Norm) bzw. nasser (RR > 125% der Norm) Vegetationsperiode. Norm: Mittlerer RR während April-August von 1981-2010.**



**Abbildung 5.2: Nasse und trockene Vegetationsperioden 1886-2021 in Langen. Unten: Niederschlags-  
 summe [RR] während der Vegetationsperiode April-August. Oben: Auftreten von Jahren  
 mit trockener (RR < 75% der Norm) bzw. nasser (RR > 125% der Norm) Vegetationsperi-  
 ode. Norm: Mittlerer RR während April-August von 1981-2010.**

Über die letzten rund 130 Jahre kann nicht von einem Trend gesprochen werden beim Auftreten von nassen oder trockenen Vegetationsperioden. Dazu passt auch, dass es insgesamt keinen Trend bei den Niederschlagssummen gibt. Wieso dennoch Trockenheit für Pflanzen im Sommer ein zunehmendes Problem darstellt, wird im folgenden Abschnitt erklärt.



**Abbildung 5.3: Nasse und trockene Vegetationsperioden 1886-2021 beim Säntis. Unten: Niederschlags-  
summe [RR] während der Vegetationsperiode April-August. Oben: Auftreten von Jahren  
mit trockener (RR < 75% der Norm) bzw. nasser (RR > 125% der Norm) Vegetationsperi-  
ode. Norm: Mittlerer RR während April-August von 1981-2010.**

## 5.2. Bodentrockenheit

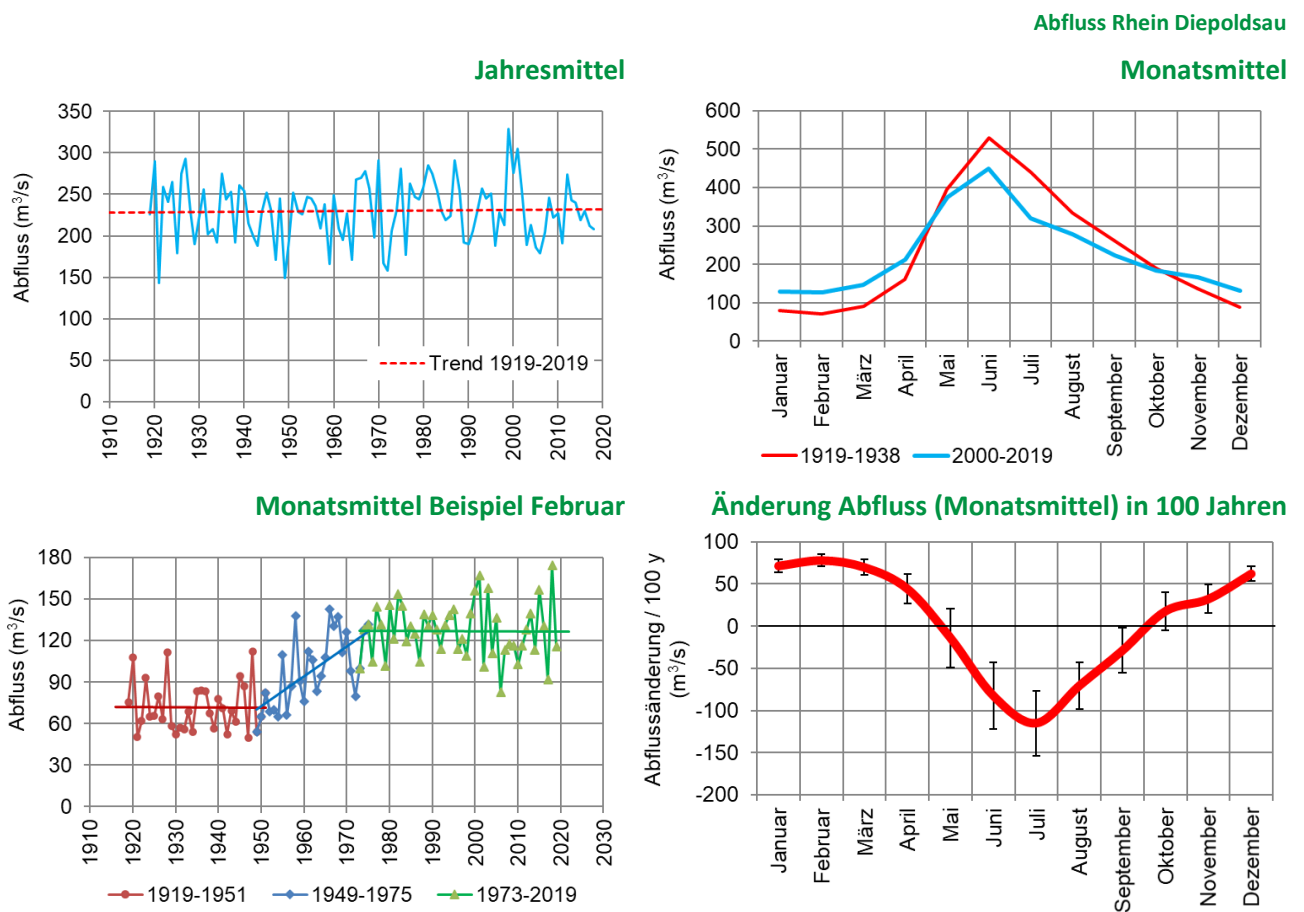
Der Bodenwassergehalt hängt vom Niederschlag und der Verdunstung ab, die vom Sättigungsdampfdruck in der Atmosphäre beeinflusst wird. Da der Sättigungsdampfdruck exponentiell mit der Temperatur steigt, steigt die Verdunstung mit der Klimaerwärmung und der Boden kann trockener werden, auch wenn sich die Niederschläge nicht geändert haben. Die zunehmende Bodentrockenheit ist vielfach gerade während der Vegetationsperiode gemessen worden und stellt ein erhebliches Problem für Landwirtschaft und den Wald dar.

Die mit der Temperatur zunehmende Verdunstung erklärt also den Umstand, dass in der Phase mit den meisten Niederschlägen – Sommer – auch die größte Bodentrockenheit auftritt. Entsprechend wirkt sich eine Phase mit Niederschlagsarmut im

Sommer viel mehr aus als in den übrigen Jahreszeiten. Mit zunehmender Erwärmung wirkt sich ein sommerliches Niederschlagsdefizit wegen der stärkeren Verdunstung stärker auf eine Bodentrockenheit aus.

### 5.3. Rheinabfluss

Das in einer Region verfügbare Wasser, hängt nicht nur von den Niederschlägen und der Verdunstung ab, sondern auch vom Abfluss in Bächen und Flüssen. Auch diese Abflüsse könnten langfristigen Änderungen unterliegen. Für Vorarlberg und Umgebung ist der Rhein der gemeinsame Abfluss. Vom Rhein liegen Abflussmessungen über die letzten gut 100 Jahre vor. Hier wurde der Abfluss bei Diepoldsau untersucht. Die Jahresmittel des Rheinabflusses schwanken stark, sind im Mittel aber über die letzten 100 Jahre konstant geblieben (Abbildung 5.4, links oben). Da die Niederschläge auch etwa konstant geblieben sind, bedeutet dies, dass ein im Mittel konstanter Anteil an diesen Niederschlägen abgeflossen ist, bzw. dass die Zurückhaltung der Niederschläge im Boden sich insgesamt nicht verändert hat.



**Abbildung 5.4: Abfluss des Rheins bei Diepoldsau 1919-2019. Oben: Jahresmittel (links) und Monatsmittel 1919-1938 und 2000-2019 (rechts). Unten: Verlauf der Monatsmittel für den Februar 1919-2019 (links) und Änderung der monatlichen Abflüsse in 100 Jahren (Trend mit Standardabweichung; rechts).**

Im Jahresgang hat es allerdings erhebliche Änderungen im Abfluss gegeben (Abbildung 5.4, rechts oben und unten). Es hat eine Verlagerung von Abfluss vom Sommer in den Winter stattgefunden. Der Grund dafür liegt in der Inbetriebnahme der großen Speicherseen in Vorarlberg und Graubünden (insbesondere Zervreila, Lago di Lei und Lünersee) im Zeitraum von etwa 1950 bis 1970 (OOSENBRUG, E., 2019. BAFU, Abteilung Hydrologie. Private Mitteilung). Das Beispiel der Abflüsse im Monat Februar (Abbildung 5.4, links unten) zeigt deren Änderung gerade während dieser beiden Dekaden. Nahezu die Hälfte des Wassers, das der Rhein im Winter in den Bodensee führt, stammt aus den Speicherseen.

Die folgende Tabelle zeigt die Speicherseen in Vorarlberg und Graubünden sowie St. Gallen, welche in den Rhein entwässern, mit Inhalt und Jahr der Fertigstellung.

**Tabelle 5.1: Speicherseen mit Entwässerung in den Rhein in Vorarlberg, Graubünden und St. Gallen (Quellen: Seite „Liste der Speicherseen in der Schweiz“. In: Wikipedia – Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 11. Juni 2020, 21:38 UTC. Seite „Liste der Stauseen in Österreich“. In: Wikipedia – Die freie Enzyklopädie. Bearbeitungsstand: 16. Juli 2021, 22:05 UTC.)**

| Name                | Kanton /<br>Bundesland | Gesamtinhalt<br>in Mio. m <sup>3</sup> | Fertigstellung |
|---------------------|------------------------|--|----------------|
| <b>CH</b>           |                        |  |                |
| Lai da Curnera      | Graubünden             | 41                                     | 1966           |
| Lai da Marmorera    | Graubünden             | 60                                     | 1954           |
| Lai da Nalps        | Graubünden             | 45                                     | 1962           |
| Lai da Sontga Maria | Graubünden             | 67                                     | 1968           |
| Sufnersee           | Graubünden             | 18                                     | 1962           |
| Zervreilasee        | Graubünden             | 101                                    | 1957           |
| Lago di Lei         | Graubünden & Italien   | 197                                    | 1961           |
| Gigerwaldsee        | St. Gallen             | 36                                     | 1976           |
| <b>AT</b>           |                        |  |                |
| Lünersee            | Vorarlberg             | 78.3                                   | 1958           |
| Silvretta-Stausee   | Vorarlberg             | 38.6                                   | 1948           |
| Spullersee          | Vorarlberg             | 16.9                                   | 1965           |
| Vermuntstausee      | Vorarlberg             | 5.3                                    | 1931           |
| Speicher Raggal     | Vorarlberg             | 2                                      | 1967           |
| Stausee Kops        | Vorarlberg             | 42.9                                   | 1965           |

## 6. Zur zukünftigen Entwicklung der Ozonbelastung in Vorarlberg

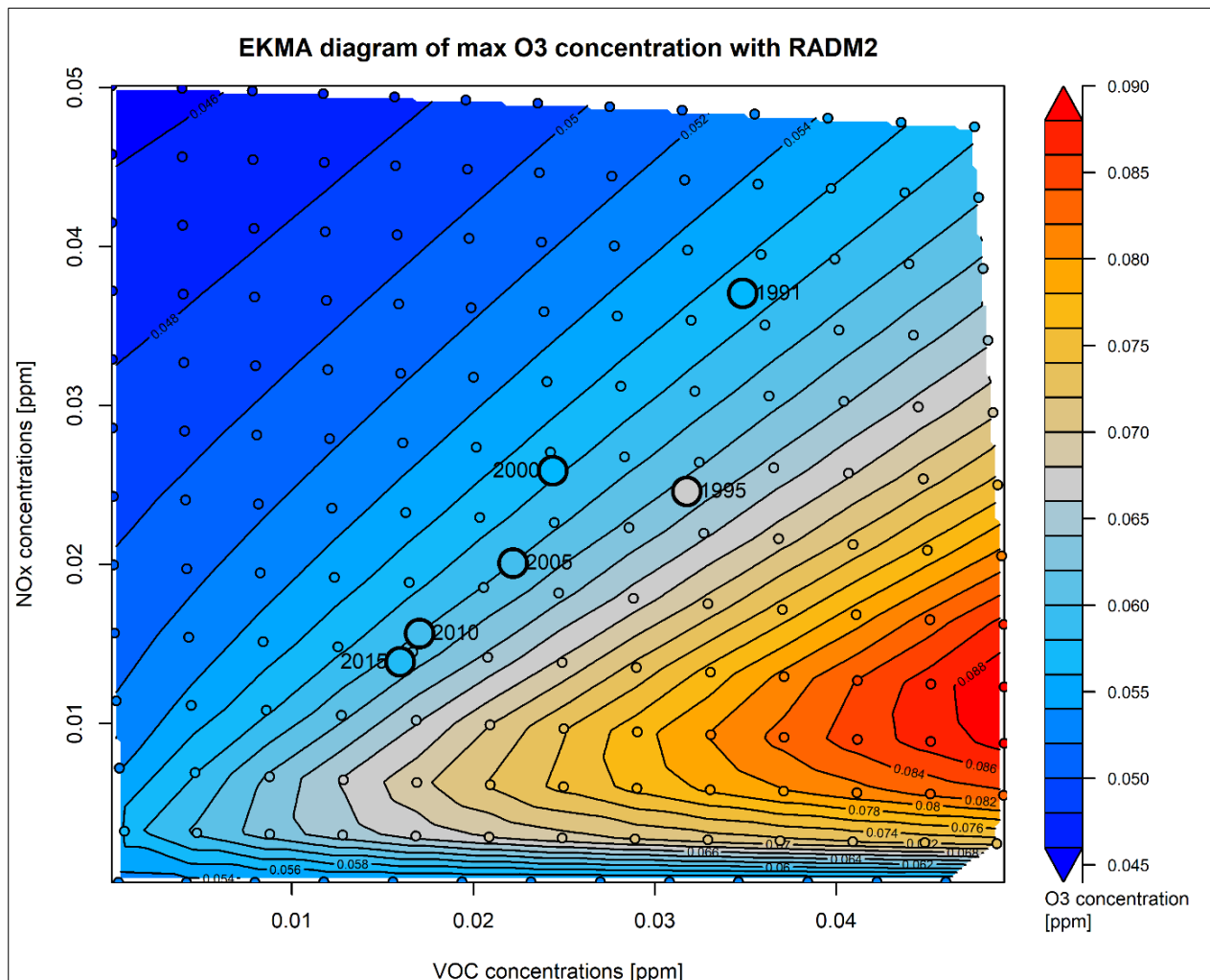
Dieses Kapitel lehnt sich an ein Projekt zur Ozonbelastung in der Ostschweiz an, welches im Auftrag von *Ostluft* durchgeführt wurde (Thudium, J., Chélala, C., 2019. Ozon in der Ostschweiz und in Graubünden: Entwicklung 1992 –2018 und Prognose bis zum Ende des 21. Jahrhunderts, im Auftrag von Ostluft).

[https://www.ostluft.ch/fileadmin/Intern/LZ\\_Information/Publikationen/Fachberichte/Be\\_Ozon2018\\_Auswertungen\\_Hitzesommer\\_GeK\\_20190321.pdf](https://www.ostluft.ch/fileadmin/Intern/LZ_Information/Publikationen/Fachberichte/Be_Ozon2018_Auswertungen_Hitzesommer_GeK_20190321.pdf)

*Als 'typische Ozonspitzenbelastung' wird das mittlere tägliche Ozonmaximum (Stundenwert) im Sommer definiert: der Mittelwert über die Ozonmaxima jeden Tages von Juni bis August. Für jedes Jahr ergibt dies einen Wert. Der Trend dieser Jahres-Zeitreihe wird in diesem Kapitel untersucht. Der Mittelwert des täglichen Ozonmaximums im Sommer erreichte in Lustenau Wiesenrain von 2000 – 2021 einen Wert von 112 µg/m<sup>3</sup>. Darauf wird in den Ergebnissen Bezug genommen.*

Die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der Ozonspitzenbelastungen – welche gesundheitlich, landwirtschaftlich und auf den Wald bezogen relevanter sind als die Ozonmittelwerte – im Lichte des Klimawandels beruht auf drei Säulen:

1. **Die Arbeit von Gretener (2018), welche modellgestützt die VOC-Limitierung der photochemischen Ozonbildung in der Ostschweiz und damit auch im Vorarlberger Rheintal zeigt.** Die Ozonproduktion bleibt auch VOC-limitiert; ein Blick auf das EKMA-Diagramm ("Empirical kinetic modeling approach") der Modellergebnisse 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 müsste sogar wieder mit einem Ozonanstieg bei einer bestimmten Maximaltemperatur gerechnet werden.



**Abbildung 6.1:** 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 2020 also nur von der Temperatur abhängen und sich nicht erhöhen aufgrund abnehmender NO<sub>x</sub>-Konzentrationen. Dies ist der günstigste Fall.

2. **Die Prognose der zukünftigen VOC-Emissionen** gemäß Austria's Informative Inventory Report (IIR) 2021, Submission under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution and Directive (EU) 2016/2284 on the reduction of national emissions of certain atmospheric pollutants. Umweltbundesamt, REPORT REP-0762, Wien 2021. Im Report wird davon ausgegangen,

dass sich die VOC-Emissionen Österreichs von 2019-2030 um insgesamt - 5.2% verringern werden, also von 108.6 auf 102.9 kt/Jahr.

3. **Die Regressionsanalyse zum Ozon** (s. Lufthygienische Entwicklung in Vorarlberg bis 2020/21, Dezember 2021, Kap. 3), welche die hohe Signifikanz der Einflussfaktoren *mittlere tägliche Maximumtemperatur* (relevant für den Klimawandel) und *VOC-Emission* (Vorläufersubstanz) zeigt und die Projektion in die Zukunft erlaubt auf Basis der ersten beiden Punkte.

Die Ozonkennzahlen zeigen eine hochsignifikante Abhängigkeit von den Einflussparametern VOC-Emission und mittlere tägliche Maximumtemperatur. Letztere Abhängigkeit ist erheblich: Pro Grad höherer mittlerer täglicher Maximumtemperatur steigt der AOT-Wert in Vorarlberg um rund 20%, das mittlere tägliche Ozonmaximum im Sommer (O<sub>3</sub>max) im Mittel um etwa 6.6%, also um gut 7 µg/m<sup>3</sup>. Die Abhängigkeit von den VOC-Emissionen ist geringer, hat aber von 2000 bis 2019 bei der Abnahme der VOC-Emissionen von 181 auf 108 kTonnen (1000 Tonnen) eine erhebliche Rolle gespielt: Die mittleren täglichen Ozonspitzen im Sommer bei gleicher Temperatur sind dadurch um etwa 16%, also rund 18 µg/m<sup>3</sup> reduziert worden (-73 kt/Jahr \* 0.215%/kt).

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. 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 ist. In unserem Zukunftsmodell wird davon ausgegangen, dass sich der aktuell bestehende Einfluss von Ferntransport und Stratosphären austausch 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. 3 im Evaluationsbericht) 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 deshalb der Einfluss des Isoprens auch weiterhin implizit in der Temperaturabhängigkeit enthalten bleibt.



- Ozon weist eine im Vergleich zum Rückgang der Vorläufersubstanzen langsamere Abnahme der Spitzenbelastungen auf. Gretener (2018) führt dies auf eine zunehmende Effektivität der Ozonbildung zurück.
- Infolge der VOC-Limitierung der Ozonbildung (zumindest) in der Ostschweiz/Vorarlberg, offensichtlich dominiert vom urbanen Wirtschaftsraum des Mittellandes, ist eine Reduktion der VOC-Emissionen für eine Ozonminderung notwendig.

## 6.1. Verwendete Klima- und VOC-Emissionsszenarien

### VOC-Emissionsszenarien:

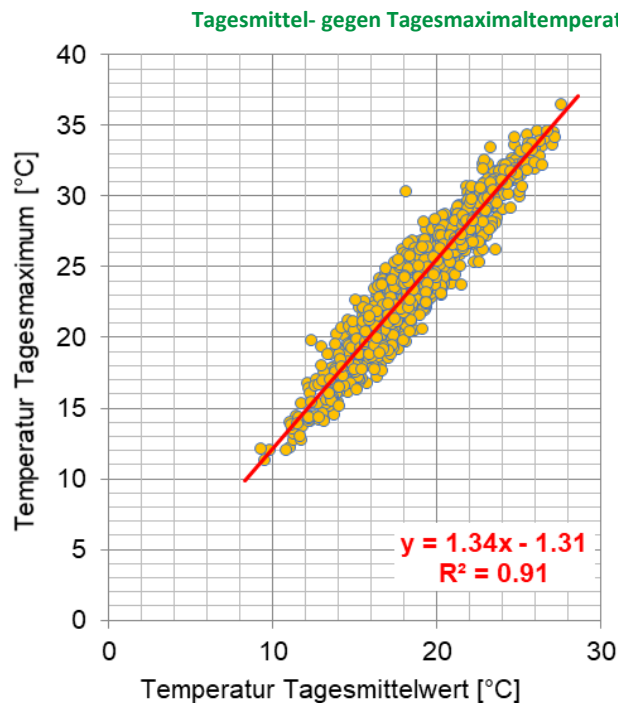
Gemäß Austria's Informative Inventory Report (IIR) 2021 sollen sich die VOC-Emissionen Österreichs von 2019-2030 noch um etwa 5.2% insgesamt absenken, also um etwa 5.6 kt/Jahr. Die mittleren täglichen Ozonspitzen im Sommer bei gleicher Temperatur senken sich dadurch nur um etwa 1.2%, also um etwa  $1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $5.6 * 0.215\%$ ). In der Folge müssten die VOC-Emissionen deutlicher zurückgehen, um einen Effekt auf die Ozonspitzenwerte zu haben. Im Folgenden werden deshalb nur die Abschätzungen der Temperatureffekte auf die Ozonspitzenwerte aufgezeigt.

### Klimaszenarien:

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 Sommertemperatur** für jeweils dreissigjährige Phasen angegeben: Für '2060' (2045-2075) und '2085' (2070-2100) mit Bezug zur Basis '1995' (1981-2010). Im Folgenden werden für das Gebiete CHNE (Nordostschweiz, gilt auch für Vorarlberg) die **Klimaszenarien RCP8.5** (keine weiteren Klimaschutzmassnahmen) und RCP 4.5 verwendet. Das **Klimaszenarium RCP4.5** geht ebenfalls wie das 'optimistische' Sze 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 **Maximaltemperatur** im Sommer 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 Dornbirn ARA von 2010-2020 (jeweils Juni-August). Mit Dornbirn ARA wurde ein typischer Vertreter des Vorarlberger Rheintals verwendet.



**Abbildung 6.2: Tagesmitteltemperatur (x-Achse) gegen Tagesmaximaltemperatur (y-Achse) für Dornbirn ARA von 2010-2020 (jeweils Juni-August).**

Die Korrelation ist hoch, und im Mittel steigt die Tagesmaximaltemperatur bei Dornbirn ARA um 1.34 °C, wenn das Tagesmittel um 1 °C steigt. Daraus lässt sich anhand der Klimaszenarien die klimawandelbedingte Erhöhung der mittleren Tagesmaximaltemperatur abschätzen.

Um daraus wiederum die Erhöhung der mittleren täglichen Ozonspitzen im Sommer ableiten zu können, wird auf die Ergebnisse der Regressionsanalyse abgestellt, wonach pro Grad höherer mittlerer täglicher Maximaltemperatur das mittlere tägliche Ozonmaximum im Sommer (O3max) im Mittel um etwa 6.6% entsprechend gut 7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ansteigt.

Damit wurden für Dornbirn ARA als Repräsentant des Vorarlberger Rheintales die beiden Szenarien RCP8.5 und RCP4.5 ohne Berücksichtigung einer Reduktion der VOC-Emissionen nach 2019 berechnet. Es ergeben sich aus den infolge des Klimawandels postulierten Temperaturanstiegen im Sommer in der östlichen Landeshälfte der Schweiz (s. Fig. 4.4 in Climate Scenarios for Switzerland, 2018) und damit auch in Vorarlberg je nach Szenarium die folgenden Erhöhungen der mittleren täglichen Ozonspitzen im Sommer:

**Tabelle 6.1: Klimawandel und Erhöhung der mittleren täglichen Ozonspitzen im Sommer für die CH-Klimaszenarien RCP8.5 und RCP4.5 für die Klimazone CHNE (Nordostschweiz), Temperatur von Dornbirn ARA. Erhöhung der Mitteltemperatur im Sommer bezogen auf die Normperiode 1981-2010.**

|               | Periode   | Erhöhung Mitteltemperatur im Sommer [°C] |     | Erhöhung mittlere Tagesmaximaltemperatur im Sommer [°C] |     | Erhöhung mittlere tägliche Ozonspitze im Sommer [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] |     |
|---------------|-----------|--|-----|---|-----|--|-----|
|               |           | von                                      | bis | von   | bis | von  | bis |
| <b>RCP8.5</b> | 2045-2075 | 2.1                                      | 4.1 | 2.8   | 5.5 | 21   | 41  |
|               | 2070-2100 | 3.4                                      | 7   | 4.6   | 9.4 | 34   | 69  |
| <b>RCP4.5</b> | 2045-2075 | 1.4                                      | 2.9 | 1.9   | 3.9 | 14   | 29  |
|               | 2070-2100 | 1.6                                      | 3.6 | 2.1   | 4.8 | 16   | 35  |

In den Szenarien stellen sich deutliche Erhöhungen der Ozonspitzenbelastungen (mittlere tägliche Ozonmaxima) aufgrund der Klimaerwärmung ein. Im als realistisch eingeschätzten Szenarium 'RCP4.5' belaufen sich diese Erhöhungen auf etwa 15-30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Im Szenarium 'RCP8.5' könnten diese bis zum Ende des 21. Jahrhunderts extrem hoch werden (von 30 bis etwa +70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , also von 112 bis auf 182  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ansteigend), allerdings wäre eine Erhöhung der Mitteltemperatur im Sommer um 7 °C ebenfalls extrem. Dies würde eine Erhöhung der Sommermitteltemperatur von 18.2 °C (Sommermittel 1981-2010) auf 25.2 °C bedeuten, wohingegen der 'Hitzesommer' 2003 eine Mitteltemperatur von 'nur' 21.4 °C aufwies.

## 7. Zusammenfassung

Die konkrete klimatische Entwicklung in Vorarlberg bezüglich Temperatur, Niederschlag und Trockenheit wurde anhand von langjährigen meteorologischen Messstationen (Bregenz, Feldkirch, Langen, Säntis, Sargans und Bad Ragaz) untersucht. Zudem wurde eine einfache Ozonprognose für Vorarlberg erstellt, welche aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Ozons stark vom Klimageschehen abhängt.

### *Temperatur und Niederschlag im Langzeitverlauf*

#### *Beispiel Feldkirch*

Das Beispiel der Messstation Feldkirch zeigt, dass der Niederschlag über die gesamte Zeit von etwa 130 Jahren (1886-2021) erhebliche Schwankungen von Jahr zu Jahr aufweist, insgesamt aber keinen Trend zeigt. Längere trockene Phasen gab es zu Beginn und in der Mitte des 20. Jahrhunderts und am Anfang des 21. Jahrhunderts.

Die Temperatur zeigt einen beständigen Anstieg. Zwischen etwa 1950 und 1980 kam es zu einer leichten Abkühlung, danach zu einem verstärkten Anstieg. In der Phase von 1950 – 1980 reduzierte sich die Sonneneinstrahlung am Erdboden ('global dimming'), danach bis heute nahm sie wieder zu ('global brightening'). Generell werden 'global dimming' und 'global brightening' als Folgen zunehmender und wieder abnehmender Luftverschmutzung durch Aerosole angesehen, vor allem durch Sulfate.

#### *Trend in Vorarlberg*

Die Datenbasis für die Trendanalyse besteht aus Monatsmitteln (Temperatur) bzw. Monatssummen (Niederschlag) von 1905-2020. Die jahreszeitlichen Effekte konnten präzisiert werden, indem für jeden einzelnen Monat der Trend mittels linearer Regression bestimmt wurde.

Die durchwegs hochsignifikanten Trends der Temperaturen liegen deutlich im positiven Bereich. In der Region Vorarlberg und Umgebung wurde es pro 100 Jahre teilweise monatlich bis zu 2.5°C wärmer. Die Erwärmung hängt stark vom jeweiligen Monat ab, und es gibt systematisch im Mittel über 116 Jahre große Unterschiede zwischen aufeinander folgenden Monaten. Über alle Stationen zusammengekommen ist die Erwärmung im Mai und September am geringsten, im Juli, August und Oktober am größten.

Die Trends beim Niederschlag waren an keiner Station und in keinem Monat signifikant. Es gibt also in Vorarlberg und Umgebung keine statistisch gesicherte Änderung des Niederschlags in den letzten 116 Jahren.

## Trockenheit

Trockenheit kann eine Folge des Klimawandels sein. Sie kann sich in verschiedenen Sphären unterschiedlich auswirken. Eine klimatische Trockenheit kommt durch zu wenige Niederschläge zustande. Bodentrockenheit ist für Pflanzen inkl. Wald bedeutsam. Schließlich sind auch verminderte Abflüsse in Flüssen und damit verbundene Trockenheit möglich. Alle drei Aspekte von Trockenheit wurden behandelt.

### Klimatische Trockenheit

Von besonderem Interesse ist allfällige klimatische Trockenheit während der Vegetationsperiode von April bis August, weil dann die Flora wesentlich empfindlicher reagiert als zu den übrigen Zeiten. Als nasse bzw. trockene Vegetationsperiode wird für diese Studie definiert, wenn die Niederschlagssumme von April bis August mehr als 25% nach oben bzw. unten von der Norm abweicht. Immer wieder über die letzten 130 Jahre gab es nasse und trockene Vegetationsperioden, die trockenen in letzter Zeit waren 1992, 2003 und 2018. Eine Häufung trockener Vegetationsperioden gab es in der Mitte des 20. Jahrhunderts. Über die letzten rund 130 Jahre kann nicht von einem Trend gesprochen werden beim Auftreten von nassen oder trockenen Vegetationsperioden. Wieso dennoch Trockenheit für Pflanzen im Sommer ein zunehmendes Problem darstellt, hängt mit der Bodentrockenheit zusammen.

### Bodentrockenheit

Der Bodenwassergehalt hängt vom Niederschlag und der Verdunstung ab, die vom Sättigungsdampfdruck in der Atmosphäre beeinflusst wird. Da der Sättigungsdampfdruck exponentiell mit der Temperatur steigt, steigt die Verdunstung mit der Klimaerwärmung und der Boden kann trockener werden, auch wenn sich die Niederschläge nicht geändert haben. Die zunehmende Bodentrockenheit ist vielfach gerade während der Vegetationsperiode gemessen worden und stellt ein erhebliches Problem für Landwirtschaft und den Wald dar. Mit zunehmender Erwärmung wirkt sich ein sommerliches Niederschlagsdefizit wegen der stärkeren Verdunstung stärker auf eine Bodentrockenheit aus.

### Rheinabfluss

Das in einer Region verfügbare Wasser, hängt nicht nur von den Niederschlägen und der Verdunstung ab, sondern auch vom Abfluss in Bächen und Flüssen. Für Vorarlberg und Umgebung ist der Rhein der gemeinsame Abfluss. Die Jahresmittel des Rheinabflusses schwanken stark, sind im Mittel aber über die letzten 100 Jahre konstant geblieben. Da die Niederschläge auch etwa konstant geblieben sind, bedeutet dies, dass ein im Mittel konstanter Anteil an diesen Niederschlägen abgeflossen ist, bzw. dass die Zurückhaltung der Niederschläge im Boden sich insgesamt nicht verändert hat.

Es hat jedoch eine Verlagerung von Abfluss vom Sommer in den Winter stattgefunden. Der Grund dafür liegt in der Inbetriebnahme der großen Speicherseen in Vorarlberg und Graubünden (insbesondere Zervreila, Lago di Lei und Lünensee) im Zeitraum von etwa 1950 bis 1970.

## Ozonprognose

Die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der Ozonspitzenbelastungen – welche gesundheitlich, landwirtschaftlich und auf den Wald bezogen relevanter sind als die Ozonmittelwerte – im Lichte des Klimawandels beruht auf drei Säulen:

- Die Arbeit von Gretener (2018), welche modellgestützt die VOC-Limitierung der photochemischen Ozonbildung in der Ostschweiz und damit auch im Vorarlberger Rheintal zeigt.
- Die Prognose der zukünftigen VOC-Emissionen gemäß Austria's Informative Inventory Report (IIR) 2021.
- Die Regressionsanalyse zum Ozon (s. Lufthygienische Entwicklung in Vorarlberg bis 2020/21, Dezember 2021, Kap. 3), welche die hohe Signifikanz der Einflussfaktoren *mittlere tägliche Maximumtemperatur* (relevant für den Klimawandel) und *VOC-Emission* (Vorläufersubstanz) zeigt und die Projektion in die Zukunft erlaubt auf Basis der ersten beiden Punkte.

Pro Grad höherer mittlerer täglicher Maximumtemperatur steigt das mittlere tägliche Ozonmaximum im Sommer im Mittel um etwa 6.6%, also um gut 7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  an.

## Szenarien

**VOC-Emissionsszenarien:** Gemäß Austria's Informative Inventory Report (IIR) 2021 sollen sich die VOC-Emissionen Österreichs von 2019-2030 noch um etwa 5.2% insgesamt absenken, was nur einen kleinen Effekt auf die Ozonspitzen hat. In diesen Szenarien wurden deshalb nur die Abschätzungen der Temperatureffekte auf die Ozonspitzenwerte aufgezeigt.

**Klimaszenarien:** Zwei Szenarien der zukünftigen Temperaturentwicklung ('RCP8.5' und 'RCP4.5') von "Climate Scenarios for Switzerland", National Centre for Climate Services, November 2018. Es werden 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).

## Ergebnisse

In den Szenarien stellen sich deutliche Erhöhungen der Ozonspitzenbelastungen (mittlere tägliche Ozonmaxima) aufgrund der Klimaerwärmung ein. Im als realistisch eingeschätzten Szenarium 'RCP4.5' belaufen sich diese Erhöhungen auf etwa 15-30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Im Szenarium 'RCP8.5' könnten diese bis zum Ende des 21. Jahrhunderts extrem hoch werden (von 30 bis etwa +70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , also von 112 bis auf 182  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ansteigend), allerdings wäre eine Erhöhung der Mitteltemperatur im Sommer um 7 °C ebenfalls extrem.

## 8. Klimawandel und Lufthygiene

Zwischen Klimawandel und Lufthygiene gibt es mannigfache Verbindungen. Eine Argumentation lautet bisweilen, in beiden Fällen handle es sich um eine negative Einwirkung des Menschen auf die Atmosphäre, dass also eine Klimaschutzmaßnahme auch gut für die Luftqualität sei bzw. umgekehrt.

In Wirklichkeit liegt aber eine weitgehende Entkopplung zwischen Klimaschutz und Lufthygiene vor: Einerseits wurden seit den achtziger Jahren große Anstrengungen zur Reduktion von Schadgasen wie SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NMVOC sowie Feinstäuben unternommen, was sich in einem drastischen Emissionsrückgang dieser Komponenten bei der Mobilität und der Wärmeerzeugung manifestiert hat. Die Emissionen von Treibhausgasen, vor allem CO<sub>2</sub>, blieben davon lange Zeit verhältnismäßig wenig berührt.

Andererseits entstehen bei der Produktion von Solarpanels, Batterien etc. Luftschadstoffe, die wenig in den Fokus gerückt werden; es wird praktisch nur die mit der Produktion verbundene CO<sub>2</sub>-Emissionen diskutiert. Auch Holzfeuerungen als Vertreter erneuerbarer Energien weisen Luftschadstoffemissionen auf, u.a. Benzo(a)pyren.

### 8.1. Klimateffekte und Luftqualität im AR6 von IPCC

Eine getrennte Betrachtung von Klimaschutz und Luftqualität ist also nach wie vor notwendig. Ungeachtet dessen gibt es umfassende Wechselwirkungen zwischen Klimaänderungen und Luftschadstoffen, welchen in diesem Kapitel nachgegangen wird. Im Sachstandsbericht Nr. 6 (Assessment Report 6) des IPCC ist das Kapitel 6 den 'Short-lived climate forcers' SLCF (kurzlebige Klimaeinflüsse) gewidmet. Die SLCF sind durchwegs (auch) Luftschadstoffe (Gase und Aerosole).

Zitat zu Kapitel 6 des AR6 des IPCC:

*Szopa, S., V. Naik, B. Adhikary, P. Artaxo, T. Berntsen, W.D. Collins, S. Fuzzi, L. Gallardo, A. Kiendler Scharr, Z. Klimont, H. Liao, N. Unger, and P. Zanis, 2021: Short-Lived Climate Forcers. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.*

[https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Chapter\\_06.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter_06.pdf)

Der AR6 des IPCC stellt eine Zusammenfassung und Bewertung von einer immensen Anzahl von wissenschaftlichen Publikationen dar, zu den SLCF etwa 900 Publikationen. Die Tabelle 6.1 in dem Report gibt eine Auflistung aller klimarelevanten SLCF, welche im Folgenden zitiert wird. Vor- und Nachspann zur Tabelle werden auch in deutscher Übersetzung angeführt.

**Tabelle 6.1 (Kap 6 AR6 IPCC):** Überblick über die interessanten SLCFs.

Für jeden SLCF sind die Quellenarten, die Lebensdauer in der Atmosphäre und der zugehörige strahlungsaktive Stoff angegeben. Der Quellentyp kann primär (emittiert von Quellenkategorien) und/oder sekundär (gebildet durch atmosphärische Oxidationsmechanismen in der Atmosphäre) sein.

Sofern nicht anders angegeben, bezieht sich die angegebene Lebensdauer auf die troposphärische Lebensdauer\*.

Die Klimawirkung erhöhter SLCFs wird als "+" für Erwärmung und "-" für Abkühlung angegeben. "Direkt" wird für SLCFs verwendet, die durch ihre Strahlungswirkung Klimateffekte ausüben, und "indirekt" für SLCFs, die als Vorläufer die atmosphärische Belastung durch andere klimatisch aktive Verbindungen beeinflussen.

Andere Prozesse, durch die sich SLCFs auf das Klima auswirken, werden gegebenenfalls aufgeführt. Die Richtlinien der Weltgesundheitsorganisation (WHO) für die Luftqualität (AQ) werden, wo zutreffend, angegeben, um zu zeigen, welche SLCFs für die Zwecke der Luftqualität geregelt sind.

**Originaltext:** *Table 6.1: Overview of SLCFs of interest for Chapter 6. For each SLCF, its source types, lifetime in the atmosphere, and associated radiatively active agent is given. Source type can be primary (emitted from source categories) and/or secondary (formed through atmospheric oxidation mechanisms in the atmosphere).*

*Unless otherwise noted, the stated lifetime refers to tropospheric lifetime\*.*

*Climate effect of increased SLCFs is indicated as "+" for warming and "-" for cooling. "Direct" is used for SLCFs exerting climate effects through their radiative forcing and "Indirect" for SLCFs which are precursors affecting the atmospheric burden of other climatically active compounds.*

*Other processes through which SLCFs affect climate are listed where applicable. The World Health Organization (WHO) guidelines for air quality (AQ) are given, where applicable, to show which SLCFs are regulated for air quality purposes.*



| Compounds   | Source Type <sup>a</sup> | Lifetime                                     | Direct                          | Indirect  | Climate Forcing | Other effects on climate | WHO AQ guidelines <sup>b</sup>  |
|---|--------------------------|--|---------------------------------|---|-----------------|--------------------------|---|
| CH <sub>4</sub>                                   | Primary                  | ~9 years<br>~12 years<br>(perturbation time) | CH <sub>4</sub>                 | O <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub>                  | +               |                          | No <sup>c</sup>   |
| O <sub>3</sub>                                    | Secondary                | Hours - weeks                                | O <sub>3</sub>                  | CH <sub>4</sub> ,<br>secondary<br>organic<br>aerosols,<br>sulphates | +               | Ecosystem                | 100 µg m <sup>-3</sup><br>8-hour mean   |
| NO <sub>x</sub> (= NO + NO <sub>2</sub> )         | Primary                  | Hours - days                                 |                                 | O <sub>3</sub> , nitrates,<br>CH <sub>4</sub>                       | +/-             | Ecosystem                | 40 µg m <sup>-3</sup><br>annual mean<br>200 µg m <sup>-3</sup><br>1-hour mean     |
| CO  | Primary +<br>Secondary   | 1-4 months                                   |                                 | O <sub>3</sub> , CH <sub>4</sub>                                    | +               |                          | No  |
| NMVOCs  | Primary +<br>Secondary   | Hours -<br>months                            |                                 | O <sub>3</sub> , CH <sub>4</sub> ,<br>organic<br>aerosols           | +/-             |                          | No  |
| SO <sub>2</sub>                                   | Primary                  | Days (trop.) to<br>weeks (strat.)            |                                 | sulphates,<br>nitrates, O <sub>3</sub>                              | -               |                          | 20 µg m <sup>-3</sup><br>24-hour mean<br>500 µg m <sup>-3</sup><br>10-minute mean |
| NH <sub>3</sub>                                   | Primary                  | Hours  |                                 | Ammonium<br>Sulphate,<br>Ammonium<br>Nitrate                        | -               | Ecosystem                | No  |
| HCFCs   | Primary                  | Months –<br>years                            | HCFCs                           | Stratospheric<br>O <sub>3</sub>                                     | +/-             |                          | No <sup>c</sup>   |
| HFCs  | Primary                  | Days – years                                 | HFCs                            |   | +               |                          | No <sup>c</sup>   |
| Halons and<br>Methylbromide                       | Primary                  | Years  | Halons and<br>Methylbro<br>mide | Stratospheric<br>O <sub>3</sub>                                     | +/-             |                          | No <sup>c</sup>   |
| Very Short-Lived<br>halogenated<br>Species (VSLs) | Primary                  | less than 0.5<br>year                        |                                 | Stratospheric<br>O <sub>3</sub>                                     | -               |                          | No <sup>c</sup>   |
| Sulphates   | Secondary                | Minutes –<br>weeks                           | Sulphates                       |   | -               | Cloud                    | as part of<br>PM <sup>d</sup>   |
| Nitrates  | Secondary                | Minutes –<br>weeks                           | Nitrates                        |   | -               | Cloud                    | as part of<br>PM <sup>d</sup>   |
| Carbonaceous<br>aerosols                          | Primary +<br>Secondary   | Minutes to<br>Weeks                          | BC, OA                          |   | +/-             | Cryo,<br>Cloud           | as part of<br>PM <sup>d</sup>   |
| Sea spray   | Primary                  | day to week                                  | Sea spray                       |   | -               | Cloud                    | as part of<br>PM <sup>d</sup>   |
| Mineral dust                                      | Primary                  | Minutes to<br>Weeks                          | Mineral<br>dust                 |   | -               | Cryo,<br>Cloud           | as part of<br>PM <sup>d</sup>   |

\* Bei den in dieser Tabelle angegebenen Lebensdauern wird davon ausgegangen, dass die Verbindungen in der gesamten Troposphäre gleichmäßig vermischt sind. Diese Annahme ist jedoch für Verbindungen mit einer Lebensdauer von weniger als einem Jahr unwahrscheinlich, weshalb die angegebenen Werte als Näherungswerte zu betrachten sind (Prather et al., 2001).

**a** Quellenarten können primär (von Quellenkategorien emittiert) und/oder sekundär (durch Reaktionen in der Atmosphäre gebildet) sein. Kryo: Wirkung auf die planetarische Albedo durch Ablagerung auf Schnee und Eis;

**b** Krzyzanowski und Cohen (2008) ;

**c** geregelt durch das Kyoto/Montreal-Protokoll;

**d** Für Feinstaub mit einem Durchmesser  $< 2,5 \mu\text{m}$  (PM<sub>2,5</sub>):  $10 \mu\text{g m}^{-3}$  Jahresmittel oder  $25 \mu\text{g m}^{-3}$  24-Stunden-Mittel (99. Perzentil) und für Feinstaub mit einem Durchmesser  $< 10 \mu\text{m}$  (PM<sub>10</sub>):  $20 \mu\text{g m}^{-3}$  Jahresmittel oder  $50 \mu\text{g m}^{-3}$  24-Stunden-Mittel (99. Perzentil).

**Originaltext:**

*\* For lifetimes reported in this table, it is assumed that the compounds are uniformly mixed throughout the troposphere, however, this assumption is unlikely for compounds with lifetimes  $< 1$  year and therefore, the reported values should be viewed as approximations (Prather et al., 2001).*

**a** *Source types can be primary (emitted from source categories) and/or secondary (formed by reactions in the atmosphere). Cryo: effect on planetary albedo through deposition on snow and ice;*

**b** *Krzyzanowski and Cohen (2008).*

**c** *regulated through Kyoto/Montreal protocol;*

**d** *For Particulate Matter with diameter  $< 2.5 \mu\text{m}$  (PM<sub>2.5</sub>):  $10 \mu\text{g m}^{-3}$  annual mean or  $25 \mu\text{g m}^{-3}$  24 hour mean (99th percentile) and for Particulate Matter with diameter  $< 10 \mu\text{m}$  (PM<sub>10</sub>):  $20 \mu\text{g m}^{-3}$  annual mean or  $50 \mu\text{g m}^{-3}$  24 hour mean (99th percentile).*

Allgemein weisen Aerosole überwiegend einen kühlenden Effekt auf (-), Methan und Ozon einen wärmenden (+). Bei fast allen Komponenten gibt es mannigfache Wechselwirkungen in der Atmosphäre, die sich klimatisch positiv oder negativ (im Sinne von verstärkend oder abschwächend) auswirken. Viele Prozesse in diesem komplexen System der Atmosphäre sind noch nicht vollständig verstanden und können vor allem nicht quantifiziert werden. Davon unberührt und auch quantifizierbar ist der Umstand, dass der Ausstoß von CO<sub>2</sub> und Methan durch den Verbrauch fossiler Energieträger der Haupttreiber der Klimaerwärmung ist.

Drei Beispielen von bekannten Luftschadstoffen werden im Folgenden in Anlehnung an Kap. 6 des AR6-ICPP etwas näher umschrieben. **Auf Deutsch übersetzte Passagen aus dem AR6 werden kursiv wiedergegeben.**

## 8.2. Ozon

Ozon ist selbst ein Treibhausgas, d.h. es streut einen Teil der von der Erdoberfläche abgestrahlten langwelligen Strahlung zurück. *Die Ozonaufnahme durch Pflanzen schädigt die Photosynthese und verringert das Pflanzenwachstum mit Folgen für den Kohlenstoff- und Wasserkreislauf (Ainsworth et al., 2012; Emberson et al., 2018). Neuere Modellierungsstudien stimmen darin überein, dass die durch Ozon*

verursachten Verluste der Bruttopräprimärproduktivität (GPP) heute im Osten der USA, Europas und Ostchinas am größten sind und auf regionaler Ebene zwischen 5 und 20 % liegen (Yue und Unger, 2014; Lombardozzi et al., 2015; Yue et al., 2017; Oliver et al., 2018) (geringes Vertrauen). Die geringere Produktivität der Pflanzen bedeutet weniger Aufnahme von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre und damit höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen. Es gibt mittlere Belege und hohe Übereinstimmung auf der Grundlage von Beobachtungsstudien und Modellen, dass die Wechselwirkungen zwischen Ozon und Vegetation das Klimasystem, einschließlich der Wasser- und Kohlenstoffkreisläufe, weiter beeinflussen, indem sie die stomatäre Kontrolle über die Transpiration von Wasserdampf zwischen der Blattoberfläche und der Atmosphäre durch die Pflanzen beeinflussen (Arnold et al., 2018; Hoshika et al., 2015; Lombardozzi et al., 2013; Sun et al., 2012; VanLoocke et al., 2012; Wittig et al., 2007).

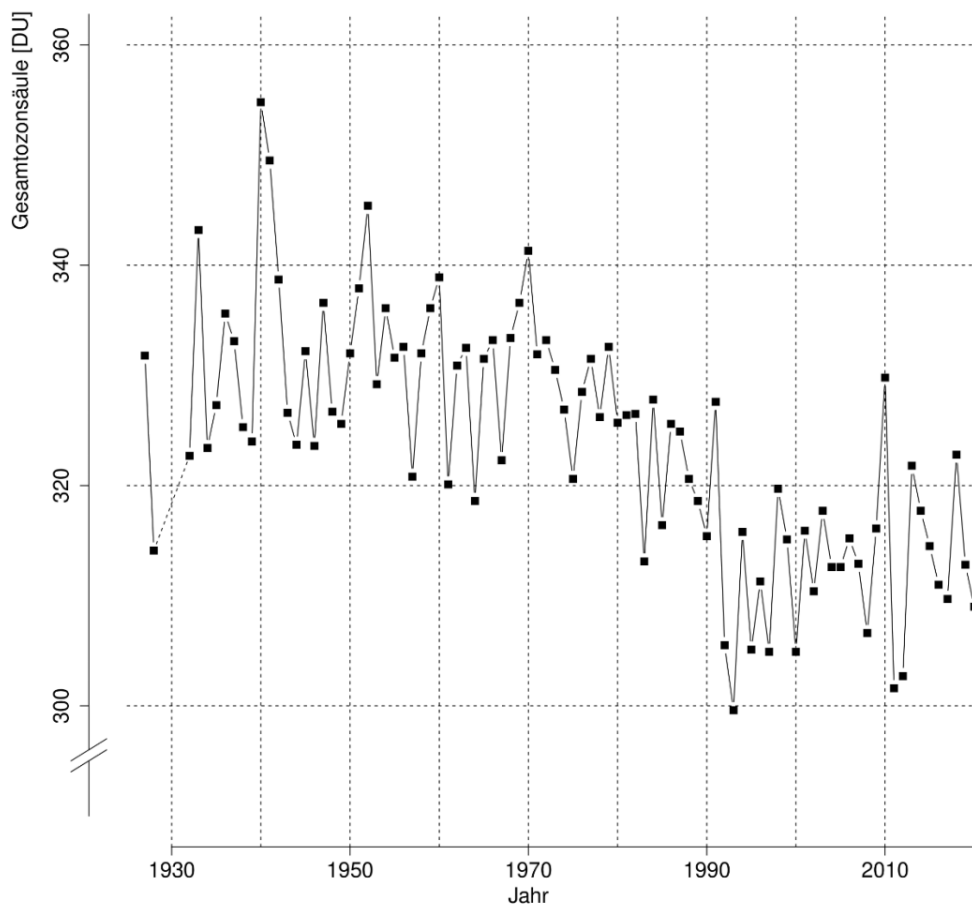
Der Klimawandel übt auch seinerseits einen Einfluss auf die resultierenden Ozonkonzentrationen aus. Insgesamt wird erwartet, dass die Erwärmung des Klimas zu einem Rückgang des Oberflächenozons in unverschmutzten Regionen führen wird, da die größere Menge an Wasserdampf den chemischen Ozonabbau beschleunigt (hohes Vertrauen). Über Regionen mit hohen anthropogenen und/oder natürlichen Emissionen von Ozonvorläufern gibt es überwiegende Hinweise darauf, dass der Klimawandel zu einer Ozonzunahme an der Erdoberfläche führen wird, der mit zunehmender Erwärmung zunimmt (mit einer Größenordnung, die regional von 0,2 bis 2 ppb/°C reicht) (mittleres bis hohes Vertrauen). Allerdings gibt es Unsicherheiten bei den Prozessen, die in einem wärmeren Klima ablaufen und die sich auf die künftigen Ausgangswerte und die regionalen/lokalen Oberflächenozonwerte auswirken und diese verändern können. Die Reaktion des Oberflächenozons auf künftige Klimaänderungen durch den Austausch zwischen Stratosphäre und Troposphäre, NO<sub>x</sub>-Emissionen im Boden und Waldbrände ist positiv (mittleres Vertrauen). Darüber hinaus bestehen wenig Kenntnisse zum Ausmaß der Auswirkungen des Klimawandels auf das Oberflächenozon durch Wechselwirkungen mit der Biosphäre (natürliches Methan, biologische VOC-Emissionen und Ozondeposition) und NO<sub>x</sub>-Emissionen durch Blitze.

Die im AR6 angegebenen 0.2 bis 2 ppb/°C beziehen sich auf Jahresmittel der Temperatur und der Ozonkonzentration. Unsere Ozonprognose befasst sich mit den täglichen Ozonspitzenwerten im Sommer; diese erhöhen sich gemäß **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** um rund 7.4 µg/m<sup>3</sup> Ozon / °C (Maximumtemperatur), also 3.7 ppb/°C. Dies ist plausibel, denn Temperaturerhöhungen in der kühleren Jahreszeit wirken sich kaum auf das Ozon aus.

Auch das stratosphärische Ozon ist ein 'Player' beim klimatischen Geschehen. 90% des atmosphärischen Ozons befinden sich in der Stratosphäre. In den 70er und 80er Jahren des 20. Jahrhunderts sank die Ozonkonzentration in der

Stratosphäre rasch, vor allem über den Polen ('Ozonloch'). In der Folge wurde im Protokoll von Montreal ein Verbot von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) international vereinbart. Dadurch gelang es, die Ozonschicht zu stabilisieren, aber der Wiederanstieg ist bislang gering. Dies bedeutet, dass die zusätzliche UV-Strahlung, vor welcher in den 80er Jahren gewarnt wurde, im Wesentlichen immer noch da ist, das im Vergleich zu früheren Zeiten erhöhte Sonnenbrand- und Hautkrebsrisiko ist immer noch da.

In Arosa (Graubünden) befindet sich eine weltbekannte Messstation für Gesamt ozon, die seit 1926 in Betrieb ist. Die folgende Grafik zeigt den Verlauf der Jahresmittel des Gesamt ozons.



**Abbildung 8.1: Zeitreihe der über Arosa gemessenen mittleren jährlichen Gesamt ozonmenge (in Dobson-units). Quelle: MeteoSchweiz.**

Ozon ist ein Treibhausgas, auch in der Stratosphäre. Die Abnahme der Ozonkonzentration führte deshalb zu einer Abkühlung der Stratosphäre, was wiederum zu mannigfachen Wechselwirkungen bis hin zu Zirkulationsänderungen in der Atmosphäre führen könnte.

### 8.3. Stickoxide NO<sub>x</sub>

Die Stickoxide sind keine Treibhausgase, sie interagieren nicht direkt im Strahlungsfeld der Atmosphäre. Über Wechselwirkungen greifen sie dennoch in das Klima ein. Dabei sind auch natürliche Quellen im Boden und in der Atmosphäre zu beachten:

*Blitze tragen ~10 % zu den gesamten NO<sub>x</sub>-Emissionen bei (Murray, 2016). Da Blitz-NO<sub>x</sub> (LNO<sub>x</sub>) überwiegend in der oberen Troposphäre freigesetzt wird, hat es im Vergleich zu NO<sub>x</sub>-Emissionen an der Oberfläche einen unverhältnismäßig großen Einfluss auf Ozon und OH-Radikale sowie auf die Lebensdauer von Methan. Es besteht ein hohes Vertrauen darin, dass die LNO<sub>x</sub>-Emissionen durch den Klimawandel verändert werden, jedoch ist aufgrund grundlegender Unsicherheiten bei der Parametrisierung unbekannt, ob sich dadurch der Klimawandel verstärkt oder abschwächt.*

*NO<sub>x</sub>-Emissionen aus dem Boden (SNO<sub>x</sub>) treten in Verbindung mit komplexen biogenen/mikrobiellen Nitrifikations- und Denitrifikationsprozessen auf (Ciais et al., 2013), die wiederum - in nichtlinearer Weise - auf Temperatur, Niederschlag, Bodenfeuchtigkeit, Kohlenstoff- und Nährstoffgehalt und das Biom selbst reagieren (z. B. Hudman et al., 2012). Während die aktuelle Stärke der NO<sub>x</sub>-Quelle im Boden in den letzten zehn Jahren besser eingegrenzt werden konnte, fehlen quantitative Schätzungen der klimabedingten Veränderungen von SNO<sub>x</sub> nach wie vor.*

NO<sub>x</sub> hat einen indirekten wärmenden Effekt durch Ozonbildung (wo dieser Prozess NO<sub>x</sub>-limitiert abläuft), und einen indirekten kühlenden Effekt durch Aerosolbildung über Nitrate.

### 8.4. Sulfate

Sulfate kommen in der Atmosphäre als Aerosole vor. Durch ihre Eigenschaft, Sonnenlicht besonders stark zurückzustrahlen, weisen sie einen hohen kühlenden Effekt auf. Ihre Konzentration nahm seit der Industrialisierung zu, besonders stark etwa von 1950 bis 1980. Im Zuge der Anstrengungen zur Verbesserung der Lufthygiene nahm sie danach wieder markant ab. Diese Phasen sind als 'global dimming' und 'global brightening' bereits diskutiert worden, weil sie sich in den Verläufen von Globalstrahlung und Sonnenscheindauer (z.B. in Feldkirch, Abbildung 3.2) manifestieren. Sulfate haben auch bedeutende natürliche Quellen, so z.B. Vulkaneruptionen.

*Wärmende oder kühlende atmosphärische Aerosole wie BC (Black Carbon) und Sulfat können die Temperatur und den Niederschlag auf unterschiedliche Weise beeinflussen, indem sie die kurz- und langwellige Strahlung und die Abkühlung der Troposphäre mit der Höhe verändern und die mikrophysikalischen Eigenschaften der Wolken beeinflussen. Ein wichtiger Unterschied zwischen streuenden und absorbierenden Aerosolen ist die gegensätzliche Natur ihrer Einflüsse auf die Zirkulation, die Wolken und den Niederschlag sowie die Oberflächentemperatur, wie aus den kontrastierenden regionalen Klimareaktionen auf regionale Aerosolemissionen hervorgeht (z. B. Lewinschal et al., 2019; Sand et al., 2020).*

*Auf der globalen Skala haben anthropogene Aerosole wahrscheinlich die Lufttemperatur an der Erdoberfläche seit 1850-1900 durch den negativen Aerosolantrieb abgekühlt. Mehrere Modellierungsstudien stützen die Erkenntnis, dass die heutigen Emissionen von SO<sub>2</sub>, dem Vorläufer von Sulfataerosolen, im Vergleich zu BC oder OC (Organic Carbon) die dominante Triebkraft der oberflächennahen Lufttemperatur sind, auch wenn in einigen Regionen der BC-Antrieb eine Schlüsselrolle spielt (Baker et al., 2015; Samset et al., 2016; Stjern et al., 2017; Zanis et al., 2020). Außerdem besteht ein hohes Vertrauen darin, dass die aerosolbedingte Abkühlung mindestens seit Mitte des 20. Jahrhunderts zu nachweisbaren großräumigen Veränderungen des Wasserkreislaufs geführt hat. Der Gesamteffekt der Oberflächenabkühlung durch anthropogene Aerosole besteht in einer Verringerung der globalen Niederschläge und einer Veränderung der großräumigen atmosphärischen Zirkulationsmuster (hohes Vertrauen), was in erster Linie auf die kühlenden Auswirkungen von Sulfataerosolen zurückzuführen ist. Darüber hinaus besteht ein hohes Vertrauen darin, dass die Verdunkelung des Schnees durch die Ablagerung von schwarzem Kohlenstoff und anderen lichtabsorbierenden Partikeln die Schneeschmelze verstärkt.*

*Die Bestimmung der Auswirkungen von Aerosolveränderungen auf lokale und überregionale Temperatur-, Zirkulations- und Niederschlagsveränderungen hängen von einer Reihe von Modellunsicherheiten ab, die die Aerosolquellen, die Umwandlung und die daraus resultierenden Klimaeffekte betreffen. Daher müssen regionale Klimaauswirkungen in globalen Modellstudien mit Vorsicht interpretiert werden. Bei der Untersuchung der Reaktion des Klimas auf regionale Aerosolemissionen werden solche Unsicherheiten wahrscheinlich durch die Variabilität zwischen Modellen in regionalen Klima- und Zirkulationsmustern noch verstärkt, was zu einer größeren Streuung zwischen den Modellen auf regionaler Ebene führt als auf globaler Ebene (Baker et al., 2015; Kasoar et al., 2016).*

*Zusammenfassend lässt sich sagen, dass über den historischen Zeitraum hinweg Veränderungen der Aerosole und ihres effektiven Strahlungsflusses in erster Linie zur Abkühlung der Oberflächentemperatur beigetragen haben, wodurch die vom Menschen verursachte Erwärmung teilweise überdeckt wurde (hohes Vertrauen).*

*Die durch Aerosolveränderungen induzierten Strahlungsantriebe führen sowohl zu lokalen als auch zu überregionalen Temperaturveränderungen (hohes Vertrauen).*

Der kühlende Effekt von Sulfat wird im AR6 deutlich höher ausgewiesen als noch im AR5. Die Verstärkung der Klimaerwärmung durch die Verbesserung der Luftqualität (hier durch Verminderung der Aerosolkonzentration wie PM10, PM2.5) bedeutet, dass ein Teil der Klimaerwärmung seit den 80er Jahren darauf und nicht durchwegs auf vermehrte Emission von Treibhausgasen zurückzuführen ist.