

Klimawandel in Graubünden und Umgebung von 1905 bis 2019 in zeitlicher Auflösung von Monatswerten : Temperatur, Schnee, Niederschlag und Trockenheit

Autor(en): **Thudium, Jürg / Chélala, Carine**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Jahresbericht der Naturforschenden Gesellschaft Graubünden**

Band (Jahr): **121 (2020)**

PDF erstellt am: **29.06.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-880912>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Klimawandel in Graubünden und Umgebung von 1905 bis 2019 in zeitlicher Auflösung von Monatswerten: Temperatur, Schnee, Niederschlag und Trockenheit

von Jürg Thudium und Carine Chélala

Oekoscience AG
PF 452
7001 Chur

Oekoscience AG
Mittenwaldweg 9
A-6020 Innsbruck
www.oekoscience.ch

Zusammenfassung

Verschiedene Untersuchungen zeigen, dass die mittleren Jahres- und Saisontemperaturen auf der Erde, in der Schweiz und auch in Graubünden zugenommen haben. In dieser Studie wird die Klimaänderung in Graubünden und Umgebung mit feinerer zeitlicher Auflösung untersucht: Die Werte von Temperatur, Niederschlag und Schneehöhe der einzelnen Monate werden in ihrem langjährigen Trend betrachtet. Die globalen Zirkulationsmuster der Atmosphäre verharren kaum je über eine ganze Jahreszeit, und es ist auch selten, dass alle Monate einer Jahreszeit den gleichen Witterungscharakter aufweisen.

Für diese Arbeit wurden monatliche Messwerte der Stationen Andermatt, Arosa, Chur, Davos, Ftan, Grono, Lugano, Maloja, Säntis, Sils-Maria, Splügen und Zuoz verwendet. Für Temperaturen und Niederschlag umfassen die Daten die letzten 115 Jahre von 1905 bis 2019, im Falle der Schneehöhe die letzten 67 Jahre von 1952 bis 2019.

Die Jahresmittel der Temperaturerhöhung liegen grundsätzlich im Bereich der Ergebnisse aus anderen Studien (1,6–1,9 °C pro 100 Jahre). Überraschend ist

der wellige Jahresverlauf der Temperaturerhöhung, vor allem von April bis Januar. Die Erwärmung hängt stark vom jeweiligen Monat ab, und es gibt systematisch im Mittel über 115 Jahre grosse Unterschiede zwischen aufeinanderfolgenden Monaten.

Über das ganze Jahr gesehen haben sich die Niederschlagsmengen kaum geändert (etwa –0,2% pro 100 Jahre ohne Säntis). Diese kleine Abnahme ist zufällig. Die Monatssummen änderten sich mehr über die 115 Jahre, aber nirgends signifikant.

Es zeigen sich überall markante Abnahmen der durchschnittlichen Schneehöhe. Prozentual sind die Abnahmen im Früh- und Spätwinter am grössten. Für den gesamten Winter (Dezember bis März) betragen sie bei allen Stationen –20% bis –30%.

Für Graubünden kann keine im Laufe der Zeit zunehmende klimatische Jahres- oder Sommertrockenheit ausgemacht werden. Das Auftreten von Jahren mit Trockensommern mit einem Niederschlagsdefizit von mindestens 30% zeigt keine zunehmende Häufung im Laufe der Zeit, temporäre Häufungen aber schon.

Die Bodentrockenheit hat hingegen wegen der zunehmenden Verdunstung infolge der Erwärmung zugenommen. Hitzesommer zeigen sich deutlich in

den Indikatoren der Bodentrockenheit. Besonders ist dies an den Standorten zu sehen, die schon immer trockener waren: Im Churer Rheintal und im Domleschg. Erhöhte Stickstoffdepositionen aus dem Niederschlag und der Luft erhöhen die Wirkungen von Trockenstress auf den Wald.

Schlagworte: Klimawandel, Temperaturerhöhung, Niederschlag, Trockenheit, Schneehöhe

Summary

Climate change in Grisons and vicinity from 1905–2019 in a temporal level of monthly merits: Temperature, snow, precipitations and dryness.

Since the nineties the global warming has been a very current topic. In many surveys, it has been proved that the yearly or seasonal mean temperature has increased on the earth level but also in Switzerland and in the Grisons.

In this study, the climate change in Grisons and vicinity is investigated in a finer temporal level, in monthly merits. Trends have been calculated from the data series of temperature, precipitation and snow height of each month. The global atmosphere circulation does not persist for a whole season and the weather character changes from month to month in the same season. Also, the possibilities of analysis of the snow height can be enhanced at a monthly level as of a yearly one.

The monthly merits of the measuring stations at Andermatt, Arosa, Chur, Davos, Ftan, Grono, Lugano, Maloja, Säntis, Sils-Maria, Splügen and Zuoz were used in this survey. It involves temperature und precipitations data analysis for the last 115 years (1905–2019) and snow height data for the last 67 years (1952–2019). The extreme winter of 1951 was not considered in this study. Shorter time rows were renounced. It is about homogenized data rows for the measuring stations of Davos, Lugano, Säntis and Sils-Maria. The trends were determined in accordance with statistic standards.

The results of this study for the temperature increase lie fundamentally in the area of the results from other studies. The yearly mean temperature in Grisons and vicinity increases of 1.6–1.9 °C per 100 years.

However, surprising is the wavy annual course of the temperature rise from April to January. The increase strongly depends on the respective month, and there are systematically differences between succeeding months in the average of the 115 consid-

ered years. As an average of all measuring stations together, is the increase in May and September most slightly, and in July, August and October most largely. During winter time (from January to March), the temperature rise is less uniform between the measuring stations.

As an average of the whole year, the amounts of precipitation have not strongly changed. In the considered 6 measuring stations (without the mountain station Säntis), the annual amount of precipitation has decreased on an average about –0.2% per 100 years. This slightly decreasing result is random.

The monthly amounts of precipitations changed more over the 115 years, but not significantly. From March to October the annual wave course of the temperature changes (variation per 100 years) are contrarily to the annual wave course of the precipitation changes (variation per 100 years). In fact, more precipitation in this season means also more clouds, less irradiation and, therefore, a weakened temperature rise. It is true the other way around as well.

In Grisons, the snow height has essentially decreased. On average over all stations, the percentage drop in snow height goes from approximately –60% in November to about –15% in February and further on to about –50% in April. It is striking that the percentage variation in snow heights for all stations throughout the winter changes in a relatively narrow band, despite varying altitude, region and location. For whole winter (from December to March) the average of snow height declines from –20% to –30%.

For Grisons, no increasing climatic dryness for the whole year or summer can be identified over time. The occurrence of years with dry summers with a precipitation deficit of at least 30% shows no increasing accumulation over time, but temporary accumulation does exist. Based on the measurements taken over the last 140 years, it is not possible to expect an increase in climatic dryness in the Grisons and vicinity, even for the vegetation growing period.

The annual average outflow of the Rhine fluctuates significantly, but has remained constant on average over the last 100 years. Also, the restraint of the equally constant precipitation in the soil has consequently not changed either.

On the other hand, soil dryness has increased due to increasing evaporation due to warming. Extreme heat summers are clearly reflected in the indicators of soil dryness. Also, after 2003, soil dryness has also increased slightly outside the hot summers, despite constant precipitation, but due to warming. This is particularly evident in the locations that have always been drier: in the Rhine Valley of Chur and in the

Domleschg. Moreover, increased nitrogen deposition from precipitation and air pollution increases the effects of drought-stress on forests.

Key words: climate change, global warming, precipitations, dryness, snow height

1 Einleitung

Seit den 1990er-Jahren ist die Klimaerwärmung ein immer aktuelleres Thema geworden. Eine Zusammenstellung verschiedener weltweiter Phänomene der Klimaerwärmung erschien im fünften Sachstandsbericht des IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change; IPCC 2014). Danach haben sich die global gemittelten Land- und Ozean-Oberflächentemperaturen über den Zeitraum 1880 bis 2012 um 0,85 °C erhöht. Über dem Land sind die Temperaturerhöhungen generell grösser als über den Ozeanen. Der Bericht bestätigt, dass die Erwärmung des Klimasystems eindeutig ist und dass mit 95% Sicherheit die zunehmenden Treibhausgasemissionen die Hauptursache der beobachteten Erwärmung seit Anfang des 20. Jahrhunderts sind (IPCC 2014).

Über die Folgen der Erwärmung allgemein und speziell im Kanton Graubünden gibt es mehrere Publikationen (z. B. BADER, BANTLE 2004, CORTESI et al. 2005, REBETEZ, REINHARD 2008, CEPPI et al. 2012, METEOSCHWEIZ 2012, IPCC 2014).

In «Brennpunkt Klima Schweiz» (AKADEMIEN DER WISSENSCHAFTEN SCHWEIZ 2016) wird die mittlere Temperaturerhöhung in der Schweiz seit 1864 mit 1,8 °C angegeben. Im «Klimabericht Kanton Graubünden 2012» von METEOSCHWEIZ (2012) wird die Temperaturerhöhung pro Jahrhundert an drei ausgewählten Stationen zwischen 1900 und 2011 mit 1,2–1,7 °C angegeben. Dabei wurden keine deutlichen Unterschiede zwischen den vier Jahreszeiten festgestellt, jedoch eine geringere Erwärmung in Sils-Maria als Station in der Südalpenregion. Beim Niederschlag konnte mit Ausnahme einer Abnahme in Sils-Maria im Frühjahr keine langfristige signifikante Änderung des mittleren Niederschlags nachgewiesen werden. Im Weiteren wurden signifikante Abnahmen verschiedener Indikatoren für Schnee (Tage mit Schneedecke, maximale Gesamtschneehöhe, Neuschneesummen) festgestellt.

In dieser Studie wird die Klimaänderung in Graubünden und Umgebung mit feinerer zeitlicher Auflösung untersucht. Die Werte der einzelnen Monate werden in ihrem langjährigen Trend betrachtet. Die globalen Zirkulationsmuster der Atmosphäre verharren kaum je über eine ganze Jahreszeit, und es ist

auch selten, dass alle Monate einer Jahreszeit den gleichen Witterungscharakter aufweisen. Könnte es also sein, dass sich die Trends benachbarter Monate auch über mehr als 100 Jahre deutlich unterscheiden? Solche Erkenntnisse könnten auch für den Themenkomplex «Folgen, Anpassung und Verwundbarkeit» bezüglich Klimawandel von Interesse sein, gerade für eine Gebirgsregion. Ebenso ist der Schnee eine an sich kurzlebige Sache, und die zeitliche Auflösung nach Monatswerten erscheint aufschlussreicher als Gesamtjahresaussagen.

In der Publikation «Monthly air temperature trends in Switzerland 1901–2000 and 1975–2004» (REBETEZ, REINHARD 2008) wurden ebenfalls Klimatrends auf Basis von Monatswerten untersucht. Es wurden zwölf homogenisierte Temperaturreihen der gesamten Schweiz betrachtet. In der vorliegenden Arbeit wurde der Fokus regional auf Graubünden gelegt, und es wurden die Klimaelemente Niederschlag, Trockenheit und Schneehöhe einbezogen.

Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit war eine Veröffentlichung der Naturforschenden Gesellschaft Graubünden (CORTESI et al. 2005) unter der Leitung von Jürg Thudium, welche die erste mit zeitlicher Auflösung in Monaten war.

2 Methodik

Für diese Arbeit wurden monatliche Messwerte der Stationen Andermatt, Arosa, Chur, Davos, Ftan, Gorno, Lugano, Maloja, Säntis, Sils-Maria, Splügen und Zuoz verwendet. Sie stammen aus der Datenbank von MeteoSchweiz. Die Schneeedaten von Andermatt, Ftan, Maloja, Splügen und Zuoz kommen aus der Datenbank des WSL-Instituts für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) Davos (Abb. 1). Für Temperatur und Niederschlag umfassen die Daten die letzten 115 Jahre von 1905 bis 2019, im Falle der Schneehöhe grundsätzlich die letzten 67 Jahre von 1952 bis 2019. Auf wesentlich kürzere Zeitreihen wurde verzichtet. Bei Davos, Lugano, Säntis und Sils-Maria handelt es sich um homogenisierte Datenreihen bezüglich Temperatur und Niederschlag (die Auswirkungen allfällig unterschiedlicher Messbedingungen wurden ermittelt und bereinigt), die zum Zweck der Vergleichbarkeit von MeteoSchweiz erarbeitet wurden. Auch bei den anderen Stationen sind Tendaussagen möglich, wenn sie auch mit mehr Vorsicht zu interpretieren sind.

Die Datenbasis besteht aus Monatsmitteln (Temperatur und Schneehöhe) bzw. Monatssummen (Niederschlag, Neuschnee). Die jahreszeitlichen Effekte wurden präziser als bisher aufgelöst, indem



Abb. 1: Karte mit den für die vorliegende Arbeit berücksichtigten Wetterstationen (Karte: swisstopo [JA100040]).

für jeden einzelnen Monat der Trend von 1905 bis 2019 (Schneehöhe und Neuschnee von 1952 bis 2019) bestimmt wurde. Trendbestimmung bedeutet hier, dass die durchschnittliche Änderung der Monatswerte pro Jahr mittels linearer Regression ermittelt wurde.

Ein signifikanter bzw. hochsignifikanter Trend wird postuliert, wenn die statistische Irrtumswahrscheinlichkeit p , dass also die gefundene zeitliche Änderung nur zufällig ist, kleiner als 5% bzw. 1% ist. Zudem muss der Shapiro-Wilk-Test erfüllt sein. Dabei wird auch geprüft, ob der Trend über den gesamten Zeitraum linear ist (und nicht etwa z. B. immer mehr zunimmt).

Es werden alle vorgefundenen Änderungen der Klimaelemente über die letzten 115 bzw. 67 Jahre im monatlichen Jahresverlauf gezeigt, unabhängig von der Signifikanz eines Trends. Die signifikanten Trends werden separat ausgewiesen.

Im Folgenden wird die Trendermittlung an zwei sehr interessanten Beispielen gezeigt: dem Verlauf der Schneehöhe in Arosa im Februar und April (Abb. 2) und dem Verlauf der Temperatur in Davos im Januar (Abb. 3).

Die Irrtumswahrscheinlichkeit p , d.h. dass die gefundene Abnahme der Schneehöhe in Arosa sich nur zufällig ergeben hat, ist 7,4% (Februar) bzw. 0,4% (April). Der Shapiro-Wilk-Test zur Normalverteilung ist für beide Monate erfüllt. Es handelt sich also um einen hoch signifikanten Trend für den April ($p < 1\%$), im Februar nur knapp signifikant ($p < 5\%$). Es ist zu erkennen, dass die mittlere Schneehöhe in den 1950er-Jahren in beiden Monaten etwa gleich hoch war (110 cm), aktuell aber im April viel mehr abgenommen hat (auf ca. 55 cm) als im Februar (auf ca. 90 cm). In der Höhenlage von 1500 m bis 2000 m ü.M. in Nord- und Mittelbünden – wofür

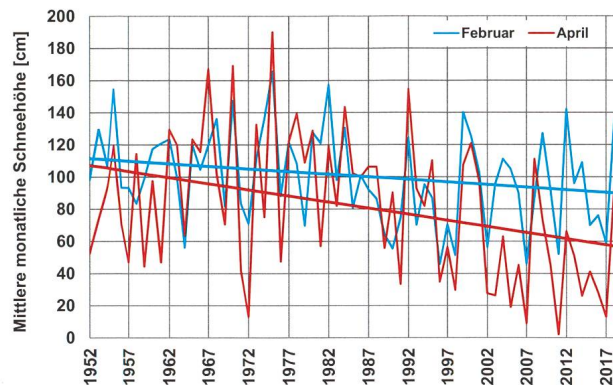


Abb. 2: Durchschnittliche Schneehöhe im Februar und im April in Arosa von 1952 bis 2019 (Grafik: Oekoscience AG).

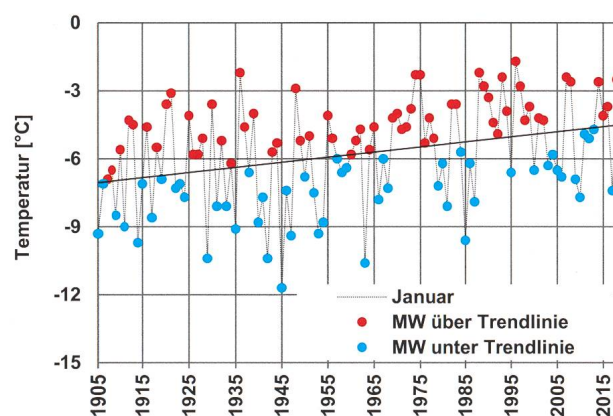


Abb. 3: Monatsmittelwerte der Temperatur im Januar in Davos von 1905 bis 2019 (Grafik: Oekoscience AG).

Arosa wohl repräsentativ ist – ist v. a. der Spätwinter ein ganz anderer geworden.

Die Temperaturmonatsmittel in Davos im Januar haben von 1905 bis 2019 enorm geschwankt, von -2 bis -12 °C. Dennoch ist die Temperaturzunahme von $+2,2$ °C/100 Jahre hoch signifikant. Grundsätzlich ist jedes Jahr zu erwarten, dass der zu Ende gegangene Monat der bisher wärmste ist, vor allem wärmer als die Norm. Entscheidend für die Frage, ob die Klimaerwärmung immer rascher abläuft, ist die Verteilung der Messpunkte um die Trendlinie (Abb. 3) und nicht um die Normlinie. Der Shapiro-Wilk-Test ergibt für alle Stationen, dass diese Verteilungen (die Residuen) zufällig, im Wesentlichen normalverteilt sind, so dass die Messpunkte am besten durch einen linearen Trend (d.h. gleichmässige Erwärmung von 1905 bis 2019) abgebildet werden können. Kurzfristige Verläufe von wenigen Jahrzehnten sind ungeeignet, um meteorologische Trends darzustellen.

In den langfristigen Temperaturverläufen zeigt sich vor allem im Frühjahr und Sommer ein relativ flacher Verlauf von etwa 1950 bis 1980, danach ein stärkerer Anstieg, welcher nichts mit dem Klimawandel zu tun hat. Dies hängt mit der markanten kontinuierlichen Abnahme der Sonnenscheindauer von etwa 1950 bis 1980 um etwa -15% zusammen (z.B. KLIMASZENARIEN SCHWEIZ 2018). Danach stieg die Sonnenscheindauer und damit die solare Einstrahlung wieder auf die Werte am Anfang des 20. Jahrhunderts an. Die starke Veränderung der Sonnenscheindauer hängt stark mit einer Veränderung der Bewölkung zusammen, deren Ursachen unklar sind. Eine Rolle dürften auch die in jener Zeit zunehmenden Luftschadstoffemissionen gespielt haben, deren Maximum in Europa zwischen 1960 und 1985 erreicht wurde (BUWAL 1995).

3 Ergebnisse

Nur für die Messstationen Davos und Lugano waren alle untersuchten Klimaelemente genügend lange verfügbar. Immerhin konnten für sechs Stationen (Davos, Lugano, Chur, Säntis, Sils-Maria, Andermatt) Temperatur und Niederschlag untersucht werden.

3.1 Überblick Klimaelemente nach Stationen

Tab. 1 zeigt für jede Messstation die Höhe über Meer und Kennzahlen zu den drei Klimaelementen Temperatur, Niederschlag und Schnee, soweit gemessen. An allen Stationen ist die Temperatur seit 1905 um etwa 2 °C angestiegen. Die Niederschlagsänderungen sind lokal sehr unterschiedlich und weisen keine eindeutige Tendenz auf. In Nord- und Mittelbünden sowie im Engadin gibt es deutlich weniger Niederschlag als an den übrigen Stationen. Das Wintermittel der Schneehöhe von Dezember bis März liegt für die Höhenstufe von 1400 m bis 1900 m ü.M. bei etwa 50 bis 90 cm, seit 1952 erfolgte eine Abnahme um 14 bis 30 cm.

3.2 Normwerte Temperatur und Niederschlag

In Witterungsberichten und anderen Publikationen ist oft von «Normwerten» die Rede. Dabei handelt es sich typischerweise um die Mittelwerte aus dem Zeitraum 1981 bis 2010.

Die Gebirgsstationen weisen als Norm negative Monatsmitteltemperaturen von November bis März auf. Die tiefliegenden Stationen Grono und Lugano massen durchwegs wärmere Temperaturen als Chur (Abb. 4).

Tab. 1: Überblick zu den Klimaelementen Temperatur, Niederschlag und Schneehöhe an den verwendeten Messstationen, soweit gemessen. Änderungen basieren auf dem linearen Trend über den Untersuchungszeitraum. Kursive Zahlen: Ergebnisse aus homogenisierten Datenreihen.

Station	Höhe ü. M. [m]	Temperatur [°C]		Niederschlag [mm]		Schneehöhe [cm]	
		Jahres- mittel	Änderung /115y	Jahres- summe	Änderung /115y	Wintermittel (Dez.-März)	Änderung /67y
Andermatt	1438	+3,5	+1,8	1410	-119	86	-27
Arosa	1840					83	-30
Chur	556	+9,2	+2,1	853	+14		
Davos	1594	+2,9	+2,2	996	+96	63	-15
Ftan	1710					52	-17
Grono	324			1437	-21		
Lugano	273	+11,9	+1,9	1581	-55	1	
Maloja	1810					88	-22
Säntis	2502	-1,8	+2,1	2658	+321		
Sils-Maria	1804	+1,6	+1,8	982	+7		
Splügen	1457					49	-14
Zuoz	1710					47	-14

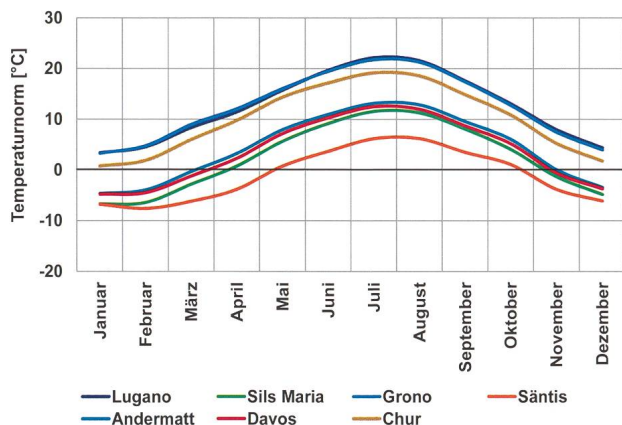


Abb. 4: Norm der Temperatur von 1981 bis 2010 (Grafik: Oekoscience AG).

Die Niederschlagsnormen sind regional stark unterschiedlich. Der von allen Seiten frei anströmbare Sants in 2500 m ü.M. sticht heraus (Abb. 5).

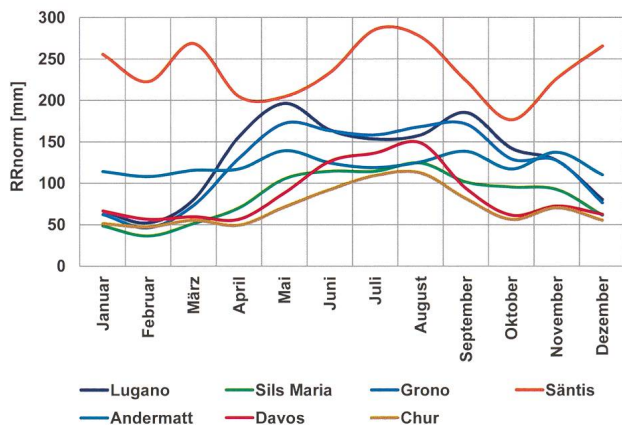


Abb. 5: Norm des Niederschlags von 1981 bis 2010 (Grafik: Oekoscience AG).

Die jahreszeitliche Verteilung der Niederschläge ist regional ebenfalls stark unterschiedlich. Die Alpensüdseite weist im Mittel sehr trockene Winter auf und Niederschlagsmaxima im Mai und September. Nord- und Mittelbünden sehen im Mittel am meisten Niederschlag im Hochsommer (Juni bis August) und sind im Winter und Frühjahr (Dezember bis April) eher trocken, aber nicht so trocken wie die Alpensüdseite. Andermatt und der Sants weisen keinen ausgeprägten Jahresgang im mittleren Niederschlag auf; das dürfte vor allem daran liegen, dass diese Orte von verschiedenen Seiten Niederschlag erhalten.

3.3 Trends Temperatur

Die Trends der Temperatur liegen deutlich im positiven Bereich (Abb. 6). Das heisst, es wurde an allen Orten und in jedem Monat wärmer. In der Region

Graubünden/Ostschweiz wurde es in den letzten 100 Jahren teilweise monatlich bis zu 2,7 °C wärmer. Die absoluten Werte der Temperaturänderungen sind trotz der geografischen Nähe recht verschieden, was auf die Bedeutung lokaler Gegebenheiten hinweist (ausser bei Andermatt und Chur handelt es sich um homogenisierte Datenreihen).

Der bei allen Stationen ziemlich parallele Jahresverlauf ist überraschend, vor allem der wellige Verlauf von April bis Januar. Mai und September, aber auch der Dezember weisen deutlich geringere Erwärmungen auf als die benachbarten Monate. Die Erwärmung hängt offenbar stark vom jeweiligen Monat ab, und es gibt systematisch im Mittel über 115 Jahre grosse Unterschiede zwischen aufeinanderfolgenden Monaten. Über alle Stationen zusammengenommen ist die Erwärmung im Mai und September am geringsten, im Juli, August und Oktober am grössten. Im Winter (Januar bis März) sind die Temperaturverläufe weniger einheitlich.

Das Bild der monatlichen Trends der Temperatur weist Ähnlichkeiten mit REBETEZ, REINHARD (2008) auf, aber auch deutliche Unterschiede, vor allem im Frühjahr. Dies mag an den zusätzlichen Jahren im 21. Jahrhundert liegen, die in diese Arbeit miteinbezogen wurden.

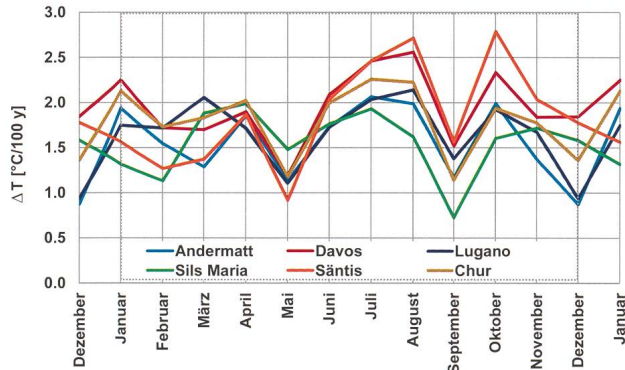


Abb. 6: Temperaturänderung ΔT pro 100 Jahre je Monat in Graubünden und Umgebung, ermittelt über den Zeitraum 1905 bis August 2019 (Grafik: Oekoscience AG).

3.4 Trends Niederschlag

Um die Änderung der Niederschlagsmengen in den letzten 115 Jahren grafisch gut vergleichbar darzustellen, wurde die absolute Änderung in mm durch die Normwerte von 1981 bis 2010 dividiert. Dadurch entstanden Kurven, die die relative Änderung in den letzten 115 Jahren darstellen (Abb. 7). Eine Änderung von -100% würde bedeuten, dass der Niederschlag über die 115 Jahre um den Durchschnittswert von 1981 bis 2010 abgenommen hat. Die Welligkeit des

Jahresverlaufs zeigt sich nur noch für die Stationen der Alpensüdseite und des Engadins: März, Oktober und Dezember zeigen überwiegend Abnahmen des Niederschlags, Januar und November überwiegend Zunahmen. Dabei handelt es sich um Trends über 115 Jahre. Chur und Davos zeigen einen Gleichlauf von geringen prozentualen Änderungen ausser im Mai, September und Oktober, wo Davos Zunahmen zeigt. Über das ganze Jahr gesehen haben sich die Niederschlagsmengen nicht stark geändert. An den betrachteten sechs Stationen, ohne die Bergstation Säntis, hat die jährliche Niederschlagsmenge im Durchschnitt um $-0,2\%$ abgenommen. Diese Abnahme ist zufällig.

Der Säntis und Andermatt zeigen kaum einen Gleichlauf mit anderen Stationen. Als ausseralpine Bergstation ist der Säntis am meisten direkt von der Grosswetterlage und am wenigsten von lokalen Gegebenheiten beeinflusst; allerdings ist dort wegen des Windes die Niederschlagsmessung auch am schwierigsten. Die monatlichen Trends bei Andermatt können nicht erklärt werden.

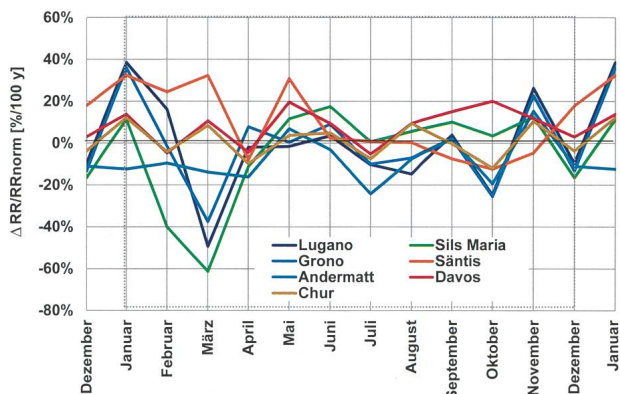


Abb. 7: Niederschlagsänderung ΔRR pro 100 Jahre je Monat in Graubünden und Umgebung, ermittelt über den Zeitraum 1905 bis August 2019. Angaben in Prozent der monatlichen Norm von 1981 bis 2010 (RRnorm, Grafik: Oekoscience AG).

3.5 Zusammenspiel von Temperatur- und Niederschlagsänderung

Von März bis Oktober ist der Jahresverlauf der Temperaturkurve (Änderungen pro 100 Jahre) relativ gut der Niederschlagskurve (Änderungen pro 100 Jahre) entgegengesetzt. Mehr Niederschlag in dieser Jahreszeit bedeutet auch mehr Wolken, weniger Einstrahlung und deshalb eine abgeschwächte Temperaturerhöhung. Das Umgekehrte gilt genauso. Im Winter hingegen geht trockenes Wetter nicht mit höheren Temperaturen einher, auch wegen der dann kalten Nächte nicht (Abb. 8).

3.6 Trends Schnee

Die mittlere monatliche Schneehöhe wird als Indikator verwendet für die vorhandene Schneemasse und für die «Intensität» des Winters. Dies kommt in Tagen mit einer allenfalls dünnen Schneedecke oder in der maximalen Gesamtschneehöhe nicht zur Geltung. Daten zur Schneehöhe waren von acht Stationen wenigstens seit 1952 verfügbar. Der Winter 1951 war ein Extremwinter, der an einzelnen Stationen zu sehr hohen Schneehöhenmessungen geführt hat. Der Trend würde durch solch extreme Ausreisser gleich zu Beginn der Datenreihe zum Teil stark beeinflusst; deshalb wurden die Schneehöhen erst ab 1952 betrachtet. Es wurden die Werte der Stationen Davos, Arosa, Lugano, Andermatt, Splügen, Maloja, Zuoz und Ftan ausgewertet. Die Engadiner Stationen St. Moritz und Samedan konnten nicht verwendet werden, da ihre Messfelder über die Jahre verschoben wurden, wodurch Höhenlage und Exposition erheblich verändert wurden. Die Station Säntis (von MeteoSchweiz) wurde ebenfalls nicht verwendet; auch dort gab es mehrere Standortverschiebungen, u. a. 1978 zu einem ca. 300 m tiefer und windgeschützter gelegenen Messfeld (MARTY, MEISTER 2012).

Es zeigen sich überall markante Abnahmen der durchschnittlichen Schneehöhe. Die Abnahme in cm wächst mit fortschreitendem Winter an, Januar/Februar etwa gleichbleibend (Abb. 9), prozentual ist sie Januar/Februar am geringsten (10–20%), am Winteranfang und -ende am grössten (40–60%, Abb. 10). Die geringe Abnahme bei Lugano geht darauf zurück, dass es dort ohnehin schon immer wenig Schnee gab und gibt.

Im Mittel über alle Stationen verringert sich die prozentuale Abnahme der Schneehöhe von etwa -60% im November bis -15% im Februar und erhöht sich wieder auf -50% im April. Es ist auffallend, dass sich die prozentualen Änderungen der Schneehöhen für alle Stationen über den ganzen Winter trotz unterschiedlicher Höhe, Region und Lage in einem relativ schmalen Band bewegen (Abb. 10). Generell sind die Prozentangaben für einzelne Monate nicht sehr stabil aufgrund der grossen Schwankungen von Jahr zu Jahr.

In Arosa z. B. (siehe Abb. 2) wurde die mittlere Schneedecke im März in den letzten 67 Jahren um rund 33 cm dünner, im April um rund 50 cm (Abb. 9). Dies bedeutet im März eine Abnahme um einen Viertel von gut 120 auf 90 cm. Im April ist die mittlere Schneehöhe gar um die Hälfte zurückgegangen, von rund 110 auf knapp 60 cm (Abb. 10).

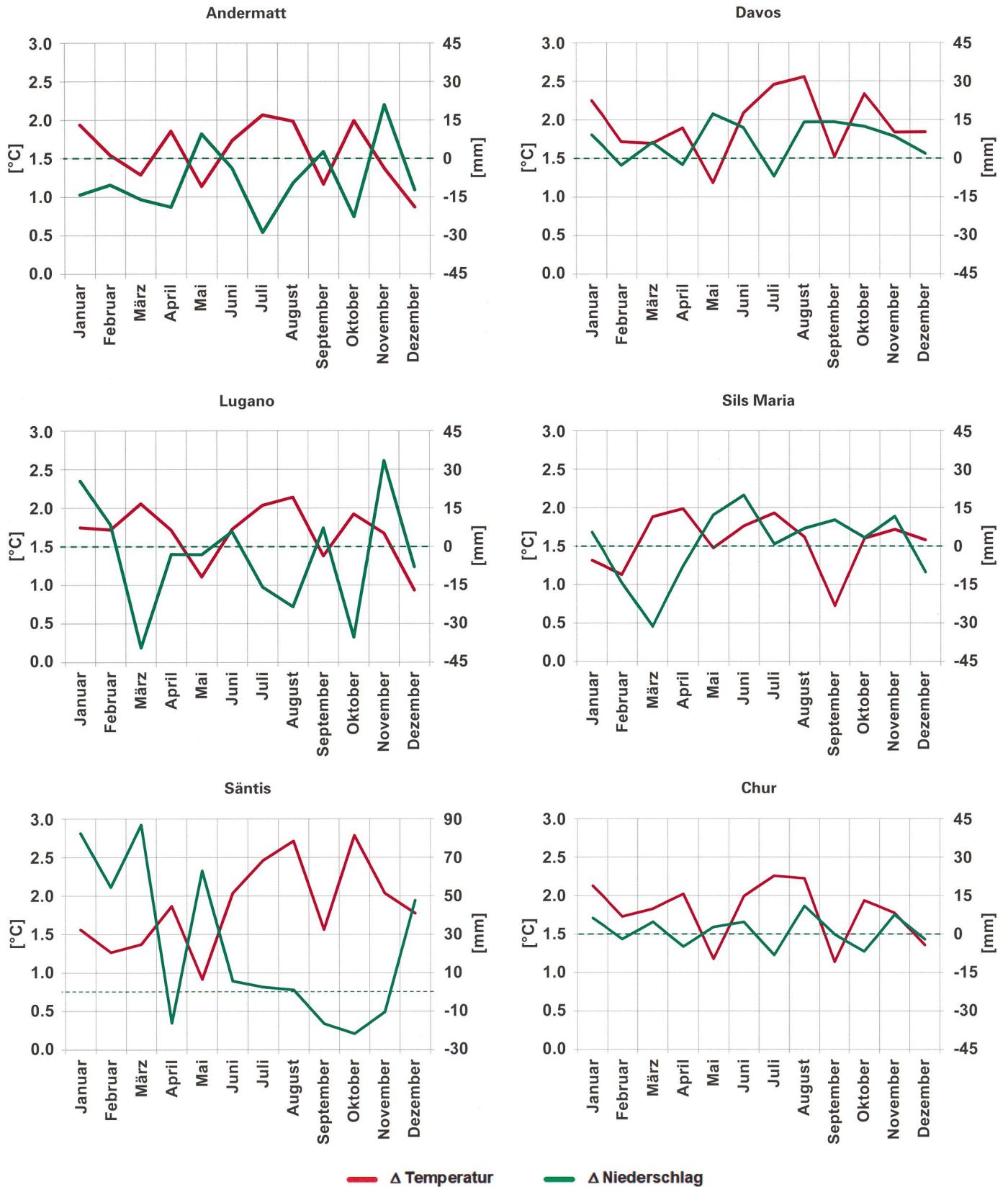


Abb. 8: Änderung von Temperatur (in °C) und Niederschlag (in mm) pro 100 Jahre in Andermatt, Davos, Lugano, Sils-Maria, Säntis und Chur, ermittelt im Zeitraum von 1905 bis August 2019 (Grafik: Oekoscience AG).

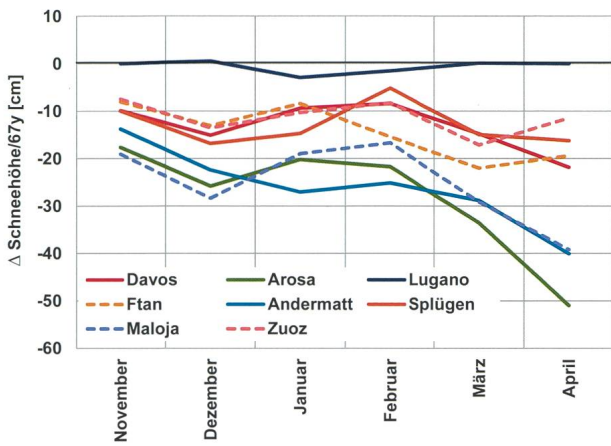


Abb. 9: Änderung der mittleren Schneehöhe in cm (Δ Schneehöhe) pro Monat von 1952 bis 2019 (Grafik: Oekoscience AG).

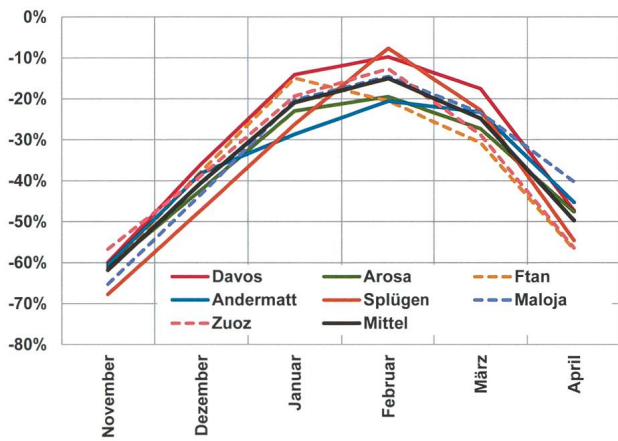


Abb. 10: Änderung der mittleren Schneehöhe pro Monat in % von 1952 bis 2019. 100% entspricht dem Wert der Trendlinie der Schneehöhe für 1952 (Grafik: Oekoscience AG).

Für den gesamten Winter (Dezember bis März) sind die Abnahmen der durchschnittlichen Schneehöhe stabiler; sie sind statistisch überwiegend signifikant und zeigen Werte von -20% bis -30% (Abb. 11). Die Basis 100% entspricht dem Wert der Trendlinie für 1952, ist also unabhängig von den realen Bedingungen im Winter 1952.

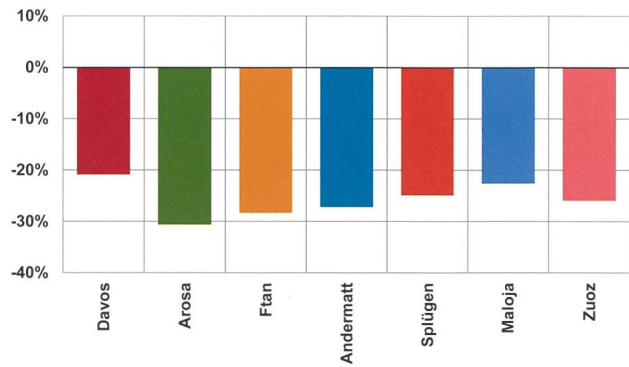


Abb. 11: Änderung der mittleren Schneehöhe in % im Winter (Dezember bis März) im Zeitraum von 1952 bis 2019 (Grafik: Oekoscience AG).

Die monatlichen Neuschneesummen haben im Januar im Mittel um 20% und damit deutlich zugenommen (Ausnahme Andermatt). In allen anderen Monaten haben sie an allen Stationen mit nur drei Ausnahmefällen abgenommen, aber nicht so stark wie die Gesamtschneehöhe (Abb. 12).

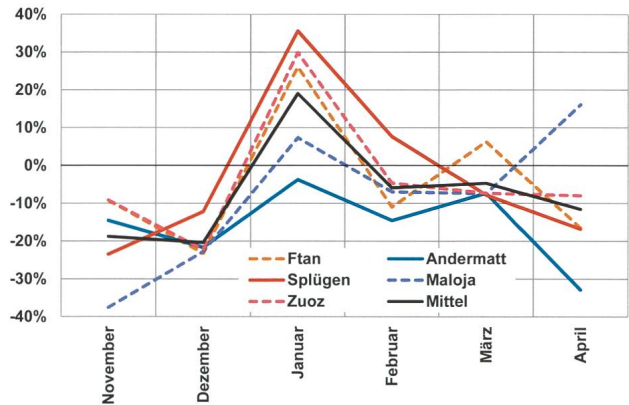


Abb. 12: Änderung der mittleren Schneehöhe pro Monat in % von 1952 bis 2019. 100% entspricht dem Wert der Trendlinie der Neuschneesumme für 1952 (Grafik: Oekoscience AG).

3.7 Signifikanz der Trends

Die Trends enthalten auch Zufälligkeiten, die vor allem mit meteorologischen Abläufen und Ereignissen zusammenhängen. Am Beispiel der Temperaturänderung werden die 90%-Konfidenzintervalle für Davos und Sils Maria gezeigt, d.h. der «wahre» Trend liegt mit einer statistischen Sicherheit von 90% im angegebenen Intervall (Abb. 13). Die übrigen Stationen weisen sehr ähnliche Konfidenzintervalle auf.

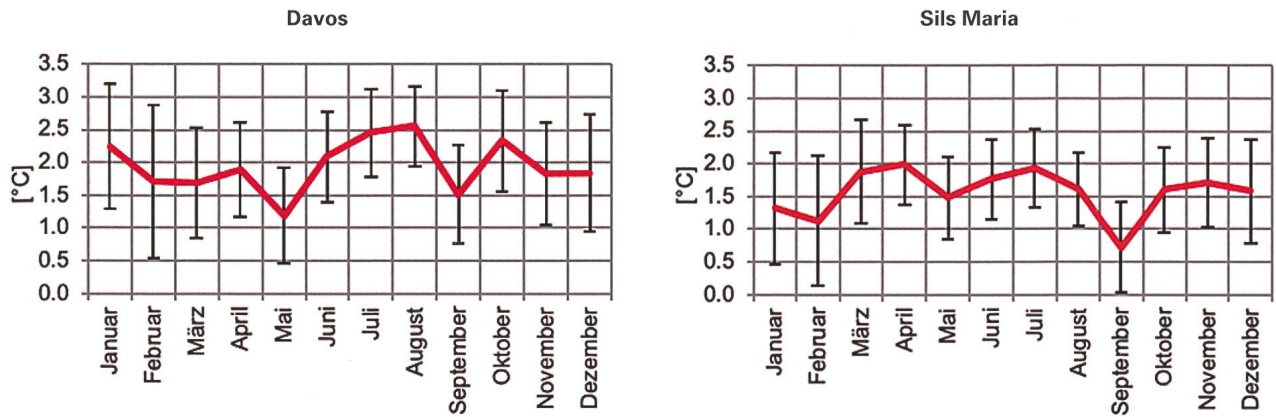


Abb. 13: Änderung der Temperatur pro 100 Jahre mit 90%-Konfidenzintervallen im Zeitraum von 1905 bis August 2019 (Grafik: Oekoscience AG).

Die Konfidenzintervalle sind recht gross, unterschiedlich von Monat zu Monat, was witterungsbedingt an der starken Streuung der Temperaturen von Jahr zu Jahr liegt. Dennoch liegen alle Intervalle vollständig im positiven Bereich der Temperaturänderung. Dies führt zu fast durchwegs hochsignifikanten Trends der Temperaturerhöhung (Tab. 2).

Die Rückgänge der durchschnittlichen monatlichen Schneehöhe sind bei allen Stationen im Januar und Februar nicht signifikant, weil sie im Verhältnis zur Schneehöhe nicht so gross sind (und stark schwanken). Ansonsten sind signifikante Abnahmen häufig, auch über den gesamten Winter (Dezember bis März, Tab. 3).

Tab. 2: Signifikanztabelle für die monatlichen Änderungen der Temperatur von 1905 bis 2019. Die Werte sind die absoluten Änderungen pro 100 y (°C). Kursiv und fett heisst hoch signifikante Zunahme, fett heisst signifikante Zunahme (Tabelle: Oekoscience AG).

	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Andermatt	1,9	1,5	1,3	1,9	1,1	1,7	2,1	2,0	1,2	2,0	1,4	0,9
Davos	2,2	1,7	1,7	1,9	1,2	2,1	2,5	2,6	1,5	2,3	1,8	1,8
Lugano	1,7	1,7	2,1	1,7	1,1	1,7	2,0	2,1	1,4	1,9	1,7	0,9
Sils-Maria	1,3	1,1	1,9	2,0	1,5	1,8	1,9	1,6	0,7	1,6	1,7	1,6
Säntis	1,6	1,3	1,4	1,9	0,9	2,0	2,5	2,7	1,6	2,8	2,0	1,8
Chur	2,1	1,7	1,8	2,0	1,2	2,0	2,3	2,2	1,1	1,9	1,8	1,4

Tab. 3: Signifikanztabelle für die monatlichen Änderungen der Schneehöhe sowie der Winterwerte (Dezember bis März) von 1952 bis 2019. Bei der Schneehöhe auch Winterwerte Dezember bis März. Kursiv und fett heisst hoch signifikante Abnahme, fett heisst signifikante Abnahme (Tabelle: Oekoscience AG).

	Januar	Februar	März	April	Mai	Oktober	November	Dezember	Winter
Arosa	-20	-22	-34	-51	-24	-6	-18	-26	-30
Davos	-9	-8	-15	-22	-5	-3	-10	-15	-15
Ftan	-8	-15	-22	-19	-19	-6	-8	-13	-17
Lugano	-3	-2	0	0	0	0	0	1	
Andermatt	-27	-25	-29	-40	-31	-8	-14	-22	-27
Splügen	-15	-5	-15	-16	-26	-1	-10	-17	-14
Maloja	-19	-17	-29	-39	-38	-5	-19	-28	-22
Zuoz	-10	-8	-17	-11	-26	-5	-7	-14	-14

Beim Niederschlag gibt es keine signifikanten Änderungen. Zwar gibt es bei zwei Stationen ein bis drei Monate mit geringer Irrtumswahrscheinlichkeit einer Niederschlagsänderung, aber da wird der Normalitätstest nicht bestanden. Die Schwankungen bei den Niederschlagsmengen sind viel grösser als bei der Temperatur oder auch der Schneehöhe, und gesicherte Trendaussagen sind für die untersuchten Stationen nicht möglich.

3.8 Trockenheit

Trockenheit kann eine Folge des Klimawandels sein. Sie kann sich in verschiedenen Sphären unterschiedlich auswirken. Eine klimatische Trockenheit kommt durch zu wenige Niederschläge zustande (Kapitel 3.8.1). Bodentrockenheit ist für Pflanzen inkl. Wald bedeutsam (Kapitel 3.8.2). Schliesslich sind auch verminderte Abflüsse in Flüssen und damit verbundene Trockenheit möglich (Kapitel 3.8.3). Alle drei Aspekte von Trockenheit werden im Folgenden behandelt.

3.8.1 Klimatische Trockenheit

Grundsätzlich wird klimatische Trockenheit als eine über einen gewissen Zeitraum anhaltende negative Abweichung von der Niederschlagsnorm (siehe oben) definiert. Da Niederschläge lokal sehr unterschiedlich ausfallen können, wurden für diese Betrachtung Mittelwerte der Niederschlagsmessstationen für die beiden Regionen Nord- und Mittelbünden sowie Alpensüdseite und Engadin gebildet. Für Nord- und Mittelbünden fliessen Werte der Stationen Davos, Chur und Andermatt (für die westliche Surselva), für die Alpensüdseite und Engadin Angaben aus Grono, Lugano und Sils-Maria in die Auswertungen ein.

Die gleitende Jahressumme der Abweichung des Niederschlags von der Norm ist ein Indikator für allfällige klimatische Trockenheit. Von 1880 bis 2019 schwankte diese Jahressumme in Nord- und Mittelbünden zwischen -40% und $+40\%$ (Abb. 14), für die Alpensüdseite und das Engadin zwischen -50% und $+80\%$ (Abb. 15). Es zeigt sich, dass in beiden Regionen in den letzten Jahren keine auffällige klimatische Trockenheit geherrscht hat. Im Gegenteil waren die Ausschläge der Abweichungen von der Norm gemässigt. Dieses Bild war, aufgrund der Niederschlagsanalyse in Kapitel 3.4 zu erwarten. Die roten Linien zeigen gleitende Drei-Jahressummen, um allfällige Akkumulationen von Trockenheit oder Nässe auszuweisen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt klimatischer Trockenheit betrifft den Niederschlag während der Vegetationsperiode, hier als Sommerniederschlag bezeichnet. In Nord- und Mittelbünden war 2018 der bisher trockenste Sommer (Abb. 16), auf der Alpensüdseite gab es in den letzten 140 Jahren manch trockenere (Abb. 17). Insgesamt kann keine im Laufe der Zeit zunehmende klimatische Sommertrockenheit ausgemacht werden. Die gleitenden Drei-Jahresmittel der Sommerabweichungen des Niederschlags von der Norm zeigen in den letzten Jahren keine auffälligen Ausschläge in Nord- und Mittelbünden. Auf der Alpensüdseite ist ein längeres Defizit von 2005 bis 2008 erkennbar, das wieder kompensiert wurde.

Es ist im Laufe der Zeit keine Häufung von Jahren mit Trockensommern mit einem Defizit von mindestens 30% erkennbar. Temporäre Häufungen gibt es allerdings (Abb. 18). Aufgrund der Messungen in

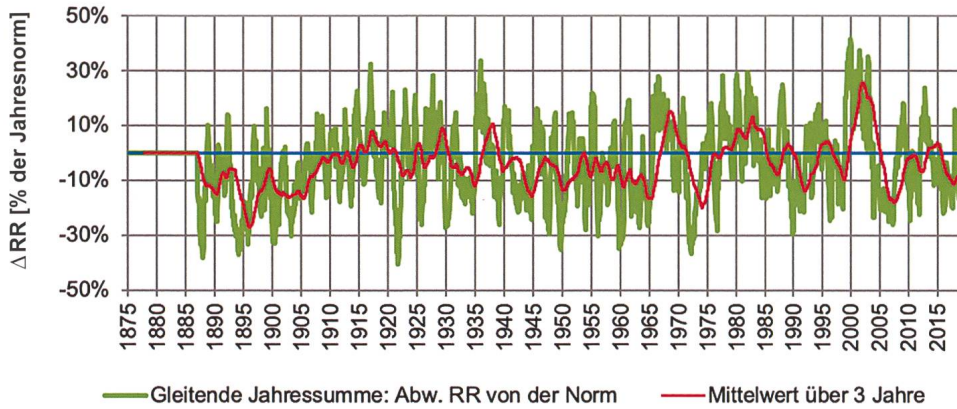


Abb. 14: Gleitende Jahressumme der Abweichung des Niederschlags (RR) von der Norm (1981 bis 2010) in Nord- und Mittelbünden im Zeitraum von 1880 bis August 2019 (Grafik: Oekoscience AG).

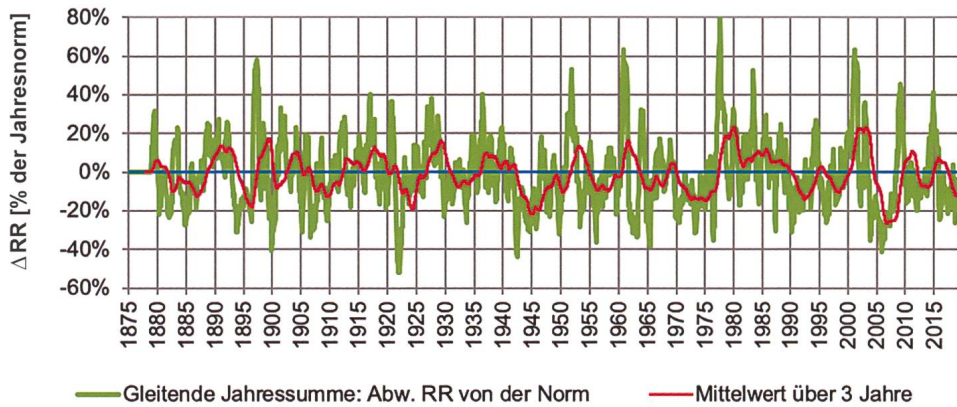


Abb. 15: Gleitende Jahressumme der Abweichung des Niederschlags (RR) von der Norm (1981 bis 2010) auf der Alpensüdseite und im Engadin im Zeitraum von 1880 bis August 2019 (Grafik: Oekoscience AG).

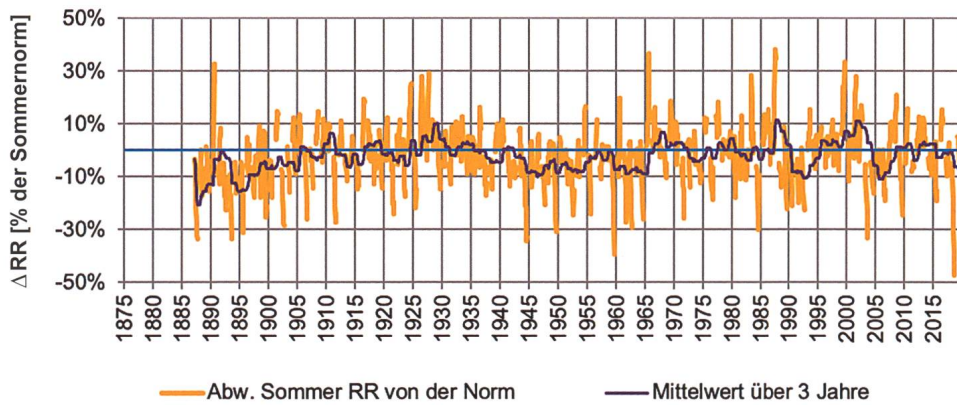


Abb. 16: Abweichung des Sommerniederschlags (RR) von der Norm (1981 bis 2010) in Nord- und Mittelbünden von 1880 bis August 2019 (Grafik: Oekoscience AG).

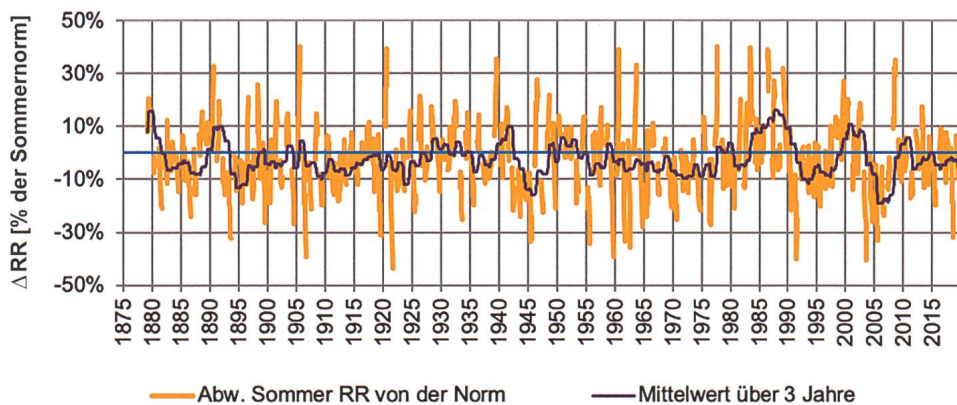


Abb. 17: Abweichung des Sommerniederschlags (RR) von der Norm (1981 bis 2010) auf der Alpensüdseite und im Engadin von 1880 bis August 2019 (Grafik: Oekoscience AG).

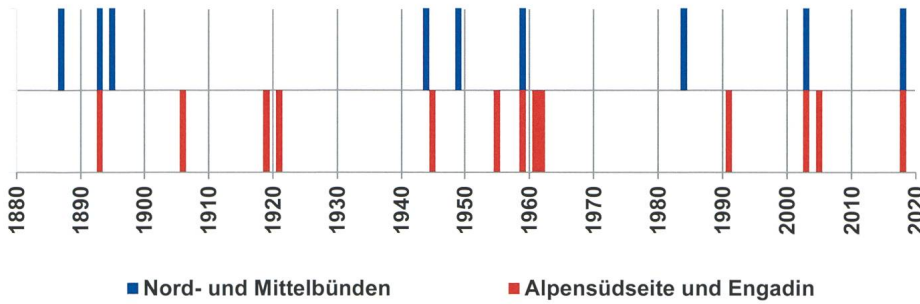


Abb. 18: Jahre mit Trockensommern (Niederschlagsdefizit > 30% der Norm) in Nord- und Mittelbünden sowie auf der Alpensüdseite und im Engadin von 1880 bis August 2019 (Grafik: Oekoscience AG).

den letzten 140 Jahren kann man für Graubünden und Umgebung nicht von einer zunehmenden klimatischen Trockenheit ausgehen, auch nicht in der Vegetationsperiode.

In den KLIMASZENARIOEN SCHWEIZ (2018), die auf die IPCC-Szenarien (IPCC 2014) abstellen, werden Erwartungswerte für die zukünftigen Sommerniederschläge bis zum Ende des 21. Jahrhunderts angegeben. Die erwarteten Änderungen zur Norm variieren je nach Szenarienmodell und erreichen beim mittleren CO₂-Emissionsszenarium RCP4.5 (weltweite deutliche Emissionsreduktionen, aber nicht bis netto Null) bis zum Ende des 21. Jahrhunderts etwa -10% bis +10% (Abb. 19). Demnach würde ein Sommer wie der 2018 mit im Mittel -47% Niederschlagsdefizit in Nord- und Mittelbünden auch in Zukunft eine Ausnahme bleiben, was die klimatische Trockenheit betrifft.

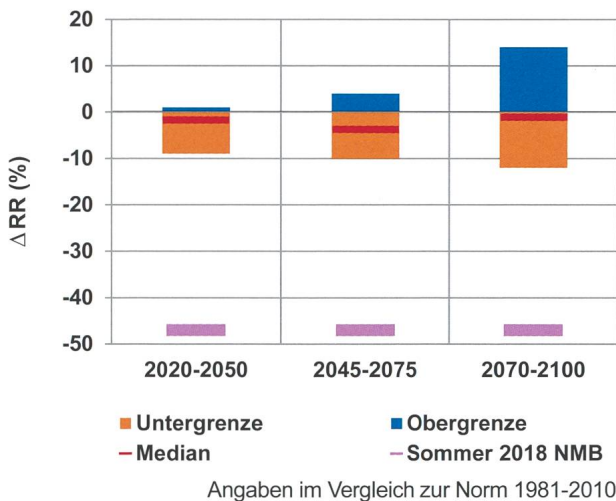


Abb. 19: Änderung Sommerniederschlag (in % der Norm 1981 bis 2010) bis 2100 gemäss KLIMASZENARIOEN SCHWEIZ (2018) für die Region Schweizer Alpen Ost, Szenario RCP4.5, dargestellt mit dem Niederschlagsdefizit im Sommer 2018 in Nord- und Mittelbünden (Grafik: Oekoscience AG).

3.8.2 Bodentrockenheit und ihre Wechselwirkung mit dem Wald

Der Bodenwassergehalt hängt vom Niederschlag und der Verdunstung ab, die vom Sättigungsdampfdruck in der Atmosphäre beeinflusst wird. Da der Sättigungsdampfdruck exponentiell mit der Temperatur steigt, steigt die Verdunstung mit der Erwärmung und der Boden kann trockener werden, auch wenn sich die Niederschläge nicht geändert haben.

Das Institut für angewandte Pflanzenbiologie (IAP) hat umfangreiche Untersuchungen zum Einfluss von Trockenheit auf den Wald durchgeführt (BRAUN et al. 2015, BRAUN et al. 2018). Auf über die ganze Schweiz verteilten Dauerbeobachtungsflächen (elf davon im Kanton Graubünden), die zum Teil seit 34 Jahren bestehen, konnten Untersuchungen zum zeitlichen Verlauf von Trockenheit und dessen Einfluss auf den Wald durchgeführt werden.

Trockenheitsindikatoren je Beobachtungsfläche wurden dabei mit einem hydrologischen Modell (Wasim-ETH) berechnet. In das Modell fließen räumlich interpolierte Tagesmittelwerte von Temperatur, Luftfeuchte, Strahlung, Windgeschwindigkeit und Niederschlag. Für das Stammwachstum von Buchen und Fichten war die minimale Standortwasserbilanz der beste Indikator. Für die Mortalität dieser Baumarten war das Verhältnis zwischen aktueller und potenzieller Evapotranspiration (ET_a/ET_p) im Frühjahr ausschlaggebend. Das Verhältnis ET_a/ET_p ist ein Mass für die Einschränkung der Transpiration infolge Trockenheit. Bei der Wasserbilanz kumulieren sich die Perioden, in denen die potenzielle Verdunstung den Niederschlag übersteigt.

Generell ist Graubünden leicht trockener als die Gesamtschweiz. Deutlich trockener ist das Churer Rheintal und das Domleschg. Hitzesommer zeigen sich deutlich in den Trockenheitsindikatoren. Nach 2003 ist die Bodentrockenheit auch ausserhalb der Hitzesommer etwas grösser geworden infolge der Erwärmung, trotz gleichbleibendem Niederschlag (Abb. 20). Besonders ist dies an den Standorten zu

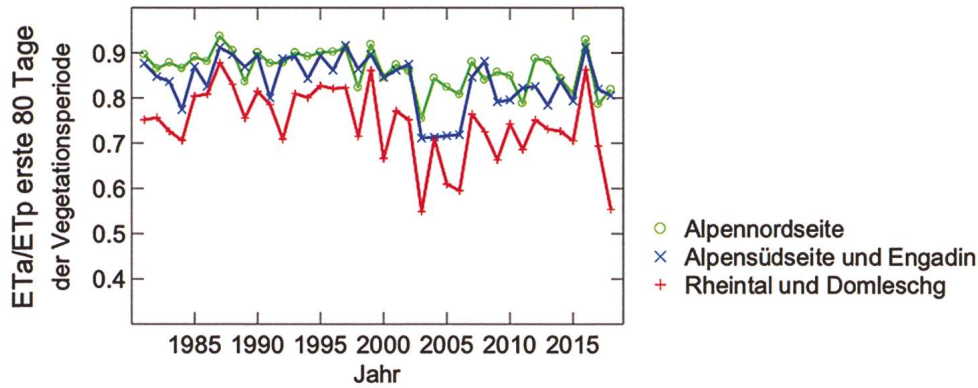


Abb. 20: Verhältnis zwischen aktueller und potenzieller Evapotranspiration E_{Ta}/E_{Tp} im Frühjahr von 1981 bis 2018 (Grafik: BRAUN 2019).

sehen, die schon immer trockener waren: im Churer Rheintal (Tamins) und im Domleschg (Tomils).

Das Bild für die minimale Standort-Wasserbilanz ist ähnlich wie beim Verhältnis E_{Ta}/E_{Tp} .

Die Reaktion des Waldes auf Trockenheit ist komplex, da die Bäume auf Trockenheit auch reagieren können. Wie in BRAUN et al. (2018) gezeigt wurde, beeinflusst der Eintrag von Stickstoff aus der Luft und mit dem Niederschlag die Fähigkeit der Waldbäume, Trockenstress auszuhalten.

So steigt die Mortalität von Fichten unter Trockenstress bei einer Stickstoffdeposition von 20 kg/Jahr und Hektare kaum an, bei 40 kg aber deutlich (Abb. 21). Zwei Drittel der Stickstoffeinträge in den

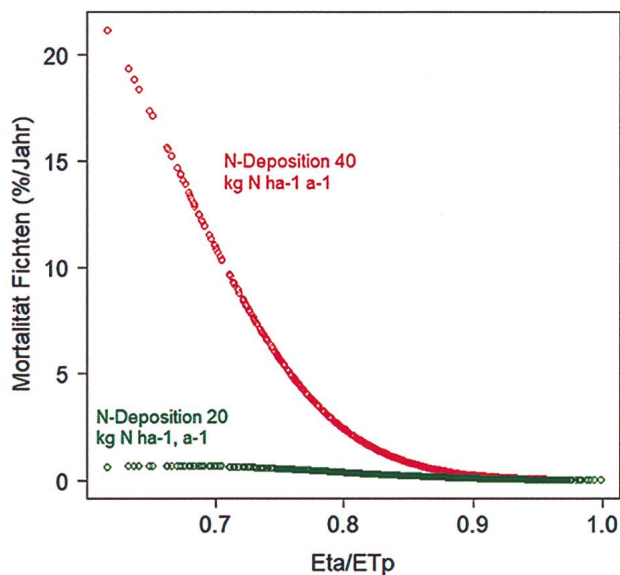


Abb. 21: Interaktion zwischen Trockenheit (E_{Ta}/E_{Tp} über die ersten 85 Tage der Vegetationsperiode) und der Stickstoffdeposition bezüglich Mortalität von Fichten. Vorhersagen aufgrund eines Regressionsmodells unter Mittelung aller anderen Parameter (Grafik: BRAUN et al. 2018).

Schweizer Wald stammen aus der Landwirtschaft, ein Drittel aus Industrie und Verkehr (BRAUN et al. 2018).

Hohe Stickstoffdepositionen vermindern auch das Stammwachstum von Buchen bei grosser Trockenheit und erhöhen so die Wirkung von Trockenstress (BRAUN et al. 2018).

Auch die Ozonbelastungen behindern das Wachstum der Bäume (z.B. BRAUN et al. 2018). Infolge der Erwärmung ist auch in der Schweiz wieder mit zunehmenden Ozonspitzenkonzentrationen zu rechnen, nachdem bei diesen über die letzten 30 Jahre doch eine Abnahme verzeichnet werden konnte (THUDIUM, CHÉLALA 2019).

3.8.3 Abfluss des Rheins

Das in einer Region verfügbare Wasser hängt nicht nur von den Niederschlägen und der Verdunstung ab, sondern auch vom Abfluss in Bächen und Flüssen. Für Nord- und Mittelbünden ist der Rhein der gemeinsame Abfluss. Vom Rhein liegen Abflussmessungen über die letzten 100 Jahre vor. Wegen des Einflusses von Kraftwerksbauten, Messstationsverschiebungen u.ä. wurde der Abfluss bei Diepoldsau untersucht. Die Jahresmittel des Rheinabflusses schwanken stark, sind im Mittel aber über die letzten 100 Jahre konstant geblieben (Abb. 22). Da die Niederschläge auch etwa konstant geblieben sind, bedeutet dies, dass ein im Mittel konstanter Anteil an diesen Niederschlägen abgeflossen ist bzw. dass die Zurückhaltung der Niederschläge im Boden sich insgesamt nicht verändert hat.

Im Jahresgang hat es allerdings erhebliche Änderungen im Abfluss gegeben. Infolge des Betriebs der grossen Speicherseen (insbesondere Zervreila und Lago di Lei) hat eine Verlagerung von Abfluss vom Sommer in den Winter stattgefunden (OSENBRUG 2019).

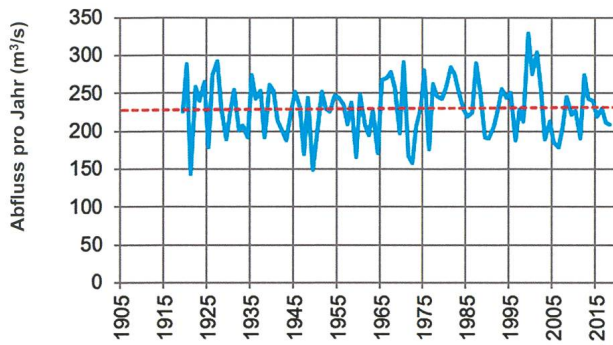


Abb. 22: Jahresmittel Rheinabfluss bei Diepoldsau (1919 bis 2019, Grafik: Oekoscience AG).

4 Diskussion

Die Ergebnisse dieser Studie zur Temperaturerhöhung liegen grundsätzlich im Bereich der Ergebnisse aus anderen Studien. Wird im Bericht «Brennpunkt Klima Schweiz» (AKADEMIEN DER WISSENSCHAFTEN SCHWEIZ 2016) eine gesamtschweizerische mittlere Temperaturerhöhung von 1,8 °C angegeben, so ergeben sich hier auf Jahresmittel zusammengefasst 1,6–1,9 °C pro 100 Jahre. Dies ist deutlich mehr als die 1,2–1,7 °C, die in METEOSCHWEIZ (2012) für Graubünden angegeben werden. Dies mag auch damit zusammenhängen, dass in METEOSCHWEIZ (2012) die Zeitreihe von 1900 bis 2011 betrachtet wurde gegenüber den Werten von 1905 bis 2019 im vorliegenden Bericht. MeteoSchweiz hat auch keine jahreszeitlichen Unterschiede in den Temperaturtrends gefunden, wohingegen vorliegend die Erwärmung im Sommer (Juni bis August) um 0,2–0,5 °C höher ausgewiesen wird als im Jahresmittel.

Die zeitliche Auflösung der Trends in Monaten erlaubt Spezifikationen, die in Jahrestrends und auch noch in Jahreszeitentrends verwischt werden. So liegt z.B. der Trend des Monats September bei der Station Säntis bei lediglich 1,6 °C, während er im Monat Oktober beträchtliche 2,8 °C beträgt. Beide Monate liegen im Herbst.

Generell konnten deutliche monatliche Unterschiede aufgezeigt werden, wohlgermerkt im Mittel über 115 Jahre. Beispiele dafür sind die geringen Temperaturanstiege im Mai und September. Ursachen dafür dürften wohl in typischen Mustern der globalen atmosphärischen Zirkulation und ihrer Reaktion auf den Klimawandel liegen. Diese Muster verharren nicht über eine ganze Jahreszeit. CEPPi et al. (2012) zeigen auf, dass die Änderungen in der atmosphärischen Zirkulation den Klimawandel regional verstärken können. Der Beitrag der atmosphärischen Zir-

kulation zur Temperaturerhöhung in der Schweiz ist gemäss unseren Untersuchungen bedeutend. Daher erscheint die Auflösung in einzelne Monate besser geeignet, den jährlichen Gang der Klimaerwärmung zu erforschen. Dies kann auch bei Prognosen für die Zukunft helfen (Einfluss der globalen Zirkulation in Atmosphäre und Ozeanen).

Wie in anderen Studien konnten nur sehr wenige signifikante Trends beim Niederschlag in Graubünden festgestellt werden. In manchen Monaten nimmt die Niederschlagsmenge zu und in manchen nimmt sie ab, nie signifikant. Zwar weist METEOSCHWEIZ (2012) für Sils-Maria im Frühjahr eine signifikante Abnahme aus. Auch wir konnten eine geringe Irrtumswahrscheinlichkeit bezüglich einer Abnahme feststellen, aber da der Normalitätstest nicht bestanden wird, kann man in diesem Fall nicht von statistischer Signifikanz sprechen. An den betrachteten sechs Stationen, ohne die Bergstation Säntis, hat die jährliche Niederschlagsmenge im Durchschnitt nur zufällig ganz leicht abgenommen (–0,2% im Mittel).

Bei den Schneeindikatoren finden sich bei METEOSCHWEIZ (2012) ähnlich markante und signifikante Abnahmen wie bei uns, allerdings nur auf Jahresbasis und ohne Betrachtung der mittleren Schneehöhe. In einer Studie des SLF (LATERNSE 2002) wurde ein Rückgang der durchschnittlichen Schneehöhe im Winterhalbjahr von etwa 10% für die Höhenstufe 1600 m–1900 m ü. M. ausgewiesen, allerdings für den Zeitraum von 1931 bis 1999. Bezüglich Schneedecke weisen die betrachteten Stationen zusammengenommen verglichen mit dem Mittel zu Beginn der 1950er-Jahre eine Abnahme der Schneehöhe von etwa –60% im November bis –15% im Februar und wieder bis –50% im April auf. Bei Betrachtungen zum Schnee ist die Unterteilung in Monate besonders wichtig, weil es da beträchtliche kurzzeitige Unterschiede in der Reaktion auf den Klimawandel gibt.

Die Schneemasse wird nicht nur von der Schneehöhe, sondern auch von der Schneedichte (in kg/m³) bestimmt. Eine Abschätzung über die allfällige Entwicklung der mittleren Schneedichte wäre wohl sehr interessant.

5 Literaturverzeichnis

- AKADEMIEN DER WISSENSCHAFTEN SCHWEIZ, 2016. Brennpunkt Klima Schweiz. Grundlagen, Folgen und Perspektiven. Swiss Academies Reports 11 (5).
- BADER, S., BANTLE, H., 2004. Das Schweizer Klima im Trend. Temperatur und Niederschlagsentwicklung 1864–2001. MeteoSchweiz, Zürich.

- BRAUN, S., 2019. Private Mitteilung.
- BRAUN, S., HOPF, S., DE WITTE, L., 2018. Wie geht es unserem Wald? 34 Jahre Walddauerbeobachtung. Interkantonales Walddauerbeobachtungsprogramm im Auftrag der Kantone AG, BE, BL, BS, GR, SO, TG, ZG, ZH und der Zentralschweizer Kantone mit Beteiligung des BAFU. Bericht 2013–2017. Institut für Angewandte Pflanzenbiologie (IAP) (Hrsg.). Schönenbuch.
- BRAUN, S., REMUND, J., RHIM, B., 2015. Indikatoren zur Schätzung des Trockenheitsrisikos in Buchen- und Fichtenwäldern. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 166(6):361–371.
- BUWAL, 1995. Vom Menschen verursachte Luftschadstoff-Emissionen in der Schweiz von 1900 bis 2010. Schriftenreihe Umwelt Nr. 256.
- CEPPI, P., SCHERRER, S., FISCHER, A., APPENZELLER, C., 2012. Revisiting Swiss temperature trends 1959–2008. *Int. J. Climatol.* 32. S. 203–213.
- CORTESI, M., GUSTIN, S., RÖNER, T., 2005. Klimawandel in Graubünden und Umgebung – Untersuchung auf der Basis von Monatswerten. Jahresbericht der Naturforschenden Gesellschaft Graubünden 113, S. 109–121.
- IPCC, 2014. Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC) (Hauptautoren, R.K. Pachauri und L.A. Meyer [Hrsg.]). IPCC, Genf, Schweiz. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, 2016.
- KLIMASZENARIEN SCHWEIZ 2018: Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp. ISBN: 978-3-9525031-4-0.
- LATERNSENER, M., 2002. Snow and Avalanche Climatology of Switzerland. Dissertation ETH Zürich Nr. 14493. 140 Seiten.
- MARTY, C., MEISTER, R., 2012. Long-term snow and weather observations at Weissfluhjoch and its relation to other high-altitude observatories in the Alps. *Theor. Appl. Climatol.* 110. S. 573–583.
- METEOSCHWEIZ, 2012. Klimabericht Kanton Graubünden 2012. Fachbericht MeteoSchweiz Nr. 242, 56 Seiten.
- OÖSENBRUG, E., 2019. BAFU, Abteilung Hydrologie. Private Mitteilung.
- REBETZ, M., REINHARD, M., 2008. Monthly air temperature trends in Switzerland 1901–2000 and 1975–2004. *Theor. Appl. Climatol.* 91 (1–4), S. 27–34.
- THUDIUM, J., CHÉLALA, C., 2019. Ozon in der Ostschweiz und in Graubünden: Entwicklung 1992–2018 und Prognose bis zum Ende des 21. Jahrhunderts. Im Auftrag von Ostluft. <https://www.ostluft.ch/index.php?id=80>.