Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement des Innern EDI
Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz

MeteoSchweiz

Klimareport 2021

Klimareport 2021

Herausgeber
Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie
MeteoSchweiz
Abteilung Klima
Operation Center 1
CH-8058 Zürich-Flughafen
kundendienst@meteoschweiz.ch
meteoschweiz.ch

Redaktion
Elias Zubler

Autoren
Stephan Bader, Simone Bircher, Martine Collaud Coen,
Anke Duguay-Tetzlaff, Christoph Frei, Sophie Fukutome,
Regula Gehrig, Eliane Maillard Barras, Giovanni Martucci,
Gonzague Romanens, Simon Scherrer, Thomas Schlegel,
Christoph Spirig, René Stübi, Laurent Vuilleumier, Elias Zubler

Vertrieb
Bundespublikationen BBL
CH-3003 Bern
bundespublikationen.admin.ch
Artikelnummer: 313.001.d
ISSN: 2296-1488

Bitte zitieren Sie diesen Bericht folgendermassen:
MeteoSchweiz 2022: Klimareport 2021. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz, Zürich. 100 S.

© MeteoSchweiz 2022

Fotos
Regenreiche Schweiz

Anpassung der Normperiode
Um das Klima einer Region zu beschreiben, werden meteorologische Messgrössen über einen definierten Zeitraum von 30 Jahren analysiert. Diese sogenannte Normperiode wird gemäss Vorgaben der Weltorganisation für Meteorologie WMO alle zehn Jahre aktualisiert, um die jüngsten Veränderungen im Zusammenhang mit dem fortschreitenden Klimawandel zu berücksichtigen. Damit ist sichergestellt, dass das Witterungsgeschehen im aktuellen Berichtsjahr beim Vergleich mit der Norm in den richtigen Kontext gesetzt wird.

Zu diesem Zweck verwendet das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz im Klimareport neu die Normperiode 1991–2020 in den Kapiteln 1–4 zur Einordnung der Jahreswitterung und der Besonderheiten. In früheren Klimareports wurde die Normperiode 1981–2010 eingesetzt. Da die Temperatur zwischen den beiden Normperioden im Jahresmittel in der Schweiz je nach Region um 0,4–0,5 °C angestiegen ist, sind einige Angaben in diesem Klimareport nicht direkt mit früheren Berichten vergleichbar. Beim Niederschlag sind die Unterschiede zwischen den Normperioden sehr klein. Die Norm der Sonnenscheindauer weist insbesondere im Mittelland eine Zunahme auf.

Für Analysen zur langjährigen Klimaentwicklung wird gemäss Empfehlung der WMO weiterhin die Referenzperiode 1961–1990 verwendet. Vergleiche der Aussagen in den betroffenen Kapiteln 4 und 5 mit früheren Klimareports sind dementsprechend möglich.

Inhaltsverzeichnis

3 **Zusammenfassung** **4**
Summary **7**
1 Verlauf der Jahreswitterung 2021 **80**
2 Diagramme zum Jahresverlauf **18**
Temperatur, Sonnenscheindauer und Niederschlag 18
Temperatur, Sonnenscheindauer und Niederschlag 19
Jahresverlauf der Globalstrahlung 20
Nullgradgrenze in der freien Atmosphäre 22
Tropopausenhöhe 23
Aussergewöhnliche Starkniederschläge 24
Jahresverlauf der UV-Strahlung 25
Ozonmessreihe Arosa und Davos 26
Ozonmessungen Payerne 28
Aerosolmessungen Jungfraujoch 30
Saharastaubereignisse 31
Vegetationsentwicklung 32
Frühling 32
Sommer 33
Herbst 33
Pollensaison 35
3 Besonderheiten 2021 **40**
3.1 Grosse Schneefälle im Januar 40
3.2 Hagelmonat Juni 42
3.3 Hochwasser im Juli 44
4 Globales Klima und Wetterereignisse **48**
Grosse Wärme über Nordamerika und Asien 48
El Niño und La Niña 49
Besondere Ereignisse 51
5 Langjährige Klimaentwicklung **54**
5.1 Atmosphäre 56
5.1.1 Bodennahe Beobachtungen 56
Temperatur 56
Frosttage 60
Sommertage 61
Niederschlag 62
Tage mit starkem Niederschlag 65
Niederschlag der sehr nassen Tage 68
Trockenperioden 69
Trockenheitsindex 70
5.1.2 Freie Atmosphäre 72
Nullgradgrenze 72
Tropopausenhöhe 74
Temperaturtrends auf verschiedenen Druckniveaus 76
5.1.3 Zusammensetzung der Atmosphäre 78
Ozonmessreihe Arosa und Davos 78
Ozonmessungen Payerne 79
Pollenintensität 82
5.2 Landoberfläche 84
Neuschneesummen 84
Tage mit Neuschnee 85
Frühlingsindex 86
Kirschblüte Liestal und Blattausbruch Rosskastanie Genève 87
5.3 Datengrundlagen und Methoden 88
Referenzen **92**

Zusammenfassung

Die Jahrestemperatur 2021 lag im landesweiten Durchschnitt 0,2 °C unter der Norm 1991–2020 (+1,1 °C gegenüber der Referenzperiode 1961–1990). Damit belegt das Jahr den 21. Rang seit Messbeginn 1864. Fünf Monate waren über der Norm 1991–2020. Sieben Monate blieben darunter. Besonders bemerkenswert waren im vergangenen Jahr die grossen Niederschlagsmengen.

Das Jahr begann mit einem der niederschlagsreichsten Winter seit Messbeginn. Auf der Alpennordseite fiel oft Schnee bis in tiefe Lagen. In der Ostschweiz wurden teilweise Neuschneerekorde aufgestellt. Der Winter 2020/21 war zudem mild. Dazu trug vor allem der Februar bei: Mit einem landesweiten Mittel von 2,7 °C über der Norm 1991–2020 verzeichnete die Schweiz einen der zehn mildesten Februarmonate seit Messbeginn 1864.

Auf den milden Winter folgte ein kalter Frühling mit nassem Ende. Es war der kälteste Frühling seit über 30 Jahren mit einem landesweiten Mittel von 1,6 °C unter der Norm 1991–2020. Nach den zwei niederschlagsarmen Monaten März und April erhielten im Mai die meisten Gebiete der Schweiz überdurchschnittliche Niederschlagsmengen. Lokal stiegen die Maisummen auf 150–200 % der Norm 1991–2020. Damit begann eine ungewöhnlich niederschlagsreiche Periode.

Der Sommer war auf der Alpennordseite einer der nassesten seit Messbeginn 1864 mit lokal um 170 % der Norm 1991–2020. Durch die grossen Regenmengen traten gegen Julimitte mehrere Flüsse und Seen über die Ufer. Auf der Alpennordseite zogen vor allem im Juni mehrere verheerende Hagelzüge über die Schweiz. Die Korngrössen erreichten gebietsweise 6–7 cm oder mehr. Auf der Alpensüdseite erreichten die Niederschlagssummen im Sommer vor allem im Nordwest-Tessin hohe Werte. Auch im Süden richtete der Hagel grosse Schäden an. Die Durchschnittstemperatur im Sommer lag im Bereich der Norm 1991–2020. Zur Sommerwärme trug vor allem der schweizweit viertwärmste Juni bei.

Der Herbst war landesweit in allen Monaten niederschlagsarm. Nördlich der Alpen war er regional einer der niederschlagsärmsten seit Messbeginn 1864. Entsprechend gab es überdurchschnittlich viel Sonnenschein, vor allem auf der Alpennordseite.

Weltweit wies das Jahr 2021 eine Abweichung von +0,8 °C zur Norm 1961–1990 auf. Die Jahre 2015–2021 sind die sieben wärmsten Jahre seit Messbeginn 1850, wobei das Jahr 2021 den siebten Rang belegt und dies trotz der seit 2020 im aquatorialen Pazifik herrschenden La-Niña-Bedingungen. Vorallem auf der Nordhemisphäre war 2021 sehr warm (Rang 6, +1,1 °C zur Norm 1961–1990). Auf der südlichen Hälfte des Globus erreichte die Jahresdurchschnittstemperatur von 2021 Rang 9 und +0,5 °C zur Norm 1961–1990. In Europa gab es während der Sommermonate intensive Hitzewellen mit Temperaturen deutlich über 40 °C im Mittelmeerraum.

Die langjährige Schweizer Temperaturentwicklung 1864–2021 zeigt einen klaren Trend zu immer wärmeren Temperaturen in allen Jahreszeiten. Im Jahresmittel beträgt der lineare Trend 1,4 °C pro Jahrhundert oder 2,2 °C über den gesamten Messzeitraum. In Übereinstimmung mit der allgemeinen Temperaturzunahme in der Schweiz ist die Anzahl der Sommertage in der Periode seit 1959 markant angestiegen, die Anzahl der Frosttage hingegen deutlich zurückgegangen. Ebenso ist in derselben Periode ein Anstieg der Nullgradgrenze zu beobachten. Die Erwärmung drückt sich auch in einer früheren Vegetationsentwicklung aus.

Die langjährige Niederschlagsentwicklung 1864–2021 zeigt im Mittelland für das Jahr und den Winter einen signifikanten Trend zu höheren Niederschlagssummen. Die übrigen Jahreszeiten verzeichnen keine langfristige Änderung in den Niederschlagssummen. Auf der Alpensüdseite ist sowohl bei den Jahressummen als auch bei den saisonalen Summen keine langfristige Änderung festzustellen. Allerdings zeigen Untersuchungen, dass die Häufigkeit und die Intensität der täglichen Starkniederschläge seit 1901 an der überwiegenden Mehrheit von 185 Messstationen zugenommen hat. Die Schweizer Sommer sind in den letzten 40 Jahren deutlich trockener geworden. Neben leichten Abnahmen der Niederschläge hat die zunehmende Verdunstung zu den trockeneren Bedingungen beigetragen.

Beim Neuschnee und bei der Schneehöhe ist in den letzten 50–60 Jahren ein deutlicher Rückgang im Alpenraum und festzustellen.

Die Ozonsituation in der höheren Atmosphäre über der Schweiz ist in den letzten Jahren stabil geblieben. Dies nachdem zwischen 1970 und 1995 eine Abnahme des Gesamtozons um rund 6 % stattgefunden hat.

Summary

The annual average temperature in 2021 was 0.2 °C below the average over the normal period 1991–2020 (+1.1 °C compared to the reference period 1961–1990). This puts the last year in 21st place since measurements began in 1864. Five months were above the 1991–2020 norm. Seven months remained below the norm. For once, it was the large amounts of precipitation that were the main cause for concern rather than high temperatures.

The year began with one of the wettest winters since the beginning of systematic measurements. On the northern side of the Alps, snow often fell even at low altitudes. In eastern Switzerland, new snow records were set in some places. The winter of 2020/21 was also mild, with February being the main contributor. With a national average of 2.7 °C above the 1991–2020 norm, Switzerland recorded one of the ten mildest February months since measurements began in 1864.

The mild winter was followed by a cold spring with a wet end. It was the coldest spring in over 30 years, with a national average of 1.6 °C below the 1991–2020 norm. After two months of low precipitation in March and April, most areas of Switzerland received above-average precipitation in May. Locally, the precipitation totals in May rose to 150–200 % of the 1991–2020 norm, marking the beginning of an unusually rainy period.

On the northern side of the Alps, the summer was one of the wettest since measurements began in 1864, with locally around 170 % of the 1991–2020 norm. The large amounts of rain caused several rivers and lakes to burst their banks towards the middle of July. On the north side of the Alps, several devastating hailstorms hit Switzerland, especially in June. The grain sizes reached 6–7 cm or more in some areas. On the south side of the Alps, precipitation totals reached high levels in summer, especially in the northwest of Ticino. Hail also caused great damage in the south. The average temperature in summer was within the range of the norm 1991–2020. June was the fourth warmest ever in Switzerland, and therefore contributed mostly to the summer warmth in 2021.

There was only little precipitation in all autumn months throughout Switzerland. North of the Alps, it was regionally one of the months with the lowest precipitation sum since measurements began in 1864. Accordingly, there was an above-average amount of sunshine, especially on the northern side of the Alps.

Globally, the year 2021 showed a deviation of +0.8 °C from the 1961–1990 norm. The years 2015 to 2021 are the seven warmest years since measurements began in 1850, with 2021 ranking 7th, despite the La Niña conditions that have prevailed in the aquatorial Pacific since 2020. Especially in the northern hemisphere, 2021 was very warm (rank 6, +1.1 °C compared to the norm 1961–1990). In the southern half of the globe, the annual average temperature of 2021 reached rank 9 and +0.5 °C to the norm 1961–1990. In Europe, there were intense heat waves during the summer months with temperatures well above 40 °C in the Mediterranean region.

The long-term Swiss temperature development 1864-2021 shows a clear trend towards increasingly warmer temperatures in all seasons. The annual average linear trend is 1.4 °C per century or 2.2 °C over the entire measurement period. In line with the general temperature increase in Switzerland, the number of summer days has increased markedly in the period since 1959, while the number of frost days has decreased significantly. An increase in the freezing level can also be observed in the same period. The warming is also expressed in an earlier development of vegetation.

The long-term precipitation development 1864–2021 shows a significant trend towards higher precipitation totals for the year and winter on the Central Plateau. The other seasons show no long-term change in precipitation totals. On the southern side of the Alps, no long-term change can be observed in either the annual or seasonal totals. However, studies show that the frequency and intensity of daily heavy precipitation has increased at the vast majority of 185 measuring stations since 1901. Swiss summers have become significantly drier over the last 40 years. In addition to slight decreases in precipitation, increasing evaporation has contributed to the drier conditions.

There has been a significant decrease in snowfall and snow depth in the Alpine region over the last 50–60 years.

After a decrease in total ozone of around 6 % between 1970 and 1995 the ozone situation in the higher atmosphere above Switzerland has remained stable in recent decades.

1| Verlauf der Jahreswitterung 2021

Im Jahr 2021 waren in der Schweiz für einmal nicht hohe Temperaturen, sondern der viele Niederschlag das bestimmende Wetterelement. Nach einem milden und niederschlagsreichen Winter mit lokal grossen Schneefällen folgte ein kalter Frühling mit nassem Ende. Der Sommer war nördlich der Alpen einer der nassesten seit Messbeginn. Die anhaltend grossen Regenmengen liessen gegen Julimitte mehrere Flüsse und Seen über die Ufer treten. Im Gegensatz zum nassen Sommer zeigte sich der Herbst verbreitet niederschlagsarm und sonnig.

Nahe an der Norm

Die Jahrestemperatur 2021 lag im landesweiten Mittel 0,2 °C unter der Norm 1991–2020. Fünf Monate waren milder als die Norm 1991–2020. Die grössten Abweichungen brachten der Februar mit 2,7 °C sowie der Juni und September mit je 1,7 °C über die Norm 1991–2020. Sieben Monate blieben unter der Norm. Die kräftigsten negativen Abweichungen zeigten der Mai mit 2,6 °C, der April mit 1,8 °C und der August mit 1,2 °C unter der Norm 1991–2020. Als Folge der wechselhaften Temperaturverhältnisse gehört das Jahr 2021 knapp nicht zu den 20 wärmsten Jahren seit Messbeginn 1864. Es belegt den 21. Rang.

Rang 21 mag wenig spektakulär tönen. Doch bei genauer Betrachtung zeigt sich, dass vor 1989 nur gerade zwei Jahre ein ähnlich hohes Temperaturniveau erreichten. Es waren die Jahre 1961 und 1947. Vor 1989 wäre das Jahr 2021 als aussergewöhnlich warm beurteilt worden. Als Folge der Klimaänderung gehört die Jahrestemperatur 2021 heutzutage in den Bereich des Durchschnitts (Norm 1991–2020).

Winter mit sehr mildem Ende

Die Wintertemperatur Dezember 2020 bis Februar 2021 lag im landesweiten Mittel 0,5 °C über der Norm 1991–2020. Lokal wurde einer der zehn mildesten Winter seit Messbeginn 1864 verzeichnet. Dazu beigetragen hat vor allem der sehr milde Februar.

Der Dezember 2020 lag im landesweiten Mittel im Bereich der Norm 1991–2020. In Berglagen blieben die Dezemberwerte hingegen regional mehr als 1 °C unter der Norm. Auch der Januar zeigte sich in den Berglagen oberhalb von 1000 m kalt mit mehr als 2 °C unter der Norm 1991–2020. Nördlich der Alpen bewegte sich die Januartemperatur vielerorts im Bereich der Norm.

Mit einem landesweiten Mittel von 2,7 °C über der Norm 1991–2020 registrierte die Schweiz einen der zehn mildesten Februarmonate seit Messbeginn 1864. Viele Tage mit weit überdurchschnittlicher Temperatur standen einer kurzen Kältewelle gegenüber. In den Bergen wurde lokal der zweit- oder viertmildeste Februar seit Messbeginn registriert. Auch die Alpensüdseite und das Wallis meldeten lokal den viertmildesten Februar seit Messbeginn.

Temperaturrekorde im Februar

Im letzten Februardrittel gab es auf der Alpennordseite mit viel Sonnenschein rekordhohe Tageshöchsttempe-raturen. In Vaduz brachte der neue Rekord von 21,9 °C am 21. Februar 2021 schon fast frühsommerliche Verhältnisse.

Niederschlagsreicher Winter

Die niederschlagsreichen und gebietsweise auch schneereichen Monate Dezember und Januar sorgten verbreitet für überdurchschnittliche Winterniederschläge. Lokal war es einer der niederschlagsreichsten Winter seit Messbeginn. Im Dezember erreichten die Niederschlagssummen im Val Müstair und im Val Poschiavo neue Monatsrekorde. In den Alpen gab es kräftige Neuschneefälle, auf der Alpensüdseite auch bis in tiefe Lagen. Der Januar zeigte sich an vielen Messstandorten als niederschlagsreichster seit mindestens 60 Jahren. Im milden Februar blieben die Niederschlagsmengen verbreitet unter dem Durchschnitt. Einzig der Süden und das Engadin erhielten gebietsweise überdurchschnittliche Mengen. In der milden Luft fiel der Niederschlag aber oft bis in grössere Höhen als Regen.

Lokal Rekordschneefälle

Im niederschlagsreichen Januar fiel auf der Alpennordseite häufig Schnee bis in tiefen Lagen. Die Ostschweiz erlebte Mitte Januar einen der kräftigsten Neuschneefälle seit Messbeginn. In Chur fiel mit 82 cm die höchste 3-Tages-Neuschneesumme in der weit über 100-jährigen Messreihe.

Sonnenarmer Winter im Süden

Als Folge der häufigen Niederschläge verlief der Winter auf der Alpensüdseite ausgesprochen trüb. In Locarno-Monti belegte die winterliche Sonnenarmut mit 75 % der Norm 1991–2020 den 3. Rang, in Lugano mit 76 % der Norm Rang 4 in den rund 60-jährigen homogenen Messreihen. Sonnenarm zeigte sich der Winter auch in Gipfellagen, im Zentralwallis und im Jura. In den übrigen Gebieten erreichten die Werte meist 80–100 % der Norm.

Saharastaub

In zwei Schüben wurde im Februar Saharastaub zur Schweiz verfrachtet, der insbesondere während des ersten Ereignisses am 6. Februar verbreitet zu einer massiven Trübung der Atmosphäre führte. Auch während des zweiten Schubes vom 22. bis am 25. Februar war die Trübung der Atmosphäre gut sichtbar, jedoch deutlich geringer als während des ersten Ereignisses.

Kalter Frühling mit nassem Ende

Die Schweiz erlebte den kältesten Frühling seit über 30 Jahren mit einem landesweiten Mittel von 1,6 °C unter der Norm 1991–2020. Nach einem leicht unterdurchschnittlichen März kam die Kälte in den Monaten April und Mai. Der April war landesweit der kälteste der letzten 20 Jahre, im Oberengadin sogar der kälteste seit über 30 Jahren. Die Maitemperatur blieb landesweit gemittelt 2,6 °C unter der Norm 1991–2020. In den letzten 30 Jahren zeigten sich nur die Maimonate 2019 und 2013 ebenso kühl.

Nach den zwei niederschlagsarmen Monaten März und April erhielten im Mai die meisten Gebiete der Schweiz überdurchschnittliche Niederschlagsmengen. Lokal stiegen die Maisummen auf 150–200 % der Norm 1991–2020. Das war der Beginn einer dreimonatigen ungewöhnlich niederschlagsreichen Periode.

Nasser Sommer

Auf der Alpennordseite war der Sommer 2021 mit lokal um 170 % der Norm 1991–2020 einer der nassesten in den langjährigen Aufzeichnungen. Bern registrierte mit 168 % der Norm den drittnassesten Sommer seit Messbeginn 1864. Aus den Alpen meldete Göschenen mit 175 % der Norm 1991–2020 den viertnassesten Sommer seit Messbeginn 1883. Letztmals nasser war hier der Unwettersommer 1987 mit 184 % der Norm.

Auf der Alpensüdseite erreichten die sommerlichen Niederschlagssummen vor allem im nordwestlichen Tessin hohe Werte. Airolo registrierte 148 %, Robiei 160 % der Norm 1991–2020. In den übrigen Gebieten der Alpensüdseite blieben die Niederschlagsmengen mit 100–140 % der Norm 1991–2020 eher moderat.

Überschwemmungen

Auf der Alpennordseite brachte der Sommer nach einem regenreichen Mai gebietsweise den nassesten Juni und den nassesten Juli seit Messbeginn. Der Juli war zudem an mehreren Messstandorten mit langjährigen Aufzeichnungen der nasseste Monat überhaupt seit Messbeginn. Die anhaltend grossen Regenmengen führten gegen Julimitte nördlich der Alpen an mehreren Flüssen und Seen zu Hochwasser und Überschwemmungen.

Massive Hagelschläge

Nördlich der Alpen zogen insbesondere im Juni mehrere verheerende Hagelunwetter über die Schweiz. Am 28. Juni trat das flächenmässig zweitgrösste Hagelereignis der Aufzeichnungen auf. Vielerorts wurden während des Ereignisses Korngrössen deutlich über 2 cm, teilweise sogar über 7 cm gemeldet. Solch grosse Körner sind lokal ein Extremereignis, das selbst in den hagelreichen Regionen an einem Ort statistisch seltener als alle 50 Jahre überschritten wird.

Der Hagel hinterliess zerschlagene Glashäuser, Dachziegel, Ernten und Gärten. Zudem trugen durch Hagel und heruntergeschlagenes Blattwerk verstopfte Abflüsse zu Überschwemmungen bei.

Auf der Alpensüdseite richtete der Hagel vor allem im Juli grosse Schäden in der Landwirtschaft an. Regional gab es bei den Reben und beim Gemüse Totalverluste. Die Hagelkörner waren 4–5 cm gross. Solche Korngrössen treten hier im Durchschnitt nur alle 10–20 Jahre auf.

Heftiger Gewittersturm über Zürich

In der Nacht vom 12. auf den 13. Juli tobte über der Stadt Zürich ein besonders heftiger Gewittersturm. Die Sturmböen von lokal über 100 km/h entwurzelten oder knickten zahlreiche Bäume. Die vom Sturm gefällten Bäume verursachten grosse Schäden an Autos, Gebäuden und Fahrleitungen des öffentlichen Verkehrs. Neben den Sturmböen brachte das Gewitter auch Hagel und in wenigen Minuten enorme Wassermengen. Innerhalb von zehn Minuten fielen in Waldegg am Stadtrand 31,1 mm, in Zürich-Affoltern 27,2 mm Regen. Für den Messstandort Zürich-Affoltern war es die zweithöchste 10-Minutensumme in der 40-jährigen Messreihe. Die 31,1 mm von Waldegg gehören zu den zehn höchsten 10-Minutensummen auf der Alpennordseite.

Lokal wenige Hitzetage

Im Sommer 2021 erreichte die Temperatur im landesweiten Mittel 13,8 °C. Das liegt im Bereich der Norm 1991–2020. Zur Sommerwärme trug vor allem der schweizweit viertwärmste Juni bei. Die Julitemperatur lag 0,7 °C, die Augusttemperatur 1,2 °C unter der Norm 1991–2020.

Die Zahl der Hitzetage mit Tageshöchstwerten von 30 °C und mehr blieb in der Schweiz im Sommer 2021 verbreitet unter zehn. In Genève gab es in den drei Sommermonaten Juni bis August acht Hitzetage bei einer Norm von 17. Neuchâtel registrierte nur gerade einen Hitzetag, die Norm 1991–2020 liegt bei zehn. Auf der Alpensüdseite waren es meist zwischen zehn und 15, in Biasca knapp 20 Hitzetage. Die Norm 1991–2020 liegt hier zwischen elf und 18 Hitzetagen.

Die sehr warmen Sommer 2015, 2017, 2018 und 2019 lieferten in einigen Gebieten der Schweiz zwischen 20 und über 30 Hitzetage. Vereinzelt waren es sogar um 40 Hitzetage. Ganz extrem war der Sommer 2003 mit 50 bis knapp 70 Hitzetagen auf der Alpensüdseite sowie gebietsweise 40–50 Hitzetagen auf der Alpennordseite und im Wallis.

Wenig Niederschlag im Herbst

Der Herbst zeigte sich in der Schweiz in allen drei Monaten September bis November verbreitet niederschlagsarm. Nördlich der Alpen wurde regional einer der niederschlagsärmsten Herbste seit Messbeginn 1864 verzeichnet. In Zürich war es mit 33 % der Norm 1991–2020 der niederschlagsärmste Herbst seit Messbeginn 1864. In Bern lag die herbstliche Niederschlagsarmut auf Rang 2 in der ab 1864 verfügbaren Messreihe. Die Niederschlagssumme erreichte 39 % der Norm 1991–2020.

Viel Sonnenschein

Dank der sonnigen Monate September und Oktober erlebte die Schweiz einen insgesamt sonnigen Herbst mit knapp überdurchschnittlicher Temperatur. Lokal war es einer der sonnigsten Herbste der letzten 60 Jahre. Bern registrierte den viertsonnigsten, Basel, Neuchâtel, Zürich und Luzern den sechstsonnigsten Herbst seit 1961.

Überdurchschnittlich viel Sonnenschein gab es im September und Oktober vor allem auf der Alpennordseite. Gebietsweise wurde einer der sonnigsten September der letzten 60 Jahre registriert. Genève verzeichnete den sechstsonnigsten Oktober seit Messbeginn 1897. Im November hingegen blieb die Sonnenscheindauer als Folge des häufigen Hochnebels nördlich der Alpen und in den tiefen Tälern der Alpennordseite unter der Norm 1991–2020.

Jahresbilanz

Die Jahrestemperatur 2021 lag in vielen Gebieten der Schweiz leicht unter der Norm 1991–2020. Im Tessin gab es regional Werte knapp über der Norm. Die Engadiner Messstandorte verzeichneten eine Jahrestemperatur zwischen 0,4 °C und 0,6 °C unter der Norm. Das landesweite Mittel lag 0,2 °C unter der Norm 1991—2020. Das Jahr 2021 belegte Rang 21 seit Messbeginn 1864.

Die Jahresniederschläge 2021 erreichten verbreitet 100–120 % der Norm 1991–2020. Auf der Alpensüdseite sowie regional in den Alpen lagen die Werte zwischen 80 und 100 % der Norm.

Die Jahressumme 2021 der Sonnenscheindauer lag verbreitet zwischen 95 und 105 % der Norm 1991–2020. Im Südtessin stieg sie auf knapp 110 % der Norm.

Station	Höhe	Temperatur °C			Sonnenscheindauer h			Niederschlag mm		
	m ü.M	Mittel	Norm	Abw.	Summe	Norm	%	Summe	Norm	%
Bern	553	9,2	9,3	-0,1	1862	1797	104	1137	1022	111
Zürich	556	9,6	9,8	-0,2	1734	1694	102	1127	1108	102
Genf	420	10,9	11,0	-0,1	1950	1887	103	867	946	92
Basel	316	10,6	10,9	-0,3	1671	1687	99	922	842	110
Engelberg	1036	6,6	6,8	-0,2	1362	1380	99	1679	1568	107
Sion	482	10,3	10,7	-0,4	2181	2158	101	696	583	119
Lugano	273	13,1	13,0	0,1	2297	2120	108	1444	1567	92
Samedan	1709	1,7	2,3	-0,6	1835	1767	104	647	710	91

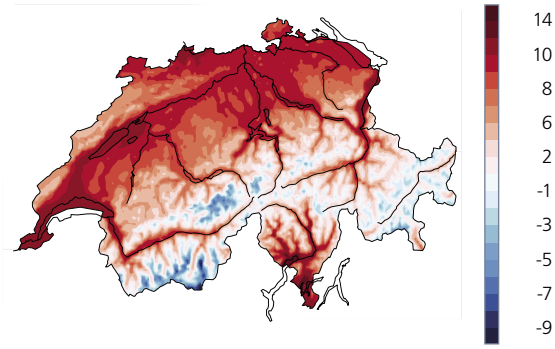
Norm Langjähriger Durchschnitt 1991–2020
Abw. Abweichung der Temperatur zur Norm 1991–2020
% Prozent im Verhältnis zu Norm 1991–2020 (Norm = 100 %)

Tabelle 1.1
Ausgewählte Jahreswerte 2021 im Vergleich zur Norm 1991–2020.

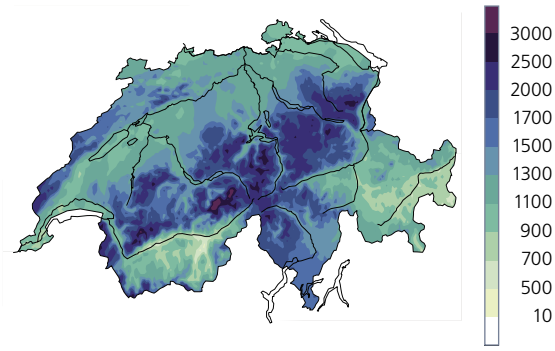
Temperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer 2021

Messwerte 2021

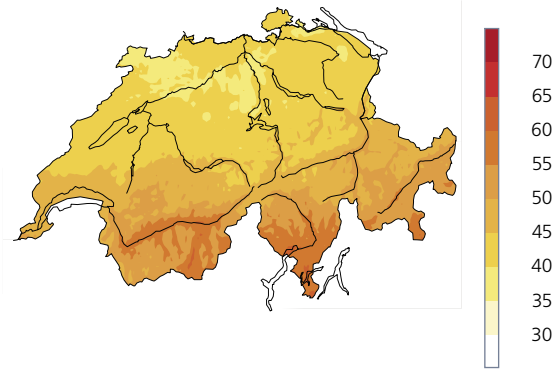
Jahresmitteltemperaturen in °C



Jahres-Niederschlagssumme in mm

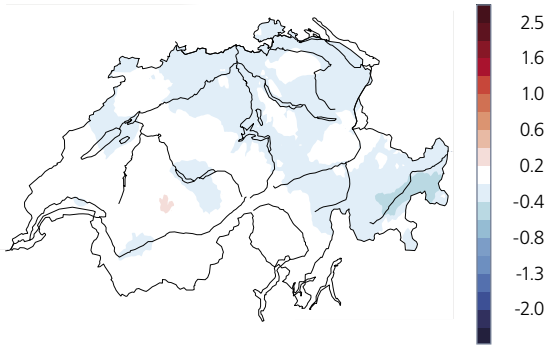


Anteil der maximal möglichen jährlichen Sonnenscheindauer in %

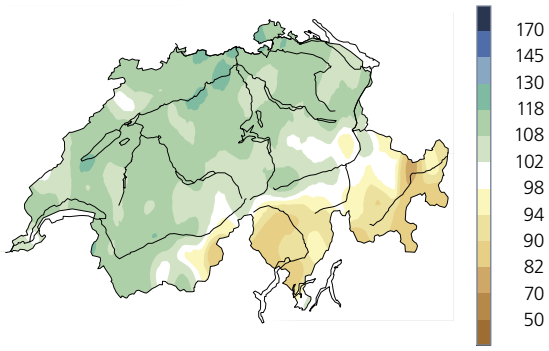


Abweichungen zur Norm 1991–2020

Abweichung der Jahresmitteltemperatur in °C



Jahres-Niederschlagssumme in %



Jährliche Sonnenscheindauer in %

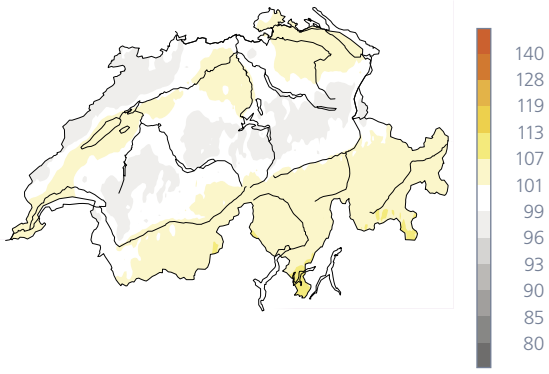


Abbildung 1.1

Räumliche Verteilung von Temperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer im Jahr 2021. Dargestellt sind Messwerte (links) und die Abweichungen zur Norm 1991–2020 (rechts).

Monatstemperatur 2021
Abweichung zur Norm 1991–2020

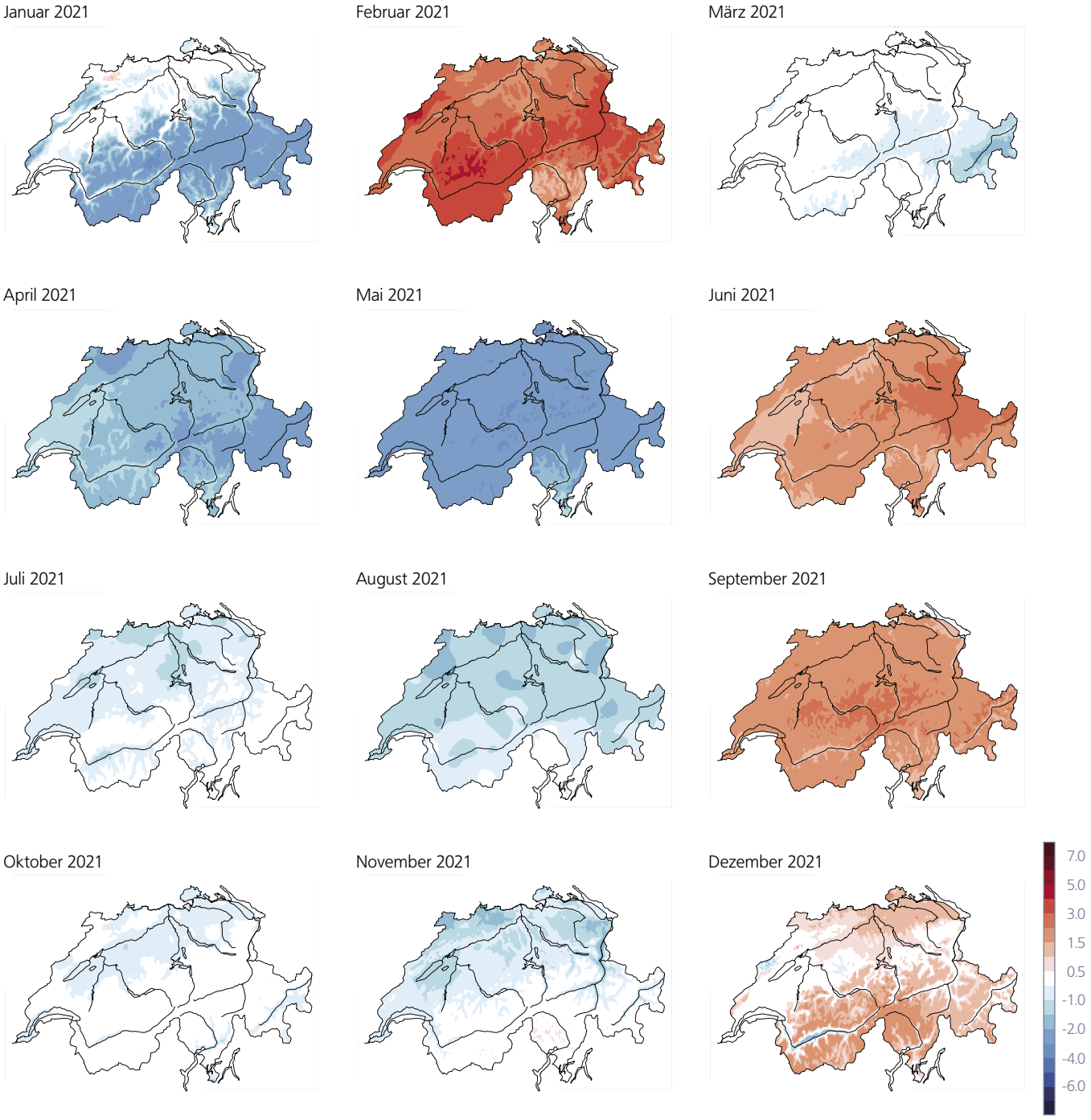


Abbildung 1.2

Räumliche Verteilung der Monatstemperatur als Abweichung zur Norm 1991–2020 in °C.

Monatsniederschlag 2021 in % der Norm 1991–2020

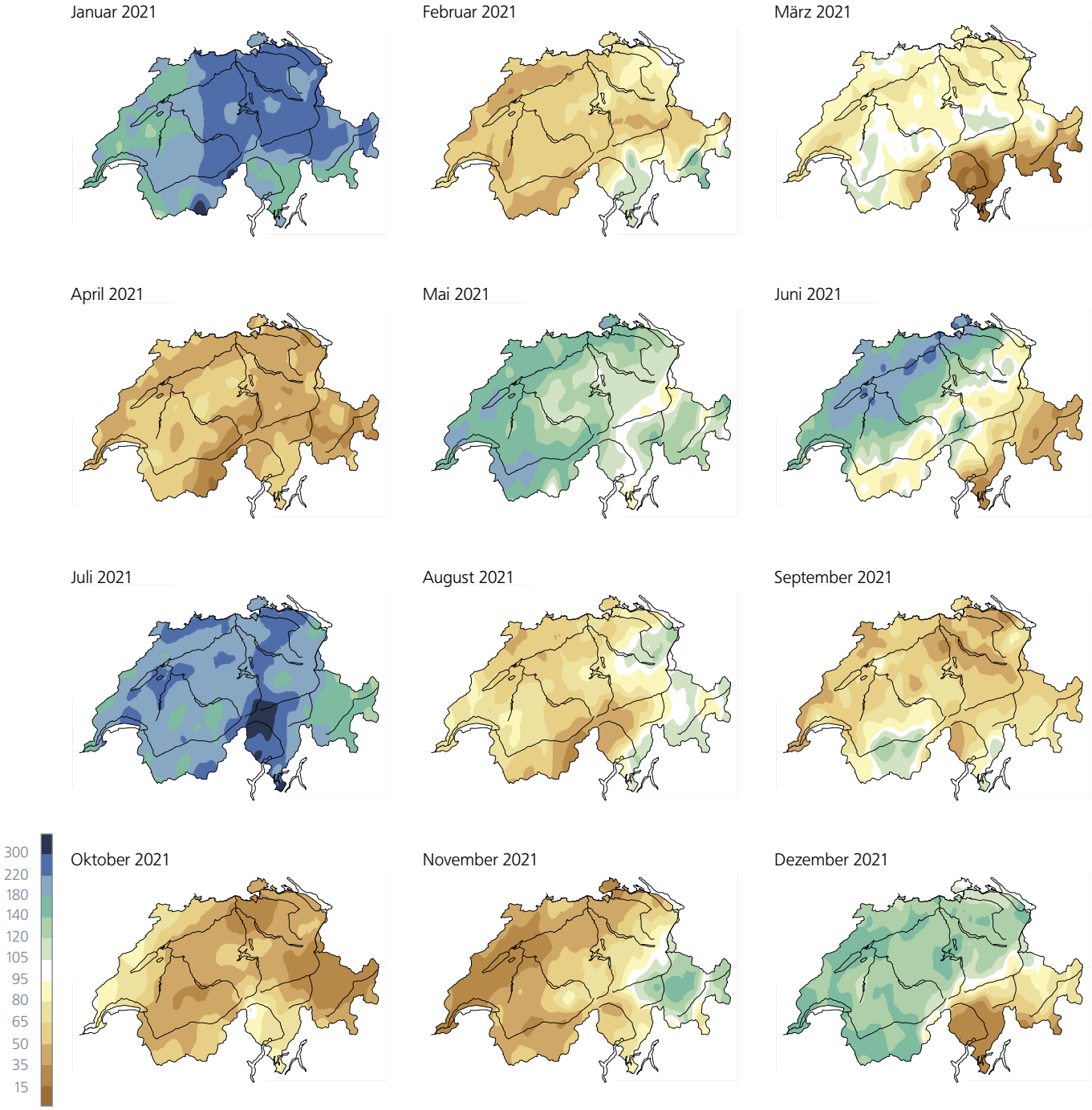


Abbildung 1.3

Räumliche Verteilung der Monatsniederschläge in % der Norm 1991–2020.

Monatliche Sonnenscheindauer 2021 in % der Norm 1991–2020

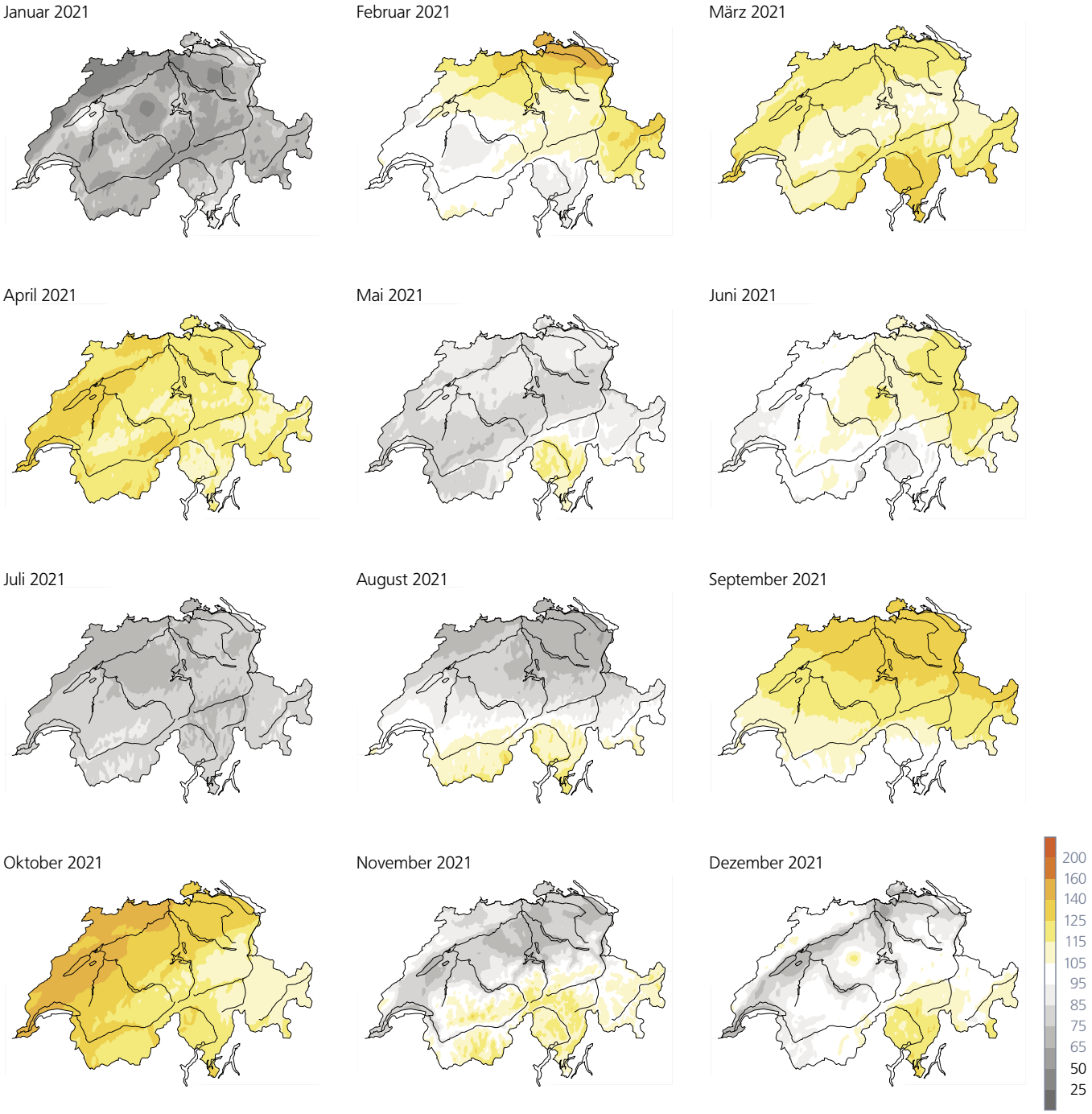


Abbildung 1.4

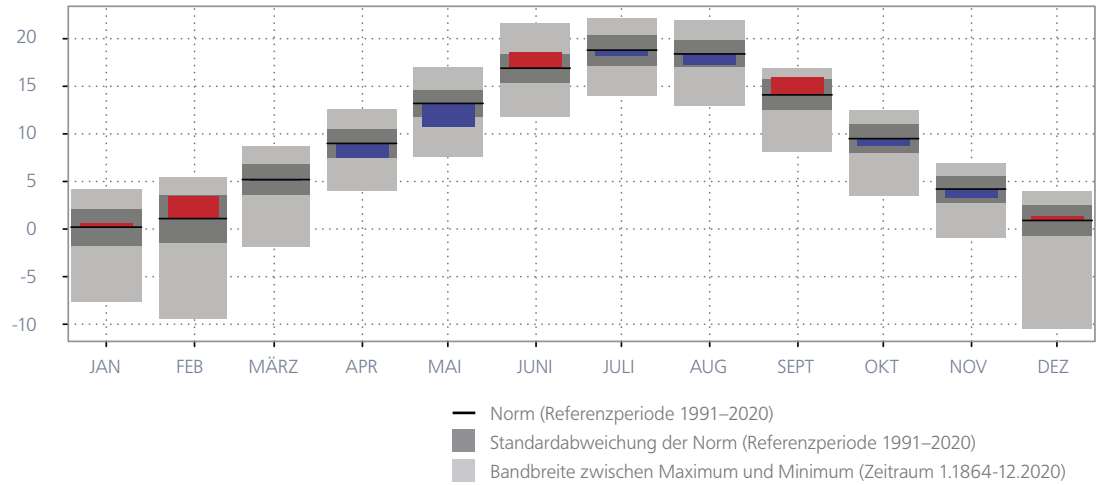
Räumliche Verteilung der monatlichen Sonnenscheindauer in % der Norm 1991–2020.

2| Diagramme zum Jahresverlauf

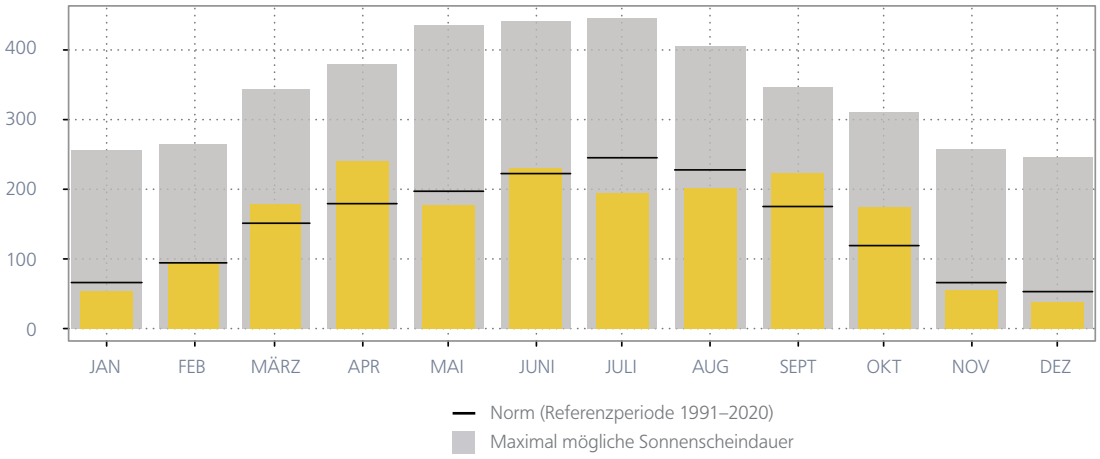
Temperatur, Sonnenscheindauer und Niederschlag Bern-Zollikofen (553 m ü.M) 1.1.–31.12.2021

Abbildung 2.1
Jahresverlauf der Monatsmitteltemperatur, der monatlichen Sonnenscheindauer und der monatlichen Niederschlagssummen an der Messstation Bern-Zollikofen.

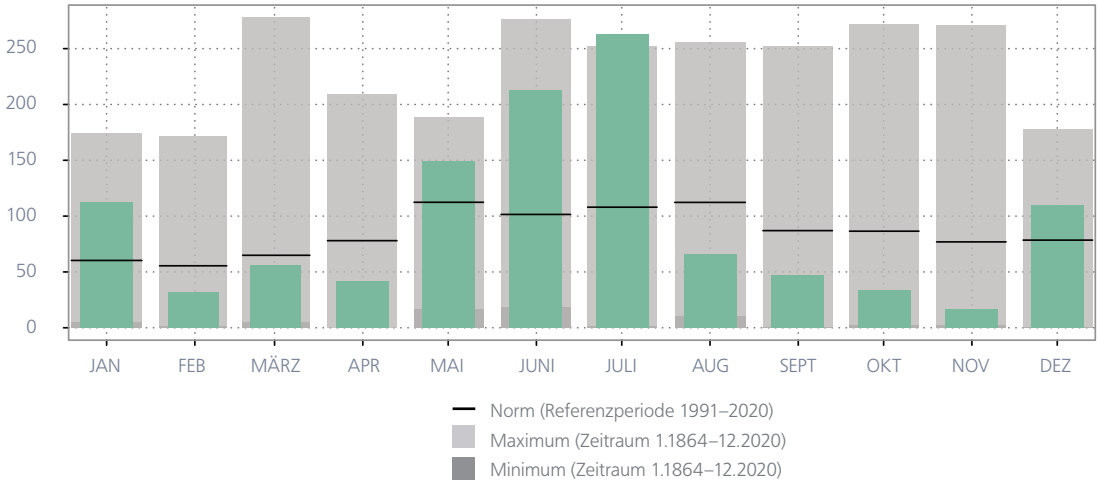
Monatsmittel der Lufttemperatur in °C: Mittel: 9,2; Norm: 9,3



Monatliche Sonnenscheindauer in h: Summe: 1861,9; Norm: 1797,1



Monatliche Niederschlagssummen in mm: Summe: 1136,6; Norm: 1021,8



Temperatur, Sonnenscheindauer und Niederschlag Lugano (273 m ü.M) 1.1.–31.12.2021

Monatsmittel der Lufttemperatur in °C: Mittel: 13,1; Norm: 13,0

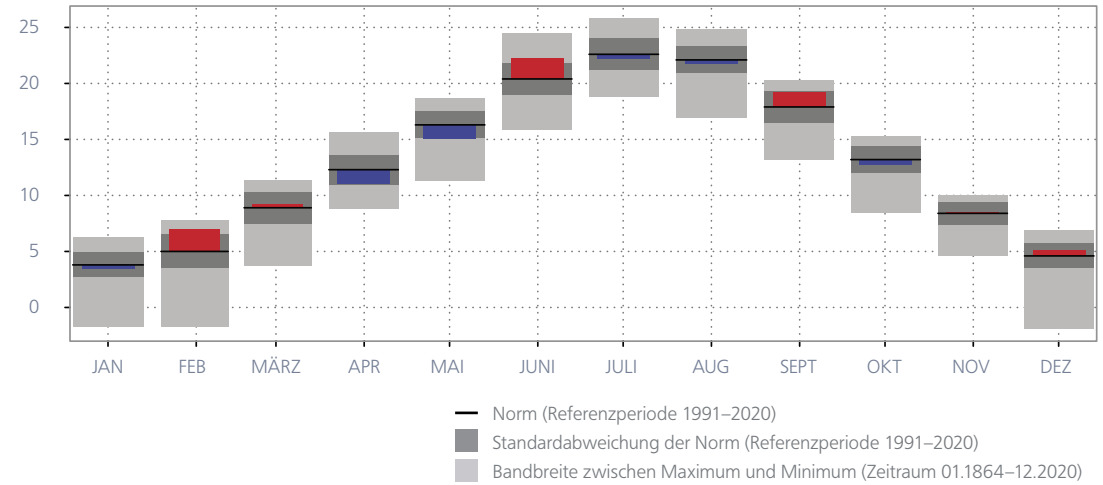
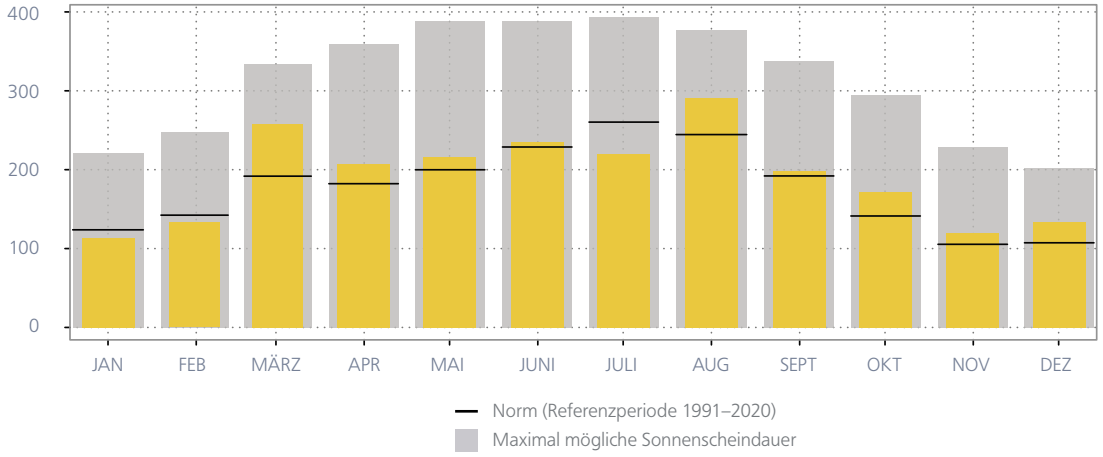
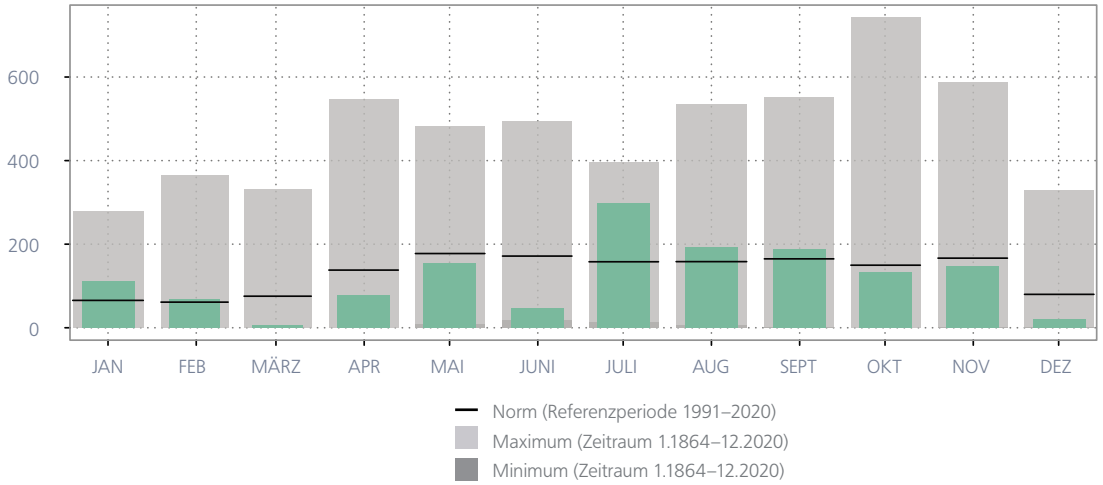


Abbildung 2.2
Jahresverlauf der Monatsmitteltemperatur, der monatlichen Sonnenscheindauer und der monatlichen Niederschlagssummen an der Messstation Lugano.

Monatliche Sonnenscheindauer in h: Summe: 2339,8; Norm: 2067,1



Monatliche Niederschlagssummen in mm: Summe: 1542,0; Norm: 1559,0



Alle Stationen [2]: meteoschweiz.admin.ch/home/klima/klima-der-schweiz/jahresverlauf-temperatur-sonne-niederschlag.html

Jahresverlauf der Globalstrahlung

Unter Globalstrahlung versteht man die gesamte an der Erdoberfläche auf eine horizontale Fläche auftreffende, kurzwellige Solarstrahlung. Die Globalstrahlung hat vor allem im Zusammenhang mit der Energiegewinnung eine besondere Bedeutung.

Im Jahr 2021 erreichte die jährlich gemittelte Globalstrahlung in den Alpen 160–180 W/m^2 (Abbildung 2.3). Das Schweizer Mittelland erhielt aufgrund winterlicher Nebellagen und einer erhöhten atmosphärischen Trübung weniger Globalstrahlung, nämlich 130–160 W/m^2.

Auch im vergangenen Jahr unterschieden sich die Bergregionen erwartungsgemäss deutlich vom Flachland: Während Zürich-Kloten im Durchschnitt 143 W/m^2 registrierte, erhielt das Jungfraujoch 192 W/m^2. Die Unterschiede waren 2021 aber stärker ausgeprägt als im Vorjahr. Das Tessin, oftmals als Sonnenstube der Schweiz bezeichnet, unterlag letztes Jahr der hochalpinen Besonnung deutlich: In Lugano wurden 162 W/m^2 registriert. Das Mittelland erreichte mit Spitzenwerten von 158 W/m^2 in Genève fast die Solarstrahlung des Tessins.

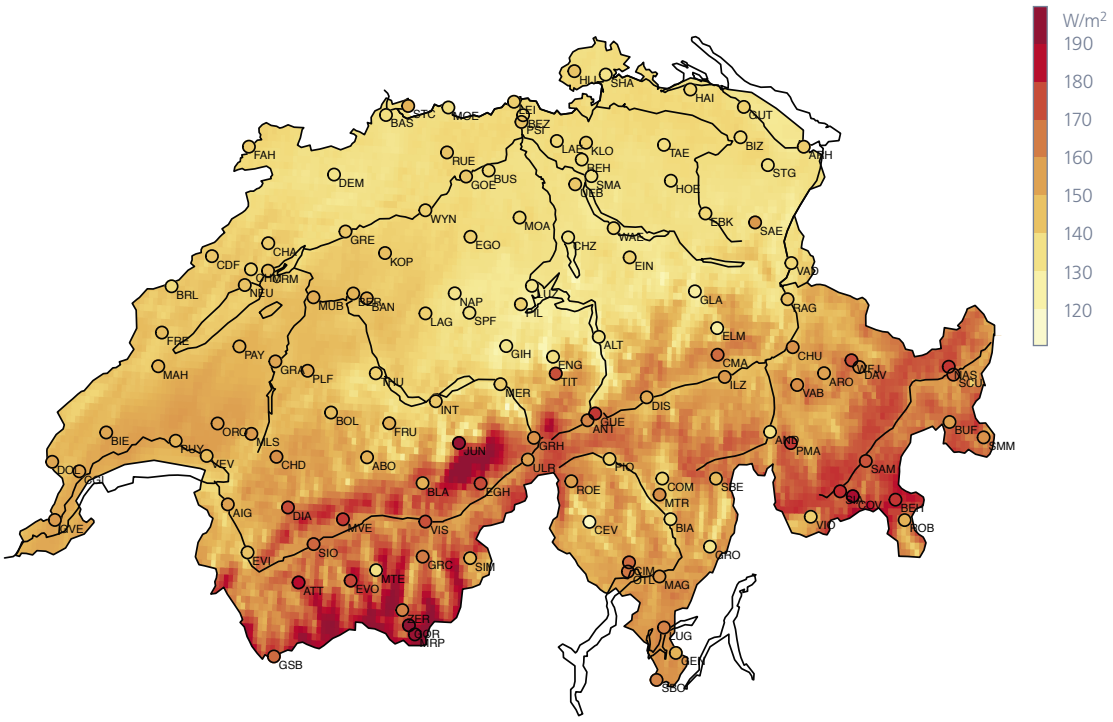


Abbildung 2.3
Jahresmittel der Globalstrahlung für 2021 in W/m^2 hergeleitet aus Satellitendaten. Die Kreise geben die entsprechenden Werte der Messstationen an.

Die Solarstrahlung ist ein sehr lokaler Parameter. Da Satelliten auf einem 2 x 2-km-Gitter, Bodenstationen an einem Punkt messen, ergeben sich Unterschiede auf Grund von lokalen Verschattungen, lokalen Nebelfeldern und unterschiedlichen Höhenlagen.

Im Vergleich zum Mittel der vergangenen 18 Jahre lagen die Globalstrahlungswerte für 2021 schweizweit im Schnitt etwa um 3 % niedriger. Auffallend vergangenen Jahr waren sehr grosse räumliche Unterschiede. Während im Mittelland die Werte im Bereich der Norm waren, lagen die Werte im Wallis bis zu 9 W/m^2 unter der Norm. Auch das nördliche Tessin bekam bis zu 5 W/m^2 weniger Solarstrahlung. Am westlichen Alpenhauptkamm wurde bis zu 9 W/m^2 weniger Strahlung registriert. In den Haupttälern des Kantons Graubünden wurden stellenweise bis zu 7 W/m^2 mehr Solarstrahlung gemessen.

Die Globalstrahlung besitzt in unseren Breitengraden einen ausgeprägten saisonalen Zyklus, der der Sonnenbahn folgt (Abbildung 2.4). Die Tagesmittel der Globalstrahlung schwanken aber aufgrund der täglich wechselnden Bewölkung äusserst stark.

Das Jahr 2021 war äusserst wechselhaft. Bis Mitte Februar war es sehr trüb. Auf eine sehr sonnige zweite Februarhälfte folgten wieder viele trübe Tage. In der zweiten Märzhälfte und der ersten Aprilhälfte dominierte die Sonne. Auf eine wolkige Periode bis Mitte Mai, folgten Ende Mai und im Juni sehr viele sonnige Tage. Im Juni wurden vor allem in der Ostschweiz Rekordwerte gemessen. Der Juli war im ganzen Land äusserst trüb, mit Strahlungswerten bis zu 50 W/m^2 unter der Norm. Im August dominierte wieder die Sonne und der September lag in der Ostschweiz wieder deutlich über der Norm. Auch im Oktober wurden viele sonnige Tage gezählt. Im November und Dezember folgten dann erneut viele trübe Tage. Die Globalstrahlungswerte lagen im November in der ganzen Schweiz unter der Norm.

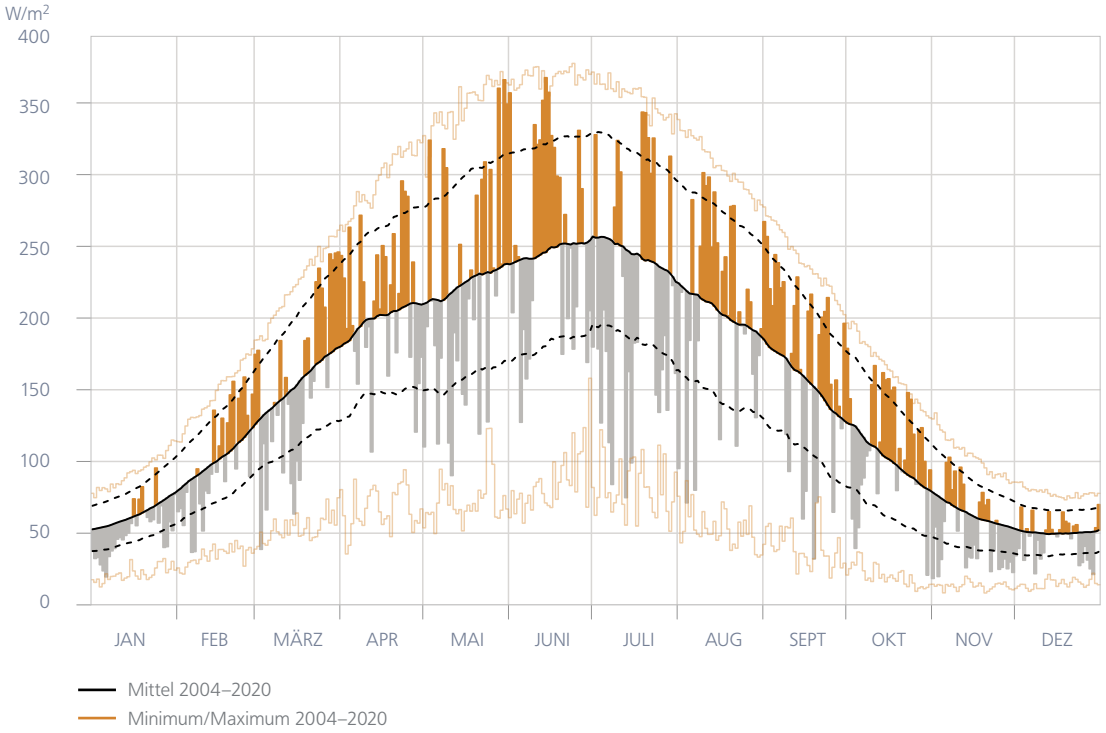


Abbildung 2.4
Tagesmittel der Globalstrahlung gemittelt über die ganze Schweiz für 2021. Orange Balken geben eine überdurchschnittliche, und graue Balken eine unterdurchschnittliche Einstrahlung im Vergleich zur Periode 2004–2020 an.

Nullgradgrenze in der freien Atmosphäre

Der Verlauf der Nullgradgrenze in der freien Atmosphäre wird aus den zweimal täglich durchgeführten Ballonsondierungen (11 und 23 UTC) in Payerne bestimmt. Die Höhe der Nullgradgrenze ist mit der Ballonsondierung nicht immer eindeutig bestimmbar. Bei Inversionslagen können mehrere Nullgradgrenzen im gleichen Profil auftreten. Dann wird jeweils die höchste Lage verwendet. Ist die Bodentemperatur zum Zeitpunkt der Radiosondierung unter 0 °C, wird eine fiktive negative Nullgradgrenze berechnet, indem ausgehend von der Bodentemperatur die fiktive Temperatur pro 100 m nach unten um 0,5 °C angehoben wird, bis die Nullgradgrenze erreicht ist. Dies führt bei sehr kalten Verhältnissen im Winter zu einer negativen Nullgradgrenze (unterhalb des Meeresspiegels).

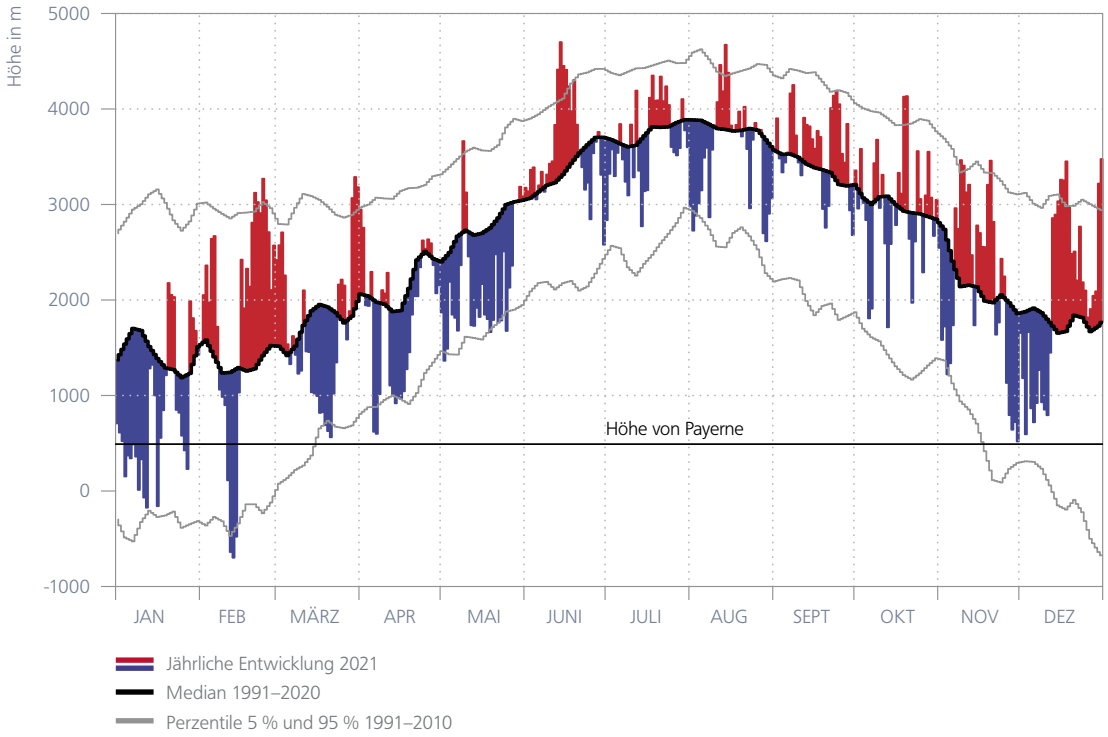
Abbildung 2.5 zeigt die täglichen Veränderungen der Nullgradgrenze im Jahr 2021. Die Werte sind sowohl absolut (Höhe in m ü. M.) als auch in Relation zu den täglichen Referenzwerten dargestellt, die über den Zeitraum der Norm 1991–2020 berechnet wurden (schwarze Kurve). Die blauen und roten Balken entsprechen den Abweichungen zur Referenz. Die Norm für den Zeitraum 1991–2020 beträgt 2600 m. In früheren Klimareports wurde die Norm 1981–2010 verwendet, wo die Nullgradgrenze im Mittel auf 2520 m lag. Der Anstieg von 80 m kommt durch die Erwärmung von 0,5 °C zwischen den beiden Referenzperioden zustande.

Der Jahresmedian der Nullgradgrenze im Jahr 2021 liegt bei 2680 m, was 80 m höher als der Median der Normperiode und 90 m niedriger als der Median des Jahres 2020 ist. Ein Überblick über die im Jahr 2021 gemessenen Extremwerte: Der Höchstwert des vergangenen Jahres wurde am 14. Juni 2021 mit einem Wert von 4700 m ü.M. gemessen, 163 m niedriger als im Jahr 2020. Am 13. Februar wurde das Minimum von -699 m registriert, 1250 m niedriger als im Jahr 2020. Im Gegensatz zum Vorjahr, in dem keine Tageswerte unterhalb des Bodenniveaus gemessen wurden, war im vergangenen Jahr in den Monaten Januar und Februar eine deutlich grössere Zahl an negativen Abweichungen zu verzeichnen. Auch der Prozentsatz der Tage, an denen die Abweichungen der Nullgradgrenze von der Referenz den Schwellenwert des 95. Perzentils im Jahr 2021 überschritten (rote Balken, die über die obere graue Kurve hinausragen), beträgt 7.1 %, verglichen mit 18,5 % im Jahr 2020. Der Prozentsatz negativer Anomalien unter dem 5. Perzentil betrug 3.8 %.

Im Allgemeinen bestätigt der Jahresmedian von 2021 den positiven Trend der Jahreswerte seit Mitte der 1980er Jahre (siehe Kapitel 5.1.2).

Abbildung 2.5
Tägliche Höhe der Nullgradgrenze in der freien Atmosphäre über Payerne im Jahr 2021, ermittelt aus den aerologischen Radiosondenmessungen 23 UTC und 11 UTC. Der Medianwert (Norm 1991–2020) wurde mit homogenisierten Daten berechnet und mit einem numerischen Filter geglättet. Innerhalb der 5 %- und 95 %-Perzentil-Linien (grau) liegen 90 % der Tagesmittelwerte.

Median 2021: 2680 m; **Norm 1991–2020:** 2600 m



23 Tropopausenhöhe

Die Tropopause trennt die vom Wetter geprägte Troposphäre von der darüber liegenden, eher stabil geschichteten und sehr trockenen Stratosphäre. Die Tropopause ist immer durch eine deutliche Änderung des Temperaturprofils gekennzeichnet und entspricht oft der tiefsten Temperatur zwischen diesen beiden Schichten. Die Tropopausenhöhe gibt an, ob die Witterung eher tiefdruck- (niedrige Tropopause) oder hochdruckbestimmt (hohe Tropopause) ist. Wie die Nullgradgrenze, wird auch die Tropopausenhöhe zweimal täglich in Payerne aus den Ballonsondierungen ermittelt. Die Berechnung der Tropopausenhöhe erfolgt mit einem automatischen Algorithmus entsprechend einer WMO-Richtlinie (siehe Kapitel 5.3, Datengrundlagen und Methoden).

Abbildung 2.6 zeigt den Verlauf der Tagesmittelwerte der Tropopausenhöhe im Jahr 2021. Die Werte werden sowohl absolut (Höhe in m ü.M.) als auch in Relation zu den täglichen Referenzwerten dargestellt, die über den Zeitraum der Norm 1991–2020 berechnet wurden (schwarze Kurve). Die blauen und roten Balken zeigen die Abweichungen in Bezug auf die Referenz. Der Zufluss polarer (oder arktischer) Luftmassen in der Atmosphäre über die Schweiz führt zu einer Absenkung der Tropopause und damit oft zu Werten unterhalb der Referenzlinie. Die täglichen Werte waren in 52,6 % der Zeit niedriger als der Referenzwert. Zum Beispiel wurden die ersten 15 Tage des Jahres 2021 von der intensivsten Serie negativer Anomalien des Jahres geprägt.

Im Gegensatz dazu nimmt bei der Ankunft einer warmen Luftmasse tropischen Ursprungs (maritimen oder kontinental) die Höhe der Tropopause im Vergleich zu den charakteristischen Werten der Atmosphäre über der Schweiz zu. Die Tropopausenhöhen können dann ungewöhnlich hoch sein (rote Werte), wie es in 47,4 % der Zeit im Jahr 2021 der Fall war.

Die Anpassung des Referenzzeitraums von 1981–2010 in früheren Berichten zur Norm 1991–2020 führte zu einem Anstieg des Jahresmedians der Tropopausenhöhe von 11'320 m auf 11'400 m. Der Jahresmedian der Tropopausenhöhe von 2021 lag mit 11'280 m unter der Norm. Im Jahr 2021 waren 4,4 % der positiven Anomalien höher als das 95. Perzentil. Insgesamt 5,7 % der negativen Anomalien blieben unter dem 5. Perzentil. Der höchste Wert des Jahres wurde am 15. August mit einer Tropopause auf 14'490 m gemessen. Am 7. April erreichte die Tropopause das Jahresminimum mit einer Höhe von 6870 m.

Median 2021: 11'280 m; **Norm 1991–2020:** 11'400 m

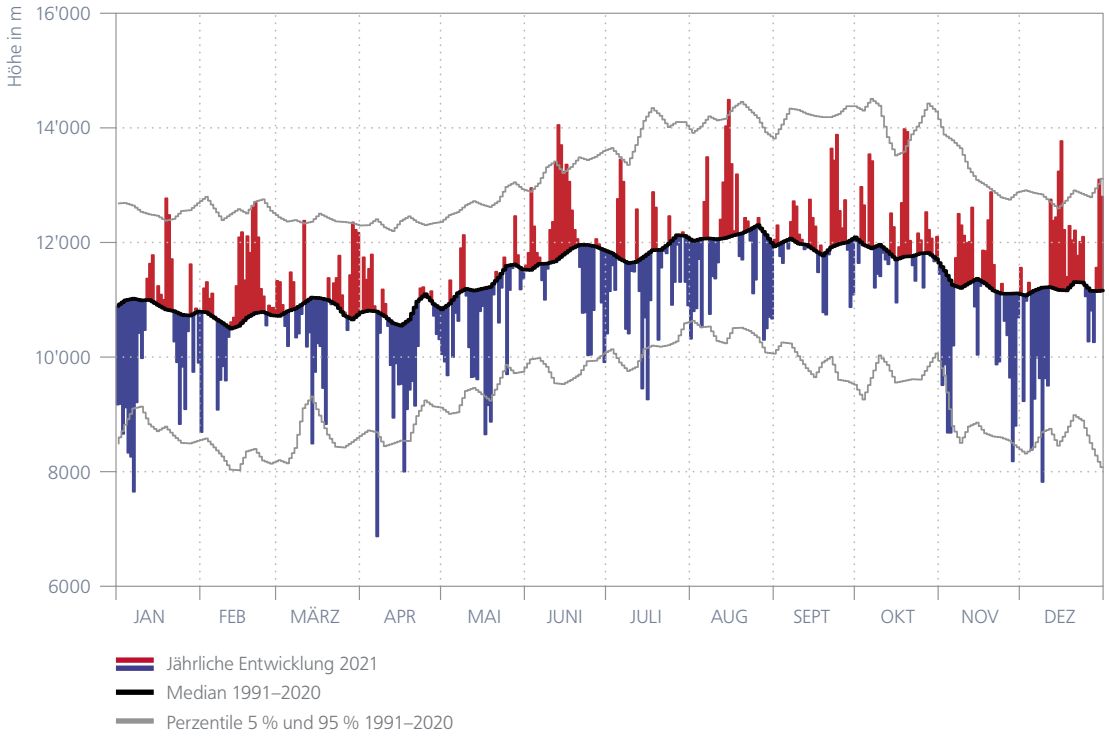


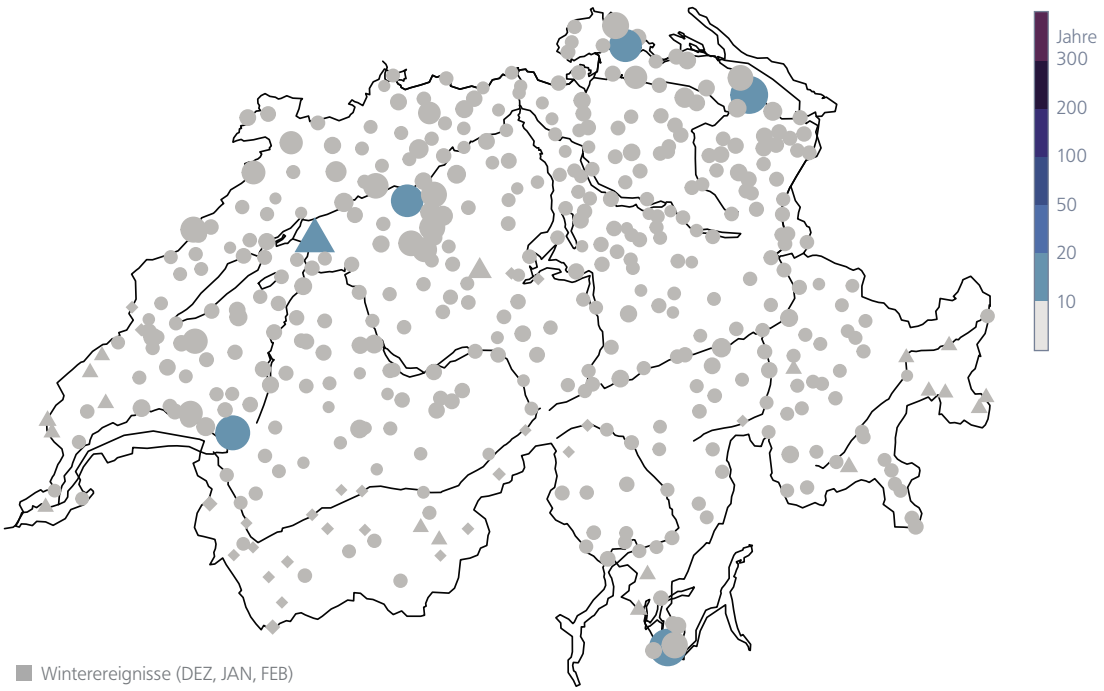
Abbildung 2.6
Tägliche Höhe der Tropopause über Payerne im Jahr 2021, ermittelt aus den aerologischen Radiosondenmessungen 23 UTC und 11 UTC. Der Medianwert (Referenzperiode 1991–2020) wurde mit homogenisierten Daten berechnet und mit einem numerischen Filter geglättet. Innerhalb der 5 %- und 95 %-Perzentil-Linien (grau) liegen 90 % der Tagesmittelwerte.

Aussergewöhnliche Starkniederschläge

Um zu beurteilen, ob ein aussergewöhnliches Witterungsereignis aufgetreten ist, werden Häufigkeitsanalysen (oder Extremwert-Analysen) durchgeführt. Häufigkeitsanalysen geben Auskunft darüber, wie häufig im langjährigen Durchschnitt das Überschreiten einer bestimmten Ereignisgrösse zu erwarten ist, z.B. alle zehn Jahre oder alle 20 Jahre. Diese Häufigkeitsangabe wird als Wiederkehrperiode bezeichnet.

Mit einem statistischen Verfahren (räumliche Extremwertanalyse mit Basisperiode 1961–2020) wird für jeden Niederschlags-Messstandort die höchste im Berichtsjahr erfasste 1-Tages-Niederschlagssumme beurteilt. In Amriswil TG wurde am 8. Juli im Zuge einer Serie von grossräumigen Gewitterzellen in der Bodenseeregion eine Tagessumme von 83,7 mm erreicht. Eine solche Menge wird an diesem Standort etwa alle 17 Jahre überschritten. Ähnlich häufig ist die Regenmenge, die am 25. Juli am südtessiner Messstandort Coldrerio infolge heftiger Gewitter niederging (156,8 mm). Beide Ereignisse fanden in einer kräftigen Südwestströmung statt. Daneben gab es im nassen Sommer an den Messstationen von Les Avants, Diessenhofen und Herzogenbuchsee drei weitere 1-Tages-Ereignisse mit Wiederkehrperioden von mehr als zehn Jahren. Das einzige derartige Extremereignis im Herbst stammt vom Messstandort Aarberg. Am 16. September 2021 wurde dort ein Tagesniederschlag von 71,7 mm registriert. Das entspricht lokal einer Wiederkehrperiode von etwa 13 Jahren. Die Schweiz war an diesem Tag auf der Vorderseite einer Kaltfront. Folglich gab es vielerorts Schauer oder Gewitter, besonders am Jurasüdfuss.

Abbildung 2.7
Wiederkehrperioden der grössten 1-Tages Niederschlagssummen (06 Uhr bis 06 Uhr), unterschieden nach Saison, im Jahr 2021.



Winterereignisse (DEZ, JAN, FEB)
Frühlingsereignisse (MÄRZ, APR, MAI)
Sommerereignisse (JUN, JUL, AUG)
Herbstereignisse (SEPT, OKT, NOV)
Die Punktgrösse und die Farbe entspricht der Länge der Wiederkehrperiode in Jahren.
Grau steht für Wiederkehrperioden von zehn Jahren oder weniger.

Jahresverlauf der UV-Strahlung

Dem UV-B-Bereich des solaren Spektrums kommt besondere Bedeutung zu, da sich diese Strahlungskomponente signifikant auf Lebewesen auswirkt und in bestimmten Fällen ein Problem für die Gesundheit darstellt (Hautkrebs, Hornhautschäden, usw.). Andererseits sind auch positive Effekte vorhanden, z.B. bezüglich der Produktion von Vitamin D im Körper. Die verwendeten UV-Messgeräte registrieren die Intensität der ultravioletten Strahlung durch einen so genannten Erythemalfilter, dessen Verhalten die Empfindlichkeit der Haut, insbesondere für UV-B mit einem kleinen Anteil UV-A, nachbildet. MeteoSchweiz misst die UV-B Strahlung in Davos seit Mai 1995, auf dem Jungfraujoch seit November 1996, in Payerne seit November 1997 und in Locarno-Monti seit Mai 2001.

Der Vergleich der monatlichen Mittelwerte mit dem durchschnittlichen Jahresverlauf zeigt, dass sich die UV-Strahlung im Jahr 2021 an allen Stationen relativ nahe am Durchschnitt bewegte. Die grössten Abweichungen waren vor allem auf die Bewölkung zurückzuführen und variierten von Station zu Station. Die Bewölkung gehört neben dem Ozongehalt in der Atmosphäre (primär in der Ozonschicht) zu den Hauptfaktoren, die die Intensität der UV-Strahlung beeinflussen. Auch die Position der Sonne am Himmel und die Höhenlage einer Messstation spielen eine Rolle, diese ändern sich im Gegensatz zu den beiden anderen Faktoren jedoch nicht von Jahr zu Jahr.

Im Jahr 2021 war der Ozongehalt der Atmosphäre mit Ausnahme der Monate Februar und Juni etwas höher als in den Vorjahren. Der im Zeitraum 2000–2020 vorhandene mittlere Ozongehalt entspricht dabei in etwa der Menge, die zur Berechnung des mittleren jährlichen UV-Strahlungsverlaufs verwendet wird. Entsprechend wäre für das Jahr 2021 ausser für Februar und Juni eine allgemein geringere UV-Strahlungsintensität als in den Vorjahren zu erwarten gewesen. In Payerne lag die UV-Strahlung im Mai und im Sommer, von Mitte Juni bis Mitte August, unter der Norm. In Locarno-Monti lag die UV-Strahlung im Juni leicht über der Norm, während sie für den Rest des Sommers, von Juli bis Mitte August, unter der Norm lag. Diese unter der Norm liegenden Sommerwerte hängen hauptsächlich mit dem bewölkten und regnerischen Sommer zusammen, den die Schweiz 2021 erlebte, wobei die weitgehend höheren Ozonwerte in der Atmosphäre diesen Effekt noch verstärkten. An den Bergstationen Davos und Jungfraujoch war die Intensität der UV-Strahlung im Juni hoch, mit vielen hohen Tageswerten, die auf sehr sonnige Tage hinweisen, und in Übereinstimmung mit der Tatsache sind, dass der Ozongehalt der Atmosphäre im Juni nicht höher war als in den Vorjahren.

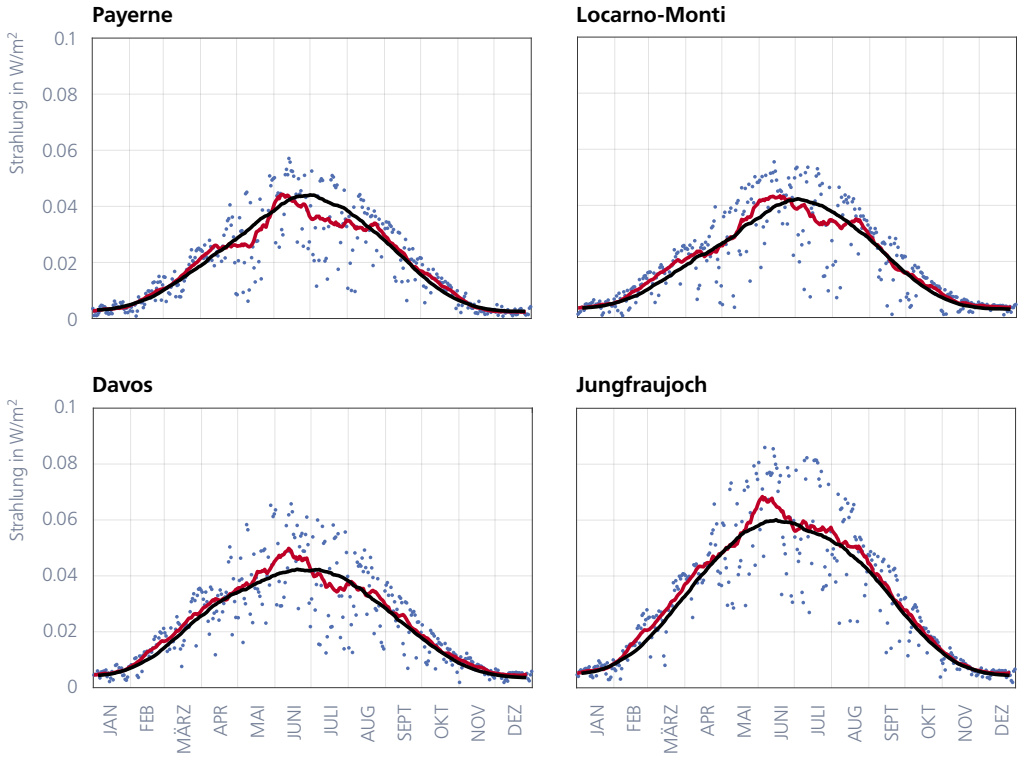


Abbildung 2.8
Tägliche Mittelwerte 2021 der erythemalen ultravioletten Strahlung (blaue Punkte) an den Messstationen Payerne, Locarno-Monti, Davos und Jungfraujoch. Rote Linie: gleitendes Monatsmittel (31 Tage). Schwarze Kurve: mittlerer jährlicher Verlauf berechnet aus den langjährigen Aufzeichnungen 1995–2020 (Davos), 1997–2020 (Jungfraujoch), 1998–2020 (Payerne) und 2001–2020 (Locarno-Monti).

Täglich
Monatlich 2021
Klimatologisches Mittel

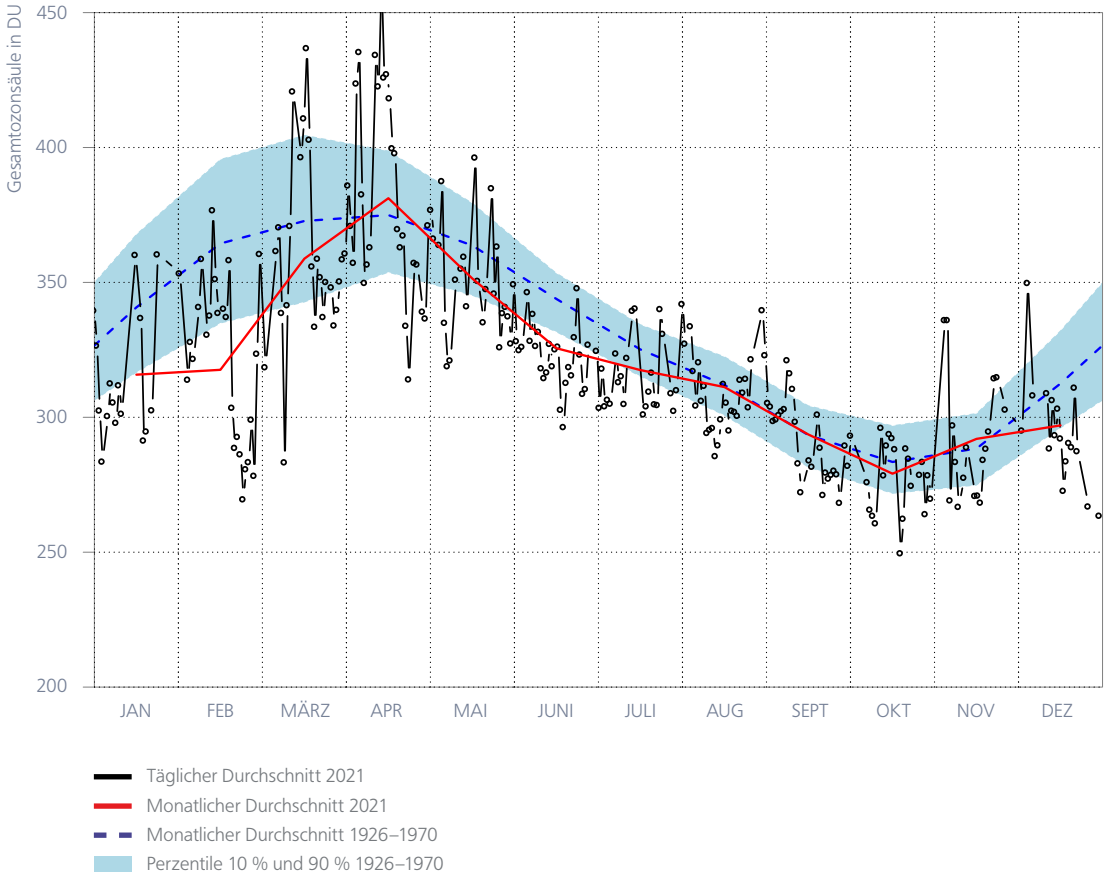
Ozonmessreihe Arosa und Davos

Im Februar 2021 wurden die letzten Ozonsäulen-Messgeräte von Arosa nach Davos verlegt. Die detaillierte Untersuchung der gleichzeitig an beiden Standorten durchgeführten Messungen hat gezeigt, dass es keinen signifikanten Unterschied gibt. Die Entwicklung der Gesamtozonsäule über Davos (Abbildung 2.9) zeigt den typischen Jahresverlauf mit hohen Werten im Winter und Frühling und niedrigeren Werten im Herbst. Der Jahresverlauf der Gesamtozonsäule wird massgeblich durch den Transport von Ozon innerhalb der Stratosphäre aus den Nordpolarregionen nach Süden bestimmt, wo das Ozonmaximum am Ende der Polarnacht erreicht wird, das heisst zu Beginn des Frühlings.

Der Referenzzeitraum 1926–1970 entspricht dem Zustand der Ozonschicht vor der Beeinflussung durch den Menschen. Die kontinuierliche Abnahme der in Arosa gemessenen Gesamtozonsäule begann um 1970, einer Zeit, als der weltweite Ausstoss von ozonschädigenden Substanzen stark anstieg. Seit dem Jahr 2000 ist über der Schweiz eine Stabilisierung des Gesamtozons festzustellen.

Im Jahr 2021 lagen die monatlichen Ozonmittelwerte näher an der Referenzperiode als in den Vorjahren. Nur in den Monaten Februar und Juni wurden Werte deutlich unterhalb des 10 %-Perzentils der Referenzperiode registriert. Die Tagesmittel der Ozonsäule waren 2021 grossen Schwankungen unterworfen: Am 15. April wurde der Höchstwert von 463 DU gemessen, das Minimum von 250 DU trat am 20. Oktober 2021 auf.

Abbildung 2.9
Die Tagesmittel der Ozonsäule waren 2021 grossen Schwankungen unterworfen: Am 15. April wurde der Höchstwert von 463 DU gemessen, das Minimum von 250 DU trat am 20. Oktober 2021 auf.



Die Ozonprofile wurden von 1956 bis Oktober 2018 in Arosa und werden seither in Davos von einem Dobson-Spektralphotometer gemessen. Es ist die längste Ozon-Messreihe der Welt. Für das Jahr 2021 sind die Schwankungen des Ozons in Abbildung 2.10 in Farbe angegeben. Die Mittelwerte der Jahre 1970–1980 sind schwarz dargestellt (Konturen für 20, 40, 60 und 80 DU). Das erlaubt es, die Abweichungen der Ozonwerte zum klimatologischen Mittel im Verlauf des Jahres in Abhängigkeit der Höhe zu visualisieren.

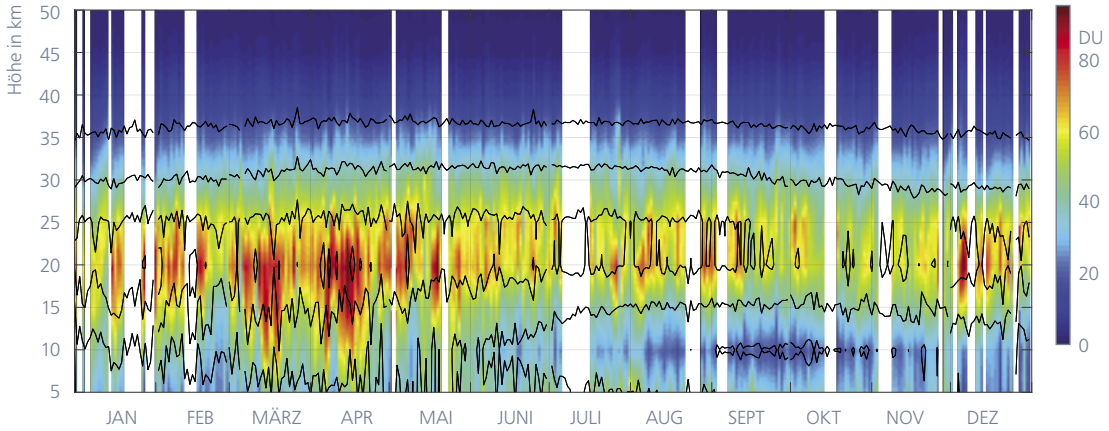
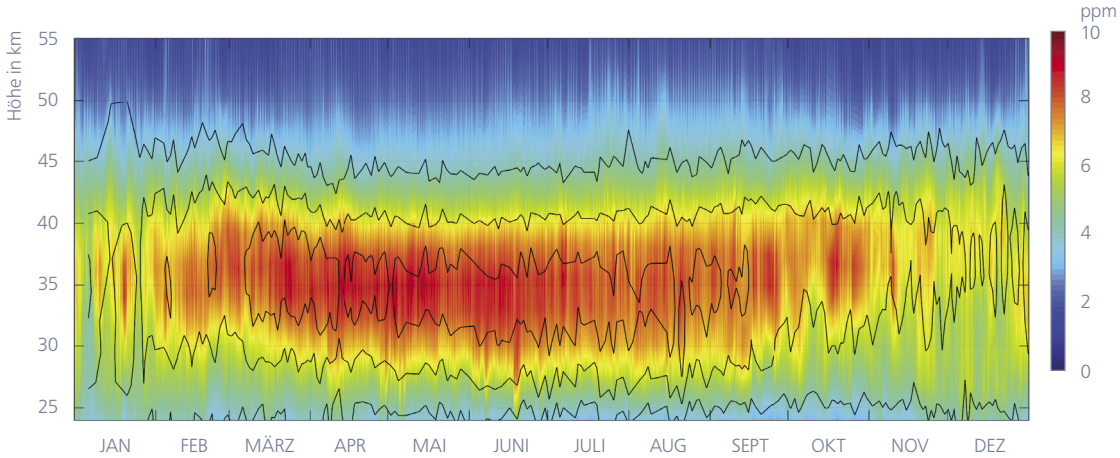


Abbildung 2.10
Die in Davos von einem Dobson-Spektralphotometer gemessenen Ozonprofile im Jahr 2021. Die Grafik zeigt die Ozonkonzentration in Dobson Units (DU) (Skala rechts zwischen 0 und 90 DU). 100 DU = 1 mm reines Ozon bei Normaldruck 1013 hPa und 0 °C.

Ozonmessungen Payerne

Das Mikrowellen-Radiometer SOMORA misst seit 2000 die vertikale Verteilung des Ozons in Payerne mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde. Die Schwankung des Ozons im Jahresverlauf 2021 ist in Abbildung 2.11 mit Farbe, für das Jahr 2020 in Schwarz angegeben (Konturen für 4, 6 und 8 ppm). Das erlaubt die unterschiedlichen Ozonwerte im Verlauf des Jahres abhängig von der Höhe und im Vergleich zum Vorjahr darzustellen.

Abbildung 2.11
Durch Mikrowellenradiometer im Jahr 2021 in Payerne gemessene Ozonprofile. Die Grafik zeigt das Volumenmischungsverhältnis (VMR) des Ozons in Teilen pro Million (ppm). Rechte Skala zwischen 1 und 10 ppm.



Die Messungen der vertikalen Verteilung des Ozons in der Atmosphäre bis ungefähr 35 km Höhe werden ausserdem im Rahmen von Ballonsondierungen vorgenommen. Die gewonnenen Daten erlauben es, die zeitliche Entwicklung der Ozonmenge in den verschiedenen Schichten der Atmosphäre zu bestimmen. Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung im Detail für das Jahr 2021 für vier verschiedene Höhenlagen:

- Auf niedriger Höhe (Stufe 925 hPa), wird die maximale Ozonmenge im Sommer erreicht, aufgrund der starken Sonneneinstrahlung und der Luftverschmutzung (welche die Ozonmenge erhöht).

- In den höheren Lagen der freien Atmosphäre, wo sich die meisten Wetterphänomene abspielen (Stufe 300 hPa = ~9000 m), ist das sommerliche Maximum stark abgeschwächt, da die Bedingungen für die Ozonbildung hier nicht optimal sind. Die markanten Spitzen beziehen sich auf den Eintritt von Ozon aus den höheren Schichten der Atmosphäre (Stratosphäre) oder auf eine vorübergehende Absenkung der Tropopause unterhalb von 300 hPa.

- In der unteren Stratosphäre (Stufe 40 hPa = ~22 km) wird die jährliche Entwicklung des Ozons durch den Transport von Ozon durch die vorherrschenden Strömungen bestimmt. Hier wird die stärkste Ozonkonzentration in der Zeit vom Winterende bis zum Frühlingsbeginn erreicht.

- In grösseren Höhen (15 hPa = ~28 km) führt die starke Sonneneinstrahlung zu einem Ozonmaximum im Sommer, wenn die Sonne hoch am Himmel steht.

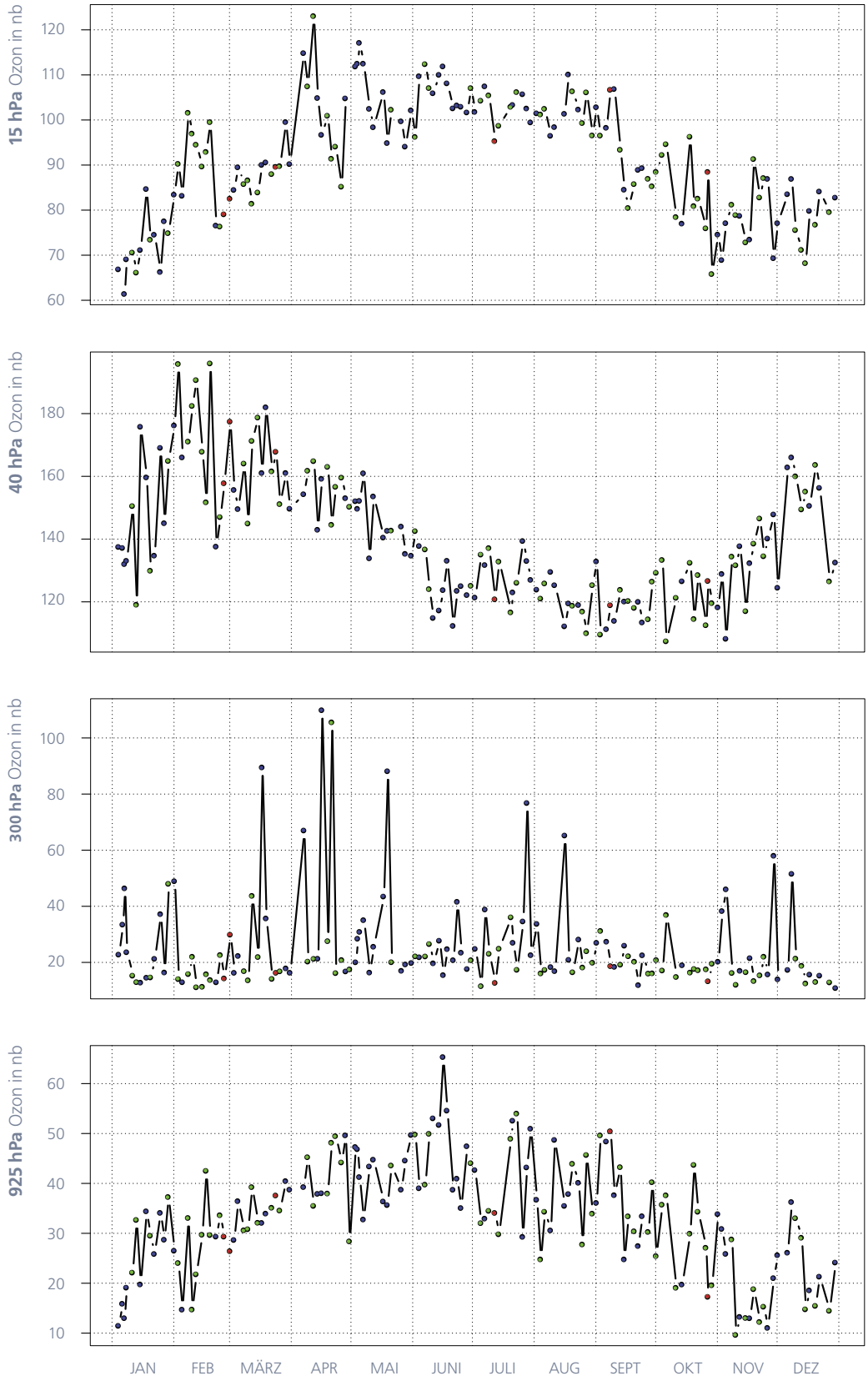


Abbildung 2.12

Verlauf der Ozonkonzentration (Partialdruck in Nanobar) im Jahr 2021 auf vier verschiedenen Druckniveaus (15, 40, 300, 925 hPa). Die Farben zeigen, wie gut die Ballonsondendaten mit der unabhängigen Ozonmessung von Davos übereinstimmen: Blau: sehr gute Übereinstimmung; grün: gute Übereinstimmung; rot: signifikante Unterschiede.

Aerosolmessungen Jungfraujoch

Aerosole beeinflussen die Atmosphäre direkt (durch Absorption und Streuung des Sonnenlichts) und indirekt (durch Wolkenbildung). Wie stark sich diese Effekte auf die Erwärmung oder Abkühlung auswirken bleibt eine der grossen Unsicherheiten der Klimamodelle [3]. Die auf dem Jungfraujoch seit 1995 vorgenommenen Aerosolmessungen sind Teil der weltweit längsten Messreihen [4].

Im Jahresverlauf der Aerosolparameter auf dem Jungfraujoch zeigen sich im Sommer maximale und im Winter minimale Werte. Die natürlichen und menschgemachten Aerosole sammeln sich insbesondere in der planetaren Grenzschicht, also der untersten Schicht der Atmosphäre, welche je nach Wetterlage und Jahreszeit eine Mächtigkeit von 0,5 bis einige km aufweist.

Im Sommer sorgt die Erwärmung des Bodens für aufsteigende Luftströmungen, die die Aerosole in grössere Höhen verfrachten. Das Jungfraujoch befindet sich dann verstärkt im Einflussbereich der planetaren Grenzschicht. Im Winter befindet sich das Jungfraujoch die meiste Zeit in der freien Troposphäre [5] und eignet sich daher gut für die Messung der optischen Eigenschaften und der Konzentration von Aerosolen in weiter Entfernung von den Verschmutzungsquellen.

Das Sphinx-Labor von Mai bis Juli 2021 renoviert. In diesem Zeitraum gab es keine Messungen. Die Tourismusaktivität auf dem Jungfraujoch blieb aufgrund der Pandemie deutlich unter dem Niveau von 2019, was die unter der Referenzperiode 1995–2020 liegenden Werte für Diffusion und Absorption für die Monate im Winter und Herbst erklären kann.

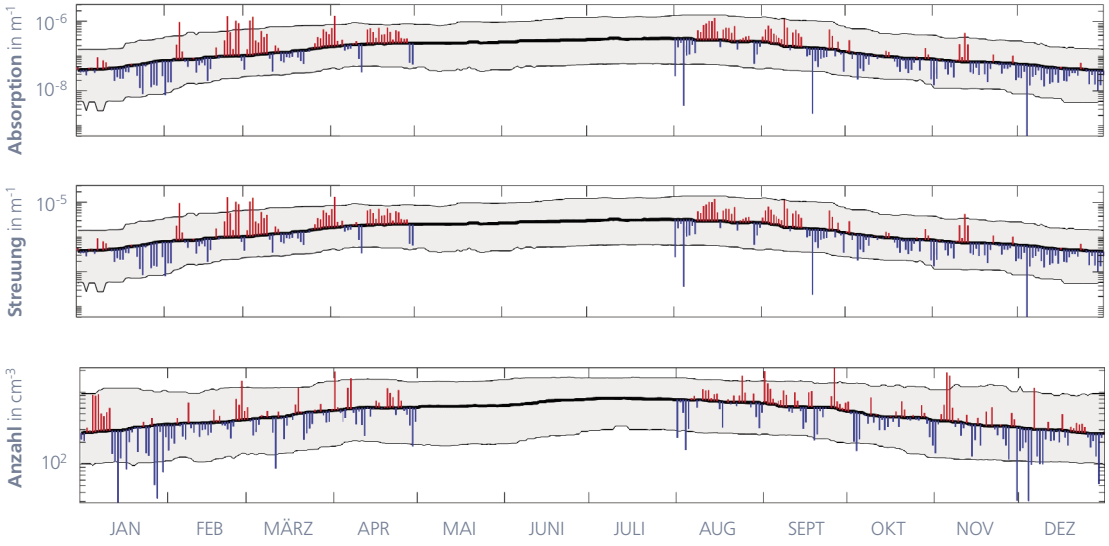


Abbildung 2.13
Entwicklung des Absorptionskoeffizienten bei 880 nm (oben), des Diffusionskoeffizienten (Streuung) bei 550 nm (Mitte) und der Aerosolkonzentration (unten) der Aerosole im Jahr 2021 auf dem Jungfraujoch. Zwischen Mai und Juli wurden aufgrund von Renovationen im Laboratorium keine Messungen durchgeführt. Die schwarze Kurve zeigt das Mittel der Periode 1995–2020. Innerhalb der grauen 5%- und 95%-Perzentil-Linien liegen 90 % der Tagesmittelwerte.

Saharastaubereignisse

Mineralstaub trägt wesentlich zu den atmosphärischen Aerosolen bei, wobei die Sahara die wichtigste Quelle ist. Das Vorhandensein von Mineralstaub in der Luft wurde in der Vergangenheit durch die Analyse von Niederschlägen oder Ablagerungen in Schnee und Eis bestimmt. Seit 2001 werden an der alpinen Forschungsstation Jungfraujoch auf einer Höhe von 3580 m ü.M. kontinuierliche Messungen der Diffusions- und Absorptionskoeffizienten auf verschiedenen Wellenlängen durchgeführt. Diese Messungen haben es ermöglicht, eine neue operationelle Methode zur stündlichen Bestimmung von Saharastaubereignissen über der Schweiz zu entwickeln. Damit kann die Häufigkeit von Saharastaubereignissen in den Alpen untersucht werden.

Während siebzehn Jahren (2001–2017) wurde eine Klimatologie der Saharastaubereignisse erstellt. Dabei waren immer die gleichen Messinstrumente im Einsatz. In diesem Zeitraum wurden jedes Jahr zwischen zehn und 50 Saharastaubereignisse identifiziert, was einem Saharastaubeintrag während 200–700 Stunden pro Jahr entspricht. Typischerweise trägt Mineralstaub aus der Sahara im Frühjahr (März bis Juni) sowie im Oktober und November erheblich zur Aerosolbelastung in den Alpen bei. Im Sommer sind solche Ereignisse seltener, können aber manchmal lange andauern, während sie im Winter im Allgemeinen sehr kurz sind. Die meisten Ereignisse (~50 %) dauern nur wenige Stunden, während 25 % davon mehr als einen Tag dauern.

Zwischen 2016 und 2018 mussten die alten Instrumente ersetzt werden, was sich auf die Empfindlichkeit bei der Erkennung von Saharastaubereignissen auswirkte. Aufgrund der Renovierung des Labors war der Nachweis von Saharastaubereignissen von Mai bis Mitte August 2021 nicht möglich. Saharastaubereignisse waren in den Monaten Februar und März 2021 besonders zahlreich und intensiv. Das Ereignis vom 5.–7. Februar 2021 war das intensivste, das seit Beginn der Messungen im Jahr 2001 beobachtet wurde. Es wurde am 6. Februar eine PM2.5-Konzentration von insgesamt 250 Mikrogramm pro m^3 und ein stündliches Maximum von 124 Mikrogramm pro m^3 um 17 Uhr gemessen. Eine Gelbfärbung des Himmels, die durch die hohe Konzentration von Staubpartikeln in der gesamten atmosphärischen Säule hervorgerufen wurde, war in der ganzen Schweiz von Auge zu beobachten. Die Konzentrationen im Flachland waren jedoch deutlich niedriger.

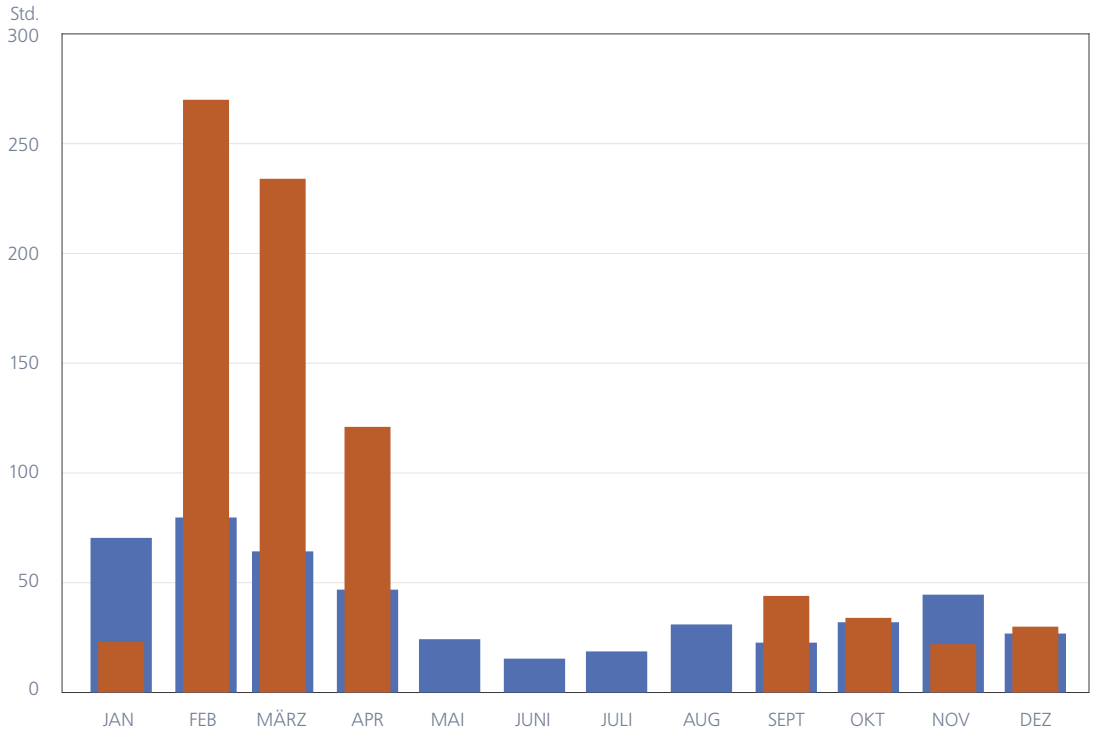


Abbildung 2.14
Anzahl Stunden pro Monat mit Mineralstaubeinbrüchen von mindestens sechs Stunden Dauer an der Messstation Jungfraujoch für den Zeitraum 2019–2020 und für 2021. Im Zeitraum vom 1. Mai bis 19. August 2021 war der Nachweis von Saharastaub wegen Renovationen im Sphinx-Labor auf dem Jungfraujoch nicht möglich.

2015–2020
2021

Vegetationsentwicklung

Die Vegetationsentwicklung im Jahr 2021 verlief bis Mitte März in einem normalen zeitlichen Rahmen mit rund 4–6 Tagen Vorsprung auf das Mittel der Periode 1991–2020. Mitte März bremste eine erste Kältewelle die Weiterentwicklung, so dass Löwenzahn und Kirschbäume noch 2–3 Tage früher blühten als im Mittel. Tiefe Temperaturen im April und Mai verzögerten die Blattentfaltung, die mit zunehmender Höhenlage immer stärker verspätet war. Die Blattentfaltung der Buche war die späteste seit 1991 und war in Lagen unterhalb 600 m um fünf Tage verspätet, in Lagen oberhalb von 1000 m sogar um acht Tage. Dank hohen Temperaturen im Juni waren die Sommerphasen etwas weniger stark verspätet. Die Bäume profitierten vom warmen September und verfärbten ihre Blätter im Oktober einige Tage später als normal.

Das aktuelle Jahr wird mit der Periode 1991–2020 verglichen. Dabei werden die Daten dieser Periode in Klassen eingeteilt. Die mittleren 50 % aller Fälle werden als normal klassiert, je 15 % als früh bzw. spät und je die extremsten 10 % als sehr früh bzw. sehr spät. Abweichungen in Tagen vom Mittel der Vergleichsperiode werden für die mittleren 50 % aller Beobachtungen im Jahr 2021 angegeben (d.h. für das 25 % und das 75 % Quantil) oder für den Median aller Stationen. Einige phänologische Phasen werden erst seit 1996 beobachtet, für diese Phasen wird die Abweichung von der Periode 1996–2020 angegeben. Die phänologischen Beobachtungen begannen 1951–1952.

Frühling

Nachdem Ende Januar zuerst im Tessin und am Genfersee erste blühende Haselsträucher entdeckt wurden, begannen sie ab dem 1. Februar in den tieferen Lagen der ganzen Alpennordseite zu blühen. Am 16. Februar begann die zweite Welle der Haselblüte, bei der auch Haselsträucher in Höhenlagen von 700 bis über 1000 m blühten. Bei den meisten Stationen trat die Haselblüte zu einem normalen Zeitpunkt auf und hatte einen Vorsprung von sechs Tagen auf das Mittel der Vergleichsperiode 1991–2020.

In der zweiten Februarhälfte öffneten Frühlingspflanzen, die schnell auf die sehr milden Temperaturen dieser Periode reagierten, ihre Blüten. Erster Huflattich konnte beobachtet werden und in den Gärten blühten Schneeglöckchen und Krokusse. Am häufigsten blühte der Huflattich jedoch zwischen dem 8. und 29. März. Im Mittel wies seine Blüte einen Vorsprung von vier Tagen auf, wobei die tiefer gelegenen Stationen einen grösseren Vorsprung hatten als jene in den Bergen, wo der Huflattich erst Ende März und Anfang April blühte.

Das Buschwindröschen blühte ab Anfang März. Im Mittel blühte es am 27. März, fünf Tage früher als normal. Ab Mitte März wurde mit dem Kälteeinbruch die Entwicklung der Vegetation ein erstes Mal gebremst.

Die ersten Kirschbäume blühten Ende März und Anfang April vor der nächsten Kältewelle. Während den etwas milderen Tagen vom 9.–11. April und ab dem 20. April wurden weitere blühende Kirschbäume beobachtet. Der Vorsprung gegenüber der Vergleichsperiode ging dabei auf wenige Tage zurück. Die tiefen Nachttemperaturen führten bei vielen Kirschbäumen zu Frostschäden, denn offene Kirschenblüten ertragen höchstens Temperaturen von rund -2 °C. Je tiefer die Temperaturen und je länger die Frostwirkung anhält, umso mehr Blüten und Fruchtknoten sterben ab. Im Mittel blühten die Kirschbäume am 16. April, die Birnbäume am 22. April und die Apfelbäume am 30. April, meist zu einem normalen Zeitpunkt mit 1–2 Tagen Vorsprung auf das Mittel.

Gleichzeitig blühte der Löwenzahn und das Wiesenschaumkraut mit den ersten Beobachtungen ab Ende März. Bei beiden sieht man sehr schön, wie sich die Entwicklung der Blüten aufgrund der tiefen Temperaturen im April mit zunehmender Höhe immer mehr verspätete. Der Löwenzahn blühte unterhalb von 600 m im Mittel am 9. April mit einem Vorsprung von sechs Tagen, zwischen 600 und 1000 m blühte er am 27. April mit einer Verspätung von einem Tag und oberhalb von 1000 m blühte er am 16. Mai mit einer Verspätung von drei Tagen.

Die Blattentfaltung und das Grünwerden der Wälder ging in diesem Jahr langsamer vonstatten als im letzten Jahr. Die Lärchen trieben ihre Nadeln ab Ende März. Bei Birken und Vogelbeeren erstreckten sich die Beobachtungen aus tiefen Lagen über den ganzen Monat April. Im selben Zeitraum entfaltete die Rosskastanie ihre Blätter. Ab Mitte April wurden erste Winter- und Sommerlinden grün und in der letzten Aprildekade entfalteten die Buchen im Flachland ihre Blätter. Die Anzahl in der Klasse «früh» eingeordneten Beobachtungen ging immer weiter zurück und es wurden vermehrt späte und sehr späte Termine notiert. Der Nadelaustrieb der Lärche war um zwei Tage verspätet, die Blattentfaltung der Laubbäume um 3–9 Tage. Mit einem Rückstand von sieben Tagen gemittelt über alle Stationen war es die späteste Blattentfaltung der Buche seit 1991. Dabei wurde gleich wie beim Löwenzahn die Verspätung mit zunehmender Höhe immer grösser.

Der Nadelaustrieb der Fichte begann Ende April. Unterhalb von 1000 m fand der Nadelaustrieb im Mai statt und war rund vier Tage verspätet. Die tiefen Temperaturen im Mai wirkten

sich besonders auf die Bäume in Lagen oberhalb von 1000 m aus, wo die Fichten in der zweiten Maihälfte und im Juni mit einer mittleren Verspätung von zehn Tagen austrieben.

Die Margeriten blühten zu einem mittleren Zeitpunkt von Anfang Mai bis ungefähr Mitte Juni. Interessanterweise waren die Margeriten nicht stark von den tiefen April- und Maitemperaturen beeinflusst.

Sommer

Ende Mai wurde das Wetter endlich trocken und wieder wärmer. Die meisten Bauern konnten erst ab dann das Heu ernten. Vom Tiefland bis auf über 1000 m wurde geheut. In Gebieten unter 600 m betrug der Rückstand auf den mittleren Termin der Vergleichsperiode 1991–2020 dabei elf Tage. Auch oberhalb von 1000 m wurde das sonnige und warme Wetter Mitte Juni und an Einzeltagen gegen Ende Juni und im Juli zum Heuen genutzt. In dieser Höhe war die Heuernte nur noch drei Tage verspätet.

Der Schwarze Holunder begann im Tessin ab dem 10. Mai und auf der Alpennordseite ab dem 20. Mai zu blühen. Hauptsächlich fand seine Blütezeit in diesem Jahr jedoch im Juni statt. Dank den hohen Temperaturen im Juni war die Blüte nur um 5 Tage verspätet und fand nicht ganz so spät statt wie zum Beispiel im Jahr 2013 oder in den meisten Jahren vor dem Jahr 1990.

Blühende Sommerlinden wurden vermehrt ab Mitte Juni beobachtet. Ihre Blüte fand vier Tage später statt als im Mittel. Mit drei Tagen Verspätung blühten die Weinreben, im Tessin ab der letzten Maidekade und auf der Alpennordseite hauptsächlich im Juni. Die Beeren des Roten Holunders reiften hauptsächlich im Juli meist zu einem normalen Zeitpunkt, drei Tagen später als im Mittel. Die Fruchtreife des Schwarzen Holunders fand hauptsächlich von Mitte August bis Mitte September statt, ziemlich genau zu einem mittleren Termin.

Herbst

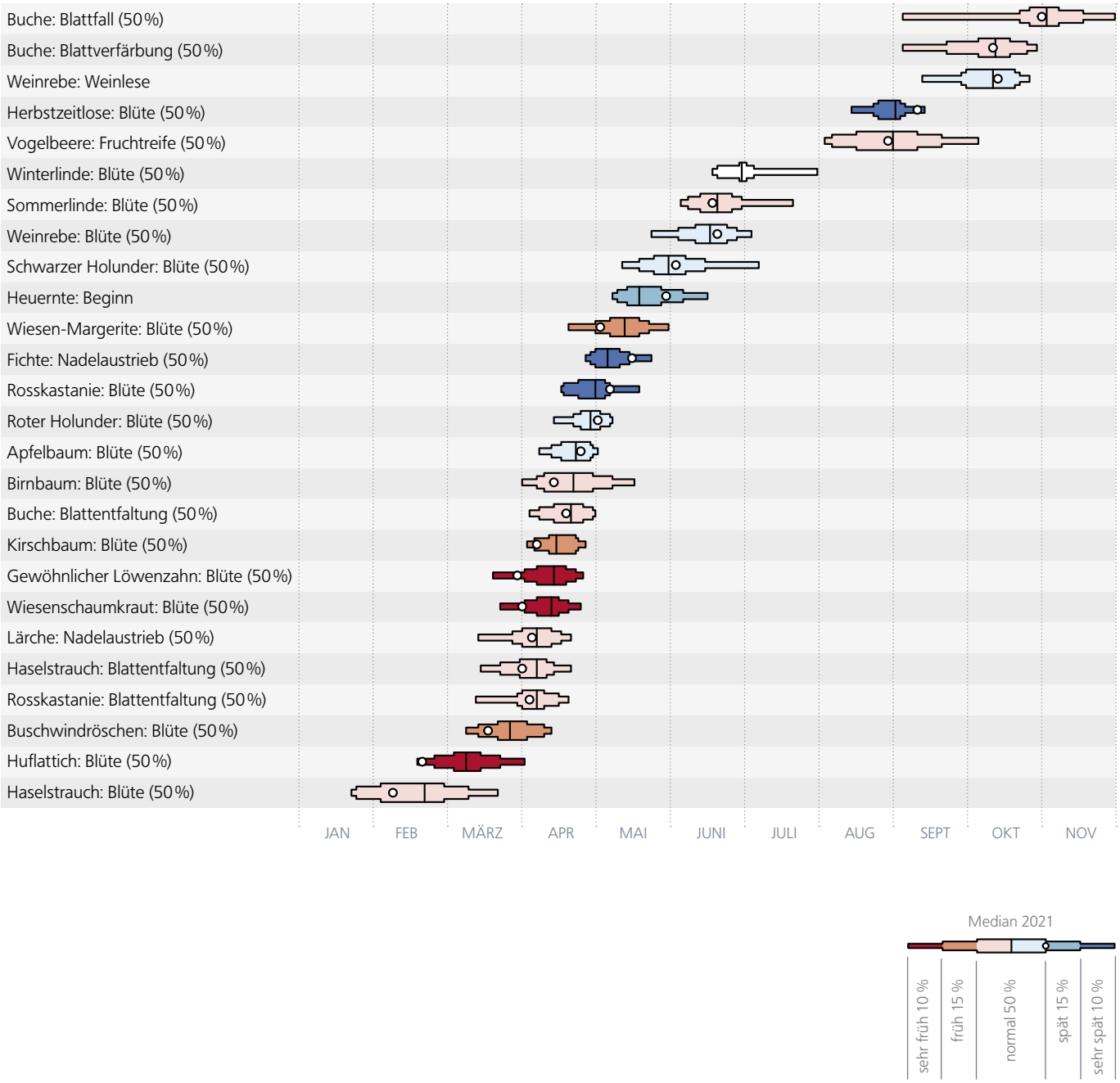
Die meisten blühenden Herbstzeitlosen konnten von Ende August bis etwa 24. September beobachtet werden, fünf Tage später als normal. Reife Edelkastanien konnten im Tessin vor allem in der ersten Oktoberhälfte gesammelt werden, wenige Tage später als im Mittel. Beobachtungen zur Weinlese gab es von Mitte September bis Mitte Oktober, wobei die meisten Daten als «normal» klassiert werden konnten.

Ab etwa Mitte September begann die Blattverfärbung der ersten Vogelbeeren, Birken und Rosskastanien, während Buchen, Bergahorne und Linden sich ab Anfang Oktober langsam zu verfärben begannen. Die Blattverfärbung intensivierte sich ab etwa dem 10. Oktober auf allen Höhenstufen vom Flachland bis in die Berge und die Wälder wurden sehr schnell bunt. Die Blattverfärbung der Buchen war über alle Höhenlagen gemittelt um fünf Tage verspätet verglichen mit dem Mittel. Dabei war die Blattverfärbung an Standorten oberhalb von 800 m stärker verspätet, im Mittel um acht Tage, während sie unterhalb von 800 m nur rund vier Tage später auftrat. Im Mittel war die Blattverfärbung der Laubbäume um 4–6 Tage verspätet, mit Ausnahme der Birken, die nur zwei Tage Verspätung aufwiesen. Die Bäume profitierten von den hohen Temperaturen im September. Sie verfärbten ihre Blätter deshalb später als normal und es gab nur ganz wenige Beobachtungen in der Klasse «früh» oder «sehr früh». Oberhalb von 1000 m verfärbten sich die Lärchen von der zweiten Oktoberwoche bis Anfang November, mit einem Schwerpunkt um Mitte Oktober. An den tiefer gelegen Stationen verfärbten sie sich von etwa Mitte Oktober bis Mitte November, mit einem Schwerpunkt ab den letzten Oktobertagen und ersten Novembertagen. Allgemein fand die Nadelverfärbung der Lärchen ziemlich genau zu einem normalen Zeitpunkt statt, wobei sie in den Bergen allerdings um einige Tage verspätet war.

Der Blattfall der Buchen begann ab Mitte Oktober und verstärkte sich ab Ende Oktober mit dem Wetterwechsel zu Niederschlägen und tieferen Temperaturen. Die Buchenblätter fielen zu einem normalen bis leicht verspäteten Zeitpunkt. Der Blattfall von Birken und Rosskastanien begann schon verbreitet in der letzten Oktoberdekade. So fielen schon einige Blätter beim Frontdurchgang mit starkem Wind am 21. Oktober. Der Blattfall beider Bäume konnte meist in die Klassen «normal» eingeordnet werden und fand bei der Birke zwei Tage früher statt als im Mittel und bei der Rosskastanie genau im Mittel. Die Lärchennadeln fielen oberhalb von 1000 m im Mittel am 15. November und unterhalb von 600 m am 24. November. Bei 36 % der Stationen konnte dieses Datum als «spät» oder «sehr spät», bei weiteren 44 % als «normal» eingeordnet werden.

Abbildung 2.15

Phänologischer Kalender 2021 von Rafz. Die Verteilung zeigt die Vergleichsperiode 1991–2020. Das Datum des aktuellen Jahrs wird als schwarzes Quadrat dargestellt und je nach zeitlicher Einordnung von sehr früh bis sehr spät wird die Vergleichsperiode eingefärbt. Fehlt die Beobachtung im Jahr 2021 oder liegt sie präzis beim Median, bleibt die Vergleichsperiode weiss.



Pollensaison

Das Pollenjahr 2021 wurde stark durch das kühle und zum Teil nasse Wetter im Frühling beeinflusst. Der Pollenflug der Bäume war sehr schwach. Die Pollensaison von Birken, Eichen und Buchen gehörte zu den schwächsten der Vergleichsperiode. Ebenfalls deutlich schwächer als normal war der Pollenflug der Esche, während die Hasel- und Erlenpollenmengen etwa im Mittel lagen. Die Gräserpollenkonzentrationen stiegen erst spät, gegen Ende Mai an. Im Juni wurde bei wärmerem Wetter jedoch hohe bis sehr hohe Konzentrationen erreicht und auch im Juli wurden während milderen, trockenen Phasen noch hohe Belastungen gemessen. Die Pollensaison 2021 wird im Folgenden mit dem 30-jährigen Mittel 1991–2020 verglichen.

Auf der Webseite von MeteoSchweiz zeigen Jahresgrafiken der 14 wichtigsten allergenen Arten die mittlere tägliche Pollenbelastung für die Stationen des Schweizer Pollenmessnetzes. Während der Pollensaison werden die Grafiken wöchentlich aktualisiert.

meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/pollensaison.html

Beginn der Pollensaison

Die Temperatur im Dezember und Januar bestimmt den Blühbeginn der Haselsträucher. Im Tessin waren beide Monate kühler als normal. Die Haselpollensaison begann deshalb im Tessin erst zwischen dem 24. und 29. Januar, 8–12 Tage später als im Mittel der 30-jährigen Vergleichsperiode 1991–2020. Auch die Erlenpollensaison begann im Tessin mit 10–13 Tagen Verspätung, erst am 8. Februar. Auf der Alpennordseite startete die Haselpollensaison nach dem winterlichen Januar an vielen Stationen am 3. Februar, fast genau zu einem mittleren Zeitpunkt. Die Erlenpollensaison begann auf der Alpennordseite zwischen dem 2. und 7. Februar fast gleichzeitig mit der Hasel, wenige Tage früher als im Mittel. Während diesen milden Tagen Anfang Februar wurden an vielen Stationen starke Belastungen von Hasel- und Erlenpollen erreicht. Hohe bis sehr hohe Konzentrationen wurden vor allem in der zweiten, sehr milden Februarhälfte gemessen.

Die Eschenpollensaison begann im Tessin am 4. März, 10–11 Tage früher als im Mittel. Damit war es das fünftfrüheste Datum seit Beginn der Pollenmessungen im Tessin. Auch in Genève und Lausanne wurden schon ab dem 10. März mässige Eschenpollenkonzentrationen gemessen, ebenfalls 12–14 Tage früher als im Mittel. Mit grosser Wahrscheinlichkeit wurden diese Pollen in der Zeit vom 10.–13. März durch starke Südwestwinde aus Frankreich an den Genfersee gebracht und stammten nicht von lokal blühenden Eschen. Auch im ganzen Mittelland und in La Chaux-de-Fonds konnten in dieser Phase Eschenpollen vor der lokalen Blüte nachgewiesen werden. Nach dem Kälteeinbruch mit Schnee ab Mitte März startete die Eschenpollensaison auf der Alpennordseite vom 24.–26. März bei sonnigem und wärmerem Wetter. Dieser Zeitpunkt liegt ungefähr im Mittel der Vergleichsperiode.

Die Birkenpollensaison begann in Visp am 25. März, im Tessin am 28. März und auf der Alpennordseite zwischen dem 30. März und dem 2. April. Alle diese Daten liegen um den mittleren Starttermin der Birkenpollensaison, im Tessin 1–2 Tage später, auf der Alpennordseite 2–4 Tage früher.

Die ersten Gräserpollen wurden Im Tessin schon im März gemessen, etwa drei Wochen früher als im Mittel. Der kühle April bremste die Weiterentwicklung der Gräser, so dass im Tessin mässige Konzentrationen ab dem 20. April erreicht wurden, ungefähr zu einem mittleren Zeitpunkt. Auf der Alpennordseite waren die ersten Gräserpollen ebenfalls im April in der Luft. Der Anstieg auf mässige Konzentrationen fand an den meisten Stationen zwischen dem 4. und dem 24. Mai statt. Die Daten Anfang Mai entsprechen etwa dem Mittel, während in Basel, Bern und Visp dieser Anstieg erst nach dem 20. Mai stattfand und um 9–17 Tage verspätet war. Während dem kalten und nassen Mai, gab es auf der Alpennordseite nur einzelne Tage mit starkem Gräserpollenflug. An den meisten Stationen stiegen die Gräserpollenkonzentrationen erst gegen Ende Mai auf starke Werte an. Der Anstieg war dabei im Schnitt um eine Woche verspätet. In Basel, Lausanne, Münsterlingen und Neuchâtel war es der späteste oder zweitspäteste Anstieg der Vergleichsperiode.

Die Beifusspollensaison begann in Visp am 18. Juli, ein Tag später als im Mittel. Mässige Konzentrationen von Ambrosiapollen traten erst Ende August und Anfang September auf, 2–3 Wochen später als im Mittel. Diese Verspätung war dem kühlen und regenreichen Monat Juli und dem kühlen August geschuldet.

Dauer der Pollensaison

Die Pollenkonzentrationen von Hasel und Erlen gingen an den meisten Stationen schon Ende Februar zurück. Bis Mitte März wurden höchstens noch mässige Konzentrationen erreicht. Das ist um 1–2 Wochen früher als im Mittel. An vielen Stationen war deshalb die Hasel- und Erlenpollen-

saison kürzer als im Mittel. Die Periode mit starkem Eschenpollenflug war auf der Alpennordseite besonders kurz. Die Konzentrationen gingen in der ganzen Schweiz schon zwischen dem 1. und 5. April mit dem Einsetzen einer Kältewelle zurück, und somit war die Eschenpollensaison fast zu Ende.

Die Birken erreichten nach der ersten Blühphase Ende März, Anfang April während der milderen letzten Aprildekade nochmals starke Pollenkonzentrationen. Damit lag die gesamte Dauer der Birkenpollensaison etwa im Mittel.

Die Zeit mit starkem Gräserpollenflug dauerte in diesem Jahr an den meisten Stationen der Alpennordseite bis zum 18.–23. Juli. Das ist je nach Station bis zehn Tage später als im Mittel. Nach vielen Niederschlägen im Juli war das eine trockene Periode mit sommerlichen Temperaturen, welche die Gräser nochmals blühen liess. Im Tessin und in Visp war die Zeit mit starkem Gräserpollenflug Mitte Juni vorbei, im Tessin etwa zu einem mittleren Zeitpunkt, in Visp jedoch rund zwei Wochen früher als im Mittel.

Die Belastungsdauer der Beifusspollen entsprach etwa dem Mittel, während Ambrosia wegen dem späten Beginn nur über eine kurze Zeit einen stärkeren Pollenflug aufwies. Am 14. September wurden das letzte Mal mässige Konzentrationen gemessen.

Intensität der Pollensaison

Die Pollenbelastung war während der Blüte der Bäume deutlich geringer als in andere Jahren. Eine besonders schwache Pollensaison hatten Birken, Buchen und Eichen und auch die Eschenpollensaison war schwächer als normal. Ein wichtiger Grund dafür ist der Blührhythmus der Bäume. Diese Arten bildeten nur wenige Blütenknospen aus, nachdem sie im Vorjahr sehr stark geblüht hatten. Der zweite wichtige Faktor war das kalte Wetter im April und Mai. Während diesen kalten Tagen waren die Pollenkonzentrationen tief.

Auf der Alpennordseite wurden nur 6–14 Tage mit starkem Birkenpollenflug gemessen, während es im Mittel 13–19 Tage sind. In Neuchâtel und Buchs war es die schwächste Birkenpollensaison seit Messbeginn (1982, bzw. 1984), in Zürich und Basel war es die schwächste der Vergleichsperiode. In Münsterlingen, Visp und Locarno war der Birkenpollenflug nicht ganz so schwach und das jährliche Pollenintegral erreicht zwischen 57 % und 75 % des Mittels.

Bei der Esche wurden in Locarno zwölf Tage mit starkem Pollenflug gemessen und in Genève neun Tage. An allen anderen Stationen waren es zwischen drei und sieben Tagen mit starker Pollenbelastung. Das sind 3–8 Tage weniger als im Mittel. Die Buchen blühten in diesem Jahr fast überhaupt nicht und es konnten nur einzelne Pollenkörner gemessen werden. Die Eichenpollensaison war die schwächste oder zweitschwächste der Vergleichsperiode und es gab kaum Tage mit starkem Pollenflug. Die Hagebuchen, die gleichzeitig mit den Birken blühen, erreichten jedoch eine etwa mittlere Stärke der Pollensaison. Der Pollenflug der Hasel profitierte von den hohen Temperaturen im Februar. In der Deutschschweiz war er stärker als im Mittel und es konnten 8–16 Tage mit starkem Pollenflug gemessen werden. In der Westschweiz entsprach er etwa dem Mittel und es wurden 4–7 Tage mit starken Pollenflug gezählt. Besonders stark war der Haselpollenflug in Locarno, wo 23 Tage mit starkem Pollenflug gemessen wurden.

Die vor allem in der zweiten Februarhälfte blühendere Erlen erreichten etwa mittlere Konzentrationen, und wiesen auf der Alpennordseite 4–15 Tage und im Tessin mit 15–20 Tage mit starkem Pollenflug auf. Der Gräserpollenflug war im Juni während vielen Tagen sehr stark. Die Konzentrationen stiegen so stark an, weil die Wiesen erst allmählich in dieser Zeit gemäht wurden, ein Heuen war vorher nicht möglich. Bezüglich der Stärke der Gräserpollensaison war die Schweiz zweigeteilt: in der Westschweiz, in Basel und Visp war sie schwächer als normal (18–26 Tage mit starkem Gräserpollenflug), während sie in der Deutschschweiz und in Locarno stärker als im Mittel war (25–55 Tage mit starkem Gräserpollenflug). In Davos und Locarno war die diesjährige Gräserpollensaison die zweit- und viertstärkste seit Messbeginn an diesen Stationen. In Davos wurden 19 Tage mit starkem Pollenflug gemessen (13 Tage mehr als im Mittel, Messbeginn 1983) und in Locarno 26 Tage (15 Tage mehr als im Mittel, Messbeginn 1989.

Die Belastung durch Beifusspollen war in Visp von Mitte Juli bis Anfang September an 36 Tagen stark und damit intensiver als im Mittel, während auf der Alpennordseite und im Tessin die Beifusspollen wie meistens nur schwache bis mässige Konzentrationen erreichten. Die Ambrosiapollensaison war an allen Stationen schwächer als im Mittel. In der Deutschschweiz wurde kein oder höchstens ein Tag mit mässigem Pollenflug gemessen. Starker Pollenflug gab es nur in der Westschweiz und im Tessin. In Genève waren es drei Tage mit starkem Pollenflug, in Lausanne und Neuchâtel ein Tag. In Locarno und Lugano 6–7 Tage mit starkem Pollenflug

registriert und in Mezzana, einer Zusatzstation für Ambrosiapollen im Südtessin, 15 Tage. Für Mezzana und Locarno war die Belastung höher als im Mittel seit 2013. Das ist der Zeitpunkt, seit dem der Ambrosiablattkäfer in Norditalien und im Tessin den Pflanzen grossen Schaden zufügt und die Pollenmenge deshalb stark zurückging. Die Belastung liegt aber noch deutlich unter den Werten vor 2013, also vor der Reduktion des Pollenflugs durch den Käfer, als in Mezzana im Mittel 24 Tage mit starkem Pollenflug gemessen wurden.

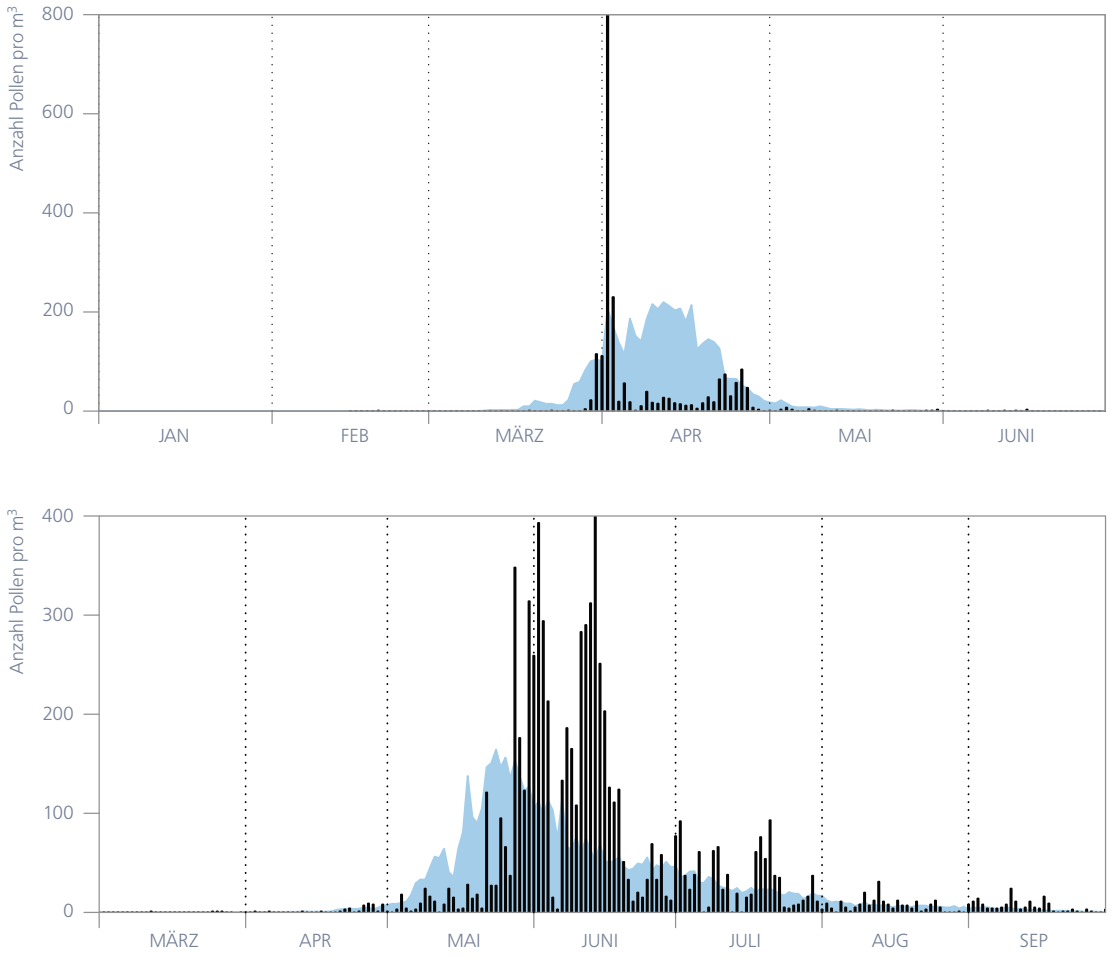


Abbildung 2.16
Verlauf der Birkenpollensaison 2021 in Genève (oben) und der Gräserpollensaison 2021 in Münsterlingen (unten) im Vergleich zum 30-jährigen Mittel von 1991–2020 (blaue Kurve). Die Birkenpollensaison gehörte in Genève zu schwächsten der Vergleichsperiode. In Münsterlingen nahmen die Gräserpollenkonzentrationen erst gegen Ende Mai zu, neun Tage später als im Mittel. Die Gräserpollen erreichten bis zum 21. Juli hohe Werte. Die Achsen der Pollenkonzentration wurden in der Höhe auf 800 bzw. 400 Pollen/m³ beschränkt, damit auch die für Allergien wichtigen tiefen Werte sichtbar sind.

3| Besonderheiten 2021

3.1
Grosse Schneefälle im Januar

Eine anhaltende kräftige Nordwestströmung brachte auf der Alpennordseite ab dem 12. Januar 2021 eine siebentägige Schneefallperiode. Vom 12. auf den 13. gab es im Flachland vielerorts zwischen 2 und 10 cm Neuschnee. In den tiefen Lagen des Wallis waren es 20–30 cm und im Churer Rheintal um 20 cm. Am 13. schneite es nur in höheren Lagen und in den Tälern der Ostschweiz, besonders kräftig im Churer Rheintal. In den tiefen Lagen der Alpennordseite fiel meist Regen.

Luftmassengrenze bringt viel Schnee im Osten

Mit zusätzlicher Kaltluft aus Nordosten bildete sich auf den 14. Januar entlang der Linie Basel-Luzern eine ausgeprägte Luftmassengrenze. Vom 14. auf den 15. fielen in der Nordostschweiz in tiefen Lagen 30–45 cm, in höheren Lagen 50–60 cm Neuschnee. Einen derart kräftigen Schneefall gab es hier letztmals vom 4. auf den 5. März 2006. Betroffen waren damals hauptsächlich die Tieflagen der Nordostschweiz, mit etwas grösseren Neuschneemengen als im aktuellen Fall. In den Bergen fielen damals keine besonderen Neuschneemengen.

Regen im Westen

In der milderen Luft über der Westschweiz lag die Schneefallgrenze am 14. und 15. Januar höher und es regnete in tieferen Lagen. Am Morgen des 16. Januar registrierte dann auch die Region Bern etwas Neuschnee, und auf den 17. schneite es fast überall einige Zentimeter. Auf den 18. Januar fiel nur noch lokal bis in tiefe Lagen etwas Schnee. Am östlichen Alpennordhang gab es nochmals 20–40 cm.

Wo gab es wieviel Schnee?

Vom Morgen des 12. bis am Morgen des 18. Januar 2021 erreichte die Neuschneesumme in den tiefen Lagen der Ostschweiz verbreitet 40–60 cm. Im zentralen Mittelland waren es 10–40 cm, gegen Westen abnehmend. Richtung Genfersee blieben die Mengen in tiefen Lagen meist unter 10 cm, lokal gab es gar keinen messbaren Neuschnee. In den tiefen Lagen der östlichen Alpentäler erreichte die Neuschneesumme 70–100 cm, in den tiefen Lagen des Wallis 30–40 cm. Berglagen erhielten im Osten gebietsweise 140–170 cm, im Westen verbreitet 60–100 cm.

Viel Neuschnee innerhalb von zwei bis drei Tagen

Die heftigsten Schneefälle erstreckten sich im östlichen Mittelland über zwei Tage. Am leicht erhöhten Messstandort Zürich-Fluntern war es mit 40 cm die fünfthöchste 2-Tages Neuschneesumme in der Messreihe seit 1931. Auf dem Flughafen Zürich wurden 37 cm gemessen, Rang 2 in der Messreihe seit 1958. Hallau am Nordrand der Schweiz erhielt eine 2-Tages Neuschneesumme von 28 cm, Rang 6 in der Messreihe seit 1964. Rang 1 belegt an allen drei Standorten das Ereignis vom 4./5. März 2006.

In den Ostalpen fielen die heftigsten Schneefälle über drei Tage. Besonders auffallend war der Messstandort Chur mit 82 cm, der höchsten 3-Tages Neuschneesumme in der weit über 100-jährigen Messreihe. Seit Messbeginn 1888 ist es erst das zweite 3-Tages Ereignis im Bereich von 80 cm.

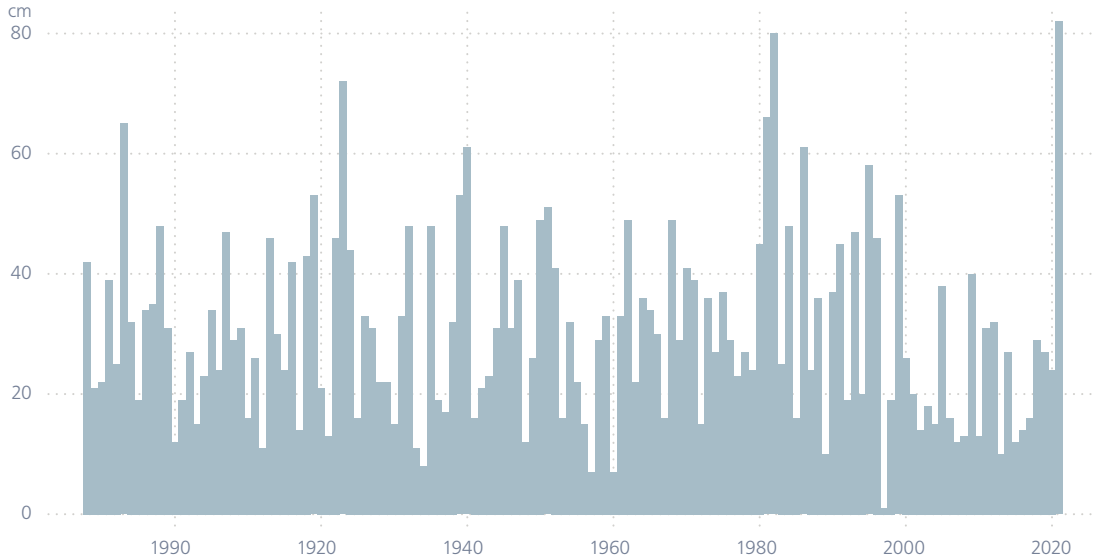


Abbildung 3.1
Jährlich höchste 3-Tages Neuschneesumme am Messstandort Chur 1888–2021.

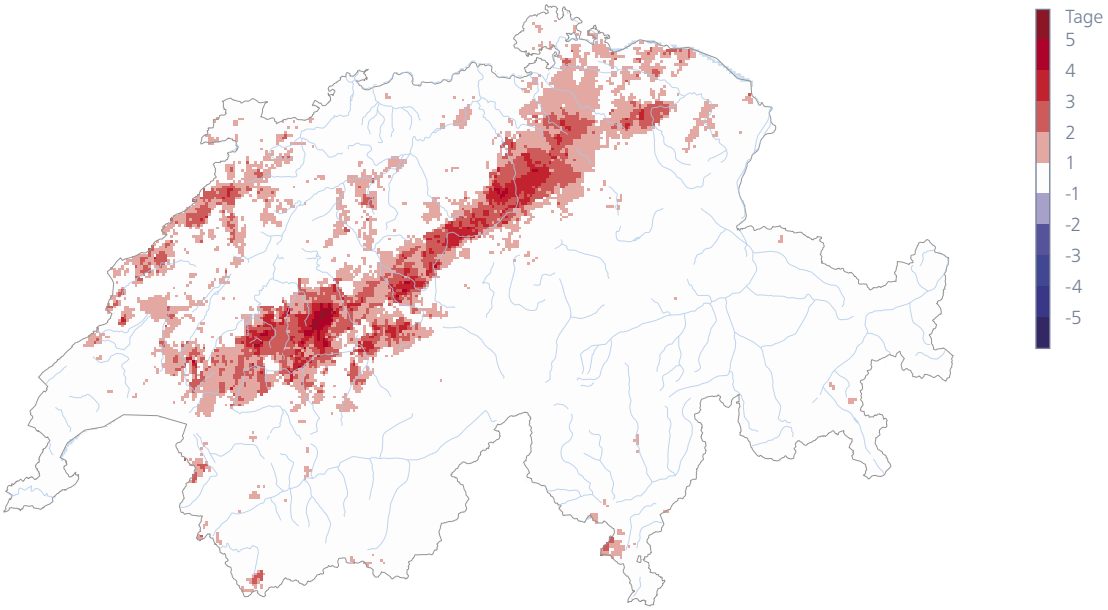
3.2
Hagelmonat Juni

Es hagelte gewaltig im überdurchschnittlich warmen und gewittrigen Monat Juni 2021. Während der häufigen Hagelschläge flogen zum Teil ballgrosse Hagelkörner vom Himmel. Über mehrere Tage waren weiträumige Warnungen aktiv. Es gab zerschlagene Glashäuser und Dachziegel, zerstörte Ernten und Gärten, und sogar von verletzten Personen wurde berichtet, die von Hagelkörnern getroffen wurden. So viel Hagel wie im Juni 2021 wurde in der 20-jährigen Messreihe nur selten verzeichnet. Die Ausdehnung der betroffenen Fläche wie auch die Hagelkorngrössen waren aussergewöhnlich.

Viele Hageltage

Im Juni gibt es in den hagelreichen Regionen durchschnittlich alle 1–2 Jahre mindestens einen Hageltag, in den übrigen Regionen seltener. Das mittlere Maximum an Hageltagen am gleichen Ort beträgt ca. 3,5 Tage. Der Vergleich mit der langjährigen Klimatologie zeigt, dass die Hagelzüge auf der Alpennordseite im Juni 2021 immer wieder die gleichen Regionen überzogen. Deshalb wurde an einigen Orten sogar an sechs Tagen Hagel verzeichnet. Spitzenreiter war das Gebiet zwischen Bern und Thun. In der ab 2002 verfügbaren Datenreihe wurden nur im Juni 2006 örtlich ebenso viele Hageltage verzeichnet.

Abbildung 3.2
Abweichung der Anzahl Hageltage im Juni 2021 vom langjährigen Mittel (2002-2021).



Betrachtet man die Schweiz als Ganzes, wurden im Juni 2021 insgesamt 13 Hageltage gezählt. Nur vier Monate in der knapp 20-jährigen Messreihe kamen auf mehr Hageltage. Letztmals mehr Hageltage lieferte der Juni 2017 mit 14. Die höchste erfasste monatliche Anzahl Schweizer Hageltage lag bei 16. Sie stammt vom Juli 2006. Als Hageltage zählen Tage, an denen mindestens über eine Fläche von 100 km² eine Hagelwahrscheinlichkeit von 80 % erreicht wurde.

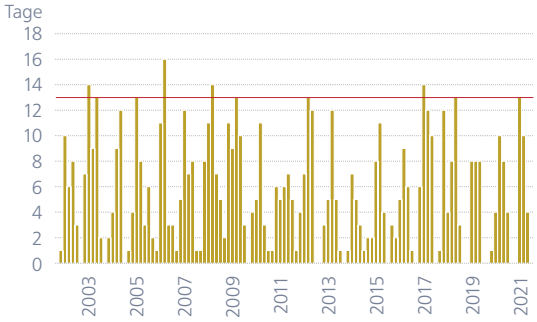


Abbildung 3.3
Monatliche Anzahl der Hageltage seit 2002. Im Juni 2021 waren es 13 Hageltage (rote Linie).

Aussergewöhnliches Ereignis

Beim massiven Hagelereignis vom 28. Juni 2021 umfasste das Gebiet mit Hagelvorkommen in der Schweiz eine Gesamtfläche von rund 9000 km². Es war flächenmässig das zweitgrösste Schweizer Hagelereignis in der ab 2002 verfügbaren Datenreihe. Beim grössten Ereignis vom 23. Juli 2009 war eine Fläche von 10'000 km² betroffen. Beim drittgrössten Ereignis vom 1. Juli 2019 erreichte die Hagelfläche 8000 km².

Vielerorts wurden Korngrössen deutlich über 2 cm, gebietsweise sogar über 6–7 cm gemeldet. Lokal sind solche Korngrössen ein Extremereignis, das selbst in den hagelreichen Regionen an einem Ort statistisch seltener als alle 50 Jahre überschritten wird.

Die Fläche, über welcher am 28. Juni 2021 maximale Körner von 6 cm und mehr möglich waren, lag bei knapp 1100 km². Nur im Rekordjahr 2009 zeigt die Datenreihe ab 2002 ein Ereignis, an dem eine ähnlich ausgedehnte Fläche von Hagelkörnern dieser Grösse betroffen war.

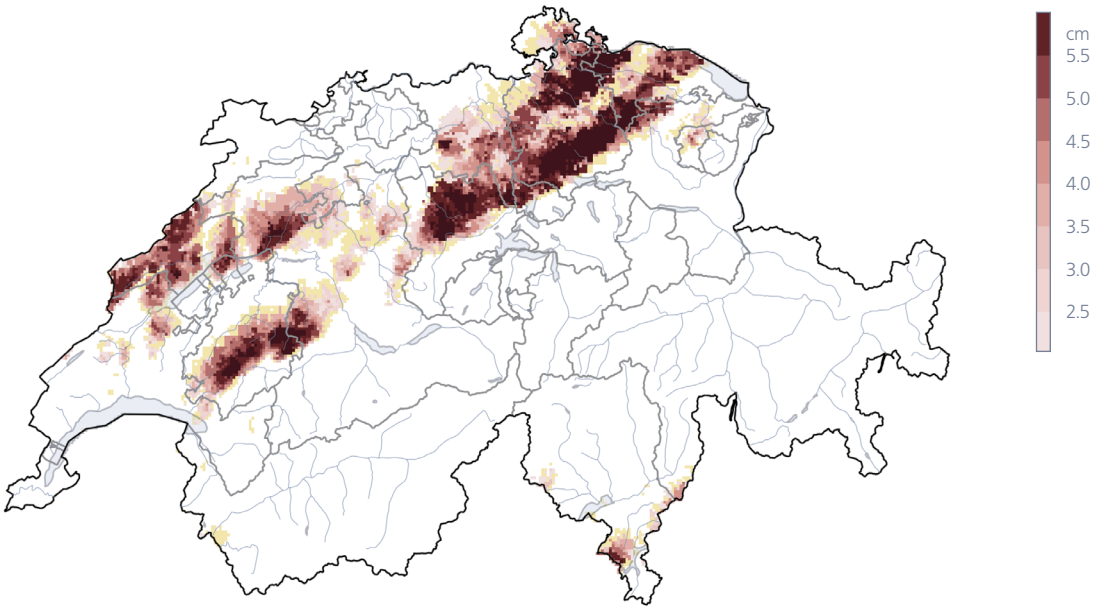


Abbildung 3.4
Die Hagelschneise am 28. Juni 2021. Angegeben sind die maximal erwarteten Hagelkorngrössen. Hagel kleiner als 2 cm ist in oranger Farbe angegeben.

3.3
Hochwasser im Juli

Nach den zwei regenreichen Monaten Mai und Juni fielen in der ersten Julihälfte abermals grosse Regenmengen. Ausser in Mittel- und Südbünden überstiegen die Niederschlagssummen im Juli schweizweit 180 % der Norm 1991–2020. An zahlreichen Stationen wurden langjährige Niederschlagsrekorde deutlich übertroffen. Im landesweiten Mittel war es mit 195 % der Norm 1991–2020 der nasseste Juli seit Messbeginn 1864. Der viele Regen führte zum Monatsbeginn auf der Alpensüdseite und gegen Monatsmitte auf der Alpennordseite zu Hochwasser und Überschwemmungen.

Kräftige Gewitterregen im Süden

Am 7. und vor allem am 8. Juli brachten kräftige Gewitter auf der Alpensüdseite grosse Regenmengen und auch verheerenden Hagel. Die grössten Niederschlagsmengen fielen zwischen dem mittleren Vallemaggia, der oberen Verzasca und der mittleren Leventina. Zum Beispiel wurden an der Station Faido innerhalb 24 Stunden 126 mm gemessen. Das viele Wasser überflutete die Gotthard-Autobahn und lokal wälzten sich vom Wasser mitgerissene Schlamm- und Geröllmassen durch Siedlungsgebiete.

Anhaltend grosse Regenmengen im Norden

In der ersten Julihälfte haben die Niederschlagssummen in den Einzugsgebieten der grossen Flüsse der Alpennordseite hohe Werte erreicht. Die grossen Niederschlagsmengen fielen ab dem 6. Juli in zwei Schüben innerhalb von zehn Tagen. Im ganzen Juli erhielten Andermatt im Reussgebiet und Sedrun im Rheingebiet mehr als das Dreifache, das Grimsel Hospiz im Aaregebiet mehr als das Doppelte der Julinorm 1991–2020. In Braunwald im Linthgebiet war es das Eineinhalbfache der Julinorm.

Nasse Vorgeschichte

Die grossen Niederschlagssummen in kurzer Zeit fielen auf ein bereits gefülltes hydrologisches System. Die Monate Mai und Juni mit anhaltender Niederschlagstätigkeit brachten in weiten Gebieten der Schweiz zum Teil deutlich überdurchschnittliche Niederschlagssummen. Zusätzlich gab in den Hochalpen im sehr milden Juni eine kräftige Schneeschmelze. Mit den zusätzlichen grossen Juli-Niederschlagsmengen kam es schliesslich an mehreren Seen und Flüssen auf der Alpennordseite zu Hochwasser und Überflutungen.

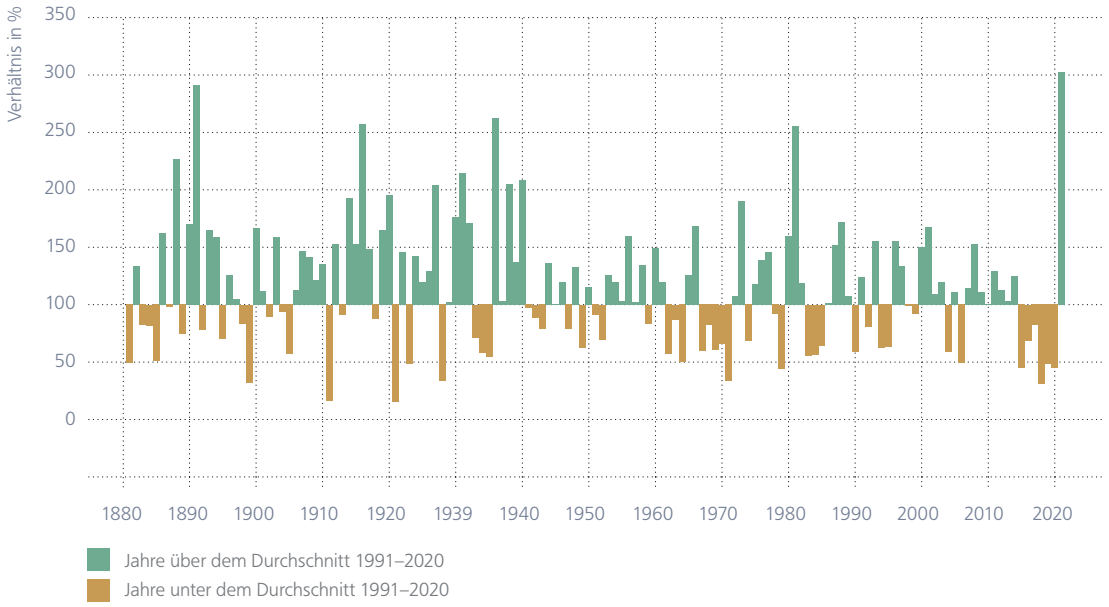


Abbildung 3.5
Langjähriger Verlauf der Juli-Niederschlagssumme in Andermatt. Dargestellt ist die Abweichung zur Norm 1991–2020 (grün = positive Abweichungen, braun = negative Abweichungen).

4| Globales Klima und Wetterereignisse

Das Jahr 2021 weist eine Abweichung von +0,8 °C zur Norm 1961–1990 auf. Die Jahre 2015–2021 sind die sieben wärmsten Jahre seit Messbeginn 1850, wobei das Jahr 2021 den 7. Rang belegt. Dies trotz der Tatsache, dass seit 2020 im äquatorialen Pazifik La-Niña-Bedingungen herrschen. Die folgende Zusammenstellung basiert hauptsächlich auf dem jährlichen Klimastatus-Bericht der Welt Meteorologie Organisation (WMO) [9] und dem Global Climate Report der National Oceanic and Atmospheric Association (NOAA) [10].

4.1 Grosse Wärme über Nordamerika und Asien

Gemäss dem HadCRUT5-Datensatz des UK Met Office Hadley Centre und der University of East Anglia lag die globale Durchschnittstemperatur im Jahr 2021 0,8 °C über dem Mittel der Referenzperiode 1961–1990. Gegenüber der Normperiode 1991–2020 betrug der Überschuss 0,2 °C. Damit belegt 2021 den 7. Rang seit Messbeginn 1850. Die sieben aufeinanderfolgenden Jahre von 2015–2021 sind auch die sieben wärmsten je gemessenen Jahre. Spitzenreiter bleibt vorerst das Jahr 2016, gefolgt von 2020 und 2019. Die fünf kältesten Jahre im globalen Durchschnitt wurden alle vor 1920 registriert.

Vor allem auf der Nordhemisphäre war 2021 sehr warm (Rang 6, +1,1 °C zur Norm 1961–1990). Auf der südlichen Hälfte des Globus erreichte die Jahresdurchschnittstemperatur von 2021 Rang 9 und +0,5 °C zur Norm 1961–1990. Besonders starke Überschreitungen der Normtemperatur von 1,5 °C und mehr wurden über Nordamerika und Grönland, sowie von Nordafrika über die arabische Halbinsel und Zentralasien bis in den Nordosten Chinas und Russlands verzeichnet. Ebenfalls über dem Durchschnitt lag das Jahr 2021 in Europa, in Brasilien, Uruguay und Paraguay und im Nordosten Australiens. In der Antarktis, in Teilen Chiles und Argentiniens und im Süden Australiens blieben die Jahrestemperaturen 2021 leicht unter oder im Bereich der Norm 1961–1990.

Die globale Durchschnittstemperatur liegt bei rund 15 °C. Das übergeordnete Muster in der langjährigen globalen Temperaturentwicklung mit der Häufung sehr warmer Jahre in jüngster Zeit findet sich auch in der Temperaturreihe der Schweiz (Abbildung 5.1).

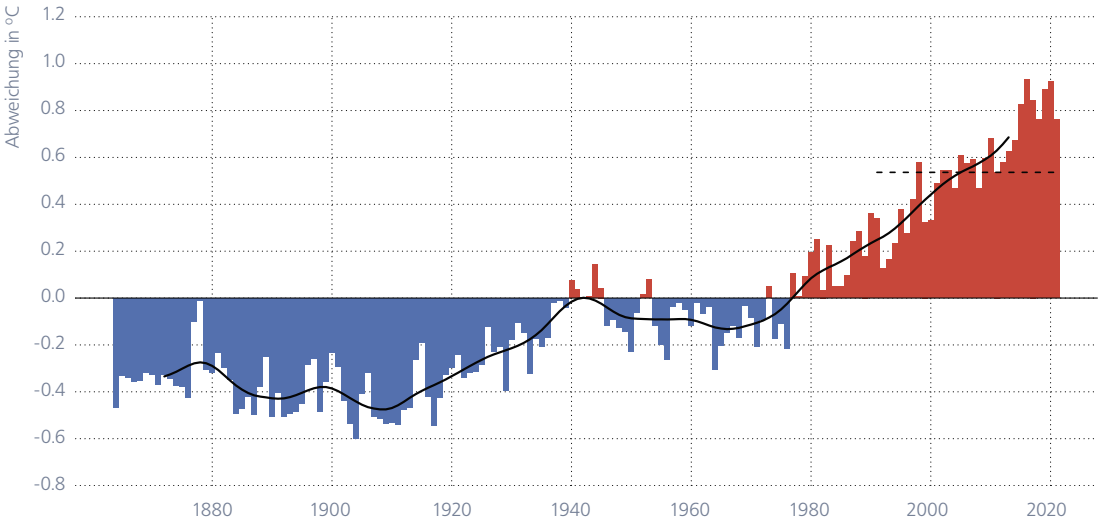


Abbildung 4.1
Langjähriger Verlauf der globalen Mitteltemperatur (Land- und Wasserflächen). Dargestellt ist die jährliche Abweichung der Temperatur von der Norm 1961–1990 (rot = positive Abweichungen, blau = negative Abweichungen). Die schwarze Kurve zeigt das 20-jährige, gewichtete Mittel. Die gestrichelte Linie zeigt die Norm 1991–2020.

Datensatz: UK Met Office Hadley Centre und University of East Anglia Climate Research Unit HadCRUT.5.0.1.0, [11]

4.2
El Niño und La Niña

Seit Beginn des Jahres 2020 dominiert La Niña das Geschehen im äquatorialen Pazifik. Im Jahr 2021 lagen die MEI-Werte sogar noch niedriger als im Vorjahr. Dies äussert sich in einer vergleichsweise niedrigen Temperatur des Oberflächenwassers und in der untersten Atmosphäre zwischen der Westküste Südamerikas und Ozeanien. El Niño und La Niña wechseln sich mit einer durchschnittlichen Periodizität von ungefähr 4–7 Jahren ab. El Niño, bzw. die El Niño Southern Oscillation (ENSO), ist bei starker Ausprägung einer der Hauptfaktoren, welcher die jährlichen Schwankungen der globalen Temperatur verursacht. Dabei sind Jahre mit El-Niño-Bedingungen global oft wärmer, Jahre mit La Niña tendenziell eher kühl.

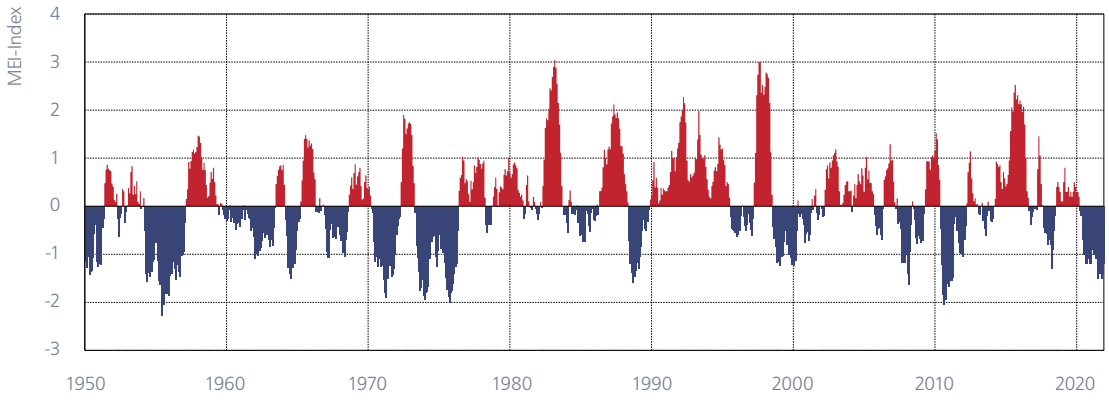


Abbildung 4.2
Multivariater El Niño Southern Oscillation Index (MEI) 1950–2021. Rot sind die Indexwerte der El Niño Phase (Warmphase), blau die Indexwerte der La Niña Phase (Kaltphase) dargestellt. Der MEI setzt sich zusammen aus dem Bodendruck, der Ost-West-, Nord- und Süd-Komponenten des Bodenwindes, der Meeresoberflächentemperatur, der Lufttemperatur auf Meereshöhe sowie des Bewölkungsgrades. Die Messungen erfolgen im äquatorialen Pazifik.

Die Daten sind verfügbar unter [12].

4.3
Besondere Ereignisse

Das Jahr 2021 gehörte in Europa zu den zehn wärmsten seit Messbeginn. Dies trotz eines insgesamt eher kühlen Frühlings. Regional gab es sogar neue Tiefstwerte für den Monat April. Am Messstandort Nova Vas in Südslowenien wurde ein neuer Aprilrekord von -20,4 °C gemessen. Im östlichsten Alpenland war dies der kälteste April seit über 100 Jahren. Die Sommermonate Juni und Juli gehörten dafür im Norden und Osten des Kontinents zu den wärmsten seit Beginn der Aufzeichnungen. Im Mittelmeerraum ereignete sich im August eine intensive Hitzewelle. An einigen Orten in Europa und Nordafrika wurden während dieser Hitzewelle Temperaturen über 45 °C registriert. In Syrakus (Sizilien) wurde am 11. August 2021 mit 48,8 °C ein neuer europaweiter Höchstwert gemessen, der allerdings bislang noch nicht bestätigt wurde. Momentan gilt weiterhin der Rekord von 48,0 °C in Athen aus dem Jahr 1977 als höchste je gemessene Temperatur auf europäischem Boden. An mehreren Orten in Südeuropa war der Juli 2021 trockener als der Durchschnitt. Es kam in der Folge zu gefährlichen Waldbränden in der Region bis zum Ende des Monats.

In Teilen Westeuropas ereigneten sich zwischen dem 13. und 15. Juli sintflutartige Regenfälle, die tödliche Überschwemmungen verursachten, wobei einige Orte in Westdeutschland und Belgien in nur drei Tagen mindestens das Doppelte der normalen monatlichen Niederschlagsmenge erhielten. Anfang Oktober fielen in Norditalien grosse Regenmengen, die Überschwemmungen und Erdrutsche verursachten. Berichten zufolge fielen in Ligurien 181 mm in einer Stunde und über 900 mm innerhalb von 24 Stunden. Ein Medicane, der einem tropischen Wirbelsturm im Mittelmeerraum ähnelt, brachte Ende des Monats sintflutartige Regenfälle über Teile von Algerien, Tunesien und Süditalien. Die heftigen Regenfälle führten zu schweren Überschwemmungen.

In Nordamerika gehörte das Jahr 2021 ebenfalls zu den zehn wärmsten. Auf einen fast rekordmässig warmen Januar folgte ein Kälteeinbruch im Zentrum der Vereinigten Staaten und Kanadas, der unter anderem zu Stromausfällen für beinahe zehn Millionen Leute führte. In der kanadischen Prärie kletterten die Tageshöchstwerte im Februar 2021 nicht über -34 °C. Hingegen grosse Hitze gab es in Nordamerika im Juni. Eine extreme Hitzewelle im Nordwesten der USA und in Kanadas Westen führte regional zu Tageshöchstwerten über 38 °C. Solche Temperaturen sind für diese Gegend sehr aussergewöhnlich. Die heissen Temperaturen und trockenen Bedingungen trugen zur Entstehung zahlreicher Waldbrände in der Region bei. In Lytton, British Columbia wurden am 29. Juni 2021 49,6 °C registriert, ein neuer kanadischer Landesrekord. Die Ortschaft brannte im Zuge der Feuer fast gänzlich nieder. Auch in Mexiko wurde 2021 ein neuer Allzeitrekord gemessen: 50,4 °C am nordwestlich gelegenen Messstandort Mexicali.

Im Atlantik gab es dieses Jahr mit 21 benannten Wirbelstürmen die dritthöchste Zahl seit Beginn der Aufzeichnungen. Am 19. Juni ging in Louisiana (USA) der Tropensturm Claudette an Land und brachte sintflutartige Regenfälle und Überschwemmungen mit sich. Claudette trug zu den überdurchschnittlich feuchten Bedingungen im Südosten der USA bei, insbesondere in Alabama und Mississippi, die den zweit- bzw. fünftnassesten Juni aller Zeiten erlebten. Hurrikan Ida hatte Kategorie 4, als er am 29. August 2021 in Louisiana auf Land traf. Bevor er die USA erreichte, richtete Ida auch in Kuba erhebliche Schäden an.

Südamerika erlebte eine sehr warme Phase zwischen August und Dezember 2021. Der September 2021 war gemäss Angaben der NOAA der wärmste September und auch der zweitwärmste aller Monate seit Beginn der Aufzeichnungen in Südamerika. Die damit einhergehende Trockenheit traf Zentral- und Südbrasilien besonders schwer und führte zu einer der schlimmsten Dürreperioden des Landes seit Jahrhunderten.

Auf dem afrikanischen Kontinent gehörte 2021 zu den drei wärmsten Jahren seit Beginn der Aufzeichnungen. Der tropische Wirbelsturm Eloise traf am 23. Januar 2021 über Mosambik auf einen Hurrikan der Kategorie 1. Der Sturm traf die Region mit starken Winden und heftigen Regenfällen, die Überschwemmungen auslösten.

Auch in Asien lag das Jahr 2021 temperaturmässig in den Top-10. Vor allem die Monate Mai, Juni und August waren im kontinentalen Durchschnitt sehr warm. Es gab auch Starkniederschlagsereignisse von Bedeutung. Nach Angaben der Weltorganisation für Meteorologie fielen z.B. in Zhengzhou in der chinesischen Provinz Henan am 20. Juli 2021 in nur sechs Stunden 382 mm – etwas mehr als die Hälfte des durchschnittlichen Jahresniederschlags von 641 mm – und in einem kurzen Zeitraum von vier Tagen mehr als 640 mm. Der ergiebige Regen führte zu gefährlichen Überschwemmungen.

Am 11. September 2021 traf der Taifun Chanthu, ein Wirbelsturm der Kategorie 5 auf der Saffir-Simpson-Skala, auf den Batanes-Inseln im Norden der Philippinen auf. Chanthu zerstörte die Infrastrukturen auf den Batanes-Inseln und stürzte Masten und Bäume um, was zu Stromausfällen führte. Chanthu traf auch Taiwan mit sintflutartigen Regenfällen und starken Sturmfluten von bis zu 7 m. Der Zyklon Seroja überquerte am 11. April die Küste Westaustraliens. Seroja brachte reichlich Regen und starke Winde in die Region. An mehreren Orten wurden die höchsten Tagesniederschläge seit Beginn der Aufzeichnungen verzeichnet. Seroja traf auch Indonesien und verursachte historische Überschwemmungen und Erdrutsche.

5| Langjährige Klimaentwicklung

Dieses Kapitel gibt einen Überblick zur vergangenen Klimaentwicklung in der Schweiz, mit Bezug zum aktuellen Berichtsjahr. Für die primären Messgrössen Temperatur und Niederschlag kann die Klimaentwicklung seit Aufnahme der offiziellen Messungen im Winter 1863/64 nachgezeichnet werden. Für die meisten übrigen Parameter liegen bereinigte Messreihen ab 1959 vor.

Gegliedert wird das Kapitel nach den essentiellen Klimavariablen des globalen Klima-Beobachtungssystems GCOS (Global Climate Observing System) [13]. Daraus werden die Bereiche Atmosphäre und Landoberfläche behandelt, mit dem Schwerpunkt auf den bodennahen Beobachtungen (Tabelle 5.1). Es handelt sich dabei um die klassischen Messreihen von Temperatur und Niederschlag und daraus abgeleitete Parameter. Die Datengrundlagen und Methoden werden im Abschnitt 5.3 beschrieben.

Tabelle 5.1
Essentielle Klimavariablen gemäss GCOS Second Adequacy Report [14], ergänzt mit den für die Schweiz zusätzlich relevanten Variablen. Aus [13].

Bereich		Essentielle Klimavariablen
Atmosphäre	Bodennah	Lufttemperatur, Niederschlag, Luftdruck, bodennahe Strahlungsbilanz, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Wasserdampf
	Freie Atmosphäre	Strahlungsbilanz (inkl. Sonnenstrahlung), Temperatur, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Wasserdampf, Wolken
	Zusammensetzung	Kohlendioxid, Methan, Ozon, weitere Treibhausgase, Aerosole, Pollen
Ozean	Oberfläche	Oberflächentemperatur, Salzgehalt, Meereshöhe, Meereszustand, Meereis, Strömung, biologische Aktivität, Partialdruck des Kohlendioxids
	Zwischen- und Tiefenwasser	Temperatur, Salzgehalt, Strömung, Nährstoffe, Kohlenstoff, Spurenstoffe, Phytoplankton
Landoberfläche		Abfluss, Seen, Grundwasser, Wassernutzung, Isotope, Schneebedeckung, Gletscher und Eiskappen, Permafrost, Albedo, Oberflächenbedeckung (inkl. Vegetationstyp), Blattflächenindex, photosynthetische Aktivität, Biomasse, Waldbrand, Phänologie

Mit dem Ziel, die Entwicklung des Temperatur- und Niederschlagsregimes detailliert und global einheitlich zu erfassen, hat die Welt-Meteorologie-Organisation (WMO; World Meteorological Organization) aus der Temperatur und dem Niederschlag ein Set von spezifisch definierten Klimaindikatoren abgeleitet [15]. Zusätzlich werden hier weitere für die Schweiz spezifische Klimaindikatoren diskutiert. Gemäss einer Empfehlung der WMO für Analysen zur Klimaentwicklung wird in diesem Kapitel die Normperiode 1961–1990 verwendet [15], [16].

Bezeichnung	Definition	Bedeutung/Charakteristik
Temperatur	Tagesmitteltemperatur konventionell (Morgen bis Morgen) aggregiert auf Monats- und Jahrestemperatur	Hauptindikator für die Veränderungen des Klimas und essentielle Klimavariable [13].
Frosttage (WMO)	Tage des Kalenderjahres mit minimaler Temperatur $T_{min} < 0\,°C$	Die Anzahl Frosttage ist hauptsächlich von der Höhenlage der Station abhängig. Als guter Klimaindikator vor allem in höheren Lagen verwendbar.
Sommertage (WMO)	Tage des Kalenderjahres mit maximaler Temperatur $T_{max} \geq 25\,°C$	Die Anzahl Sommertage hauptsächlich ist von der Höhenlage der Station abhängig. Als guter Klimaindikator vor allem in tiefen Lagen verwendbar.
Nullgradgrenze	Höhenkote mit der Temperatur 0 °C, bestimmt auf der Basis von Messwerten mit Ballonsondierungen	Die Höhenlage der Nullgradgrenze ist ein Mass für den Wärmeinhalt der Atmosphäre im Höhenprofil.
Niederschlag	Tagessumme konventionell (Morgen bis Morgen) aggregiert auf Monats- und Jahressummen	Hauptindikator für die Veränderungen des Klimas und essentielle Klimavariable [13].
Tage mit starkem Niederschlag (WMO)	Tage des Kalenderjahres mit Tagesniederschlag $P \geq 20$ mm	Die Schwelle von mehr als 20 mm darf nicht gleichgestellt werden mit seltenen Extremniederschlägen. Ereignisse von 20 mm werden in der Schweiz jedes Jahr mehrmals registriert.
Niederschlag der sehr nassen Tage (WMO)	Niederschlagssumme der Tage im Kalenderjahr, an welchen der Tagesniederschlag P > 95tes Perzentil der Tagesniederschläge erreicht (Referenz: 1961–1990)	Ein Tag gilt als sehr nass, wenn seine Niederschlagssumme grösser ist als die im langjährigen Durchschnitt 18 nassesten Tage im Jahr.
Max. Anzahl zusammenhängender Trockentage (WMO)	Maximale Anzahl zusammenhängender Tage des Kalenderjahres, für welche der Tagesniederschlag $P < 1$ mm ist	Ununterbrochene Periode mit hintereinander folgenden Trockentagen, von denen jeder weniger als 1 mm Niederschlag aufweist.
Trockenheitsindex	SPEI (standardized precipitation evapotranspiration index) Abweichung von der mittleren klimatischen Wasserbilanz (Differenz von Niederschlag und potenzieller Verdunstung)	Der Indexwert eines bestimmten Monats zeigt den akkumulierten Wassermangel bzw. den akkumulierten Wasserüberschuss in der davorliegenden Periode im langjährigen Vergleich.
Neuschneesumme	Neuschneesumme der Monate Oktober bis März (Winterhalbjahr)	Schneemengen und Neuschneefall sind in komplexer Weise von der Temperatur und dem Niederschlag abhängig. Sie reagieren deshalb sehr empfindlich auf langfristige Klimaänderungen [17], [18], [19], [20], [21].
Tage mit Neuschnee	Anzahl Tage mit messbarem Neuschnee der Monate Oktober bis März (Winterhalbjahr)	

Tabelle 5.2
Benutzte Klimaindikatoren aus den behandelten Bereichen Atmosphäre und Landoberfläche. Die WMO-Indikatoren sind definiert in WMO/ETCCDI [15].

5.1 Atmosphäre

5.1.1 Bodennahe Beobachtungen

Die hier verwendeten Klimaindikatoren nach WMO (Tabelle 5.2) werden überwiegend exemplarisch anhand der Messreihen der Stationen Bern (nordalpines Flachland), Sion (inneralpines Tal), Davos (alpine Lage) und Lugano (Südschweiz) dargestellt. Berechnet werden sie als Jahreswerte, das heisst z.B. Anzahl Frosttage pro Jahr, wobei immer das Kalenderjahr benutzt wird (1. Januar bis 31. Dezember).

Temperatur

Das Jahr 2021 lag mit einer Abweichung von +1,1 °C gegenüber der Normperiode 1961–1990 im landesweiten Mittel nicht unter den zwanzig wärmsten Jahren seit Messbeginn 1864 (Rang 21). Der Winter 2020/21 war mild mit einer Abweichung von +1,4 °C zur Norm 1961–1990. Die landesweite Durchschnittstemperatur im darauffolgenden Frühling lag exakt auf dem saisonalen Normwert. Im Sommer registrierte die Schweiz eine Temperaturabweichung von +1,7 °C gegenüber dem Durchschnitt von 1961–1990, vergleichbar mit dem Sommer der Jahre 2016 oder 2013. In den Hitzesommern von 2015 und 2017–2019 wurden jeweils Abweichungen von mehr als +3 °C erreicht. Der Hitzesommer 2003 bleibt der bis anhin wärmste je gemessene Sommer in der Schweiz. Auch der Herbst 2021 lag mit +0,9 °C über der Norm 1961–1990.

Der langjährige gesamtschweizerische Trend der Jahrestemperatur liegt bei +1,4 °C/100 Jahre, was einer Gesamtänderung von +2,2 °C entspricht (1864–2021). Eine Übersicht zu den Temperaturtrends gibt Tabelle 5.3.

Tabelle 5.3
Saisonale und jährliche Temperaturtrends in °C/10 Jahre in den Perioden 1864–2021, 1901–2021 und 1961–2021, berechnet jeweils für die ganze Schweiz. Die Signifikanz-Angaben werden im Abschnitt Temperatur unter 5.3 Datengrundlagen und Methoden erläutert.

Periode	Frühling MÄRZ–MAI	Sommer JUN–AUG	Herbst SEP–NOV	Winter DEZ–FEB	Jahr JAN–DEZ
1864–2021	+0,13 °C stark signifikant	+0,15 °C stark signifikant	+0,14 °C stark signifikant	+0,13 °C stark signifikant	+0,14 °C stark signifikant
1901–2021	+0,16 °C stark signifikant	+0,21 °C stark signifikant	+0,18 °C stark signifikant	+0,16 °C stark signifikant	+0,18 °C stark signifikant
1961–2021	+0,44 °C stark signifikant	+0,52 °C stark signifikant	+0,26 °C stark signifikant	+0,35 °C stark signifikant	+0,38 °C stark signifikant

Weitere Infos zu Klimaindikatoren:
meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/klima-indikatoren.html

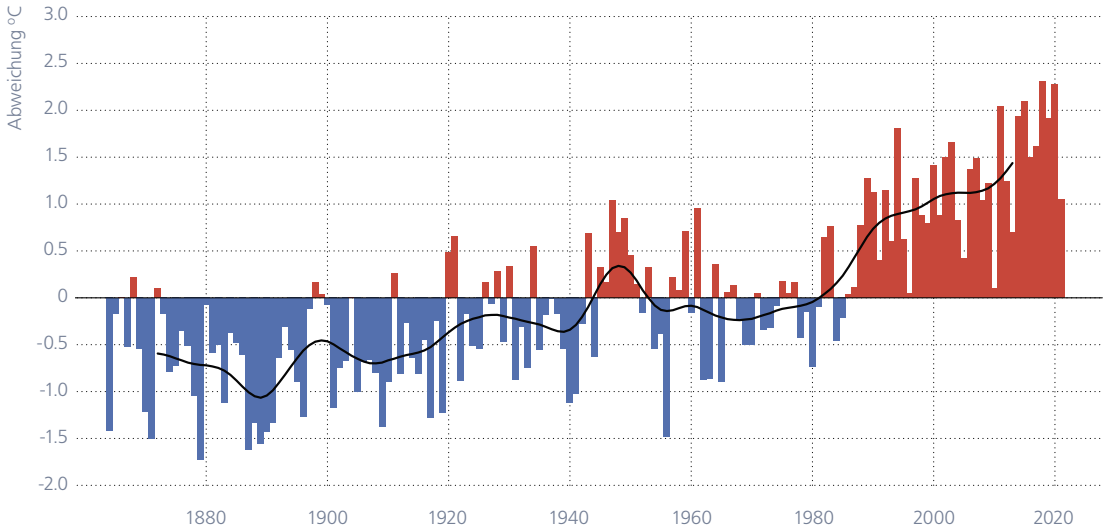


Abbildung 5.1
Langjähriger Verlauf der Jahres-Temperatur gemittelt über die gesamte Schweiz. Dargestellt ist die jährliche Abweichung der Temperatur von der Norm 1961–1990 (rot = positive Abweichungen, blau = negative Abweichungen). Die schwarze Kurve zeigt das 20-jährige, gewichtete Mittel.

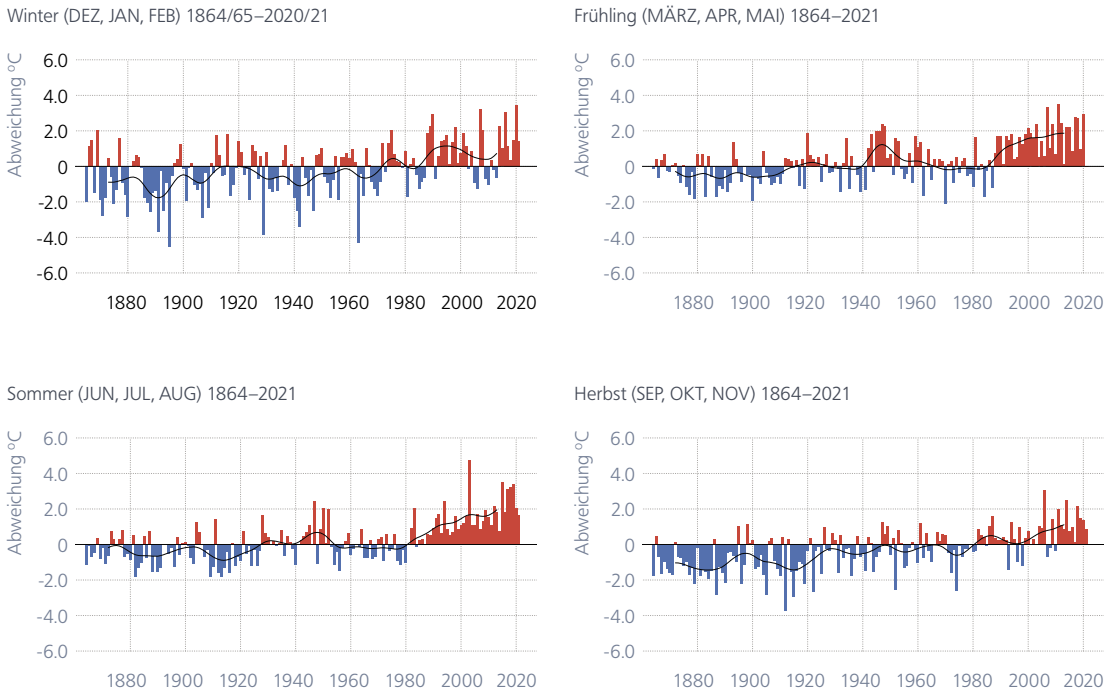
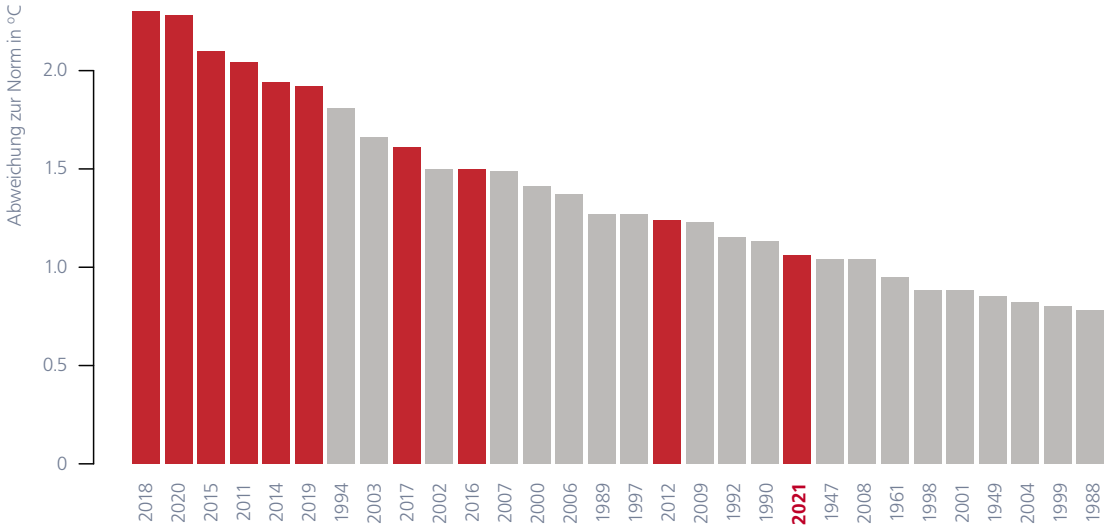


Abbildung 5.2
Langjähriger Verlauf der jahreszeitlichen Temperatur gemittelt über die gesamte Schweiz. Dargestellt ist die jährliche Abweichung der saisonalen Temperatur von der Norm 1961–1990 (rot = positive Abweichungen, blau = negative Abweichungen). Die schwarze Kurve zeigt das 20jährige, gewichtete Mittel.

Die Jahre mit den höchsten Temperaturen sind gehäuft in den letzten Jahrzehnten zu finden. Unter den dreissig wärmsten Jahren seit Messbeginn 1864 liegen nur einzelne Vertreter aus der Zeit vor 1990. Die fünf Spitzenreiter sind allesamt nach 2010 aufgetreten (Abbildung 5.3). Nur die Jahre 2010 und 2013 zählen in der Schweiz nicht zu den dreissig wärmsten Jahren. Das Jahr 2021 erreichte passend den 21. Rang. Das Muster der langjährigen Temperaturentwicklung in der Schweiz mit der Häufung sehr warmer Jahre in jüngster Zeit findet sich auch in der globalen Temperaturreihe (Abbildung 4.1).

Ohne global wirksame Klimaschutzmassnahmen wird für die Schweiz eine weitere deutliche Erwärmung aufgrund des anthropogenen Klimawandels erwartet. Bis Ende des 21. Jahrhunderts soll die Zunahme der Jahresdurchschnittstemperatur laut den aktuellen Klimaszenarien, ausgehend vom Mittel 1981–2010, rund 3,3–5,4 °C betragen. Die stärkste jahreszeitliche Erwärmung von 4,1–7,2 °C wird für den Sommer berechnet, für den Fall, dass die globalen Treibhausgasemissionen weitergehen wie bisher [8].

Abbildung 5.3
Rangliste der 30 wärmsten Jahre seit 1864. Die Balken zeigen die Abweichung der mittleren Schweizer Jahrestemperatur zur Norm 1961–1990. Die Jahre ab 2010 sind rot dargestellt. Das Jahr 2021 befindet sich an 21. Stelle.



Weitere Infos zur Temperaturentwicklung:
meteoschweiz.admin.ch/home/klima/klimawandel-schweiz/temperatur-und-niederschlagsentwicklung.html
meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/trends-an-stationen.html
nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien/broschuere-bestellen.html
nccs.admin.ch/nccs/de/home/materialien-und-daten/daten/ch2018-webatlas.html

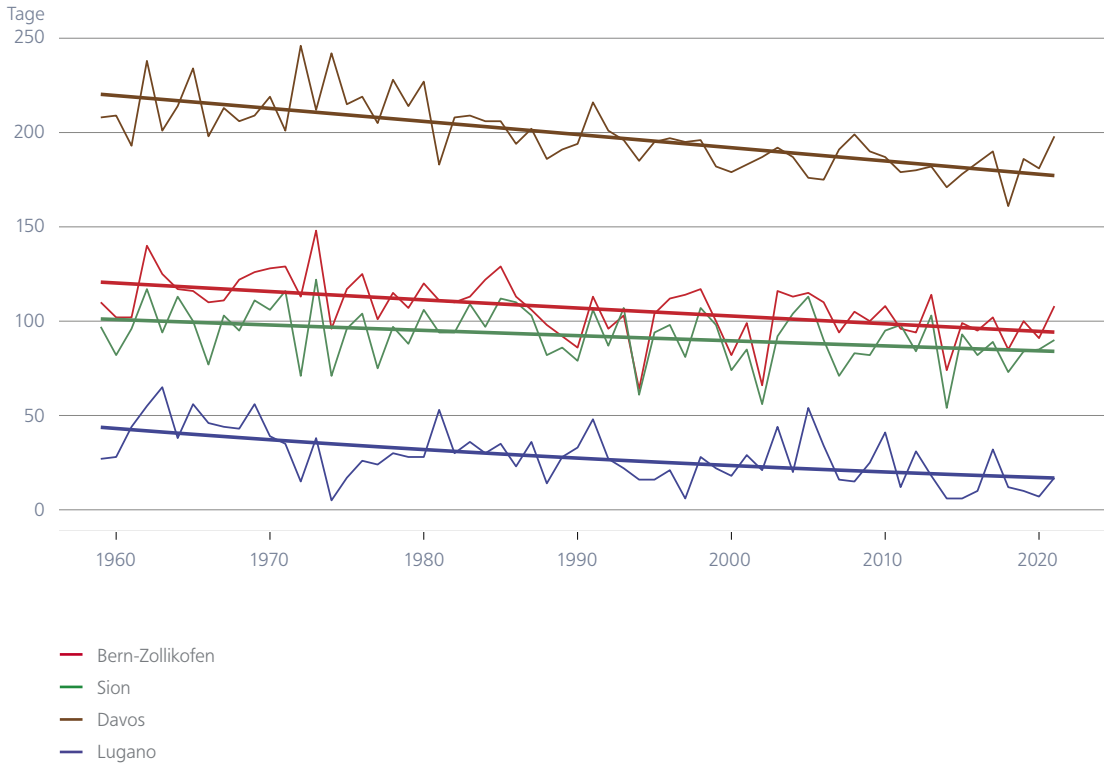
Frosttage

Trotz des milden Winters lag die Anzahl Frosttage 2021 an allen hier aufgeführten Messstandorten etwas höher als in den Vorjahren. Grund hierfür waren die teils tiefen Temperaturen im Frühling. An der höchstgelegenen der hier gezeigten Messstationen in Davos wurden 198 Frosttage erreicht. In der Norm 1961–1990 wurden an diesem Standort im Durchschnitt 210 Frosttage pro Jahr gemessen. In Bern waren es im Jahr 2021 108 Frosttage (Norm 115), in Sion wurden 90 Frosttage (Norm 97) registriert. In Lugano reichte es knapp für die Hälfte des Normalen (17, Norm 35).

Mit der kräftigen Wintererwärmung der letzten Jahrzehnte ist in allen Messreihen Bern, Davos, Sion und Lugano ein signifikanter Rückgang der Anzahl Frosttage festzustellen. Pro Jahrzehnt werden hier rund 3–7 Frosttage weniger gezählt.

Gemäss den neuen Klimaszenarien CH2018 [8] dürfte die Anzahl Frosttage in Lugano bis 2060 auf 5–14 Tage pro Jahr sinken, wenn der Treibhausgasausstoss unvermindert weitergeht. In Bern wäre noch mit 53–69 Frosttagen pro Jahr zu rechnen.

Abbildung 5.4
Zeitlicher Verlauf der Frosttage (Tage des Kalenderjahres mit minimaler Temperatur <0 °C) für die Stationen Bern, Sion, Davos und Lugano.



Sommertage

Dass der Sommer 2021 nicht zu den wärmsten gehörte, äussert sich auch in einer im Vergleich zu den warmen Sommern zwischen 2015 und 2020 deutlich geringeren Anzahl Sommertage. In Lugano wurden 81 Sommertage gezählt. Das ist zwar deutlich mehr als in der Norm 1961–1990 (50 Sommertage), in den Jahren 2018 und 2019 wurden in Lugano aber 105 resp. 92 Sommertage registriert. Am Messstandort in Sion wurden lediglich 67 Sommertage gezählt (Norm 55). Dort waren es zwischen 2015 und 2020 jeweils zwischen 74 und 115 Sommertage. Bern verzeichnete im Jahr 2021 insgesamt 34 Sommertage und damit fast gleich viele wie in der Norm (durchschnittlich 31 Sommertage pro Jahr). In Davos reichte es 2021 für vier Tage mit mehr als 25 °C. In der Normperiode 1961–1990 wurde dort durchschnittlich geradem al ein Sommertag pro Jahr registriert.

In allen der vier dargestellten Messreihen ist der Trend hin zu immer mehr Sommertagen signifikant. Pro Jahrzehnt werden in Bern ungefähr vier, in Sion sechs und in Lugano acht Sommertage mehr verzeichnet. In Davos, auf 1600 m ü.M., sind es zwei Sommertage mehr pro Jahrzehnt.

Hält die zunehmende Entwicklung der globalen Treibhausgaskonzentrationen wie bisher an, dürfte sich die Zahl der Sommertage in einem durchschnittlichen Jahr bis 2060 in den tieferliegenden Regionen des Landes mehr als verdoppeln gegenüber der Norm 1961–1990. Für Bern könnten 68–90 Sommertage zur Regel werden, für Davos 15–40 Sommertage, was etwa dem Schwankungsbereich während der Normperiode am Messstandort in Bern entspricht [8].

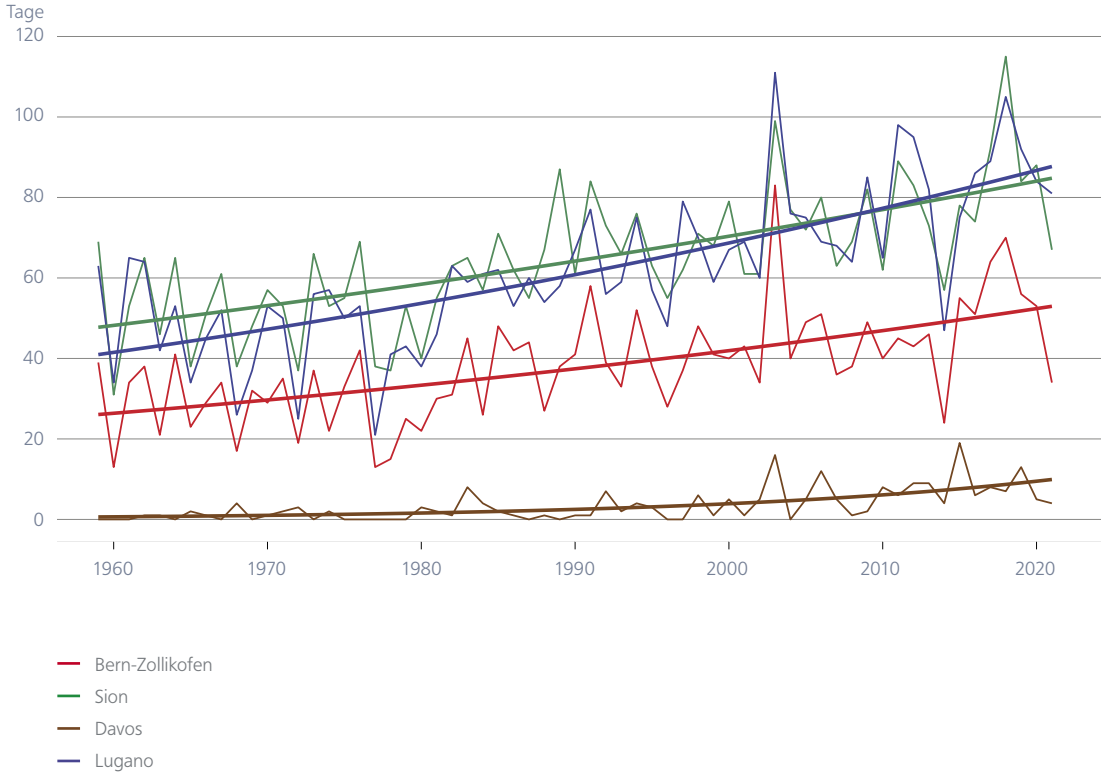


Abbildung 5.5
Zeitlicher Verlauf der Sommertage (Tage des Kalenderjahres mit maximaler Temperatur ≥25 °C) für die Stationen Bern, Sion, Davos und Lugano.

Niederschlag

Nach vier aufeinanderfolgenden Jahren mit zu trockenen Verhältnissen war die Niederschlagsmenge für das Jahr 2021 im Mittelland mit 106 % des Normniederschlags leicht überdurchschnittlich (Abbildung 5.6). Zwischen den einzelnen Jahreszeiten gab es jedoch grosse Unterschiede. Der Winter 2020/21 brachte mit 115 % der Norm 1961–1990 eine leicht überdurchschnittliche Niederschlagsmenge. Deutlich zu nass war der Sommer mit 142 % der Norm. Der Niederschlag im Frühling 2021 war mit 94 % des Normniederschlags nur leicht unter der Norm. Im trockenen Herbst fielen dagegen nur 50 % des normalen Niederschlags (Abbildung 5.7).

In der Südschweiz lag die Niederschlagsmenge im Jahr 2021 mit 93 % im Gegensatz zur Nordschweiz leicht unter dem langjährigen Mittel in der Vergleichsperiode 1961–1990 (Abbildung 5.8). Im Winter fiel auf der Alpensüdseite noch relativ viel Niederschlag (163 % der Norm). Der darauffolgende Frühling brachte dann aber nur 53 % der normalen Niederschlagsmengen (Abbildung 5.9). Sommer und Herbst waren dann wieder leicht über dem Durchschnitt mit 114 % des jeweiligen saisonalen Normniederschlags.

Im Mittelland ist ein langfristig schwach ansteigender Trend des Jahresniederschlags (1864–2021) von +0,6 %/10 Jahre zu beobachten. Dies ist auf den stark signifikanten Trend im Winter zurückzuführen (+2,1 %/10 Jahre). In den Jahreszeiten Frühling, Sommer und Herbst sind keine signifikanten Trends zu mehr oder weniger Niederschlag vorhanden. Die Südschweiz zeigt weder auf der jährlichen noch auf der saisonalen Basis signifikante Trends. Eine Gesamtübersicht zu den nordalpinen und südalpinen Niederschlagstrends geben Tabelle 5.4. und Tabelle 5.5.

Tabelle 5.4
Saisonale und jährliche Niederschlagstrends in % pro 10 Jahre in den Perioden 1864–2021, 1901–2021 und 1961–2021, berechnet für das Mittelland. Die Angaben signifikant, stark signifikant und nicht signifikant werden im Abschnitt Niederschlag unter 5.3 Datengrundlagen und Methoden erläutert.

Periode	Frühling MÄRZ–MAI	Sommer JUN–AUG	Herbst SEP–NOV	Winter DEZ–FEB	Jahr JAN–DEZ
1864–2021	+0,7 % nicht signifikant	+0,1 % nicht signifikant	-0,4 % nicht signifikant	+2,1 % stark signifikant	+0,6 % signifikant
1901–2021	+0,6 % nicht signifikant	-0.4 % nicht signifikant	+0,1 % nicht signifikant	+1,8 % signifikant	+0,5 % nicht signifikant
1961–2021	+0,2 % nicht signifikant	+0,6 % nicht signifikant	+0,5 % nicht signifikant	+1,0 % nicht signifikant	+0,5 % nicht signifikant

Tabelle 5.5
Saisonale und jährliche Niederschlagstrends in % pro 10 Jahre in den Perioden 1864–2021, 1901–2021 und 1961–2021, berechnet für die Südschweiz. Die Angabe nicht signifikant wird im Abschnitt Niederschlag unter 5.3 Datengrundlagen und Methoden erläutert.

Periode	Frühling MÄRZ–MAI	Sommer JUN–AUG	Herbst SEP–NOV	Winter DEZ–FEB	Jahr JAN–DEZ
1864–2021	-0,1 % nicht signifikant	-0.1 % nicht signifikant	-0,7 % nicht signifikant	+1,4 % nicht signifikant	0,0 % nicht signifikant
1901–2021	-1.1 % nicht signifikant	-0,6 % nicht signifikant	+0,6 % nicht signifikant	+1,1 % nicht signifikant	-0,2 % nicht signifikant
1961–2021	-1,2 % nicht signifikant	+2,4 % nicht signifikant	+1,2 % nicht signifikant	+2,4 % nicht signifikant	+0,9 % nicht signifikant

Ohne global wirksame Interventionsmassnahmen wird für die Schweiz in Zukunft im Sommer eine Niederschlagsabnahme erwartet. Bis Ende dieses Jahrhunderts sind laut den aktuellen Klimaszenarien, ausgehend vom Mittel 1981–2010, Niederschlagsänderungen zwischen +2 % bis gegen -39 % möglich. Für den Winter ist dagegen mit einer Zunahme zu rechnen, welche sich zwischen +2 % und +24 % bewegen könnte [8].

Weitere Infos zur Niederschlagsentwicklung:
meteoschweiz.admin.ch/home/klima/klimawandel-schweiz/temperatur-und-niederschlagsentwicklung.html
meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/trends-an-stationen.html
nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien/broschuere-bestellen.html
nccs.admin.ch/nccs/de/home/materialien-und-daten/daten/ch2018-webatlas.html

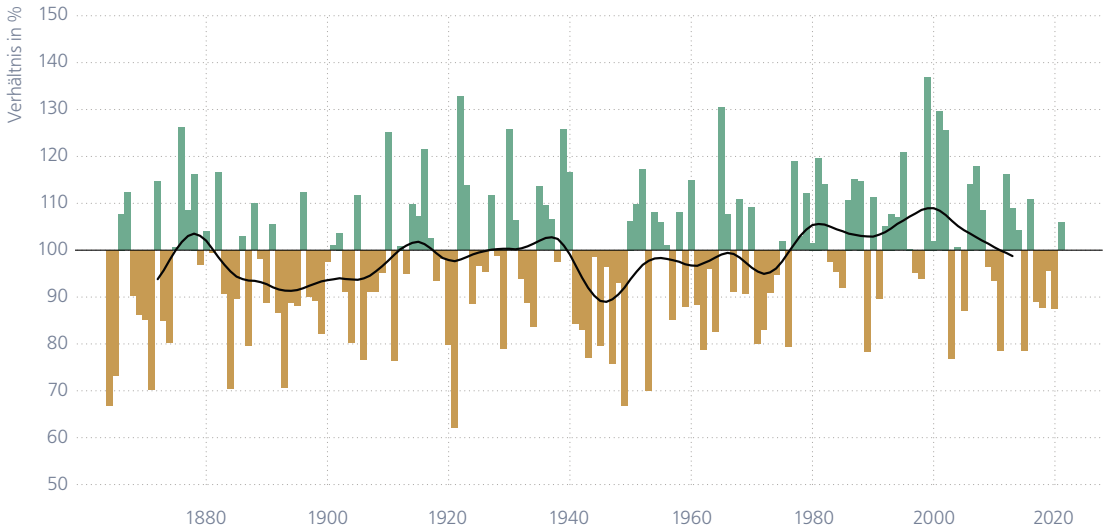


Abbildung 5.6
Langjähriger Verlauf der Jahres-Niederschlagssummen gemittelt über das Mittelland. Dargestellt ist das Verhältnis der Jahres-Niederschlagssummen zur Norm 1961–1990 (grün = positive Abweichungen, braun = negative Abweichungen). Als Datenbasis dienen die homogenen Messreihen Genève, Basel, Bern und Zürich. Die schwarze Kurve zeigt das 20-jährige gewichtete Mittel.

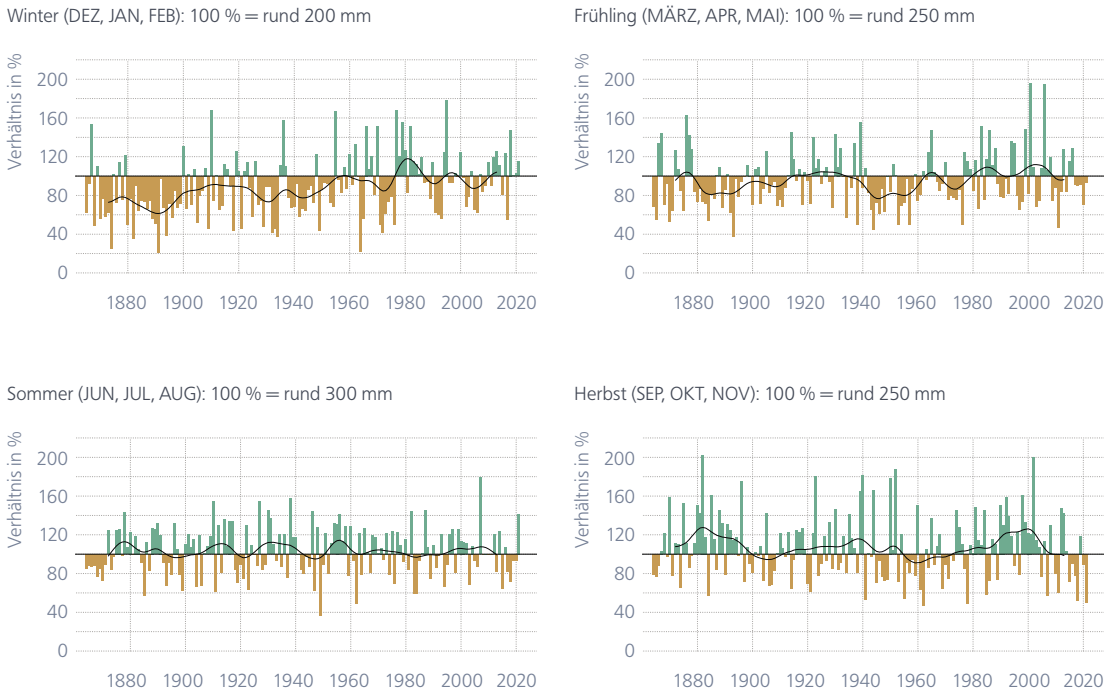


Abbildung 5.7
Langjähriger Verlauf der jahreszeitlichen Niederschlagssummen gemittelt über das Mittelland. Dargestellt ist das Verhältnis der saisonalen Niederschlagssummen zur Norm 1961–1990 (grün = positive Abweichungen, braun = negative Abweichungen). Als Datenbasis dienen die homogenen Messreihen Genève, Basel, Bern und Zürich. Die schwarze Kurve zeigt das 20-jährige gewichtete Mittel. Man beachte, dass die Sommer 2008–2011 100 % Niederschlag lieferten, was in der Grafik als «fehlende» Säulen zum Ausdruck kommt.

Abbildung 5.8

Langjähriger Verlauf der Jahres-Niederschlagssummen in der Südschweiz. Dargestellt ist das Verhältnis der Jahres-Niederschlagssummen zur Norm 1961–1990 (grün = positive Abweichungen, braun = negative Abweichungen). Als Datenbasis dient die homogene Messreihe von Lugano. Die schwarze Kurve zeigt das 20-jährige gewichtete Mittel.

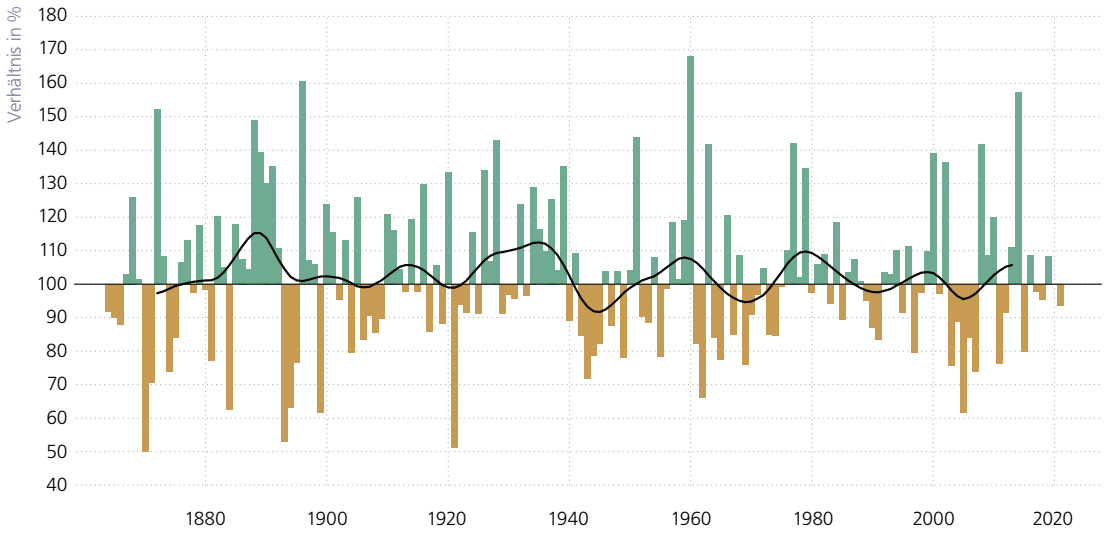
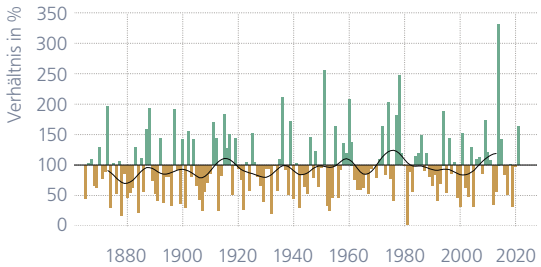


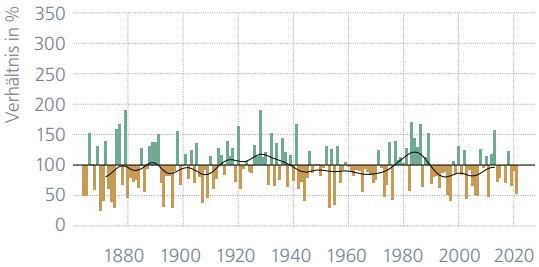
Abbildung 5.9

Langjähriger Verlauf der jahreszeitlichen Niederschlagssummen in der Südschweiz. Als Datenbasis dient die homogene Messreihe von Lugano. Dargestellt ist das Verhältnis der saisonalen Niederschlagssummen zur Norm 1961–1990 (grün = positive Abweichungen, braun = negative Abweichungen). Die schwarze Kurve zeigt das 20-jährige gewichtete Mittel.

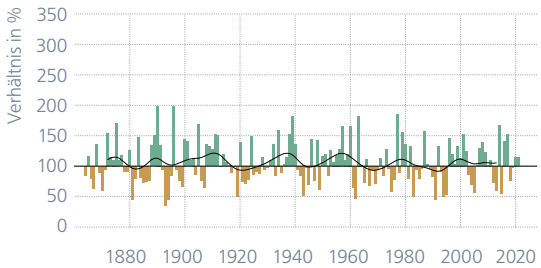
Winter (DEZ, JAN, FEB): 100 % = rund 220 mm



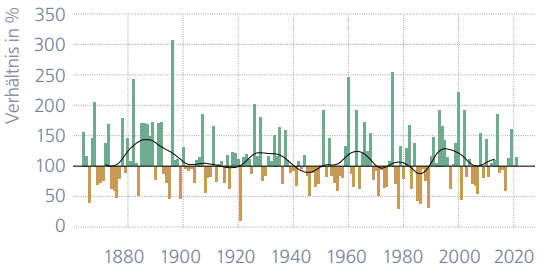
Frühling (MÄRZ, APR, MAI): 100 % = rund 480 mm



Sommer (JUN, JUL, AUG): 100 % = rund 520 mm



Herbst (SEP, OKT, NOV): 100 % = rund 470 mm



Tage mit starkem Niederschlag

Ähnlich wie die nur leicht vom Durchschnitt abweichenden Niederschlagsmengen im Jahresmittel 2021, blieb auch die Anzahl Tage mit starkem Niederschlag an den vier Messstandorten im normalen Bereich. In Bern waren es elf Tage mit mehr als 20 mm Niederschlag (Norm zehn), in Davos 14 Tage (Norm zehn), in Sion vier Tage (Norm fünf), in Lugano 26 Tage (Norm 26). Wie beim Niederschlagsregime generell (Ausnahme Winter Mittelland, vgl. Tabelle 5.4) sind bezüglich der Tage mit starkem Niederschlag an drei der vier aufgeführten Messstandorten in der untersuchten Periode ab 1959 keine signifikanten Trends feststellbar. Davos weist eine signifikante Zunahme von 0,5 Tagen pro Jahrzehnt auf. Blickt man bis 1901 zurück, so zeigen 92 % von 185 Messreihen eine Zunahme und 35 % eine signifikante Zunahme der Häufigkeit von starken Niederschlägen. Bei der Niederschlagsintensität zeigen 91 % aller Messreihen eine Zunahme und 31 % eine signifikante Zunahme [22].

Die Klimaszenarien CH2018 deuten auch für die Zukunft auf eine Zunahme der Extrem- und Starkniederschläge hin. Der stärkste Eintagesniederschlag pro Jahr dürfte bis 2060 um 10 % zunehmen [8].

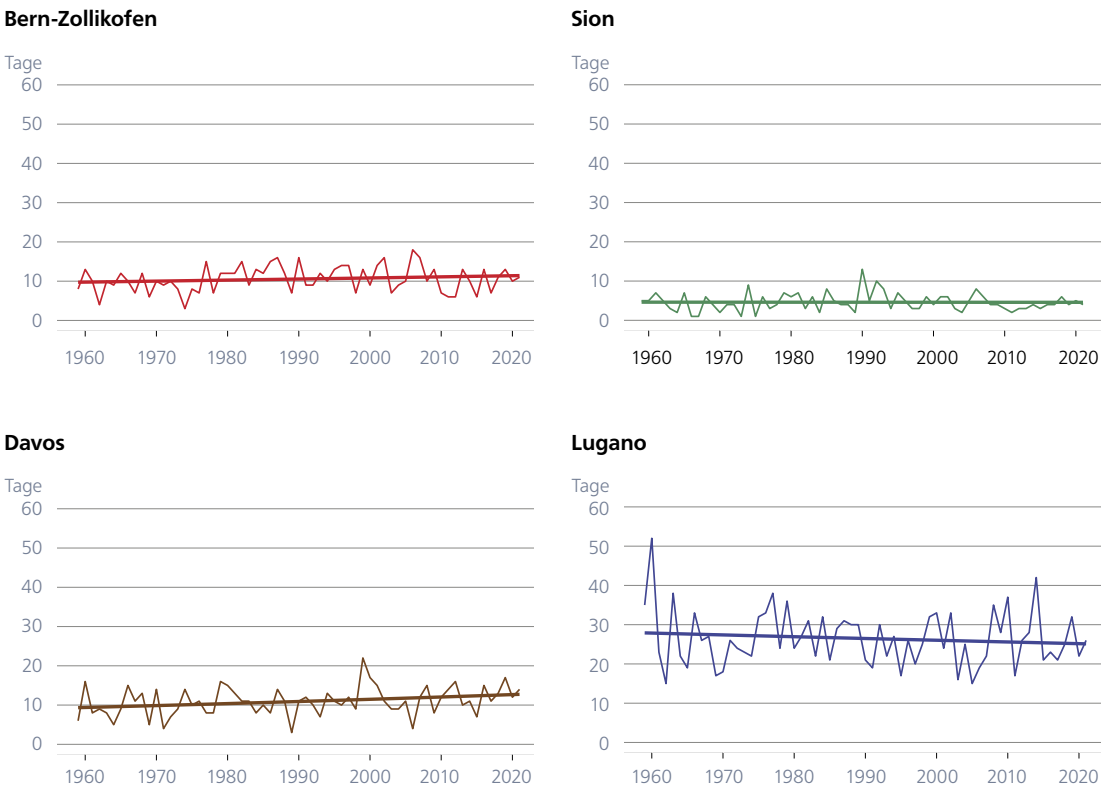
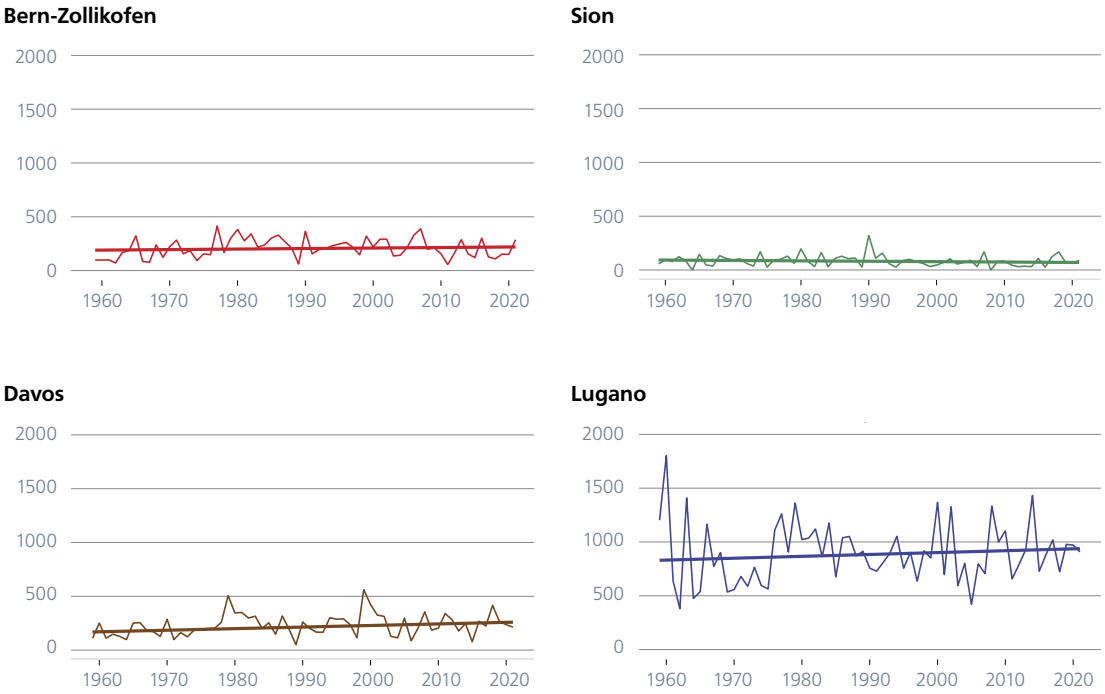


Abbildung 5.10
Anzahl Tage mit Niederschlag ≥ 20 mm im Kalenderjahr für die Stationen Bern, Sion, Davos und Lugano.

Niederschlag der sehr nassen Tage

Die Niederschlagssumme der sehr nassen Tage betrug am alpinen Messstandort Davos mit 214 mm genau gleich viel wie in der Norm. Nur leicht überdurchschnittlich war die Summe in Lugano mit 908 mm (Norm 858 mm). Am Messstandort Bern/Zollikofen wurden 288 mm gemessen. Das ist deutlich mehr als in der Norm (216 mm). Grund hierfür ist der sehr niederschlagsreiche Sommer nördlich der Alpen. In Sion wurden mit 89 mm etwas geringere Mengen als im Durchschnitt über die Periode 1961–1990 registriert (Norm 98). Im langfristigen Verlauf zeigen Bern, Sion und Lugano keinen signifikanten Trend. Eine signifikante Zunahme von 14 mm pro Dekade ist aus der Messreihe von Davos zu entnehmen.

Abbildung 5.11
Jährliche Niederschlagssumme (mm) aller sehr nassen Tage für die Stationen Bern, Sion, Davos und Lugano. Als sehr nasse Tage gelten jene, deren Tagesniederschlagssumme zu den 5 % der höchsten Tages-niederschläge gehören. Als Referenzperiode gelten die Jahre 1961–1990.



Trockenperioden

Im Jahr 2021 wurden in der Schweiz keine aussergewöhnlich kurzen oder langen Trockenphasen registriert. An den Messstandorten Bern, Sion und Davos waren die längsten Trockenperioden nur unwesentlich verschieden von der Norm (Bern 24 Tage / Norm 22, Sion 25 Tage / Norm 30, Davos 19 Tage / Norm 22). In Lugano war die längste Trockenperiode 27 Tage lang und damit um fast eine Woche kürzer als im Durchschnitt der Periode 1961–1990 (33 Tage). Im langfristigen Verlauf zeigt keine der genannten Messreihen einen signifikanten Trend zu längeren oder kürzeren Trockenperioden.

Gemäss den aktuellen Klimaszenarien ist bis 2060 von einer Zunahme der längsten Trockenperiode eines Jahres um bis zu neun Tage zu rechnen, wenn die globalen Treibhausgasemissionen nicht drastisch reduziert werden [8].

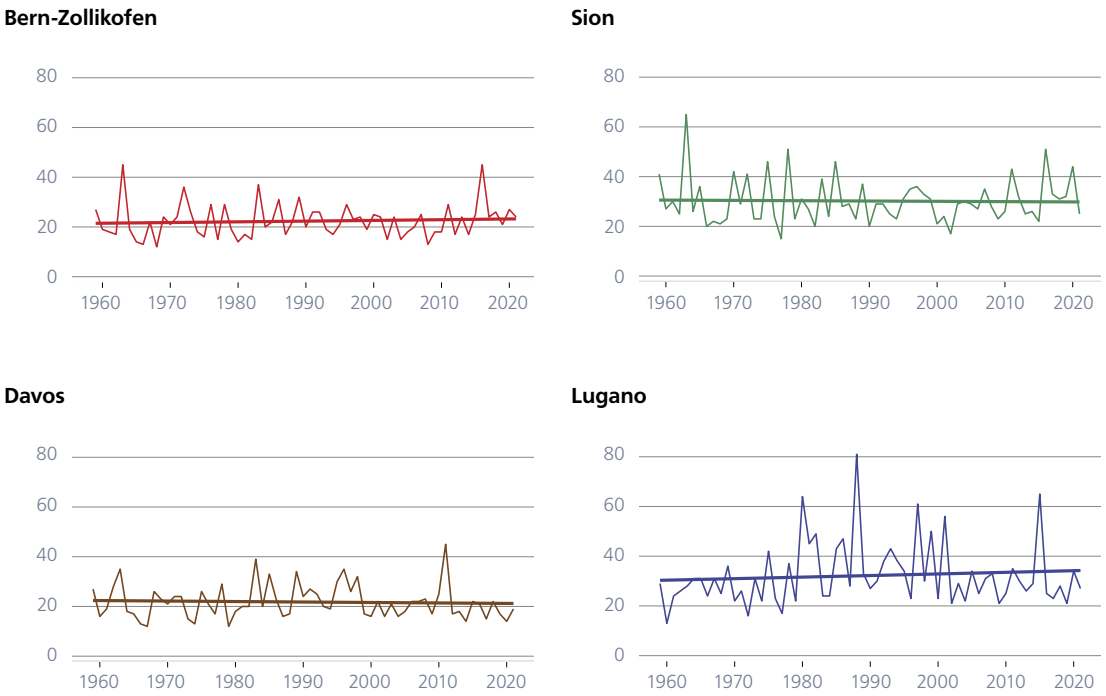


Abbildung 5.12
Dauer (Anzahl Tage) der längsten Trockenperiode pro Kalenderjahr für die Stationen Bern, Sion, Davos und Lugano.

Trockenheitsindex

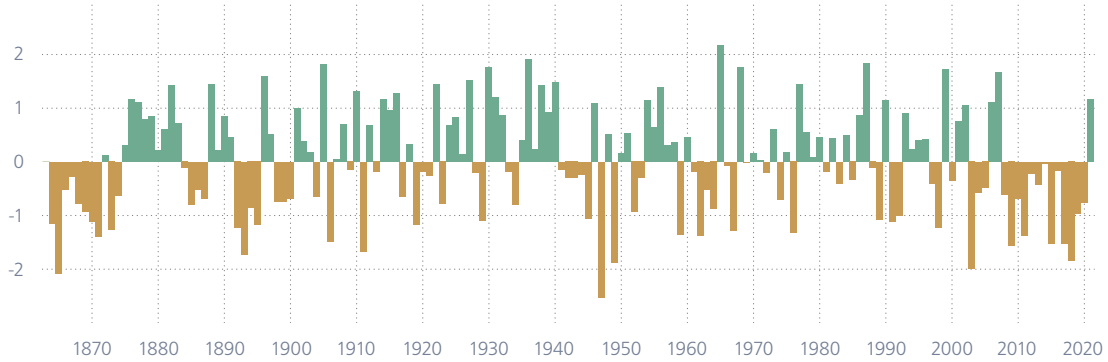
Trockenheit kann auf verschiedene Arten verstanden werden. Ganz allgemein ist sie als Niederschlagsdefizit über eine längere Zeit, d.h. mehrere Monate bis mehrere Jahreszeiten definiert. Je nach Dauer einer Trockenheit betrifft die Wasserknappheit verschiedene Bereiche (Land- und Forstwirtschaft, Wasser-und Energieversorgung, Schifffahrt) unterschiedlich stark. Hier wird anhand des SPEI (standardized precipitation evapotranspiration index) die Wasserbilanz der Monate April bis September aufgezeigt.

Das Sommerhalbjahr (Vegetationsperiode) ist der entscheidende Zeitraum für die Landwirtschaft. Die Messungen in Bern zeigen, dass 2021 als erstes Jahr seit langem eine positive Wasserbilanz über die Monate April bis September aufwies. Zuvor waren 13 Jahre während der Vegetationsperiode allesamt trockener als im langjährigen Median, mit einigen extrem trockenen Jahren wie zuletzt 2018 [1]. Häufigere trockene Sommer entsprechen der Erwartung in einem sich erwärmenden Klima mit höherer Verdunstung [36], doch vergleichsweise feuchte Sommer wie 2021 sind wegen der grossen Variabilität nicht ungewöhnlich.

Die Jahre mit sehr niedrigen SPEI-Werten (1947, 1865, 2003, 1949, 1893, 1911) in dieser Reihe entsprechen genau denjenigen Jahren, in welchen die grössten landwirtschaftlichen Schäden auftraten. Die ausgeprägten Perioden mit negativem SPEI stimmen gut überein mit bekannten Dürreereignissen während der letzten 150 Jahre [23], [24].

Neben zahlreichen Dürreereignissen in den letzten 20 Jahren lässt sich im Zeitraum 1981–2020 ein klarer Trend zu mehr Trockenheit erkennen. Dieser wird von zwei Faktoren getrieben. Zum einen wird eine leichte Abnahme der Niederschläge verzeichnet. Zum anderen trägt die erhöhte Verdunstung etwa gleichermassen zur Trockenheit bei. Die Zunahme der Verdunstung hängt vor allem mit der starken Erwärmung in den letzten Jahrzehnten zusammen [38].

Abbildung 5.13
SPEI über die gesamte Vegetationsperiode (6 Monate, April-September) an der Messstation Bern. Positive Werte bedeuten feuchtere und negative Werte trockenere Bedingungen als im Median (1864–2021).



5.1.2
Freie Atmosphäre

Nullgradgrenze

Aus den täglich um 11 Uhr und 23 Uhr UTC mittels Ballonsondierungen ab Payerne gemessenen Nullgradgrenzen wird für jedes Jahr seit 1959 ein Median bestimmt. Die im Jahr 2021 aufgezeichnete mittlere Höhe der Nullgradgrenze betrug 2680 m. Dieser Wert liegt 80 m tiefer als 2020.

Abbildung 5.14 zeigt den zunehmenden Trend der Nullgradgrenze (rote Linie) über den Zeitraum 1959–2021. Der lineare Trend über die gesamte Datenreihe macht die langjährige Entwicklung deutlich, gibt aber keine Auskunft über kurzfristigere Veränderungen, welche auch gegen diese Entwicklung gerichtet sein können, wie z.B. im Zeitraum 1959–1987. Die Abbildung zeigt deshalb zusätzlich die Jahr-zu-Jahr-Schwankungen um den linearen Trend (schwarze Linie und Rechtecke) und die Unsicherheit bei der Bestimmung der Jahreswerte (graue Fläche).

Der Trend zu einer Erhöhung der Nullgradgrenze ist ab den 1990er Jahren besonders ausgeprägt. In diesem Zeitrahmen markiert das Jahr 2018 den Rekord der gesamten Zeitreihe mit einem Wert von 2951 m, 594 m über dem Median der Norm 1961–1990 (2357 m). Der Minimalwert von 2087 m wurde im Jahr 1965 erreicht, 270 m unter dem Referenzwert. Im Jahr 2021 ist die Nullgradgrenze im Vergleich zum Vorjahr leicht gesunken, aber stets im Einklang mit dem allgemeinen Trend. Es ist zu beachten, dass die Nullgradgrenze in den letzten 30 Jahren systematisch über dem Medianwert von 1961–1990 lag. Für den Zeitraum 1959–1990 hingegen ist kein klarer Trend ersichtlich.

Tabelle 5.6
Saisonale Minima und Maxima der Nullgradgrenze in den jeweiligen Zeitreihen.

	Winter DEZ–FEB	**Frühling** MÄRZ–MAI	**Sommer** JUN–AUG	**Herbst** SEP–NOV
Minima (Jahr)	311 m (1963)	1472 m (1962)	3092 m (1977)	1532 m (1974)
Maxima (Jahr)	2192 m (2020)	2612 m (2007)	3955 m (2015)	3378 m (2018)

Die Entwicklung der Nullgradgrenze folgt eng der Entwicklung der Jahresdurchschnittstemperatur in der Schweiz. Wie in Abbildung 5.14 gezeigt, stieg der Jahresmedian der Nullgradgrenze im Zeitraum 1990–2021 deutlich an. Dies trifft auch auf die saisonalen Trends der Nullgradgrenze zu (Abbildung 5.15). Besonders in den warmen Jahreszeiten, im Frühjahr und Sommer, ist der lineare Trend vergleichbar mit den Jahreswerten, wenn auch gekennzeichnet durch eine stärkere Zunahme pro Dekade (89 m/10 Jahre im Sommer und 85 m/10 Jahre im Frühjahr). Auch der Bruchpunkt um 1990 ist in beiden saisonalen Reihen und in den Jahreswerten ersichtlich. Im Gegensatz dazu ist die Zunahme der Höhe der Nullgradgrenze in den Winter- und Herbstmonaten weniger ausgeprägt (69 m/10 Jahre im Winter, 50 m/10 Jahre im Herbst). Tabelle 5.6 zeigt die Minima und Maxima aus den jeweiligen Zeitreihen. Die Maximalwerte stammen alle aus den letzten beiden Jahrzehnten.

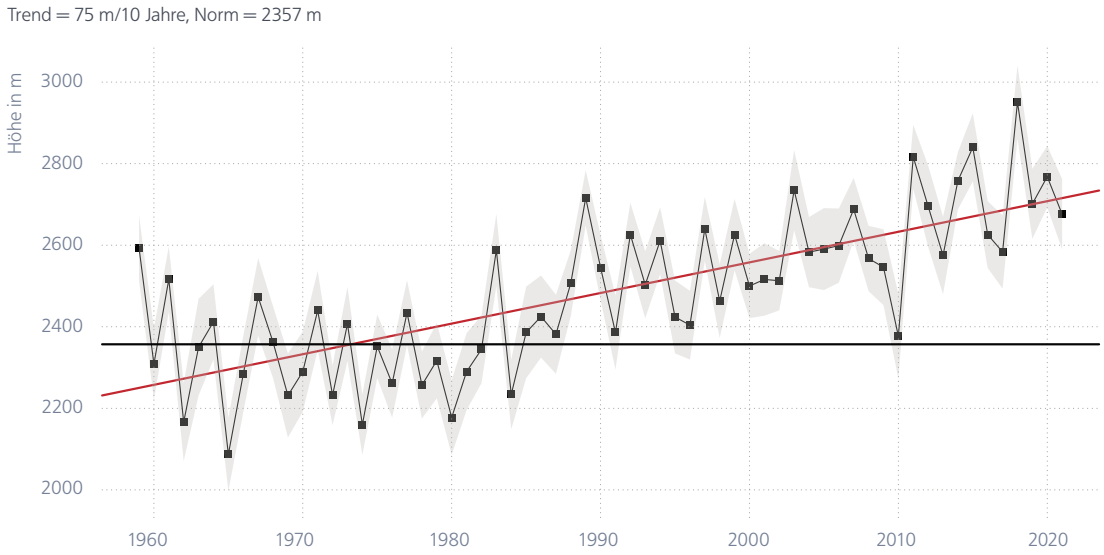


Abbildung 5.14
Jahresmedian der Nullgradgrenze über den Zeitraum 1959–2021, ermittelt aus den täglichen Ballonsondierungen der aerologischen Station Payerne. Die schwarze Linie zeigt den Median der Jahreshöhen im Referenzzeitraum 1961–1990 (2357 m). Die rote Linie zeigt den linearen Trend (signifikant). Der graue Bereich um den Median entspricht der Messunsicherheit.

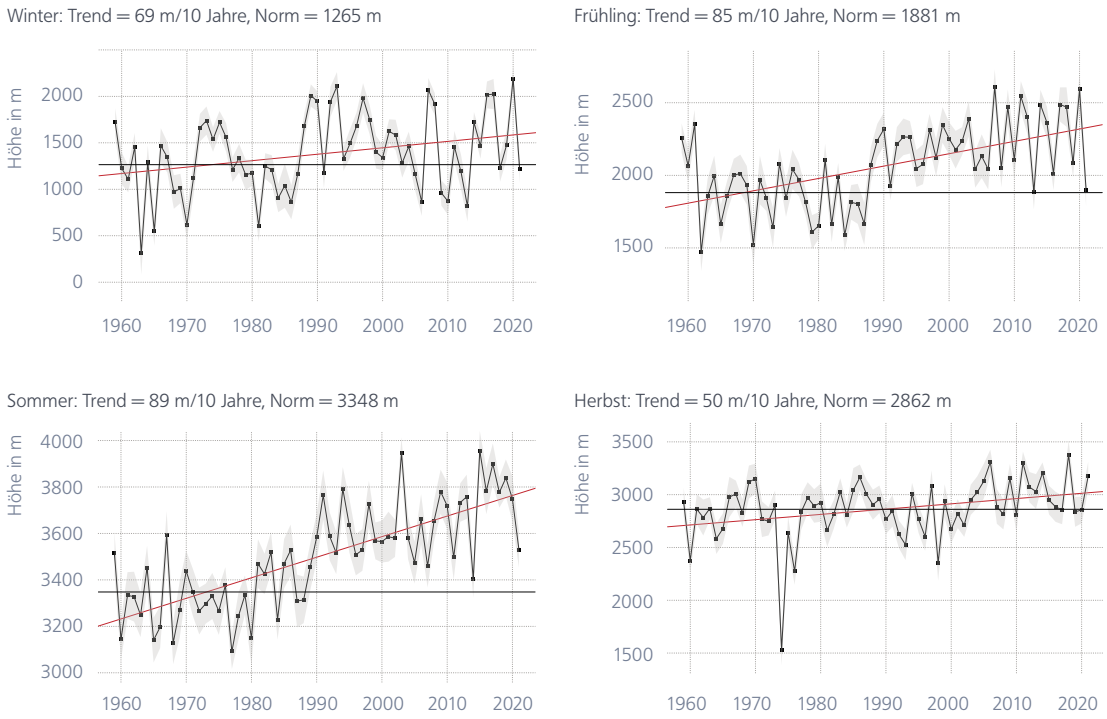


Abbildung 5.15
Saisonale Medianwerte der Nullgradgrenze über den Zeitraum 1959–2021. Die schwarze Linie zeigt die saisonalen Medianwerte für die Norm 1961–1990. Die rote Linie zeigt den linearen Trend über die gesamte Zeitreihe. Der graue Bereich um den Median entspricht der Messunsicherheit.

Tropopausenhöhe

Die Höhe der Tropopause wird nach der WMO-Definition der thermischen Tropopause (WMO, 1957) aus dem Temperaturprofil auf Grundlage der Ballonsondierungen in Payerne berechnet. Die in Abbildung 5.16 dargestellten Jahreswerte seit 1959 entsprechen dem jeweiligen Median aller innerhalb eines Jahres gemessenen Tropopausenhöhen. Wie die Nullgradgrenze zeigt auch die Tropopausenhöhe einen steigenden Trend über den gesamten Zeitraum 1959–2021 (rote Linie). Der graue Bereich entspricht der Unsicherheit der Jahresmedianwerte. Die horizontale schwarze Linie zeigt als Referenzwert den Median aller Jahreswerte über den Normzeitraum 1961–1990.

Im Jahr 2021 erreichte die Tropopause eine mittlere Höhe von 11’280 m. Das ist 100 m höher als der Median über die Normperiode (11’180 m). Die lineare Höhenzunahme der Tropopause seit 1959 ist statistisch signifikant, und dies trotz der starken Jahr-zu-Jahr-Variabilität und deutlichen Ausbrüchen nach unten wie in den Jahren 1984 (absolutes Minimum von 10'880 m), 1996 und 2010. Der höchste Jahresmedian mit 11’720 m wurde 2015 erreicht. Im Zeitraum von 1959–2021 nahm die Höhe der Tropopause um 61 m pro Dekade zu. Im Allgemeinen stimmt dieser Trend mit der Entwicklung der Nullgradgrenze überein (Abbildung 5.14).

Tabelle 5.7
Saisonale Minima und Maxima der Tropopausenhöhe in den jeweiligen Zeitreihen.

	Winter DEZ–FEB	**Frühling** MÄRZ–MAI	**Sommer** JUN–AUG	**Herbst** SEP–NOV
Minima (Jahr)	9980 m (1963)	10'060 m (1984)	11'220 m (1977)	10'600 m (1974)
Maxima (Jahr)	11'510 m (2016)	11'400 m (2017)	12'400 m (2003)	12'300 m (1970)

Die Tropopausenhöhe nahm insbesondere im Zeitraum 1990–2021 deutlich zu. Im Allgemeinen stimmen die saisonalen Trends mit den in Abbildung 5.15 dargestellten Trends der Nullgradgrenze überein. Im Winter (Dezember, Januar, Februar), Frühjahr (März, April, Mai) und Sommer (Juni, Juli, August) liegen die Jahreswerte im Zeitraum 1990–2021 deutlich über dem Median der Norm 1961–1990 (11’180 m). Nur der Herbst (September, Oktober, November) zeigt keinen klaren Trend. Tabelle 5.7 zeigt die saisonalen Minima und Maxima der Tropopausenhöhe. Nur im Herbst stammt das Maximum nicht aus den letzten beiden Jahrzehnten.

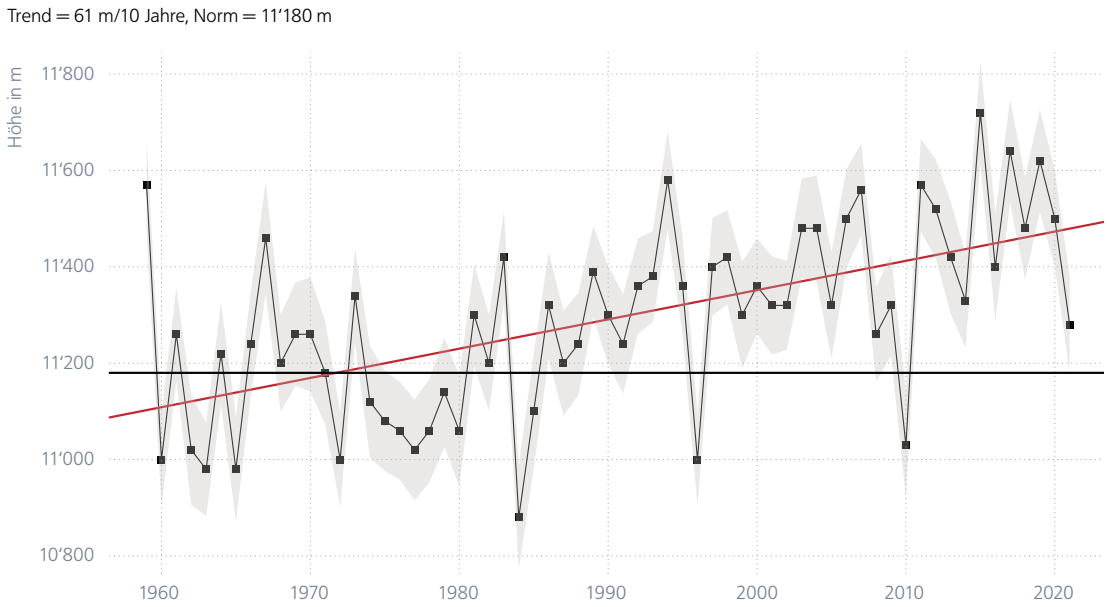


Abbildung 5.16
Jahresmedianwert der Tropopausenhöhe 1959–2021, die aus den täglichen Ballonsondierungen der aerologischen Station Payerne bestimmt werden. Die schwarze Linie zeigt den Median für die Normperiode 1961–1990 (11'180 m). Der graue Bereich um den Median entspricht der Messunsicherheit.

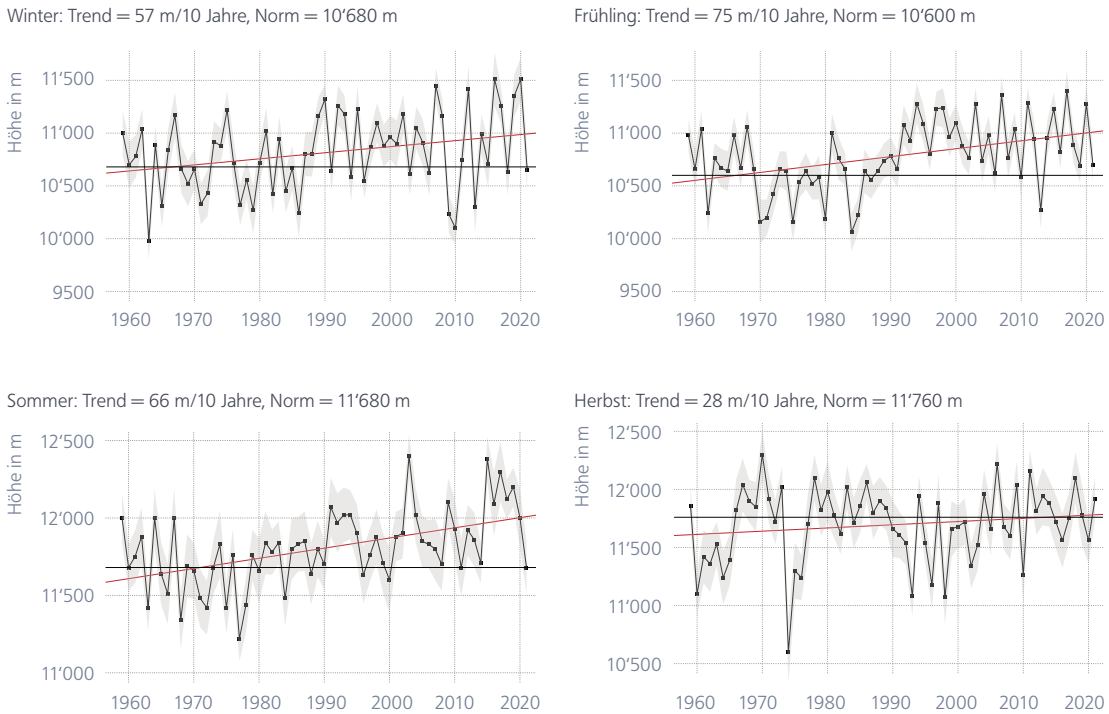


Abbildung 5.17
Saisonale Medianwerte der Tropopausenhöhe über den Zeitraum 1959–2021. Die schwarze Linie zeigt die saisonalen Medianwerte für die Norm 1961–1990, die rote Linie zeigt den linearen Trend über die gesamte Zeitreihe. Der graue Bereich um den Median entspricht der Messunsicherheit.

Temperaturtrends auf verschiedenen Druckniveaus

Im Jahr 1980 legten Isaksen et al. eine Studie vor, die den Zusammenhang zwischen der Zunahme der Konzentration des Treibhausgases CO_2 in der Troposphäre, der Abkühlung der Stratosphäre und der Abnahme der Ozonkonzentration in der Stratosphäre aufzeigte [33]. Vierzig Jahre später kennen wir den starken Zusammenhang zwischen chemischen Reaktionen und dem Klima, wo Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), ultraviolette Strahlung, Ozon in der unteren Stratosphäre und Treibhausgase in der Troposphäre eine Schlüsselrolle für das thermische Gleichgewicht auf verschiedenen atmosphärischen Niveaus spielen.

Abbildung 5.18 zeigt Temperaturtrends relativ zum Median der Normperiode 1961–1990 auf acht Druckniveaus (vier in der Troposphäre und vier in der unteren Stratosphäre). Der kontinuierliche Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen in der Troposphäre und teilweise auch in der Stratosphäre [34] seit den 1990er-Jahren dominiert die allgemeinen Temperaturtrends. Er führt in der unteren Troposphäre zu wärmeren Temperaturen mit etwa 0,4 °C pro Jahrzehnt. Mit zunehmender Höhe bis zur Tropopause (ungefähr 200 hPa) nimmt der Temperaturtrend allmählich ab und kehrt oberhalb der Tropopause um (-0,4 °C pro Jahrzehnt auf einer Höhe von 20 hPa).

Die Temperaturreihen in der Troposphäre und der Stratosphäre lassen sich zeitlich in zwei Teile mit unterschiedlich starken Trends einteilen. In der Troposphäre zeigt die Temperatur zwischen 1959 und 1990 einen neutralen Trend im Vergleich zur Norm 1961–1990. Im Zeitraum zwischen 1980 und 2021 hingegen widerspiegelt die Temperaturentwicklung den starken Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen, der in den letzten vierzig Jahren stattgefunden hat.

Auch in der Stratosphäre lassen sich zwei Trends ausmachen: ein negativer Trend auf allen Ebenen zwischen 1959 und 1990 und ein allgemein neutraler Trend ab den 1990er Jahren, der vor allem auf den höchstgelegenen Druckniveaus sichtbar wird. Der negative Trend im Zeitraum 1959-1990 ist hauptsächlich auf den Abbau der Ozonschicht zurückzuführen, der zu einer Abkühlung der Stratosphäre führt.

Der ab 1990 beobachtete neutrale Trend lässt sich durch den Rückgang der FCKW-Konzentration in der unteren Stratosphäre nach dem Übereinkommen von Montreal 1987 erklären (Protokoll zur Verringerung und Beseitigung von Stoffen, die zu einem Abbau der Ozonschicht führen). In der Folge kam es ab 1990 zu einer Stabilisierung der Ozonkonzentration, die eine Erwärmung der unteren Stratosphäre durch direkte Absorption der ultravioletten Strahlung bewirkte. Beide Temperaturtrends in der unteren Stratosphäre (abnehmend in den Jahren 1959–1990 und stabil in den Jahren 1990-2021) wurden auch von Philipona et al. in ihrer 2018 veröffentlichten Studie beobachtet [35].

Die Abbildung zeigt, dass knapp oberhalb der Tropopause auf den Druckniveaus 200 hPa und 100 hPa der starke Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen in der Troposphäre die Erholung der Ozonschicht ausgleicht und eine allgemeine Abkühlung im gesamten Zeitraum 1959–2021 bewirkt. Die Abweichungen im Jahr 2021 passen alle gut zum langfristigen Trend.

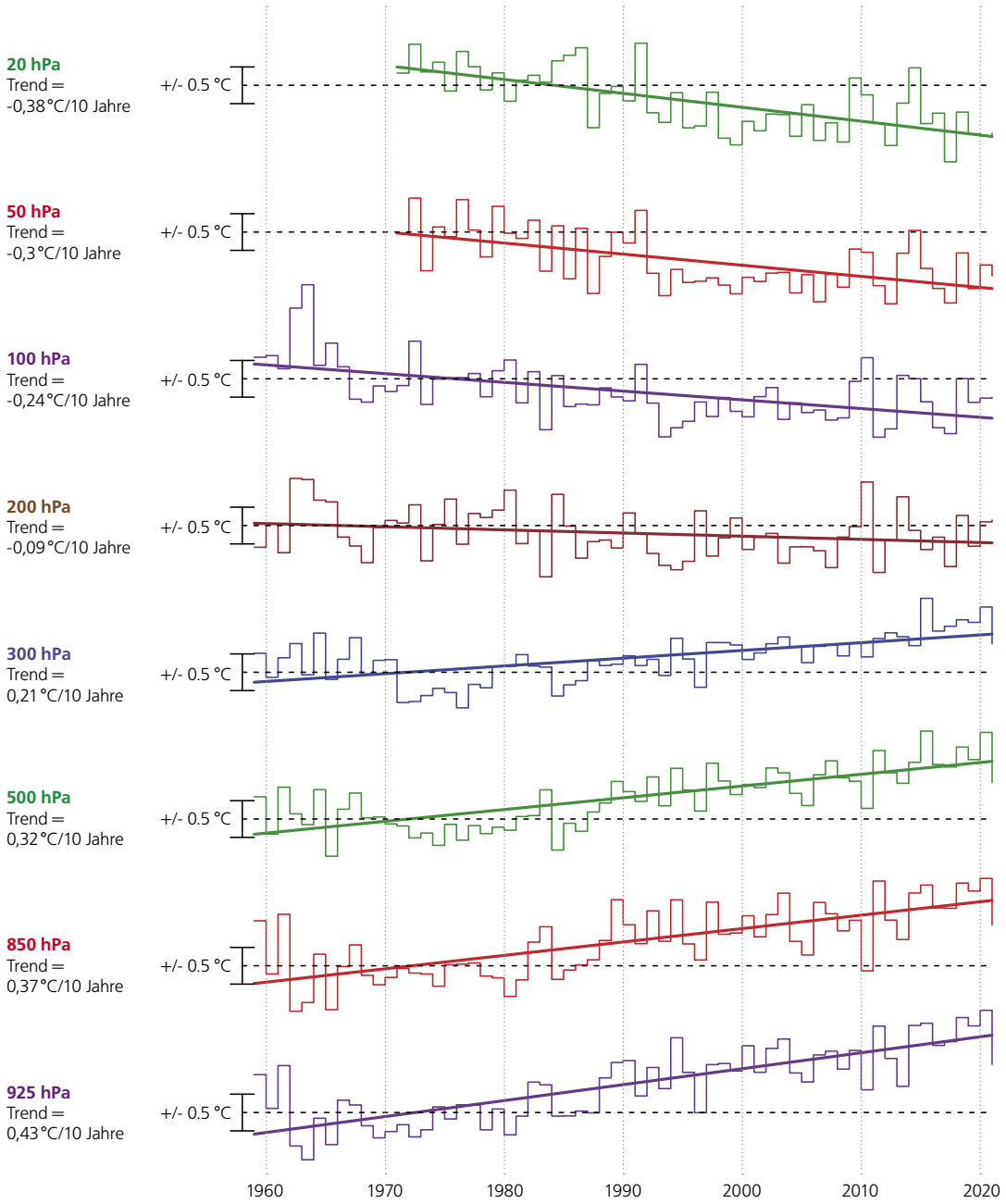


Abbildung 5.18

Trends der Temperatur im Zeitraum 1959–2021, gemessen mittels Ballonsondierungen aus Payerne. Die Temperaturabweichung vom Median der klimatologischen Norm 1961–1990 wird für acht Druckniveaus dargestellt (vier in der Troposphäre und vier in der unteren Stratosphäre).

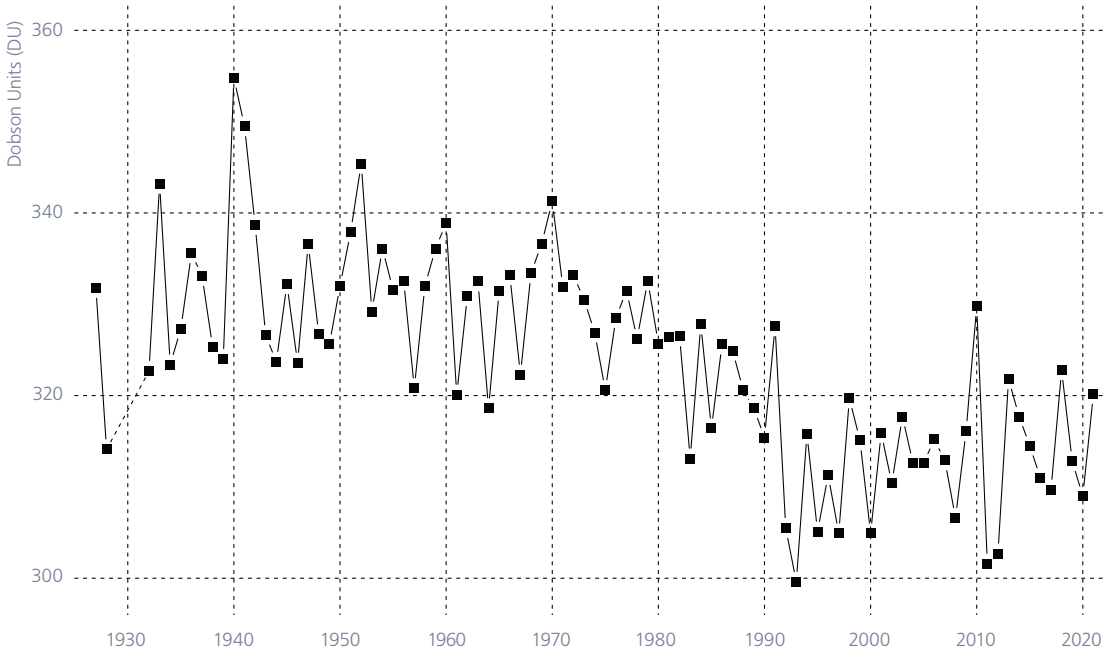
5.1.3
Zusammensetzung der Atmosphäre

Ozonmessreihe Arosa und Davos

Mit den in Arosa durchgeführten Messungen verfügt die Schweiz über die weltweit längste Messreihe für das atmosphärische Gesamtozon. Seit Beginn der Messungen im Jahr 1926 bis etwa 1975 lieferten diese Messungen einen Langzeit-Mittelwert von etwa 330 DU. Zwischen 1975 und 1995 zeigen die Messungen eine erhebliche Abnahme des Gesamtozons um etwa 15 DU. Die kontinuierliche Abnahme des Gesamtozons über Arosa setzte in den 1970er Jahren ein. Genau in diese Zeit fällt die stark erhöhte Freisetzung ozonschädlicher Stoffe. In den vergangenen Jahren ist eine Stabilisierung des Gesamtozons zu beobachten [25], wobei der Mittelwert zwischen 1995 und heute im Bereich von 310–315 DU liegt.

Nach 2010 (330 DU), 2013 (322 DU) und 2018 (323 DU) ist 2021 das vierte Jahr seit 2010 mit einem Durchschnittswert von über 320 DU (320,2 DU). Im gleichen Zeitraum gab es mit 2011 (302 DU) und 2012 (303 DU) auch einzelne Jahre deutlich unter 320 DU. Dies verdeutlicht die starken Schwankungen, denen das Gesamtozon von Jahr zu Jahr unterworfen ist. Der Trend ist zwar nicht signifikant, es gibt aber Anzeichen einer Erholung der Ozonsäule über Arosa/Davos.

Abbildung 5.19
Gesamtozonsäule über Arosa und Davos im Zeitraum 1926–2021. 100 Dobson-Einheiten (Dobson Units) entsprechen 1 mm reinem Ozon bei 1013 hPa und 0 °C.



Ozonmessungen Payerne

Seit 1968 wird die Ozonkonzentration mit Ballonsonden von der Aerologischen Station von MeteoSchweiz in Payerne aus gemessen. Die älteren Messungen (1966–1968) stammen von der ETH Zürich. Dank dieser lückenlosen Messreihe ist es möglich, die zeitliche Entwicklung des Ozongehalts verschiedener Schichten der Atmosphäre zu bestimmen. In der folgenden Abbildung sind drei verschiedene Höhenstufen (3, 22 und 27 km) als Beispiel dargestellt.

Wie aus den drei horizontalen Linien ersichtlich ist, hat sich das Ozon seit den frühen 2000er-Jahren nicht wesentlich verändert. Für die Jahre vor 2000 wurde in der Stratosphäre ein Rückgang des Ozons beobachtet (veranschaulicht durch die Werte auf 22 km und 27 km Höhe), während in der Troposphäre ein Anstieg des Ozons beobachtet wurde (hier durch den Wert auf 3 km Höhe veranschaulicht).

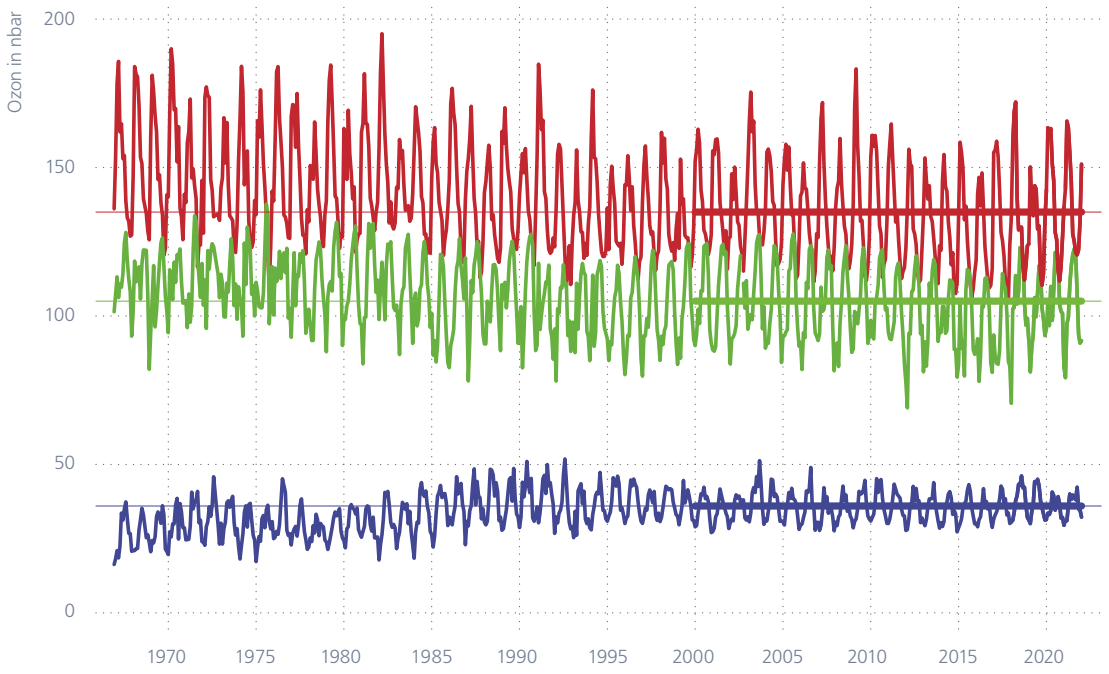


Abbildung 5.20
Monatliche Ozonkonzentration auf drei verschiedenen Höhen für die Periode 1967–2021.

Blau: 3 km
Rot: 22 km
Grün: 27 km

Die Ozonkonzentration ist als Partialdruck in Nanobar (nbar) angegeben.

Pollenintensität

Die Intensität der Pollensaison ändert sich von Jahr zu Jahr und kann einmal sehr stark oder auch sehr schwach sein. Dies hat Auswirkungen auf die Stärke der Heuschnupfensymptome der Pollenallergiker.

Bei der Birke hängt die Intensität der Pollensaison einerseits vom Wetter des Vorjahres ab, da die Blütenkätzchen schon im Sommer des Vorjahres angelegt werden. Warmes Wetter begünstigt die Anlage einer grösseren Zahl von Blütenkätzchen. Weiter hängt die Intensität auch vom Wetter während der Blütezeit und von der Pflanzenphysiologie ab, denn Birken zeigen eine Tendenz zu einem zweijährigen Blührhythmus. Bei den Gräserpollen wird die Intensität der Saison hauptsächlich vom Wetter während der Blütezeit der Gräser bestimmt.

Die Birkenpollensaison 2021 war über mehrere Stationen gemittelt in der Deutschschweiz die schwächste und in der Westschweiz die zweitschwächste seit 1989. Auch im Tessin war der Birkenpollenflug schwach und folgte damit weiterhin dem Zweijahresrhythmus. Die Intensität der Gräserpollensaison war im Tessin und auf der Alpennordseite stärker als im Mittel, in der Westschweiz war sie leicht schwächer. Die absoluten Werte sind im Tessin deutlich tiefer als auf der Alpennordseite.

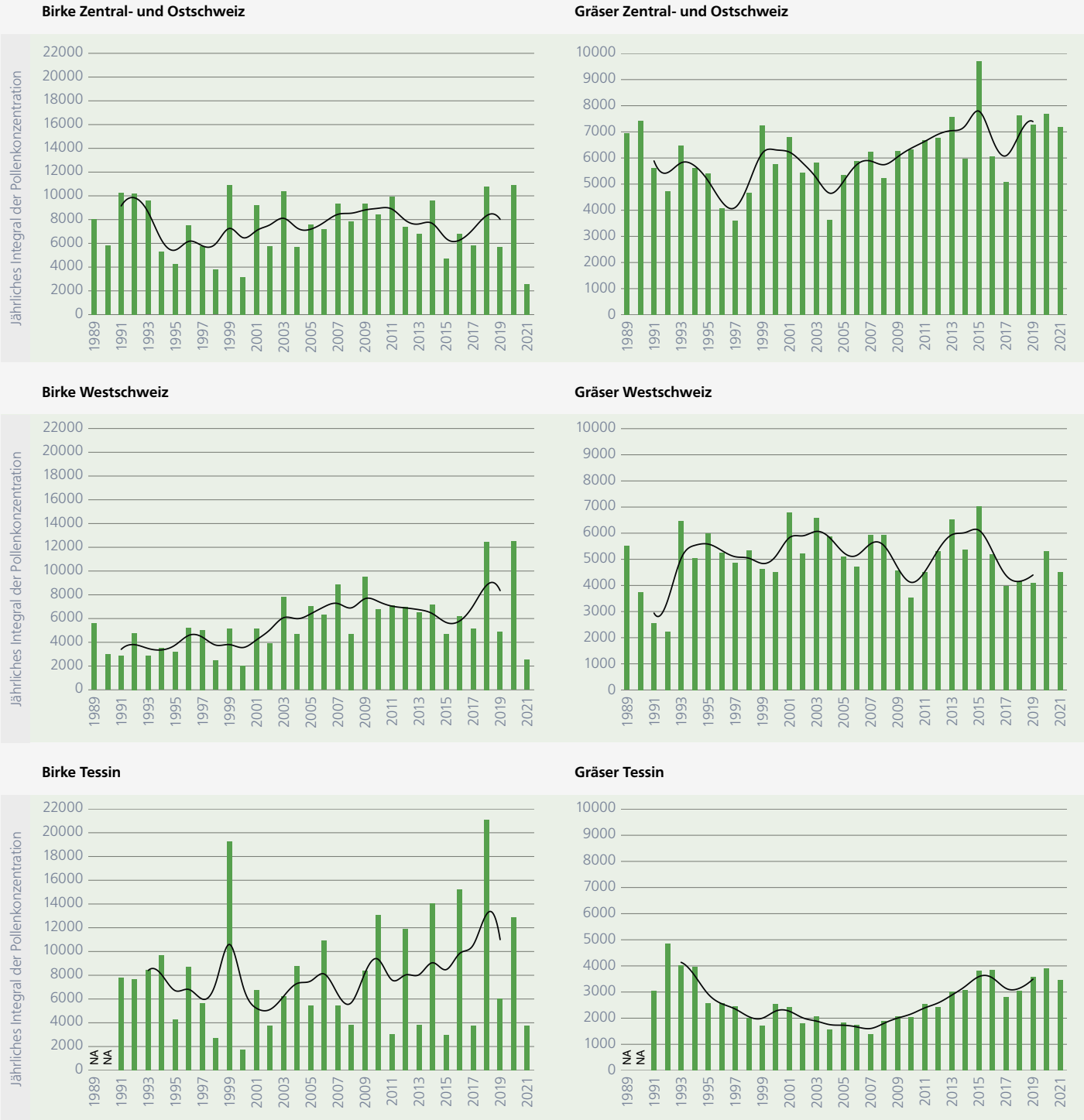


Abbildung 5.21

Intensität des Pollenflugs der Birken (links) und der Gräser (rechts) in den Regionen der Alpennordseite von 1989–2021 und im Tessin von 1991–2021. Das jährliche Pollenintegral ist die Summe der täglichen Pollenkonzentrationen. Die schwarze Linie zeigt das 5-jährige gewichtete Mittel.

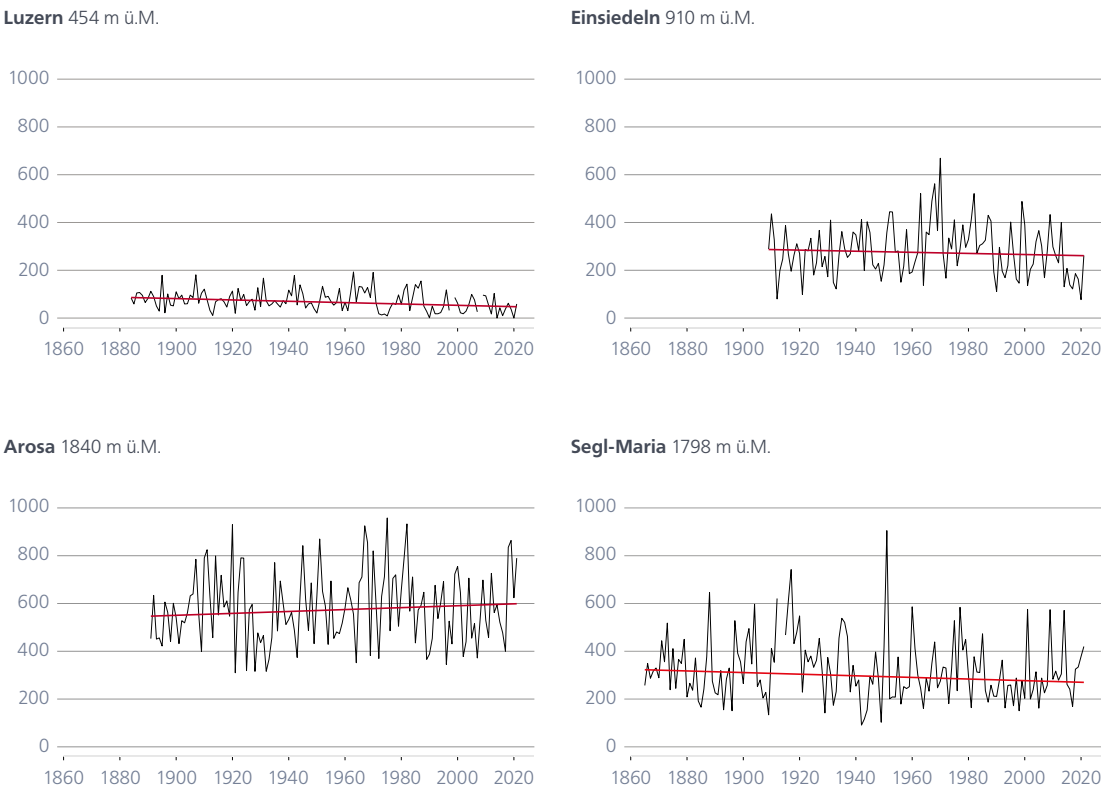
5.2 Landoberfläche

Neuschneesummen

Die niederschlagsreichen und gebietsweise auch schneereichen Monate Dezember 2020 und Januar 2021 sorgten verbreitet für überdurchschnittliche Winterniederschläge. In den Alpen gab es kräftige Neuschneefälle, auf der Alpensüdseite. Auch an den hier gezeigten Messstationen wurden mehrheitlich überdurchschnittliche Neuschneemengen aufgezeichnet. Am Messstandort Arosa fielen insgesamt 7,90 m Neuschnee (Norm 6,31 m). Am Messstandort Segl-Maria erreichte die Neuschneesumme im Winterhalbjahr Oktober bis März 4,20 m (Norm 3,12 m). In Einsiedeln wurden 2,62 m gemessen (Norm 3,41 m). In Luzern reichte es für 59 cm (Norm 83 cm).

Bei den Neuschneesummen im Winterhalbjahr ist an den Messstandorten Segl-Maria, Arosa und Einsiedeln über den gesamten Messzeitraum kein signifikanter Trend feststellbar. In Luzern ist eine signifikante Abnahme um 2,8 cm pro Jahrzehnt zu beobachten. Dabei ist allerdings darauf hinzuweisen, dass die täglichen und monatlichen Schneeaufzeichnungen nicht in Form homogener Daten verfügbar sind. Werden nur die letzten 5–6 Jahrzehnte betrachtet, ist eine generelle Abnahme festzustellen. Für die gesamte Alpenregion zeigt sich ein deutlicher Rückgang der Schneehöhe im Zeitraum zwischen 1971 und 2019 [37]. Dieser Trend ist vor allem an Stationen signifikant, wo ein Übergang von schneebedeckt zu schneefrei erfolgt.

Abbildung 5.22
Neuschneesummen in cm im Winterhalbjahr ab Messbeginn bis 2021 an den Messstationen Luzern, Einsiedeln, Arosa und Segl-Maria. Datenquelle Arosa: MeteoSchweiz, Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos.



Tage mit Neuschnee

Die Anzahl Tage mit Neuschnee im Winter 2020/21 lag an allen hier aufgeführten Messstandorten im Normbereich. Im Winterhalbjahr Oktober bis März waren es am Messstandort Arosa 69 Tage mit Neuschnee (Norm 71 Tage). In Segl-Maria im Oberengadin wurden 46 Tage registriert (Norm 42 Tage). In Luzern gab es an insgesamt elf Tagen messbaren Neuschnee (Norm 18 Tage). Einsiedeln verzeichnete mit 34 Neuschneetagen deutlich weniger als in der Norm (46).

Die Messreihe Arosa zeigt einen signifikanten Trend zu mehr Tagen mit Neuschnee. Er liegt bei ungefähr +1,6 Tagen pro Jahrzehnt. Luzern zeigt demgegenüber mit -0,5 Tagen pro Jahrzehnt einen schwächeren, aber signifikanten Trend zu weniger Tagen mit Neuschnee. An den beiden Messstandorten Einsiedeln und Segl-Maria ist kein signifikanter Trend zu beobachten. Auch hier ist darauf hinzuweisen, dass die täglichen und monatlichen Schneeaufzeichnungen nicht in Form homogener Daten verfügbar sind.

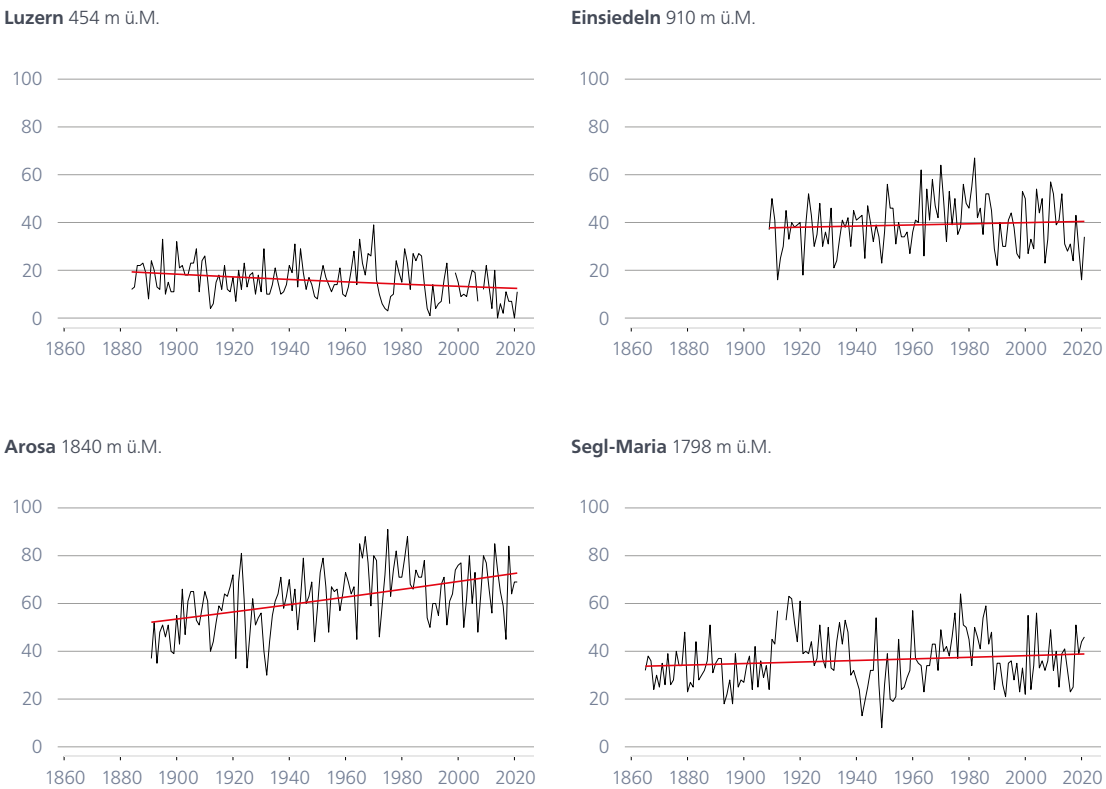


Abbildung 5.23
Anzahl Tage mit Neuschnee im Winterhalbjahr ab Messbeginn bis 2021 an den Messstationen Luzern, Einsiedeln, Arosa und Segl-Maria. Datenquelle Arosa: MeteoSchweiz, Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos.

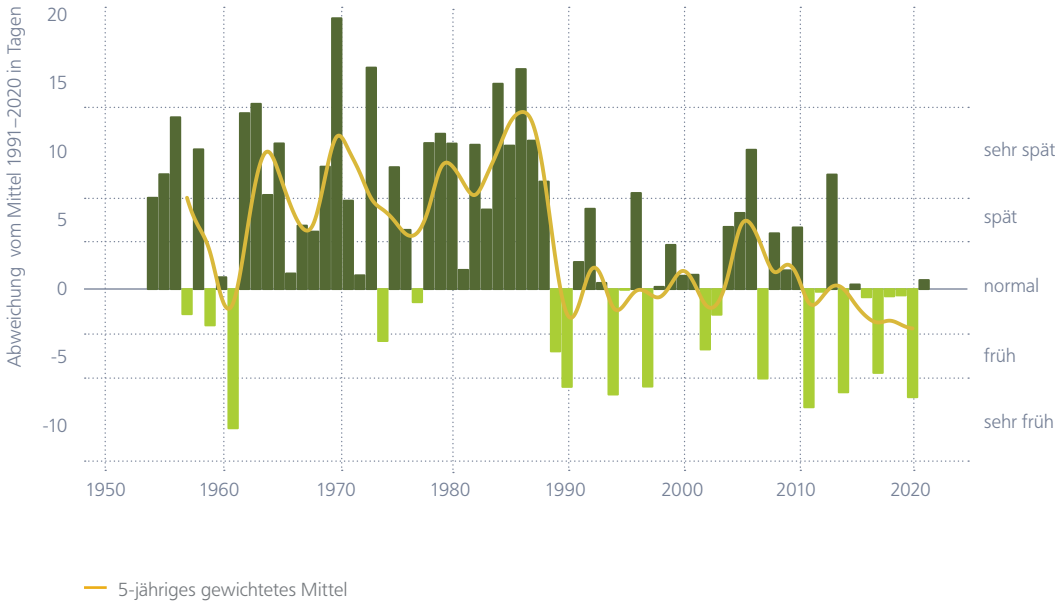
Frühlingsindex

Der Frühlingsindex zeigt den Zeitpunkt der Vegetationsentwicklung im Frühling als Abweichung in Tagen vom langjährigen Mittel 1991–2020. Der jährlich ermittelte Index fasst die phänologischen Frühlingsphasen zusammen. Die Vegetationsentwicklung im Frühling ist hauptsächlich vom Gang der Winter- und Frühlingstemperatur abhängig [26].

Im Jahr 2021 entwickelte sich die Frühlingsvegetation in einem normalen zeitlichen Rahmen. In den Monaten von Februar bis Mitte April war die Vegetation dem mittleren Zeitplan (Mittel 1991–2020) voraus, während ab dann die tiefen Temperaturen dafür sorgten, dass sich vor allem die Blattentfaltung verspätete. Hasel, Huflattich und Buschwindröschen blühten von Februar bis März mit einem Vorsprung von 4–6 Tagen. Bei der Obstbaumblüte und der Blüte des Löwenzahns im April reduzierte sich der Vorsprung auf 1–3 Tage. Ab der zweiten Aprilhälfte trieben die Blätter der Laubbäume aus. Die Blattentfaltung der Buche war aufgrund der tiefen April- und Maitemperatur um sieben Tage verspätet.

Parallel zu den höheren Winter- und insbesondere höheren Frühlingstemperaturen ab Mitte der 1980er Jahre zeigt der Frühlingsindex ab der zweiten Hälfte der 1980er Jahre eine gleichsam sprungartige Verschiebung zu einer früheren Vegetationsentwicklung im Frühling.

Abbildung 5.24
Jährlicher Stand der gesamtschweizerischen Vegetationsentwicklung (Frühlingsindex) 1954–2021 dargestellt als Abweichung in Tagen vom langjährigen Durchschnitt der Periode 1991–2020. Die ausgezogene Linie zeigt das 5-jährige gewichtete Mittel, dunkelgrün sind Jahre mit späterer, hellgrün Jahre mit früherer Vegetationsentwicklung.

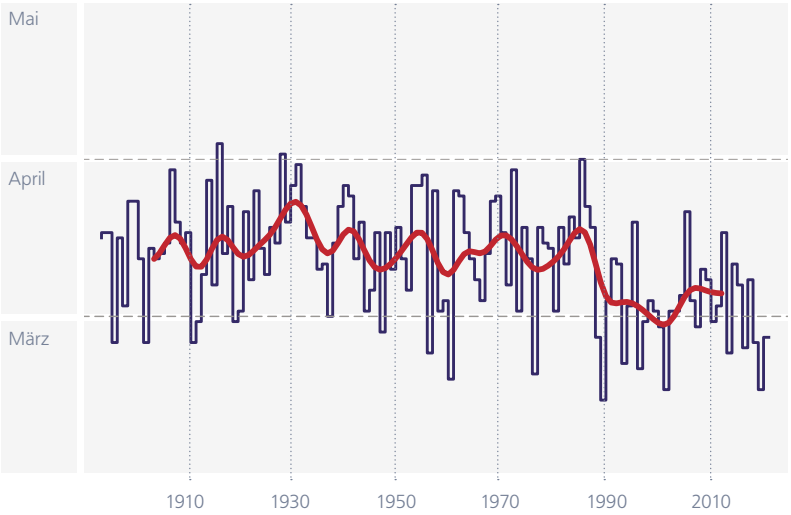


Kirschblüte Liestal und Blattausbruch Rosskastanie Genf

Seit 1894 werden in der Nähe von Liestal, in Liestal-Weideli, die Eintrittsdaten der Blüte eines Kirschbaums registriert. In der Messreihe lässt sich ab etwa 1990 ein Trend zu früheren Eintrittsterminen feststellen. Der Eintrittstermin am 28. März 2021 fand sechs Tage früher statt als im Mittel der Periode 1991–2020, bedingt durch die hohen Temperaturen im Februar und Anfang und Ende März. Im Vergleich mit der gesamten Messperiode lag der diesjährige Termin 15 Tage vor dem mittleren Datum und ist der 15. früheste Termin aller Jahre.

Von grosser Bedeutung ist auch die seit 1808 existierende historische Messreihe des Zeitpunkts des Blattausbruchs der Rosskastanie in Genève. Dies ist die längste phänologische Messreihe der Schweiz. Ab etwa 1900 ist ein deutlicher Trend zu früheren Eintrittsterminen ersichtlich. Im Jahr 2021 fand der Blattausbruch der Rosskastanien am 12. März statt. Der Blattausbruch der Rosskastanie wird sehr stark durch die Temperaturen beeinflusst, aber auch andere Faktoren wie das Baumalter oder das Stadtklima können eine Rolle spielen. Der Grund für die seit einigen Jahren wieder späteren Eintrittstermine ist noch unbekannt.

Kirschbaums



Rosskastanie

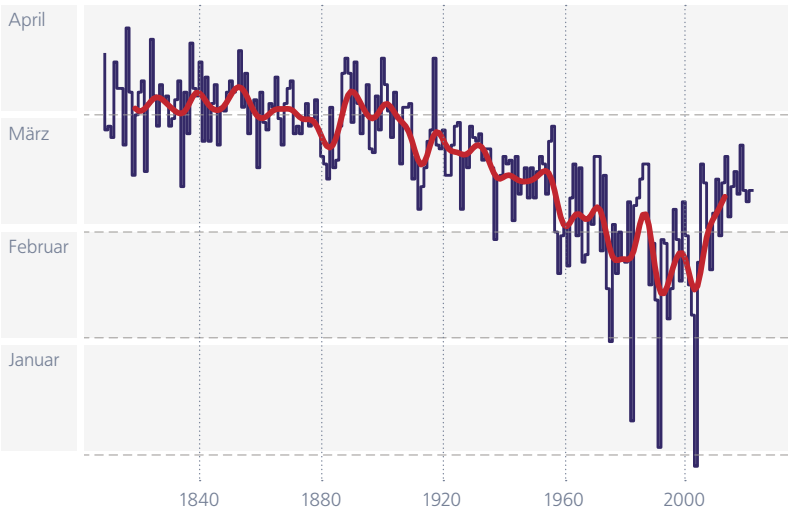


Abbildung 5.25
Oben: Blüte des Kirschbaums bei Liestal 1894–2021 (Quelle: Landw. Zentrum Ebenrain, Sissach und MeteoSchweiz).

Unten: Blattausbruch der Rosskastanie in Genève 1808–2021 (Quelle: Grand Conseil de la République et canton de Genève).

5.3 Datengrundlagen und Methoden

Ausgewählte Klimaindikatoren nach WMO

Die Klimaindikatoren nach WMO werden nach den Regeln und der offiziellen Software des WMO Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) berechnet [15]. Eingangsgrössen sind homogenisierte Reihen ab 1959.

Temperatur

Aufgrund der unterschiedlichen Temperaturregimes auf kleinem Raum (tiefere Temperaturen in Berglagen, höhere Temperaturen im Flachland), wird die Temperaturentwicklung in der Schweiz idealerweise nicht mit absoluten Temperaturen, sondern als Abweichung zum langjährigen Normwert (1961–1990) dargestellt. Das Schweizer Temperaturmittel beschreibt die im Mittel über die gesamte Fläche und die verschiedenen Höhenlagen der Schweiz gemessene Temperatur. Die Daten verschiedener Messstationen aus dem Schweizer Klimanetzwerk (Swiss National Basic Climatological Network; Swiss NBCN [2] werden dazu entsprechend ihrer Repräsentativität kombiniert.

meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/schweizer-temperaturmittel.html

Bei Trendanalysen wird jeweils angegeben, wie eindeutig der Trend ist. Dabei werden die zwei Signifikanzniveaus «stark signifikant» und «signifikant» unterschieden. «Stark signifikant» bedeutet, dass mit sehr grosser Sicherheit gesagt werden, dass ein Trend vorhanden ist (p-Wert ≤0,01; die Irrtumswahrscheinlichkeit ist 1 % oder kleiner). «Signifikant» bedeutet, dass mit grosser Sicherheit gesagt werden, dass ein Trend vorhanden ist (p-Wert >0,01 und ≤0,05; die Irrtumswahrscheinlichkeit liegt zwischen 1 % und 5 %). «Nicht signifikant» bedeutet, dass bezüglich der gewählten Signifikanzschwelle (p-Wert = 0,05) kein gesicherter Trend vorliegt.

Niederschlag

In der Schweiz stehen sich das nordalpine und das südalpine Niederschlagsregime gegenüber, beide mit ihren ganz spezifischen Eigenheiten in der langfristigen Niederschlagsentwicklung. Die Darstellung einer gesamtschweizerischen Niederschlagskurve kann diese wesentlichen regionalen Unterschiede verschleiern. Deshalb wird in diesem Bericht eine Differenzierung zwischen nordalpiner und südalpiner Niederschlagsentwicklung vorgenommen. Eine gesamtschweizerische Niederschlagsentwicklung wird nicht aufgeführt. Die Analysen basieren auf zwölf homogenen Messreihen [27] aus dem Schweizer Klimanetzwerk (Swiss National Basic Climatological Network; Swiss NBCN [2]).

Bei Trendanalysen wird jeweils angegeben, wie eindeutig der Trend ist. Dabei werden die zwei Signifikanzniveaus «stark signifikant» und «signifikant» unterschieden. «Stark signifikant» bedeutet, dass mit sehr grosser Sicherheit gesagt werden, dass ein Trend vorhanden ist (p-Wert ≤0,01; die Irrtumswahrscheinlichkeit ist 1 % oder kleiner). «Signifikant» bedeutet, dass mit grosser Sicherheit gesagt werden, dass ein Trend vorhanden ist (p-Wert >0,01 und ≤0,05; die Irrtumswahrscheinlichkeit liegt zwischen 1 % und 5 %). «Nicht signifikant» bedeutet, dass bezüglich der gewählten Signifikanzschwelle (p-Wert = 0,05) kein gesicherter Trend vorliegt.

Tage mit starkem Niederschlag

Der hier verwendete Begriff «starker Niederschlag» auf der Basis der Schwelle ≥20 mm darf nicht gleichgestellt werden mit seltenen Extremniederschlägen. Ein Tagesniederschlag von 20 mm wird an in den meisten Gebieten der Schweiz jedes Jahr mehrmals registriert. Es handelt sich dabei also um ein häufiges Ereignis. Selten ist ein Niederschlagsereignis, welches nur noch etwa alle zehn Jahre oder seltener zu erwarten ist. In Bern ist dies ab rund 65 mm, in Sion ab 50 mm, in Davos ab 70 mm und in Lugano ab 130 mm Tagesniederschlag der Fall. Der Nachweis von Trends bei Extremereignissen stösst jedoch auf Grund ihrer Seltenheit an grundsätzliche Grenzen. Je seltener Ereignisse sind, umso schwieriger ist es, einen Trend nachzuweisen [28]. Ausführliche Informationen zu seltenen Starkniederschlägen sind zu finden unter:

meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/extremwertanalysen.html

Niederschlag der sehr nassen Tage

Ein Tag gilt als sehr nass, wenn seine Niederschlagssumme grösser ist als die im langjährigen Durchschnitt 18 (5 %) nassesten Tage im Jahr. Als Referenzperiode gelten die Jahre 1961–1990. Dargestellt wird die Gesamtmenge des Niederschlags pro Jahr, welche während der sehr nassen Tage gefallen ist.

Trockenheitsindex

Die Indizes SPI (standardized precipitation index, [29]) und SPEI (standardized precipitation evapotranspiration index, [30]) zeigen die Abweichungen vom mittleren Niederschlag und der mittleren klimatischen Wasserbilanz (Differenz von Niederschlag und potenzieller Verdunstung) an. Positive Werte bedeuten feuchtere und negative Werte trockenere Bedingungen als im Mittel.

Der SPI ist ein Mass für die Niederschlagsanomalie über eine bestimmte Zeitbasis (typischerweise 1–48 Monate) und wird aus monatlichen Niederschlagssummen berechnet. Die kumulierten Niederschläge der vergangenen (1–48) Monate werden dabei mit den entsprechenden Niederschlagssummen zum gleichen Zeitpunkt in der Vergangenheit verglichen. Dafür wird die Verteilung dieser Niederschlagssummen in eine Standardnormalverteilung um Null transformiert. Der so transformierte Wert einer bestimmten Niederschlagssumme ist der SPI-Wert.

Der SPEI wird analog zum SPI berechnet, anstelle der Niederschlagssummen über eine bestimmte Zeitdauer wird aber die klimatische Wasserbilanz benutzt. Die klimatische Wasserbilanz entspricht dem Niederschlag abzüglich der potenziellen Evapotranspiration. Der SPEI ist also die auf Standardnormalverteilung transformierte Wasserbilanz.

Entsprechend der Definition der Standardnormalverteilung entsprechen Bedingungen mit einem SPI/SPEI von weniger als -1 einer Häufigkeit von gut 15 %, solche mit einem Wert unter -2 einer von gut 2 %. Entsprechend kann die Trockenheit oder der Wasserüberschuss mit den Indizes in folgende Klassen eingeteilt werden:

	SPEI	≤ -2,0	extrem trocken
-2,0	<SPEI	≤ -1,5	sehr trocken
-1,5	<SPEI	≤ -1,0	trocken
-1,0	<SPEI	< 1,0	normal
1,0	≤SPEI	< 1,5	nass
1,5	≤SPEI	< 2,0	sehr nass
	SPEI	≥ 2,0	extrem nass

Nullgradgrenze in der freien Atmosphäre

Unter normalen atmosphärischen Bedingungen nimmt die Lufttemperatur von der Erdoberfläche aus mit zunehmender Höhe ab. Ist die Temperatur am Boden positiv, so befindet sich in der Höhe eine Fläche, auf welcher die Temperatur 0 °C beträgt. Über dieser Fläche nimmt die Temperatur negative Werte an. Die jeweilige Höhe, auf welcher sich die Grenze zwischen positiven und negativen Temperaturen befindet, nennen wir die Höhe der Nullgradgrenze. Bei Inversionen bei denen die Nullgradgrenze zweimal oder gar dreimal durchschnitten wird, wird laut WMO Richtlinien in der Regel der oberste Schnittpunkt als effektive Höhe der Nullgradgrenze genommen. Um auch bei negativen Temperaturen am Boden vergleichbare Zahlen über die Höhe der Nullgradgrenze zu erhalten, wird bei solchen Wetterlagen ein theoretischer Wert ermittelt. Von der in der Sondierung angegebenen Bodentemperatur wird eine fiktive unter der Erdoberfläche gelegenen Höhe, beziehungsweise Tiefe der Nullgradgrenze errechnet, indem ein mittlerer vertikaler Temperaturgradient von 0,5 °C pro 100 m angenommen wird. Auf diese Weise ergeben sich Nullgradgrenzen, welche unter der Oberfläche, bei Bodentemperaturen von -2,5 °C oder tiefer, sogar unter dem Meeres Niveau liegen und somit negativ sind [31]. Die Höhe der Nullgradgrenze ist im Bericht jedes Radiosonden-Aufstieges enthalten. Aus diesen Werten werden Monatsmittel errechnet, welche dann für die Berechnung von Klimatrends verwendet werden.

Tropopausenhöhe

Die Tropopausenhöhe entspricht dem tiefsten Niveau in der Atmosphäre, welches eine Abkühlungsrate von 2 °C oder weniger pro Kilometer zeigt (0,2 °C pro 100 m). Zusätzlich gilt die Bedingung, dass in einer 2 km dicken Schicht über diesem Niveau die Abkühlungsrate von 2 °C pro km nicht überschritten wird.

Vegetationsentwicklung

Die Beobachtung der einzelnen phänologischen Phasen wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten begonnen. Phasen, die seit 1951 beobachtet werden, werden jeweils mit der Normperiode 1991–2020 verglichen. Phasen, die seit 1996 beobachtet werden, werden mit der ganzen verfügbaren Datenreihe von 1996 bis zum Vorjahr des aktuellen Jahres verglichen. Zu Letzteren gehören insbesondere die Phasen zum Blühbeginn und jene zur Blattverfärbung von vielen Bäumen. Im Text ist jeweils erwähnt, auch welche Referenzperiode Bezug genommen wird.

Pollensaison und Pollenintensität

Die aktuelle Pollensaison wird mit dem 20-jährigen Mittel 1997–2016 verglichen. Der Grund dafür ist, dass die einzelnen Stationen einen sehr unterschiedlichen Messbeginn aufweisen, von 1969 in Basel bis 1997 in Lausanne.

Das jährliche Pollenintegral (Pollen/m^3 Tag) berechnet sich aus der mittleren täglichen Pollenkonzentration pro m^3 Luft. Diese Zahl wird für das ganze Jahr aufsummiert.

Verwendete Pollenmessstationen für die Grafik Pollenintensität: Zentral- und Ostschweiz: Basel, Buchs, Luzern, Münsterlingen und Zürich. Westschweiz: Bern, Genève, Neuchâtel. Tessin: Locarno und Lugano.

Neuschneesummen und Tage mit Neuschnee

Die täglichen und monatlichen Schneeaufzeichnungen sind nicht in Form homogener Daten verfügbar. Die Homogenisierung von Schneedaten konnte bisher noch nicht an die Hand genommen werden. Die Interpretation der Messreihen ist deshalb mit der gebotenen Vorsicht vorzunehmen.

Frühlingsindex

Der Stand der Vegetationsentwicklung wird mit Hilfe von phänologischen Phasen erfasst. Die Phänologie befasst sich mit den im Jahresablauf periodisch wiederkehrenden Entwicklungserscheinungen in der Natur. Phänologische Beobachtungen werden an rund 160 Stationen verteilt über die ganze Schweiz durchgeführt. Für den Frühlingsindex werden rund 80 Stationen mit den längsten Messreihen verwendet.

Der hier verwendete Frühlingsindex wird auf der Basis der zehn folgenden phänologischen Phasen gebildet: Blüte des Haselstrauchs, Blüte des Huflattichs, Blüte des Buschwindröschens, Blattentfaltung der Rosskastanie, Blüte des Kirschbaumes, Blattentfaltung des Haselstrauchs, Nadelaustrieb der Lärche, Blüte des Wiesenschaumkrautes, Blattentfaltung der Buche und Blüte des Löwenzahns.

Die einzelnen phänologischen Phasen sind vom Gang der Witterung abhängig. So kann die Blüte des Haselstrauchs bei einem milden Winterende früh eintreten, während eine nachfolgende länger dauernde Kaltperiode den Fortschritt der Vegetationsentwicklung wieder hemmt. Die Vegetationsentwicklung ist zudem von der Höhenlage abhängig. An tief gelegenen Beobachtungsstandorten mit milden Verhältnissen treten die phänologischen Phasen früher ein als in höheren Lagen mit kühlen Verhältnissen. Mit Hilfe der Hauptkomponentenanalyse werden diese umfangreichen Beobachtungsdaten strukturiert, vereinfacht und zur Veranschaulichung zu einem gesamtschweizerischen Frühlingsindex zusammengefügt [26].

Referenzen

[1] Bader S., Burgstall A., Casanueva A., Duguay-Tetzlaff A., Gehrig R., Gubler S., Kotlarski S., Scherrer S., Spirig C., 2018: Hitze und Trockenheit im Sommerhalbjahr 2018 – eine klimatologische Übersicht. Fachbericht MeteoSchweiz, 272, 38 pp.

[2] Begert M., Seiz G., Foppa N., Schlegel T., Appenzeller C., Müller G., 2007: Die Überführung der klimatologischen Referenzstationen der Schweiz in das Swiss National Climatological Network (Swiss NBCN). Arbeitsbericht MeteoSchweiz, 215.

[3] IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

[4] Collaud Coen M., Andrews E., Alastuey A., Arsov T. P., Backman J., Brem B. T., Bukowiecki N., Couret C., Eleftheriadis K., Flentje H., Fiebig M., Gysel-Beer M., Hand J. L., Hoffer A., Hooda R., Hueglin C., Joubert W., Keywood M., Kim J. E., Kim S.-W., Labuschagne C., Lin N.-H., Lin Y., Lund Myhre C., Luoma K., Lyamani H., Marinoni A., Mayol-Bracero O. L., Mihalopoulos N., Pandolfi M., Prats N., Prenni A. J., Putaud J.-P., Ries L., Reisen F., Sellegri K., Sharma S., Sheridan P., Sherman J. P., Sun J., Titos G., Torres E., Tuch T., Weller R., Wiedensohler A., Zieger P., and Laj P.: Multidecadal trend analysis of aerosol radiative properties at a global scale, Atmos. Chem. Phys. Discuss (in review, 2020):
doi.org/10.5194/acp-2019-1174

[5] Collaud Coen M., Weingartner E., Furger M., Nyeki S., Prévôt A. S. H., Steinbacher M. and Baltensperger U., 2011: Aerosol climatology and planetary boundary influence at the Jungfraujoch analyzed by synoptic weather types. Atmos. Chem. Phys., 11, 5931-5944, doi: 10.5194/acp-11-5931-2011.

[6] MeteoSchweiz, 2018: Der Wintersturm Burglind/Eleanor in der Schweiz, Fachbericht MeteoSchweiz, 268, 35 pp.

[7] MeteoSchweiz: 2018, Hitze und Trockenheit im Sommerhalbjahr 2018 – eine klimatologische Übersicht. Fachbericht MeteoSchweiz, 272, 38 pp.

[8] NCCS (Hrsg.), 2018: CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz. National Centre for Climate Services, Zürich. 24 S. ISBN-Nummer 978-3-9525031-0-2:
klimaszenarien.ch

[9] WMO 2018: WMO Statement on the status of the global climate in 2018:
public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate

[10] NOAA National Centers for Environmental Information, State of the Climate: Global Climate Report for Annual 2019, published online January 2020, retrieved on January 29, 2020 from:
ncdc.noaa.gov/sotc/global/201913

[11] C. P. Morice, J. J. Kennedy, N. A. Rayner, J. P. Winn, E. Hogan, R. E. Killick, R. J. H. Dunn, T. J. Osborn, P. D. Jones and I. R. Simpson (in press). An updated assessment of near-surface temperature change from 1850: the HadCRUT5 dataset. Journal of Geophysical Research (Atmospheres) doi:10.1029/2019JD032361:
metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut5/data/current/download.html

[12] MEI-Daten unter:
esrl.noaa.gov/psd/enso/mei

[13] Seiz G., Foppa N., 2007: Nationales Klima-Beobachtungssystem (GCOS Schweiz). Publikation von MeteoSchweiz und ProClim, 92 S.:
meteoschweiz.admin.ch/home/suche.subpage.html/de/data/publications/2007/10/nationales-klima-beobachtungssystem.html

[14] WMO, 2003: GCOS-82. Second Report on the Adequacy of the Global Observing Systems for Climate in Support of the UNFCCC. WMO TD 1143.

[15] wmo.int/pages/prog/wcp/wcdmp/CA_3.php
wmo.int/pages/prog/wcp/wcdmp/documents/WCDMP_72_TD_1500_en_1.pdf

[16] Wright W., 2012: Discussion paper on the calculation of the standard Climate normals: a proposal for a dual system:
wmo.int/pages/prog/wcp/wcdmp/GCDS_1.php
wmo.int/pages/prog/wcp/wcdmp/documents/Rev_discussion_paper_May2012.pdf

[17] Beniston M., 1997: Variations of snow depth and duration in the swiss alps over the last 50 years: Links to changes in large-scale climatic forcings, Climatic Change 36 (1997), 281–300.

[18] Scherrer S. C., Appenzeller C., Laternser M., 2004: Trends in Swiss Alpine snow days: The role of local- and large-scale climate variability. Geophys. Res. Lett., 31, L13215, doi: 1029/2004GL020255.

[19] Laternser M., Schneebeli M., 2003: Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931–99). International Journal of Climatology 23: 733–750.

[20] Marty C, 2008: Regime shift of snowdays in Switzerland, Geophys. Res. Lett. 35, L12501, doi: 10.1029/2008GL033998.

[21] Wüthrich C., 2008: Lange Schneemessreihen der Schweiz, Aufarbeitung der längsten Schneemessreihen und Trendanalyse ausgewählter Schneeparameter, Geographisches Institut der Universität Bern, Diplomarbeit.

[22] Scherrer S. C., Fischer E. M., Posselt R., Liniger M. A., Croci-Maspoli M. and Knutti R., 2016: Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland, J. Geophys. Res. Atmos., 121, doi: 10.1002/2015JD024634.

[23] Calanca, P., 2007: Climate change and drought occurrence in the Alpine region: How severe are becoming the extremes? Global and Planetary Change, 57, 1–2, 151–160. doi: 10.1016/j.gloplacha.2006.11.001.

[24] Pfister, C., Rutishauser, M., 2000: Dürresommer im Schweizer Mittelland seit 1525. Workshopbericht «Trockenheit in der Schweiz», Organe Consultatif sur les Changements Climatiques (OcCC), Bern. 17 S. und 2 Anhänge:
occc.ch/reports_d.html

[25] Favaro G., Jeannet P., Stübi R., 2002: Re-evaluation and trend analysis of the Payerne ozone soundings. Veröffentlichungen der MeteoSchweiz Nr. 63. MeteoSchweiz, Zürich.

[26] Studer S., Appenzeller C. and Defila C., 2005: Inter-annual variability and decadal trends in Alpine spring phenology: A multivaritae analysis approach. Climatic Change 73: 395–414.

[27] Begert M., Seiz G., Schlegel T., Musa M., Baudraz G., Moesch M., 2003: Homogenisierung von Klimamessreihen der Schweiz und Bestimmung der Normwerte 1961–1990. Schlussbericht des Projekts NORM90. MeteoSchweiz, Zürich.

[28] Frei C. and Schär C., 2001: Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitations in the Alpine region. Journal of climate 14: 1568–1584.

[29] McKee T. B., Doesken N. J., Kleist J., 1993: The relationship of drought frequency and duration to time scales, Proc. 8th Conf. on Applied Climatology, Jan. 17–22, American Meteorological Society, Boston, pp. 179–184.

[30] Vicente-Serrano S., Bugueria S., Lopez-Moreno J., 2010: A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, J of Climate, 23, 1696–1718, doi: 10.1175/2009JCLI2909.1.

[31] Güller A., 1979: Die Nullgradgrenze in der Schweiz 1951–1978, nach den Radiosondierungen von Payerne. Klimatologie in der Schweiz, Heft 21/0. Beiheft zu den Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Anstalt (Jahrgang 1978).

[32] Scott C. Sheridan, Cameron C. Lee. Temporal Trends in Absolute and Relative Extreme Temperature Events Across North America. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018; doi: 10.1029/2018JD029150.

[33] Isaksen I., Hesstvedt E. and Stordal F., Influence of stratospheric cooling from CO_2 on the ozone layer. Nature 283, 189–191 (1980) doi: 10.1038/283189a0.

[34] Humpage N., Boesch H., Palmer P. I., Vick A., Parr-Burman P., Wells M., Pearson D., Strachan J. and Bezawada N.: Green-House gas Observations of the Stratosphere and Troposphere (GHOST): an airborne shortwave-infrared spectrometer for remote sensing of greenhouse gases, Atmos. Meas. Tech., 11, 5199–5222:
doi.org/10.5194/amt-11-5199-2018, 2018

[35] Philipona R., Mears C., Fujiwara M., Jeannet P., Thorne P., Bodeker G., Haimberger L., Hervo M., Popp C., Romanens G., Steinbrecht W., Stübi R., Van Malderen R., (2018) Radiosondes show that after decades of cooling the lower stratosphere is now warming. J. Geophys Res 123(22): 12–509.

[36] Scherrer S. C, Hirschi M., Spirig C., Maurer F., Kotlarski S.: Trends and drivers of recent summer drying in Switzerland. Environ. Res. Commun:
doi.org/10.1088/2515-7620/ac4fb9

[37] M. Matiu, A. Crespi, G. Bertoldi, C. M. Carmagnola, C. Marty, S. Morin, W. Schöner, D. Cat Berro, G. Chiogna, L. De Gregorio, S. Kotlarski, B. Majone, G. Resch, S. Terzago, M. Valt, W. Beozzo, P. Cianfarra, I. Gouttevin, G. Marcolini, C. Notarnicola, M. Petitta, S. C. Scherrer, U. Strasser, M. Winkler, M. Zebisch, A. Cicogna, R. Cremonini, A. Debernardi, M. Faletto, M. Gaddo, L. Giovannini, L. Mercalli, J.-M. Soubeyroux, A. Susnik, A. Trenti, S. Urbani, V. Weilguni: Observed snow depth trends in the European Alps: 1971 to 2019. The Cryosphere, 15, 1343–1382, 2021:
tc.copernicus.org/articles/15/1343/2021

[38] Scherrer S.C., Hirschi M., Spirig C., Maurer F. and Kotlarski S., 2022: Trends and drivers of recent summer drying in Switzerland, Environ. Res. Commun., 4, 025004:
doi.org/10.1088/2515-7620/ac4fb9

Adressen
Bundesamt für Meteorologie
und Klimatologie MeteoSchweiz
Operation Center 1
Postfach
CH-8058 Zürich-Flughafen

Ufficio federale di meteorologia
e climatologia MeteoSvizzera
Via ai Monti 146
CH-6605 Locarno-Monti

Office fédéral de météorologie
et de climatologie MétéoSuisse
7bis, av. de la Paix
CH-1211 Genève 2

Office fédéral de météorologie
et de climatologie MétéoSuisse
Chemin de l'Aérologie
CH-1530 Payerne

Website
meteoschweiz.admin.ch

Kontakt
kundendienst@meteoschweiz.ch

printed in
switzerland

PRINTED MATTER
CO_2 NEUTRAL
by Swiss Climate
SC2021070701