



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement des Innern EDI
Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie **MeteoSchweiz**

Arbeitsbericht MeteoSchweiz Nr. 228

Im Auftrag des Amtes für Natur und Umwelt Graubünden

Klimabericht Kanton Graubünden



Arbeitsbericht MeteoSchweiz Nr. 228

Im Auftrag des Amtes für Natur und Umwelt Graubünden

Klimabericht Kanton Graubünden

Herausgeber

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz
Klimadienste
Krähbühlstrasse 58
CH – 8044 Zürich
klimadienste@meteoschweiz.ch
www.meteoschweiz.ch

Auftraggeber

Amt für Natur und Umwelt Graubünden
Gürtelstrasse 89
CH – 7000 Chur

Projektleitung

Thomas Schlegel
Dr. Mischa Croci-Maspoli

Projektteam

Christian Wüthrich
Dr. Stephan Bader
Dr. Simon Scherrer
Michael Begert
Christine Füllemann
Dr. Christof Appenzeller
Dr. Christoph Marty, WSL-SLF

Bitte zitieren Sie diesen Arbeitsbericht folgendermassen:

MeteoSchweiz, 2009, Klimabericht Kanton Graubünden, *Arbeitsberichte der MeteoSchweiz*, 228, p. 40

© MeteoSchweiz 2009

Dieser Bericht wurde auf chlorfrei gebleichtem, nach FSC Standards zertifiziertem Papier gedruckt.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| INHALTSVERZEICHNIS | I |
| VORWORT | 1 |
| ZUSAMMENFASSUNG | 2 |
| 1 DATENGRUNDLAGE & METHODEN | 4 |
| 1.1 Bodenmessdaten | 4 |
| 1.1.1 Messstandorte..... | 4 |
| 1.1.2 Datenverfügbarkeit..... | 5 |
| 1.1.3 Datenqualität / Datenaufarbeitung..... | 6 |
| 1.2 Klimaszenariendaten | 6 |
| 1.3 Statistische Methoden | 6 |
| 2 DAS KLIMA VON GRAUBÜNDEN – EINE KURZE ÜBERSICHT | 8 |
| 3 HISTORISCHE KLIMAENTWICKLUNG | 9 |
| 3.1 Einleitung | 9 |
| 3.2 Temperatur | 10 |
| 3.2.1 Temperaturentwicklung..... | 10 |
| 3.2.2 Temperaturtrends..... | 12 |
| 3.3 Niederschlag | 13 |
| 3.3.1 Niederschlagsentwicklung..... | 13 |
| 3.3.2 Niederschlagstrends..... | 15 |
| 4 KLIMAINDIKATOREN | 16 |
| 4.1 Einleitung | 16 |
| 4.2 Ausgewählte Klimaindikatoren | 17 |
| 4.2.1 Frosttage..... | 17 |
| 4.2.2 Sommertage..... | 18 |
| 4.2.3 Starkniederschlag: Tage mit Niederschlag ≥ 20 mm..... | 19 |
| 4.2.4 Starkniederschlag: Niederschlag der sehr nassen Tage..... | 20 |
| 4.2.5 Trockenperioden..... | 21 |
| 4.2.6 Nullgradgrenze..... | 22 |
| 5 SCHNEEKLIMATOLOGIE | 24 |
| 5.1 Einleitung | 24 |
| 5.2 Ausgewählte Schneeparameter | 25 |
| 5.3 Schneetrendanalysen | 25 |
| 5.3.1 Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm..... | 25 |
| 5.3.2 Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm..... | 26 |
| 5.3.3 Neuschneesummen..... | 27 |
| 5.3.4 Maximaler Neuschnee..... | 28 |
| 5.3.5 Maximale Gesamtschneehöhe..... | 29 |
| 5.3.6 Tage mit Neuschnee..... | 30 |
| 5.4 Lange Schneereihenanalyse | 32 |
| 5.4.1 Tage mit Neuschnee ≥ 1 cm..... | 32 |
| 5.4.2 Maximaler Tagesneuschnee..... | 32 |
| 5.4.3 Neuschneesumme..... | 33 |
| 6 ZUKÜNFTIGE KLIMAENTWICKLUNG | 34 |
| 6.1 Einleitung | 34 |
| 6.2 Mittlere Temperaturszenarien | 35 |
| 6.3 Mittlere Niederschlagsszenarien | 35 |
| 6.4 Extremereignisse | 38 |

Vorwort

Die Auseinandersetzung mit der Klimaänderung ist in einem Bergkanton wie Graubünden wichtig und anspruchsvoll. Wichtig deshalb, weil der Schutz der Bevölkerung und die Aufrechterhaltung der Infrastrukturen und der Verbindungen jederzeit sichergestellt werden müssen. Anspruchsvoll deshalb, weil das Klima sehr vielfältig ist, entsprechend der Orientierung sowohl Richtung Alpennord- wie Alpensüdseite, unterschiedlicher Höhenlagen der Siedlungen zwischen 500 und 1800 m ü.M. und vielfältiger Windphänomene. Exakte Klimaprognosen sind umso schwieriger, je kleiner der zu betrachtende Raum gewählt wird, aber auch umso interessanter, je grösser die eigene Betroffenheit ist.

Die Messtätigkeit bezüglich einer Vielzahl von klimarelevanten Parametern wie Temperatur, Niederschlagsmenge und Schneehöhe wird im Kanton von Bundesstellen, wissenschaftlich tätigen Instituten und kantonseigenen Spezialisten ausgeführt. Die zur Verfügung stehenden Datenreihen gehen dabei teilweise bis gegen 150 Jahre zurück.

Mit dem vorliegenden Auftrag an das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz zur Auswertung ihrer Klimamessdaten wurde die Zielsetzung verfolgt, die Klimaentwicklung in Graubünden durch ausgewiesene Spezialisten darstellen zu lassen. Es resultiert einerseits die Bestätigung des gemessenen Klimas bezüglich einer signifikanten Temperaturerhöhung um 1 – 2°C während der letzten ca. 100 Jahre. Diese Tatsache widerspiegelt sich auch in der entsprechenden Abnahme der Anzahl Frosttage oder der Zunahme der Sommertage. Andererseits zeigen aktuelle Klimaszenarien auch Aussichten auf weitere 2 – 3°C bis im Jahr 2050. Damit ist die Klimaerwärmung auch für unsere Region quasi amtlich bestätigt worden.

In diesem Bericht mag man vielleicht konkrete Schlussfolgerung und den Ausblick auf Massnahmen vermissen. Dies erklärt sich daraus, dass parallel zur vorliegenden Arbeit, unter Federführung des Amtes für Natur und Umwelt, ein weiterer Bericht mit dem Titel „Klimawandel in Graubünden“ [1] erarbeitet wurde, der sich speziell mit der Betroffenheit der kantonalen Stellen und den Massnahmen in der Vergangenheit und in Zukunft auseinandersetzt. Die Anstrengungen, die Klimaänderung weiterhin zu beobachten und darüber zu informieren, Klimafragen dauernd aktiv zu bearbeiten, sowie geeignete Begleit- und Gegenmassnahmen zu entwickeln und zu realisieren, werden im Kanton Graubünden sicher fortgesetzt werden.

Dr. Peter Baumgartner

Vorsteher des Amtes für Natur und Umwelt Graubünden von 1993 – 2008

Chur, im Mai 2009

Zusammenfassung

Die globale Klimaänderung beeinflusst das Klima auf verschiedenen räumlichen Skalen. Resultate dazu wurden in diversen internationalen ([2], [3]), europäischen [4] und auch nationalen Studien ([5], [6], [7]) publiziert. Wie dieser Bericht zeigt, ist die Klimaänderung auch im Kanton Graubünden feststellbar. Die Auswirkungen sind vielfältig und lassen sich unter anderem anhand verschiedener Klimagrössen wie Temperatur, Niederschlag und Schnee nachweisen.

Historische Klimaentwicklung im Kanton Graubünden

Eine Klimaerwärmung im Kanton Graubünden ist in den Messdaten eindeutig nachweisbar. Der langfristige Temperaturtrend seit Beginn der Messungen im 19. Jahrhundert beträgt im Winter je nach Region zwischen +1°C und etwas über +2°C pro 100 Jahre, im Sommer liegt er zwischen +1°C und +1.5°C pro 100 Jahre. Betrachtet man die Trends der letzten ca. 50 Jahre so lässt sich feststellen, dass die Trends der Temperaturzunahme in allen Jahreszeiten noch ausgeprägter sind. Alle Stationen zeigen zudem signifikante Abnahmen der Frosttage in den letzten 50 Jahren. So sind die Frosttage um zwischen 13% und 42% zurückgegangen. Absolut liegen die Abnahmen zwischen 23 und 50 Tagen. Die Sommertage nehmen markant zu. Abgesehen von hohen Lagen, wo Sommertage noch immer sehr selten sind, kamen alle 10 Jahre zwischen 4 und 11 zusätzliche Sommertage dazu. Relativ gesehen gibt es heute an tiefen und mittleren Lagen rund 60-70% mehr Sommertage als zu Beginn der 1960er Jahre. Die Nullgradgrenze steigt in allen Jahreszeiten in der Periode 1959-2008 deutlich an. Mit Ausnahme vom Herbst sind die Anstiege stark signifikant. Sie bewegen sich je nach Jahreszeit und zwischen 30 und gut 70 m pro 10 Jahre. Wie die Temperaturtrends ist der bisherige Anstieg der Nullgradgrenze im Herbst am Niedrigsten und im Sommer am Grössten. Pro 1°C Erwärmung steigt die Nullgradgrenze um rund 150-200 m.

Bei der Analyse des Niederschlags seit Beginn der systematischen Messungen im Jahre 1864 sind periodische Schwankungen der saisonalen Niederschlagssummen das typische Merkmal. Über die gesamte Messperiode betrachtet ist keine eindeutige langfristige Niederschlagsänderung zu beobachten. Ebenfalls keine statistisch abgesicherten Veränderungen zeigen sich in den meisten Gebieten für die indirekten Niederschlagsmessgrössen „Trockenperioden“ und „Starkniederschläge“ seit 1959.

Der Grossteil der ausgewerteten Stationen im Kanton Graubünden zeigen einen signifikanten Rückgang in der jährlichen Anzahl Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm und auch grösser als ≥ 30 cm. Die Auswertungen über das hydrologische Jahr zeigen eine Abnahme der Neuschneesummen, auch in Lagen über 2000 m ü.M. Die maximale Gesamtschneehöhe pro Jahr zeigt insbesondere im Engadin eine deutliche Abnahme. Ab ca. 2000 m ü.M. kann jedoch kein Trend festgestellt werden. Nur marginale Änderungen sind beim maximalen Neuschnee zu beobachten. Unabhängig von der Höhenlage zeigt die Trendanalyse bei allen Stationen eine Abnahme der Tage mit Neuschnee. Bereits Ende des 19. Jahrhunderts sowie Mitte des 20. Jahrhunderts wurden jedoch ähnlich tiefe Werte wie heute gemessen. Eine Übersicht zu allen untersuchten Parameter ist in Tabelle A zusammengestellt.

Zukünftige Klimaentwicklung im Kanton Graubünden

Aufgrund der heute verfügbaren Klimamodelle muss davon ausgegangen werden, dass die Klimaänderung weitergeht. Obwohl Klimavorhersagen immer mit Unsicherheiten behaftet sind, lassen sich dennoch einige Aussagen über die gemäss heutigem Kenntnisstand zu erwartenden Veränderungen machen. Gemäss Modellszenarien dürften sich bis Mitte des 21. Jahrhunderts die mittleren Temperaturen im Winter um knapp 2°C und im Sommer um gut 2.5°C erhöhen. Gemäss Modellszenarien könnten die Niederschläge im Winter um etwa 10% zunehmen, während in den Sommermonaten mit einer Abnahme der Niederschläge in der Grössenordnung von 20% zu rechnen ist. Bezüglich der Entwicklung der extremen Wetterereignisse deuten die Modellszenarien in Richtung einer Zunahme der Temperaturextreme, einer Zunahme von Trockenperioden und einer erhöhten Anzahl an Starkniederschlägen.

Tabelle A: Übersicht der Veränderungen der wichtigsten Parameter und Klimaindikatoren im Kanton Graubünden. Die Trends wurden für die Trendperiode 1959 – 2008 berechnet. Eine Ausnahme sind die mittlere Temperatur/Niederschlag (1961-2008), die Station Scuol (1972-2008) und Grono (1971-2008). Signifikant positive Trends sind in rot, signifikant negative Trends in blau dargestellt ($p \leq 0.05$). Detaillierte Angaben zu den Trends werden in den entsprechenden Kapiteln diskutiert.

| Veränderung von | Mittlere Temperatur | Mittlerer Niederschlag | Anzahl Frosttage | Anzahl Sommertage | Tage mit Niederschlag $\geq 20\text{mm}$ | Sehr nasse Tage | Trockenperioden | Gesamtschnee $\geq 5\text{cm}$ | Gesamtschnee $\geq 30\text{cm}$ | Neuschneesummen | Maximaler Neuschnee | Maximaler Gesamtschnee | Tage mit Neuschnee |
|-----------------|---------------------|------------------------|---------------------|---------------------|--|-------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------|------------------------|---------------------|
| Einheit | [°C pro 10 Jahre] | [% pro 10 Jahre] | [Tage pro 10 Jahre] | [Tage pro 10 Jahre] | [Tage pro 10 Jahre] | [mm pro 10 Jahre] | [Tage pro 10 Jahre] | [Tage pro 10 Jahre] | [Tage pro 10 Jahre] | [cm pro 10 Jahre] | [cm pro 10 Jahre] | [cm pro 10 Jahre] | [Tage pro 10 Jahre] |
| Chur | +0.4 | +2.8 | -7.9 | +4.7 | +0.8 | +24.4 | +0.1 | -6.2 | -1.8 | -15.9 | -1.1 | -2.3 | -3.0 |
| Davos | +0.4 | +1.4 | -5.2 | +1.3 | +0.5 | +20.8 | +0.1 | -6.4 | -8.3 | -36.4 | -1.2 | -5.4 | -1.3 |
| Weissfluhjoch | +0.3 | +0.5 | - | - | - | - | - | -3.8 | -4.7 | -31.2 | +0.5 | -0.2 | -3.3 |
| Disentis | +0.4 | +2.5 | -4.5 | +3.8 | +0.5 | +21.9 | +0.7 | -6.4 | -9.4 | -30.5 | -2.5 | -6.6 | -2.3 |
| Arosa | +0.4 | +0.8 | - | - | - | - | - | -5.9 | -8.8 | -46.4 | -2.1 | -9.9 | -3.1 |
| Samedan | +0.4 | +0.9 | -9.8 | +0.6 | +0.4 | +15.9 | +0.6 | - | - | - | - | - | - |
| Scuol | +0.3 | +0.5 | -7.7 | +5.0 | +0.2 | +9.3 | +0.9 | - | - | - | - | - | - |
| Segl-Maria | +0.3 | +1.8 | - | - | - | - | - | -10.6 | -14.9 | -27.8 | -0.1 | -14.8 | -1.6 |
| Robbia | +0.3 | +2.0 | -6.5 | +4.1 | -0.1 | +24.5 | +2.2 | - | - | - | - | - | - |
| Grono | +0.3 | -1.0 | -2.3 | +11.2 | -1.6 | -14.8 | +1.3 | - | - | - | - | - | - |

1 Datengrundlage & Methoden

1.1 Bodenmessdaten

Die Datengrundlage dieses Berichtes basiert auf Stationen des MeteoSchweiz Messnetzes im Gebiet des Kantons Graubündens. Dazu wurden Stationen des schweizerischen Klimabeobachtungs-Messnetzes (Swiss NBCN) [8] oder des schweizerischen Klimaergänzungsmessnetzes (NSCN) verwendet. Die Stationsauswahl wird dabei aufgrund verschiedener Kriterien festgelegt. In erster Linie sollen die Stationen die verschiedenen klimatologischen Gegebenheiten des Gebirgskantons abdecken (Kapitel 1.1.1). Zudem müssen die Datenreihen genügend weit in die Vergangenheit zurückreichen, damit allfällige Veränderungen überhaupt gesichert feststellbar sind. Die Datenverfügbarkeit sollte hierfür ca. 50 Jahre betragen (Kapitel 1.1.2). Ein weiteres Kriterium ist die Datenqualität. Für verlässliche Klimaanalysen ist es zwingend notwendig die entsprechenden Datenreihen vorgängig zu prüfen. Insbesondere dürfen die Datenreihen keine Signale enthalten, welche auf Veränderungen in den Messbedingungen zurückzuführen sind, z.B. eine Stationsverschiebung. Das Verfahren zur Eliminierung solcher Einflüsse wird als Homogenisierung bezeichnet (Kapitel 1.1.3).

1.1.1 Messstandorte

Es wurden Daten von 11 verschiedenen Bodenmessstandorten im Kanton Graubünden verwendet. Die geographische Verteilung dieser Stationen ist in Abbildung 1.1 ersichtlich. Die genaue Lage der Stationen und die Höhe sind in Tabelle 1.1 enthalten, wobei auch eine räumliche Zuteilung in a) Nord- und Mittelbünden, b) Engadin und c) Bündner Südtäler gemacht wird.

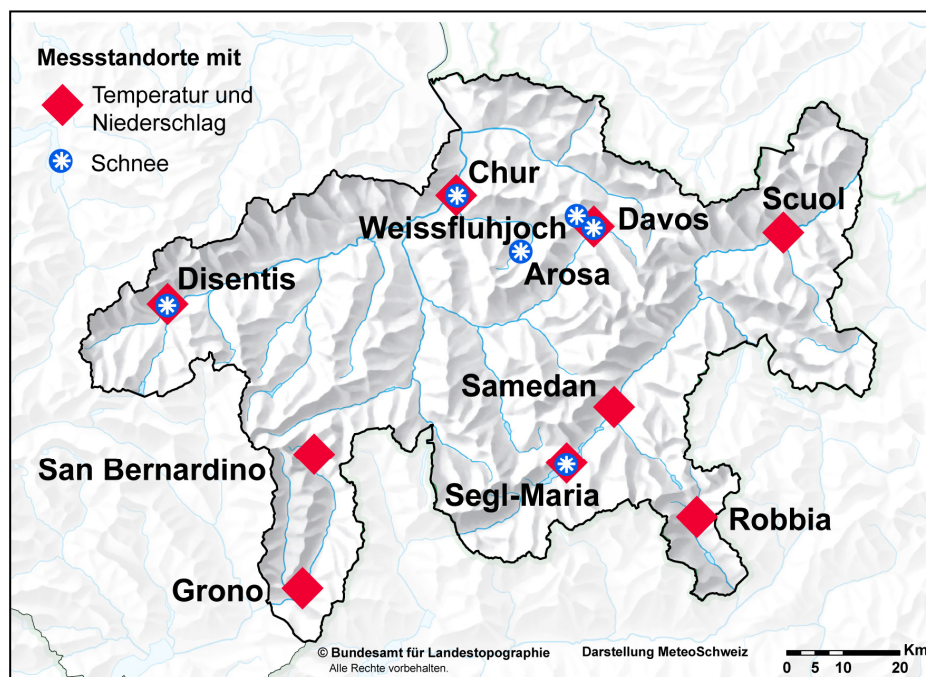


Abbildung 1.1 Geographische Verteilung der verwendeten Bodenmessstationen im Kanton Graubünden. Die Stationen werden aufgeteilt nach verschiedenen Parametern.

Tabelle 1.1: Liste der verwendeten Stationen mit Name, räumlicher Zuordnung, Höhe über Meer und CH-Koordinaten.

| Station | Zuordnung räumlich | Höhe [m ü.M.] | CH-Koordinaten |
|----------------|------------------------|---------------|-------------------|
| Chur | Nord- und Mittelbünden | 556 | 759'471 / 193'157 |
| Davos | Nord- und Mittelbünden | 1594 | 783'514 / 187'458 |
| Weissfluhjoch | Nord- und Mittelbünden | 2690 | 780'615 / 189'636 |
| Disentis | Nord- und Mittelbünden | 1197 | 708'189 / 173'789 |
| Arosa | Nord- und Mittelbünden | 1840 | 770'730 / 183'320 |
| Samedan | Engadin | 1709 | 787'210 / 155'700 |
| Scuol | Engadin | 1304 | 817'135 / 186'393 |
| Segl-Maria | Engadin | 1798 | 778'800 / 145'738 |
| Robbia | Bündner Südtäler | 1078 | 801'850 / 136'180 |
| Grono | Bündner Südtäler | 382 | 732'100 / 123'700 |
| San Bernardino | Bündner Südtäler | 1639 | 734'112 / 147'296 |

1.1.2 Datenverfügbarkeit

Je nach Station, Parameter und Qualität sind Klimadaten im Kanton Graubünden über verschiedene Zeiträume verfügbar. Nach Möglichkeit sollen die Datenreihen eine Länge von 50 Jahren aufweisen. Wo dies nicht möglich ist, wird auf kürzere Messreihen zurückgegriffen (Tabelle 1.2). Der Schneemessstandort Disentis der MeteoSchweiz wurde im Jahr 2005 von Disentis nach Sedrun verschoben. Um bei der Trendanalyse plausible Resultate zu gewährleisten und die Vergleichbarkeit mit den übrigen Stationen sicher zustellen wurden bei der Auswertung der Schneemessreihe von Disentis ab 2005 die Daten des WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF verwendet. Der Messstandort des WSL-SLF befindet sich an derselben Stelle, wo bis 2005 MeteoSchweiz Schnee gemessen hat. Zusätzlich wurden für eine vollständige statistische Analyse Datenlücken in der langen Neuschneemessreihe von Segl-Maria durch die jeweiligen 20-jährigen Mittelwerte interpoliert. Dies betrifft die Werte der Jahre 1911, 1914, 1915 und 1950. Grundsätzlich basieren die Auswertungen auf dem Kalenderjahr. Für die Schneeanalysen wird das hydrologische Jahr verwendet (1. Oktober - 30. September).

Tabelle 1.2: Liste der verwendeten Stationen mit Name und verwendeten/verfügbaren Daten. §Station nicht über den ganzen Zeitraum (1959 – 2008) verfügbar. * nur zur Bestimmung der Nullgradgrenze.

| Station | Temperatur- / Niederschlagsanalysen | Klima-indikatoren | Neuschneeanalysen | Gesamtschneeanalysen |
|----------------|-------------------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|
| Chur | 1887 - 2008 | 1959 - 2008 | 1889 - 2008 | 1959 – 2008 |
| Davos | 1876 - 2008 | 1959 - 2008 | 1932 - 2008 | 1959 – 2008 |
| Weissfluhjoch | – | – | §1960 - 2008 | §1960 - 2008 |
| Disentis | – | 1959 - 2008 | §1961 - 2008 | §1961 - 2008 |
| Arosa | – | – | 1892 - 2008 | 1959 - 2008 |
| Samedan | – | 1959 - 2008 | – | – |
| Scuol | – | §1972 - 2008 | – | – |
| Segl-Maria | 1863 - 2008 | *1959 - 2008 | 1865 - 2008 | 1959 - 2008 |
| Robbia | – | 1959 - 2008 | – | – |
| Grono | – | §1971 - 2008 | – | – |
| San Bernardino | – | *1968 - 2008 | – | – |

1.1.3 Datenqualität / Datenaufarbeitung

Sämtliche verwendeten Daten wurden vorgängig auf ihre Qualität hin überprüft. Dies geschieht an der MeteoSchweiz routinemässig mit automatischen und manuellen Verfahren. Dadurch werden unplausible Werte, wie sie z.B. aufgrund fehlerhafter Übermittlung auftreten können, eliminiert.

Der Nachweis von klimatischen Änderungen setzt zudem zwingend sogenannte homogene lange Datenreihen voraus. Homogen bedeutet, dass alle künstlichen (=nicht auf klimatologische Ursachen zurückzuführende) Änderungen in einer Datenreihe eliminiert sind. Künstliche Änderungen haben viele Ursachen: Viele Messstationen mussten in der Vergangenheit einmal oder mehrmals etwas verschoben werden. Zudem wurden die meisten Stationen im Laufe der Zeit automatisiert und mit modernen Messinstrumenten versehen. Diese und noch einige weitere bekannte Ursachen können teilweise massive künstliche Unregelmässigkeiten im Verlauf der Messreihe nach sich ziehen. Werden solche Unregelmässigkeiten nicht erkannt und entsprechend korrigiert (= homogenisiert), führen sie zu falschen klimatologischen Schlüssen. MeteoSchweiz hat für die Homogenisierung von Klimareihen ein Verfahren entwickelt [9], [10] und wendet dieses systematisch auf Datenreihen ihrer Bodenmessstationen an.

Für die Temperatur- und Niederschlagsanalysen wie auch für die Analysen der Klimaindikatoren (= aus den Datenreihen der Temperatur und des Niederschlags abgeleiteten Klimagrössen wie Frost- und Sommertage oder Tage mit Niederschlag ≥ 20 mm) konnten homogene Datenreihen verwendet werden. Lediglich die Schneeanalysen beruhen auf nicht homogenen, jedoch geprüften Datenreihen.

1.2 Klimaszenariendaten

Die Daten für die Szenarien der Temperatur- und Niederschlagsentwicklung in den nächsten Jahrzehnten basieren auf einer grossen Zahl globaler und regionaler Klimamodellrechnungen aus dem EU-Forschungsprojekt PRUDENCE [11]. Mit den heute verfügbaren Mitteln lassen sich allerdings keine hochaufgelösten spezifischen Klimaszenarien, zum Beispiel für das Oberengadin oder die Landschaft Davos, berechnen. Die aktuellen Szenarien liefern Angaben über die zukünftige saisonale Entwicklung der Temperatur und des Niederschlags im Grossraum Alpennordseite und Alpensüdseite. Als Ausgangsbasis für die Berechnung der Änderungen wird immer der Zustand von 1990 verwendet.

Szenarienrechnungen sind mit relativ grossen Unsicherheiten verbunden. Deshalb wird neben der Berechnung der Temperatur- und Niederschlagsänderung immer auch der dazu gehörende Unsicherheitsbereich der Aussage bestimmt. Im Folgenden wird jeweils das 95% Vertrauensintervall angegeben. Das bedeutet, dass sich die Änderung mit 95% Wahrscheinlichkeit innerhalb der angegebenen Unsicherheits-Bandbreite bewegen wird.

1.3 Statistische Methoden

Für die Auswertungen in diesem Bericht werden verschiedene statistische Methoden angewendet.

Für Temperatur-, Schnee- und Niederschlagsanalysen über sehr lange Zeiträume wird ein 20-jähriger Gauss-Filter auf die Messdaten angewendet. Für die Schneeanalysen wurde am Beginn und Ende der Messreihe ein einseitiger Gaussfilter verwendet. Durch den Gaussfilter werden die einzelnen Messwerte einer Zeitreihe geglättet, um die langjährigen Variabilitäten besser sichtbar zu machen.

Für die Berechnung der linearen Trends wird auf kontinuierliche Daten (z.B. Saison- und Jahresmittel der Temperatur-, Niederschlag und Schneedaten) eine least-square Regression verwendet [12]. Für Zählraten (z.B. Tage mit Frost, Anzahl Tage mit Schneedecke ≥ 5 cm) wird für die Berechnung der Trends eine logistische Regression verwendet, da Auswertungen auf Zählraten nicht mit Hilfe von linearen Trendberechnungen vorgenommen werden sollten [13], [14]. Die Signifikanz der Trendanalysen wird über den p-Wert der Regression bestimmt. Dabei werden drei verschiedene Signifikanzniveaus von a) stark signifikant, b) signifikant zu c) nicht

signifikant unterschieden (Tabelle 1.3). Unsicherheiten werden mit einem sogenannten Vertrauensintervall angegeben. Im Folgenden wird jeweils das 95% Vertrauensintervall angegeben.

Für die Berechnung der Nullgradgrenze wurde folgendes Vorgehen gewählt: Für jeden Zeitpunkt (hier saisonal, also z.B. Winter 1962) wird über eine lineare Regression zwischen homogenisierten Temperaturmittelwerten und Höhe über Meer die Höhe der Nullgradgrenze sowie eine Abschätzung deren Unsicherheit bestimmt. Für diese zwei Schritte wird die `predict()` Funktion des Statistikpakets *R* [15] verwendet. Für die so bestimmten saisonalen Nullgradgrenzen (z.B. Sommer 1959-2008) wird dann über eine lineare Regression die zeitliche Veränderung der Nullgradgrenze quantifiziert (Trend in m/10 Jahre sowie Signifikanz über den p-Wert). Es wurden zwei Gruppen von Stationen verwendet um die Sensitivität der Stationsanzahl auf die Nullgradgrenzenberechnung abzuschätzen. Einmal wurden alle 29 Stationen aus dem Klimamessnetz (Swiss NBCN) [8] verwendet, einmal 9 Stationen aus Graubünden

Tabelle 1.3: Darstellung und Beschreibung der im Bericht verwendeten Signifikanzniveaus.

| p-Wert | Signifikanzen | Beschreibung |
|--------------------------|----------------------|--|
| ≤ 0.01 | Stark signifikant | Es kann mit sehr grosser Sicherheit gesagt werden, dass ein Trend vorhanden ist. |
| > 0.01 und ≤ 0.05 | Signifikant | Es kann mit grosser Sicherheit gesagt werden, dass ein Trend vorhanden ist. |
| > 0.05 | Nicht signifikant | Obwohl eine Tendenz in den Daten erkennbar ist, lässt sich nicht eindeutig sagen, ob es sich um einen gesicherten Trend handelt. |

2 Das Klima von Graubünden – eine kurze Übersicht

Das Klima der Schweiz und damit auch das Klima Graubündens werden stark durch den nahen Atlantik bestimmt. Mit den vorherrschenden Strömungen aus westlichen und südwestlichen Richtungen gelangt vorwiegend feucht-milde Meeresluft in die Schweiz. Im Sommer wirkt sie kühlend, im Winter wärmend, und das ganze Jahr hindurch fällt in den meisten Gebieten regelmässig Niederschlag. Die Alpen wirken dabei als markante Klimaschranke zwischen der Nord- und der Südschweiz. Die hauptsächlich vom Mittelmeer her beeinflusste Südschweiz unterscheidet sich vom Norden vor allem durch deutlich mildere Winter. Hierunter fallen insbesondere die Bündner Südtäler Val Poschivo, Val Bregaglia und Valle Mesolcina.

Die Temperaturen – von mediterran bis arktisch

Die Temperaturen in Graubünden sind neben den Nord-Süd-Unterschieden primär abhängig von der Höhenlage. In den Tieflagen Nordbündens, Beispiel Chur, liegt die Durchschnittstemperatur im Januar bei rund -0.5°C , im Juli bei knapp 18°C . In Tieflagen der mediterran beeinflussten Südseite, Beispiel Grono im unteren Val Mesolcina, liegen die entsprechenden Durchschnittstemperaturen 2 bis 3 Grad höher. In Höhenlagen von rund 1600 m ü.M., Beispiel Davos, zeigt der Januar eine Durchschnittstemperatur von rund -5°C , und der Juli von rund 11°C . Im arktischen Klima des Hochgebirges auf rund 3300 m ü.M., Beispiel Piz Corvatsch, sinken die durchschnittlichen Januartemperaturen schliesslich auf -12°C , während die durchschnittliche Julitemperatur nur noch 1 bis 2°C über Null erreicht.

Der Kanton Graubünden ist übrigens Temperatur-Rekordhalter der Schweiz: In Grono stieg während des Hitzesommers 2003 am 11. August die Temperatur auf den bisher absolut höchsten von MeteoSchweiz in der Schweiz gemessenen Wert von $+41.5^{\circ}\text{C}$.

Trockenes Klima im Innern der Alpen

Neben ihrer dominanten Wirkung als Klimaschranke zwischen Nord und Süd erzeugen die Alpen als kompliziertes Gebirge zusätzlich mehrere verschiedene Klimabereiche. Ein ausgeprägt eigenes Klima zeigen die inneralpinen Täler, da sie sowohl gegen die Niederschlagsaktivität aus Norden als auch aus Süden abgeschirmt sind. Die Folge sind trockene Bedingungen. Ganz typische Bündner-Vertreter sind hier die Region Mittelbünden sowie das Engadin. Während entlang der nördlichen Voralpen und in den Alpen sowie in der Südschweiz die durchschnittliche Niederschlagsmenge bei ungefähr 2000 mm/Jahr liegt, beträgt sie in Mittelbünden regional nur 780 bis 920 mm/Jahr, im Engadin sogar nur 690 bis 800 mm/Jahr. Im Flachland nördlich der Alpen beträgt die Menge etwa 1000 bis 1500 mm/Jahr. Die Niederschlagsmengen sind im Sommer in diesen Regionen ungefähr doppelt so hoch wie im Winter.

3 Historische Klimaentwicklung

Eine Klimaerwärmung im Kanton Graubünden ist in den Messdaten eindeutig nachweisbar. Beim mittleren Niederschlag sind periodische Schwankungen der saisonalen Niederschlagssummen das typische Merkmal. Die wichtigsten Resultate können wie folgt zusammengefasst werden:

- Seit 1900 wird ein stark signifikanter positiver Temperaturtrend im Winter (0.1°C bis 0.2°C pro 10 Jahre) und im Sommer (0.2°C bis 0.15°C pro 10 Jahre) gemessen.
- Seit 1961 wird ein stark signifikanter und noch ausgeprägterer Temperaturtrend im Winter (0.3°C bis 0.4°C pro 10 Jahre) und im Sommer (0.4°C bis 0.5°C pro 10 Jahre) gemessen.
- Sowohl ab 1900 als auch ab 1961 ist kein eindeutiger langfristiger Trend des mittleren Niederschlags zu beobachten.

3.1 Einleitung

Die Diskussion um die langfristige Klimaentwicklung wird in der Öffentlichkeit immer wieder dann aktuell, wenn sich Dramatisches abspielt. Kurzfristige extreme Bedingungen wie Überflutungen durch anhaltende Starkniederschläge, Hitzewellen oder auch Lawinenwinter sind für jedermann wahrnehmbar. Allerdings wird in solchen Situationen die Klimaentwicklung allzu oft nur auf Extremereignisse und insbesondere auf die Änderungen in deren Häufigkeit und Intensität reduziert. Doch gerade hierzu sind meist keine verlässlichen Aussagen möglich, da die seltenen Extremereignisse statistisch schlecht erfassbar sind [16], [17]. In der alltäglichen Klimaentwicklung von Jahr zu Jahr oder von Jahrzehnt zu Jahrzehnt kommen Änderungen hingegen viel eindeutiger zum Ausdruck [9], [10]. Das Klima, wie wir es erleben, ist nämlich nichts konstantes, sondern eine Abfolge von deutlich wechselnden Bedingungen. Je nach Jahreszeit haben sich in der langfristigen Klimaentwicklung dabei nicht nur Wechsel, sondern eigentliche Klimasprünge ereignet, welche durchaus auch mit einer gewissen Dramatik verbunden sind.

Verursacher klimatischer Änderungen und Sprünge sind seit jeher eine Reihe natürlicher Klimafaktoren, wie zum Beispiel die Schwankungen der Sonnenaktivität, Vulkanausbrüche oder auch Änderungen von Ozeanströmungen. Diese Klimafaktoren überlagern sich in vielfältiger Weise und führen schliesslich zu der zwar bekannten, aber bisher immer noch recht unverständenen alpinen Klimavariabilität [19]. Seit Beginn der Industrialisierung im 19. Jahrhundert sind wir Menschen zusätzlich als wesentlicher Klimafaktor hinzugekommen. Mit unseren Emissionen aus Industrie, Verkehr und Haushalt, den bekannten Treibhausgasen und anderen klimawirksamen Stoffen, sowie gravierender Oberflächenveränderungen wie Verstädterung oder Abholzungen, greifen wir in den Wärmehaushalt und damit in die zentrale Steuerung des Klimasystems ein. Auch wenn der Einfluss der natürlichen Klimafaktoren noch keinesfalls ausreichend verstanden ist, muss nach den neuesten Befunden damit gerechnet werden, dass ein wesentlicher Anteil der globalen Erwärmung der vergangenen 100 bis 150 Jahre, und speziell jene ab den 1970er Jahren, mit hoher Wahrscheinlichkeit auf diese menschlichen Aktivitäten zurückgeht [2], [3].

3.2 Temperatur

3.2.1 Temperaturentwicklung

Hinsichtlich der langfristigen mittleren Temperaturentwicklung zeigen die Jahreszeiten Herbst und Winter ein sehr ähnliches Muster. Noch näher kommen sich die Temperaturmuster der beiden Jahreszeiten Frühling und Sommer.

Das Muster des langjährigen Temperaturverlaufs von Frühling und Sommer wird geprägt durch die überdurchschnittlich warmen 1940er Jahre sowie den Temperatursprung im Laufe der 1980er Jahre (Abbildung 3.1) Ausgesprochen gleichmässig im langfristigen Temperaturverlauf zeigen die Frühlings- und Sommertemperaturen zwischen 1960 und 1980. Die Frühlingstemperaturen weisen zudem auch vor 1940 eher geringe Variabilitäten in der langfristigen Temperaturentwicklung auf.

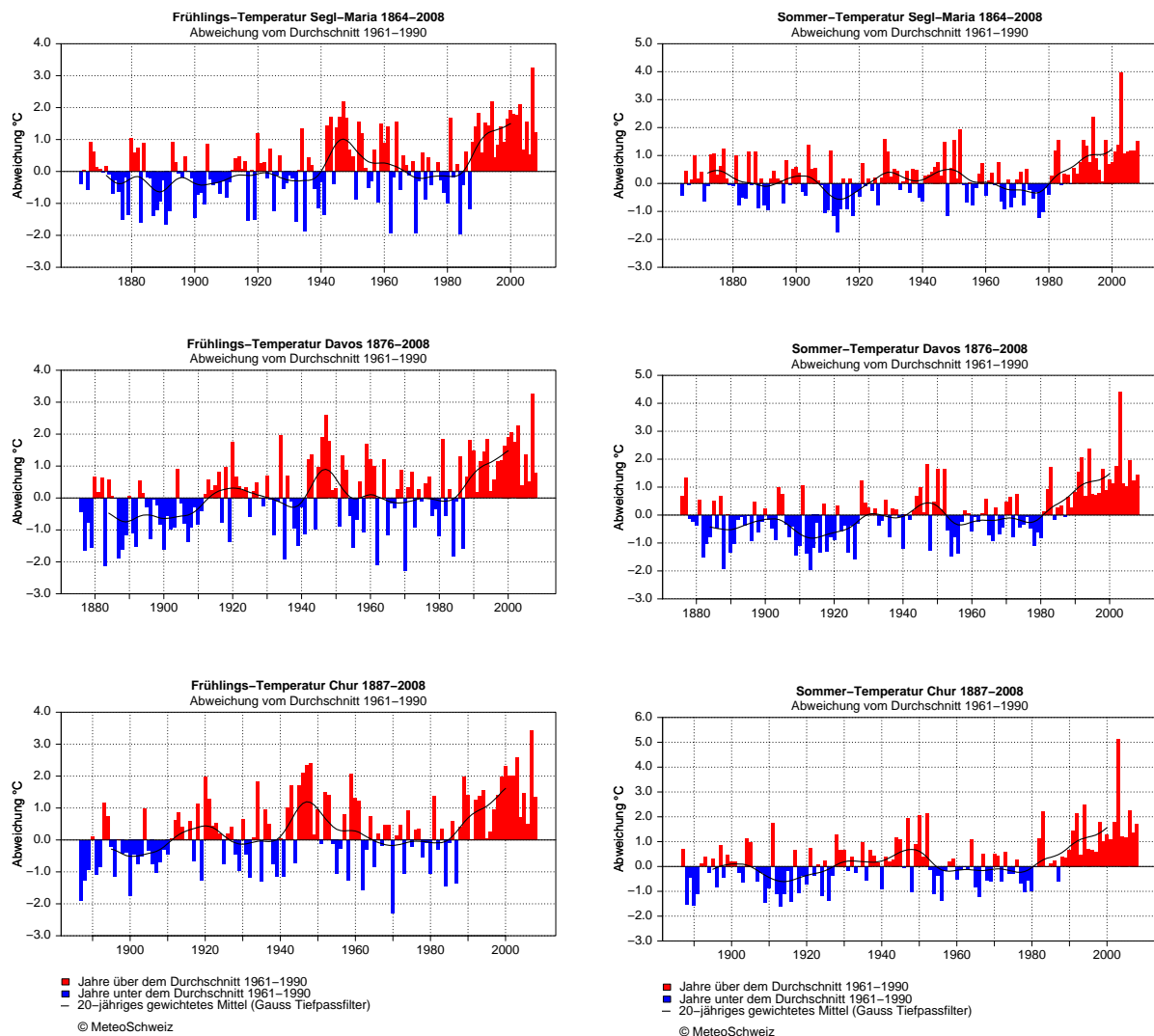


Abbildung 3.1: Langjähriger Verlauf der Frühlingstemperatur (März bis Mai, links) und der Sommertemperaturen (Juni bis August, rechts) an den Messstationen Segl-Maria, Davos und Chur. Dargestellt in rot und blau ist die jährliche Abweichung der Temperatur von der Norm 1961-1990. Die schwarze Kurve zeigt den 20-jährigen Gaußfilter. Die Frühlings-Normtemperatur beträgt für Segl-Maria 0.1°C , für Davos 1.7°C und für Chur 8.6°C . Die Sommer-Normtemperatur beträgt für Segl-Maria 9.5°C , für Davos 10.4°C und für Chur 16.7°C .

In der Zeit von 1864 und 2008 hat sich das Temperaturregime der Jahreszeiten Herbst und Winter zweimal grundlegend geändert (Abbildung 3.2). Zwischen 1880 und 1900 sanken die Temperaturen insbesondere im Winter innert weniger Jahre für kurze Zeit auf ein bedeutend tieferes Niveau. Eine weitere Phase mit tiefen Temperaturen, diesmal vor allem im Herbst ausgeprägt, folgte zwischen 1900 und 1920. Rund 100 Jahre später vollzog sich mit dem Winter 1987/88 ein sprunghafter Wechsel zu einer ausgeprägten Warmwinterphase. Ab diesem Zeitpunkt sind wiederholt auftretende hohe Temperaturen, etwas weniger stark ausgeprägt auch im Herbst, das typische Merkmal bis zum Übergang ins 21. Jahrhundert. Auch das Fehlen sehr tiefer Winter- und Herbsttemperaturen gegen Ende des 20. Jahrhunderts macht deutlich, dass sich eine grundlegende Änderung im Temperaturregime eingestellt hat. Bis in die 1960er Jahre traten insbesondere sehr kalte Winter hin und wieder auf. Anschliessend verschwand dieses Muster jedoch vollständig aus der Klimatologie des Winters.

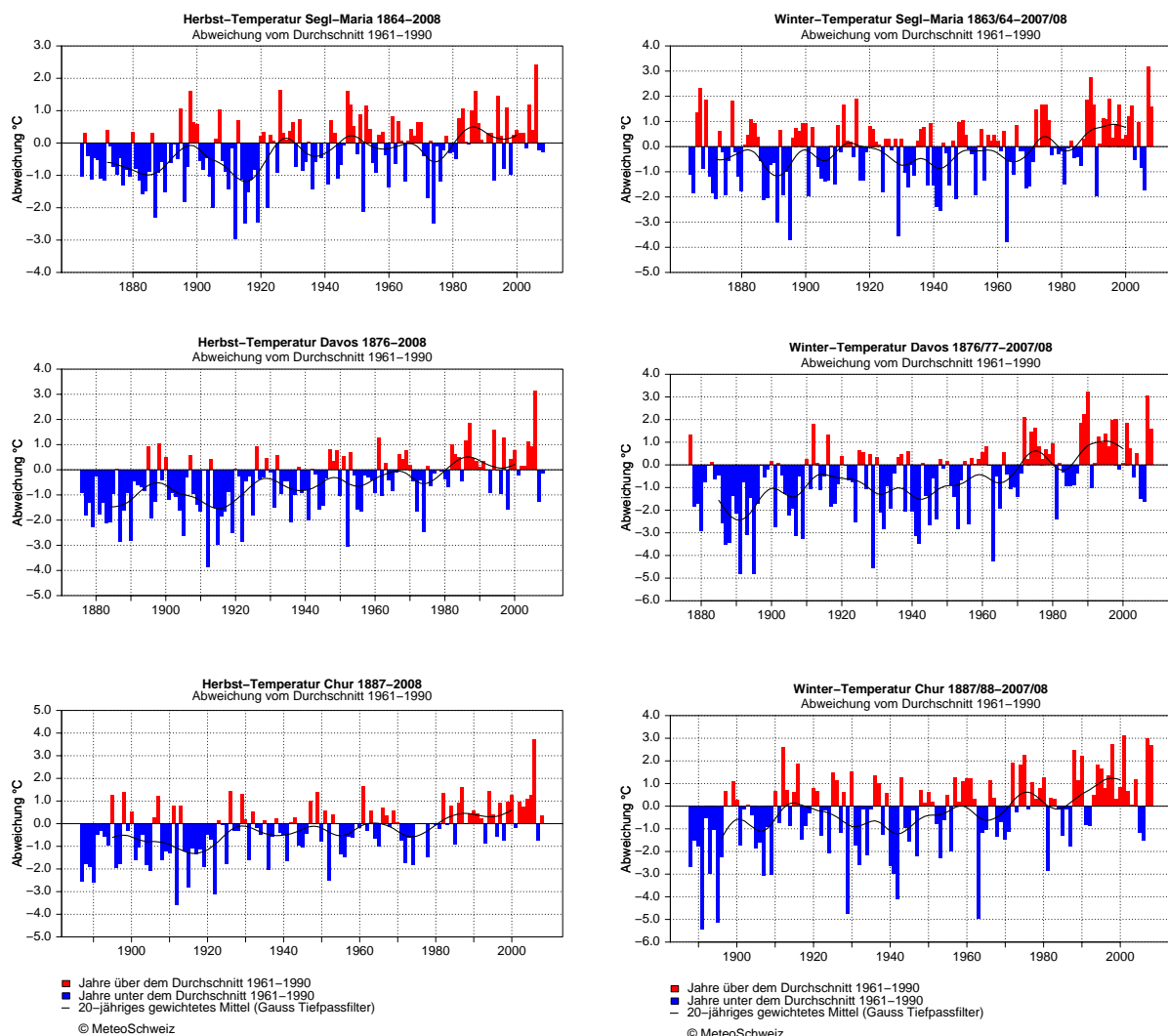


Abbildung 3.2: Langjähriger Verlauf der Herbsttemperatur (September bis November, links) und Wintertemperaturen (Dezember bis Februar, rechts) an den Messstationen Segl-Maria, Davos und Chur. Dargestellt in rot und blau ist die jährliche Abweichung der Temperatur von der Norm 1961-1990. Die schwarze Kurve zeigt den 20-jährigen Gaussfilter. Die Herbst-Normtemperatur beträgt für Segl-Maria 3.1°C, für Davos 4.0°C und für Chur 9.3°C. Die Winter-Normtemperatur beträgt für Segl-Maria -6.5°C, für Davos -4.8°C und für Chur 0.2°C.

3.2.2 Temperaturtrends

Ab dem Jahr 1887 sind für alle drei Messreihen Segl-Maria, Davos und Chur Temperaturdaten verfügbar. Um vergleichbare Aussagen zum langfristigen Temperaturverlauf zu erhalten, beziehen sich die folgenden Angaben für alle Stationen auf die Perioden 1900-2008 und 1961-2008 (Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2).

Alle drei Messreihen zeigen in allen vier Jahreszeiten stark signifikante Trends zu höheren Temperaturen ([10], [18], [20], [21]). Die mit Abstand grössten Erwärmungstrends sind im Winter an den Messstationen Davos und Chur zu verzeichnen. Segl-Maria als südalpine Messstation weist im Sommer, Herbst und im Winter im Vergleich zu Davos und Chur deutlich geringere Erwärmungstrends auf. Der Befund von tendenziell geringeren Erwärmungstrends an alpensüdseitigen Messstationen steht in Übereinstimmung mit früheren Auswertungen zu Temperaturtrends in der Schweiz ([10], [18], [20]). Abweichend zu Davos und Chur zeigt die Messreihe Segl-Maria die grösste jahreszeitliche Erwärmung nicht im Winter, sondern im Frühling.

Tabelle 3.1: Saisonale Temperaturtrends in Grad Celsius pro 10 Jahre in der Periode 1900 bis 2008. Signifikante Trends sind fett und rot (positiv) oder blau (negativ) dargestellt.

| Station | Frühling (Mär. – Mai) | Sommer (Jun. – Aug.) | Herbst (Sep. – Nov.) | Winter (Dez. – Feb.) |
|------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Segl-Maria | + 0.2°C (stark signifikant) | + 0.1°C (stark signifikant) | + 0.1°C (stark signifikant) | + 0.1°C (stark signifikant) |
| Davos | + 0.1°C (stark signifikant) | + 0.2°C (stark signifikant) | + 0.2°C (stark signifikant) | + 0.2°C (stark signifikant) |
| Chur | + 0.1°C (stark signifikant) | + 0.1°C (stark signifikant) | + 0.2°C (stark signifikant) | + 0.2°C (stark signifikant) |

Tabelle 3.2 Saisonale Temperaturtrends in Grad Celsius pro 10 Jahre in der Periode 1961 bis 2008. Signifikante Trends sind fett und rot (positiv) oder blau (negativ) dargestellt.

| Station | Frühling (Mär. – Mai) | Sommer (Jun. – Aug.) | Herbst (Sep. – Nov.) | Winter (Dez. – Feb.) |
|------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| Segl-Maria | + 0.5°C (stark signifikant) | + 0.4°C (stark signifikant) | + 0.1°C (nicht signifikant) | + 0.3°C (stark signifikant) |
| Davos | + 0.5°C (stark signifikant) | + 0.5°C (stark signifikant) | + 0.2°C (nicht signifikant) | + 0.3°C (stark signifikant) |
| Chur | + 0.5°C (stark signifikant) | + 0.5°C (stark signifikant) | + 0.2°C (signifikant) | + 0.4°C (signifikant) |

3.3 Niederschlag

3.3.1 Niederschlagsentwicklung

In den Niederschlags-Messreihen treten regional zum Teil recht verschiedene Muster auf. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Messreihe Segl-Maria zum südalpinen Niederschlagsregime gehört und damit der Niederschlag hier primär bei Südströmungen fällt, während die beiden anderen Messstationen nordalpin ausgerichtet sind. Markante Unterschiede zwischen Nord und Süd ergeben sich insbesondere in der Niederschlagsentwicklung während der letzten Jahre im Frühling (Abbildung 3.3). Die im Engadin auffallende Rückkehr zu wieder trockeneren Frühlings-Bedingungen nach einer niederschlagsreicheren Phase um die 1980er Jahre ist an den beiden anderen Messstandorten nicht zu beobachten.

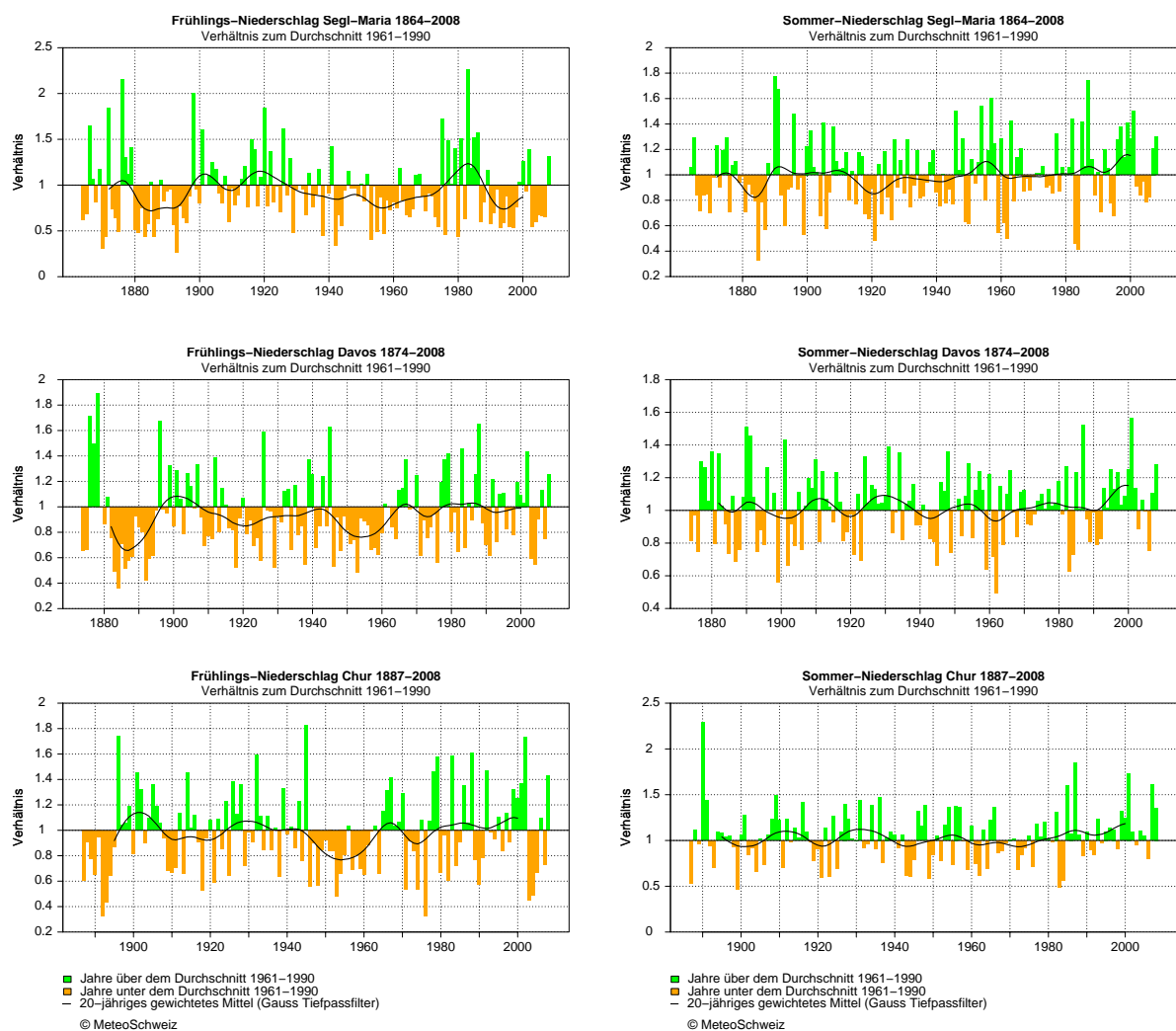


Abbildung 3.3: Langjähriger Verlauf der Frühlingsniederschläge (März bis Mai, links) und Sommerniederschläge (Juni bis August, rechts) an den Messstationen Segl-Maria, Davos und Chur. Dargestellt in grün und orange ist die jährliche Abweichung von der Norm 1961-1990. Die schwarze Kurve zeigt den 20-jährigen Gaussfilter. Die Frühlings-Normniederschlagssumme beträgt für Segl-Maria 244 mm, für Davos 206 mm und für Chur 173 mm. Die Sommer-Normniederschlagssumme beträgt für Segl-Maria 335 mm, für Davos 387 mm und für Chur 290 mm.

In den anderen Jahreszeiten treten jedoch in der jüngsten Zeit im gesamten Bündnerland ähnliche Niederschlags Tendenzen auf. An allen drei Messstationen zeigt sich ab den 1990er Jahren im Sommer und im Herbst eine Niederschlagszunahme (Abbildung 3.3 und Abbildung 3.4). Im Winter hingegen ist in den letzten Jahren an der Messstation Davos eine Tendenz zu weniger Niederschlag zu beobachten. Weniger stark ausgeprägt ist diese Niederschlagsentwicklung in Segl-Maria und Chur. Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass ähnlich tiefe Winter-Niederschläge auch aus der Vergangenheit bekannt sind, so zum Beispiel zwischen 1880 und 1900, sowie zwischen 1925 und 1945. Die Tendenz zur Abnahme der Winterniederschläge in den letzten Jahren ist nicht nur im Bündnerland, sondern auch bei der Betrachtung von Niederschlagsmessreihen in der übrigen Schweiz feststellbar.

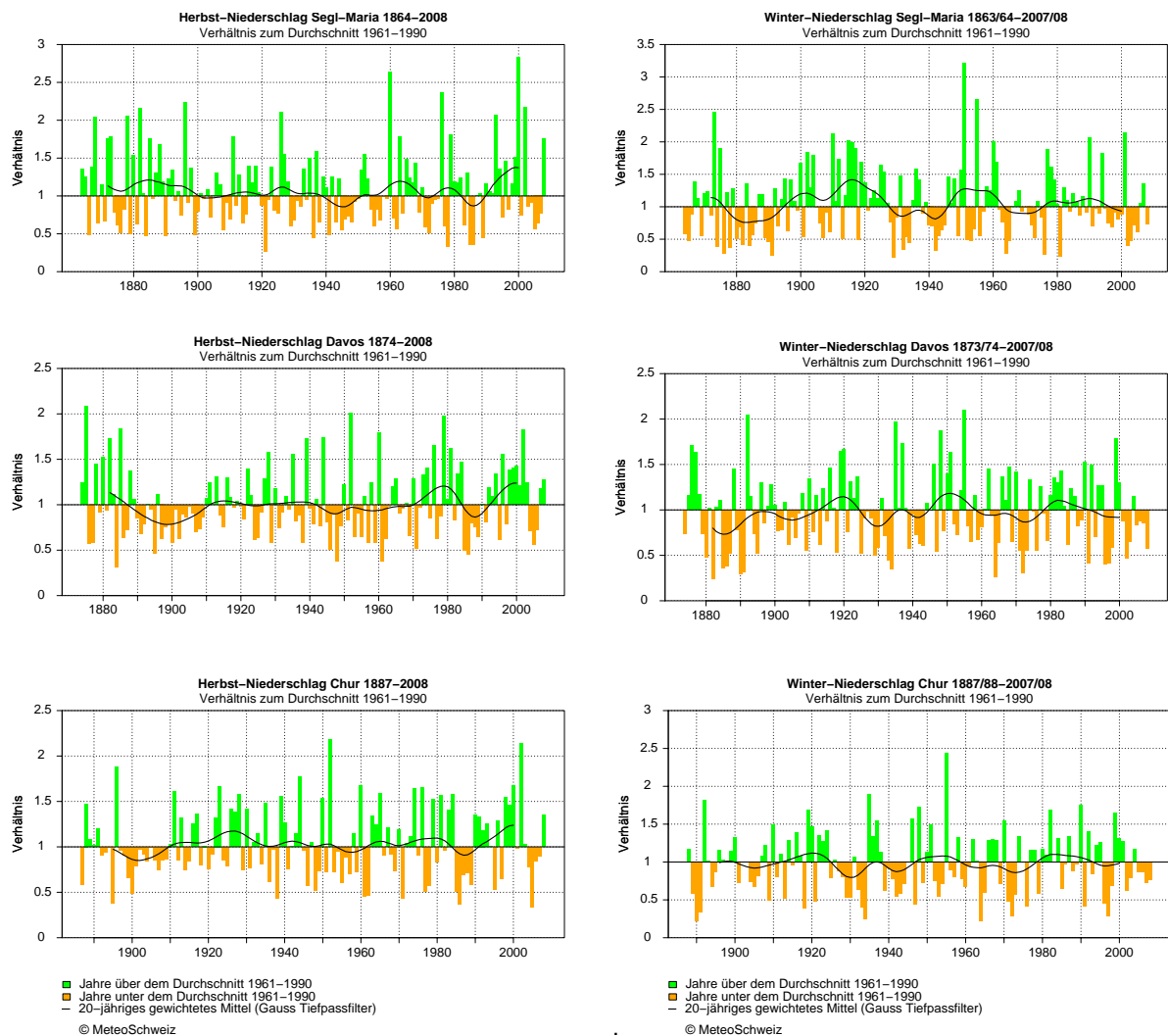


Abbildung 3.4: Langjähriger Verlauf der Herbstniederschläge (September bis November, links) und Winterniederschläge (Dezember bis Februar, rechts) an den Messstationen Segl-Maria, Davos und Chur. Dargestellt in grün und orange ist die jährliche Abweichung von der Norm 1961–1990. Die schwarze Kurve zeigt den 20-jährigen Gaussfilter. Die Herbst-Normniederschlagssumme beträgt für Segl-Maria 260 mm, für Davos 214 mm und für Chur 193 mm. Die Winter-Normniederschlagssumme beträgt für Segl-Maria 141 mm, für Davos 192 mm und für Chur 161 mm.

3.3.2 Niederschlagstrends

Ab dem Jahr 1887 sind für alle drei Messreihen Segl-Maria, Davos und Chur Niederschlagsdaten verfügbar. Um vergleichbare Aussagen zum langfristigen Niederschlagsverlauf zu erhalten, beziehen sich die folgenden Angaben deshalb immer auf die Perioden 1900-2008 und 1961-2008 (Tabelle 3.3 und Tabelle 3.4).

Wie im vorangehenden Abschnitt diskutiert, sind periodische Schwankungen der Niederschlagssummen das typische Merkmal der Messreihen von Segl-Maria, Davos und Chur. Über die gesamte Messperiode betrachtet ist jedoch keine eindeutige langfristige Änderung zu beobachten, was auch schon in früheren europäischen Studien beobachtet wurde [22]. Dies wird durch die Berechnung der linearen Trends bestätigt. Ausser der Station Segl-Maria im Frühling für die Periode 1900-2008, zeigt keine der drei Messreihen in keiner der vier Jahreszeiten im langfristigen Verlauf einen signifikanten Trend zu mehr oder weniger Niederschlag. Im Bündnerland ist demnach, basierend auf den drei Messreihen Segl-Maria, Davos und Chur, keine langfristige Änderung des mittleren Niederschlags nachzuweisen.

Tabelle 3.3: Saisonale Niederschlagstrends in Prozent pro 10 Jahre in der Periode 1900 bis 2008. Signifikante Trends sind fett und rot (positiv) oder blau (negativ) dargestellt.

| Station | Frühling (Mär. – Mai) | Sommer (Jun. – Aug.) | Herbst (Sep. – Nov.) | Winter (Dez. – Feb.) |
|------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Segl-Maria | - 2.3% (signifikant) | + 0.9% (nicht signifikant) | + 0.4% (nicht signifikant) | - 2.6% (nicht signifikant) |
| Davos | + 0.3% (nicht signifikant) | + 0.5% (nicht signifikant) | + 1.4% (nicht signifikant) | - 0.4% (nicht signifikant) |
| Chur | - 0.2% (nicht signifikant) | + 0.6% (nicht signifikant) | + 0.5% (nicht signifikant) | + 0.0% (nicht signifikant) |

Tabelle 3.4 Saisonale Niederschlagstrends in Prozent pro 10 Jahre in der Periode 1961 bis 2008. Signifikante Trends sind fett und rot (positiv) oder blau (negativ) dargestellt.

| Station | Frühling (Mär. – Mai) | Sommer (Jun. – Aug.) | Herbst (Sep. – Nov.) | Winter (Dez. – Feb.) |
|------------|-------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Segl-Maria | - 2.8% (nicht signifikant) | + 4.7% (nicht signifikant) | + 2.3% (nicht signifikant) | - 2.8% (nicht signifikant) |
| Davos | - 0.7% (nicht signifikant) | + 3.7% (nicht signifikant) | + 4.7% (nicht signifikant) | - 2.9% (nicht signifikant) |
| Chur | + 1.5% (nicht signifikant) | + 6.5% (stark signifikant) | + 2.5% (nicht signifikant) | - 0.9% (nicht signifikant) |

4 Klimaindikatoren

Verschiedenste die Gesellschaft, Wirtschaft und den Tourismus beeinflussende Klimaindikatoren zeigen während der letzten 50 Jahre markante Änderungen des Klimas im Kanton Graubünden. Neben den starken Trends in den vor allem höhenabhängigen Temperaturgrössen (Frosttage, Sommertage, Nullgradgrenze) gibt es zum Teil auch Änderungen in Niederschlagsgrössen (Starkniederschläge, Trockenperioden), die allerdings für die klimatisch sehr verschiedenen beeinflussten Regionen des Kantons recht verschieden ausfallen können. Die wichtigsten Resultate für den Kanton Graubünden sind in Kürze:

- stark signifikante Abnahme der Frosttage (alle Regionen und Höhenstufen).
- markante Zunahme der Sommertage (alle Regionen und Höhenstufen).
- deutlicher Anstieg der Nullgradgrenze in allen Jahreszeiten (nur im Herbst nicht signifikant). Die Nullgradgrenze steigt rund 150-200 m pro 1°C Erwärmung.

4.1 Einleitung

Die historische Entwicklung ausgewählter Klimaindikatoren gibt Hinweise über die möglichen Auswirkungen der Klimänderung [5]. Die Liste von zu besprechenden Grössen ist nicht vollständig und liesse sich beliebig verlängern. Gegeben durch die Verfügbarkeit von homogenisierten Daten wird soweit möglich die Entwicklung der letzten 50 Jahre (1959-2008) besprochen. Die verwendeten Stationen sind in den nachfolgenden Grafiken nach Region wie folgt dargestellt: Nord- und Mittelbünden (links, Stationen Chur, Davos, Disentis), des Engadins (Mitte, Stationen Samedan und Scuol) sowie den Bündner Südtälern (rechts, Stationen Robbia und Grono).

Tabelle 4.1 zeigt die für diesen Bericht ausgewählten Klimaindikatoren sowie deren Definition. Es wurden drei Temperaturgrössen sowie drei Niederschlagsgrössen, wovon zwei im Zusammenhang mit Starkniederschlag, ausgewählt. Fünf der sechs Indikatoren sind Klimaindikatoren definiert nach WMO Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) [23]. Der Nullgradgrenzenindikator ist von MeteoSchweiz definiert. Ein weiterer wichtiger Indikator für Graubünden ist Schnee und seine Ausprägungen und wird deshalb in einem separaten nachfolgenden Kapitel behandelt.

Klimaindikatoren nach WMO Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI)

Die Indikatoren 1-5 der Tabelle 4.1 wurden nach den Regeln und der offiziellen Software des WMO Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) berechnet. Einganggrössen sind homogenisierte Reihen von Tagesminima und Tagesmaxima der Temperatur sowie Tagessummen des Niederschlags. Die resultierenden Indikatoren werden alle auf Jahresstufe ausgegeben, d.h. z.B. Anzahl Sommertage pro Jahr. Zu beachten ist, dass sich die Jahreswerte der Indikatoren alle auf das Kalenderjahr (1. Januar bis 31. Dezember) beziehen.

Indikator Nullgradgrenze

Der Indikator Nullgradgrenze ist kein offizieller Klimaindikator der WMO, allerdings für Bergregionen der Schweiz von beträchtlicher Bedeutung. Deshalb wird in diesem Bericht dieser Indikator ebenfalls besprochen. Die Nullgradgrenze in einer Region kann auf verschiedene Weise bestimmt werden (z.B. mit Hilfe vertikaler Temperaturverläufe der Atmosphäre wie sie z.B. Radiosonden liefern, über Berechnungsansätze mit Hilfe von Bodendaten oder über ein Bodenstationsnetz, das sich über verschiedene Höhenstufen erstreckt). In diesem Bericht wird die Methode mit dem Bodenstationsnetz verwendet.

Tabelle 4.1: Liste der verwendeten Klimaindikatoren nach Bezeichnung, Typ nach Parametergruppe und Definition nach WMO/ETCCDI [23].

| # | Bezeichnung | Typ | Definition |
|---|---|-------------------|--|
| 1 | Frosttage | Temperatur | Tage des Kalenderjahres mit minimaler Temperatur $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$ |
| 2 | Sommertage | Temperatur | Tage des Kalenderjahres mit maximaler Temperatur $T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$ |
| 3 | Tage mit starkem Niederschlag | Starkniederschlag | Tage des Kalenderjahres mit Tagesniederschlag $P \geq 20 \text{ mm}$ |
| 4 | Niederschlag der sehr nassen Tage | Starkniederschlag | Niederschlagssumme der Tage im Kalenderjahr wo der Tagesniederschlag $P > 95\text{tes Perzentil der Tagesniederschläge (Referenz: 1961-1990)}$ |
| 5 | Max. Anzahl zusammenhängender Trockentage | Niederschlag | Maximale Anzahl zusammenhängender Tage des Kalenderjahres für welche Tagesniederschlag $P < 1 \text{ mm}$ |
| 6 | Nullgradgrenze | Temperatur | Saisonale Nullgradgrenze [m ü.M.] bestimmt mittels linearer Regression von einer Anzahl zur Verfügung stehender Stationen |

4.2 Ausgewählte Klimaindikatoren

4.2.1 Frosttage

Allgemeines

Abbildung 4.1 zeigt die Entwicklung der Frosttage über 50 Jahre von 1959-2008. Die Anzahl Frosttage ist hauptsächlich von der Höhenlage der Station abhängig. Die räumliche Lage spielt eine untergeordnete Rolle. Die Spanne von Frosttagen in dauerhaft bewohnten Gebieten des Kantons reicht von im Mittel unter 40 Tagen (z.B. Grono, 382 m ü.M.) bis über 250 Tagen (z.B. Samedan, 1709 m ü.M.).

Trends

Alle Stationen zeigen einen Trend hin zu abnehmenden Anzahl Frosttagen. Die Trends reichen von -2.3 Tagen pro 10 Jahre (Grono) bis -9.8 Tagen pro 10 Jahre (Samedan) und sind eindeutig auf die Zunahme der Temperaturen zurückzuführen. Obwohl die stärkste Abnahme an der höchsten Station auftritt und die niedrigste an der tiefstgelegenen Station ist sind die Abnahmen nicht generell in der Höhe grösser als in tiefen Lagen sondern für alle Höhenstufen beträchtlich. Das zeigen auch die statistischen Kennzahlen, die besagen, dass mit Ausnahme der Station Grono alle Trends stark signifikant sind. Zu beachten ist, dass für Grono nur Daten ab 1971 vorhanden sind und somit nicht direkt mit den anderen Stationen verglichen werden kann. Die relativen Zahlen zeigen, dass die Frosttage von 1959 bis 2008 um zwischen 13.3% (Davos) und 42% (Chur) zurückgegangen sind. Hier ist der Rückgang an tiefen Stationen generell etwas grösser als an hochgelegenen Stationen.

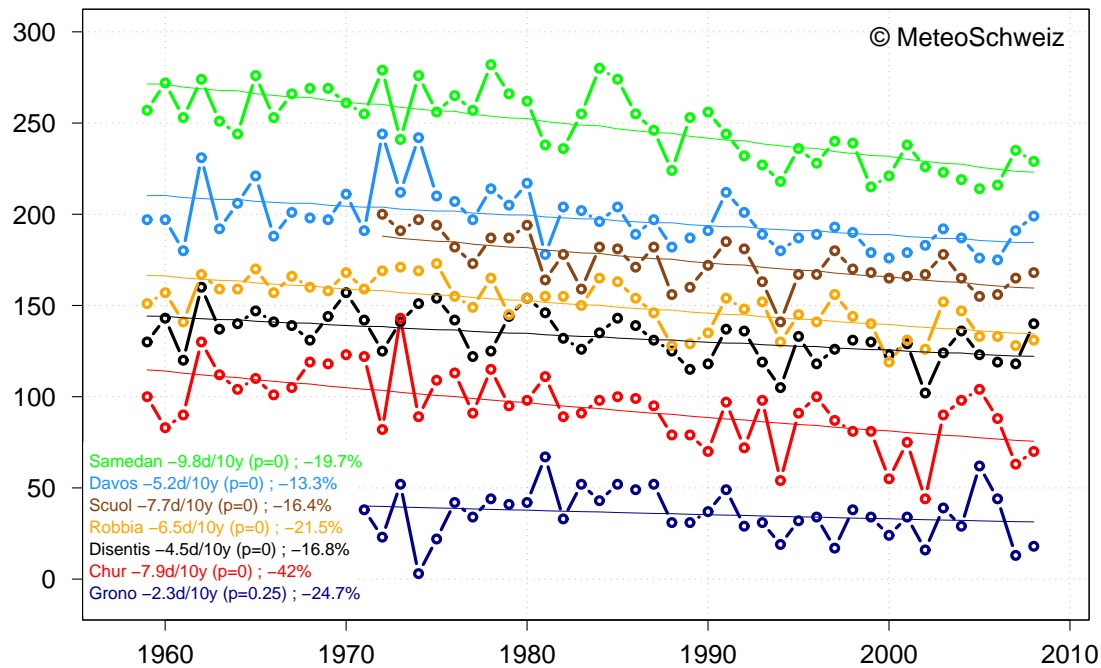


Abbildung 4.1: Zeitlicher Verlauf der Frosttage (Tage des Kalenderjahres mit minimaler Temperatur $<0^{\circ}\text{C}$) für die Stationen Chur, Davos, Disentis, Samedan, Scuol, Robbia und Grono. Logistische Trends in Tage / 10 Jahre sowie Signifikanzwerte und relative Abnahme über die Periode sind in der Legende gegeben.

4.2.2 Sommertage

Allgemeines

Abbildung 4.2 zeigt den zeitlichen Verlauf der Sommertage (=Anzahl Tage des Kalenderjahres mit maximaler Temperatur $\geq 25^{\circ}\text{C}$) für Stationen des Nord- und Mittelbündens, des Engadins sowie der Bündner Südtäler. Wie die Anzahl Frosttage ist die Anzahl Sommertage hauptsächlich von der Höhenlage der Station abhängig. Die Spanne von Sommertagen in dauerhaft bewohnten Gebieten des Kantons reicht von im Mittel praktisch 0 Tagen in Samedan bis etwa 70 Tagen in Grono.

Trends

Alle Stationen zeigen eine deutliche Tendenz zu zunehmenden Sommertagen. Ausser für die höchstgelegene Station Samedan sind die Zunahmen stark signifikant ($p \leq 0.01$). Die Zunahmen in absoluten Zahlen sind besonders gross für tief- und mittelhoch gelegene Stationen (Grono: 11.2 Tage/10 Jahre, Chur: 4.7 Tage / 10 Jahre, Robbia: 4.1 Tage / 10 Jahre, Scuol: 5.0 Tage / 10 Jahre, Disentis: 3.8 Tage / 10 Jahre). Für die zwei höhergelegenen Stationen Davos und Samedan sind die absoluten Trends relativ klein (1.3 resp. 0.6 Tage / 10 Jahre) wobei an diesen Stationen erst in jüngerer Zeit vermehrt einige Sommertage registriert werden.

Die Zunahmen in relativen Zahlen (Vergleich Ende/Anfang der Beobachtungsperiode) sind beeindruckend, müssen aber im Zusammenhang mit den absoluten Zahlen interpretiert werden. Für Stationen die bereits zu Beginn der Beobachtungsperiode zwischen 20 und 50 Sommertage registrierten (Scuol, Chur und Grono) ist die relative Zunahme zwischen 60 und 70%. Für die Stationen mit zu Beginn der Beobachtungsperiode zwischen 5 und 20 Sommertagen (Disentis und Robbia) ist die relative Zunahme mit 130 bzw. 163% deutlich grösser. Die grössten relativen Zunahmen finden sich für die Stationen wo zu Beginn kaum Sommertage registriert wurden (Samedan und Davos mit +179 resp. +298%). Der Einfluss des Jahrhundertssommers 2003 ist hier besonders gross und führt so zu sehr grossen relativen Zunahmen.

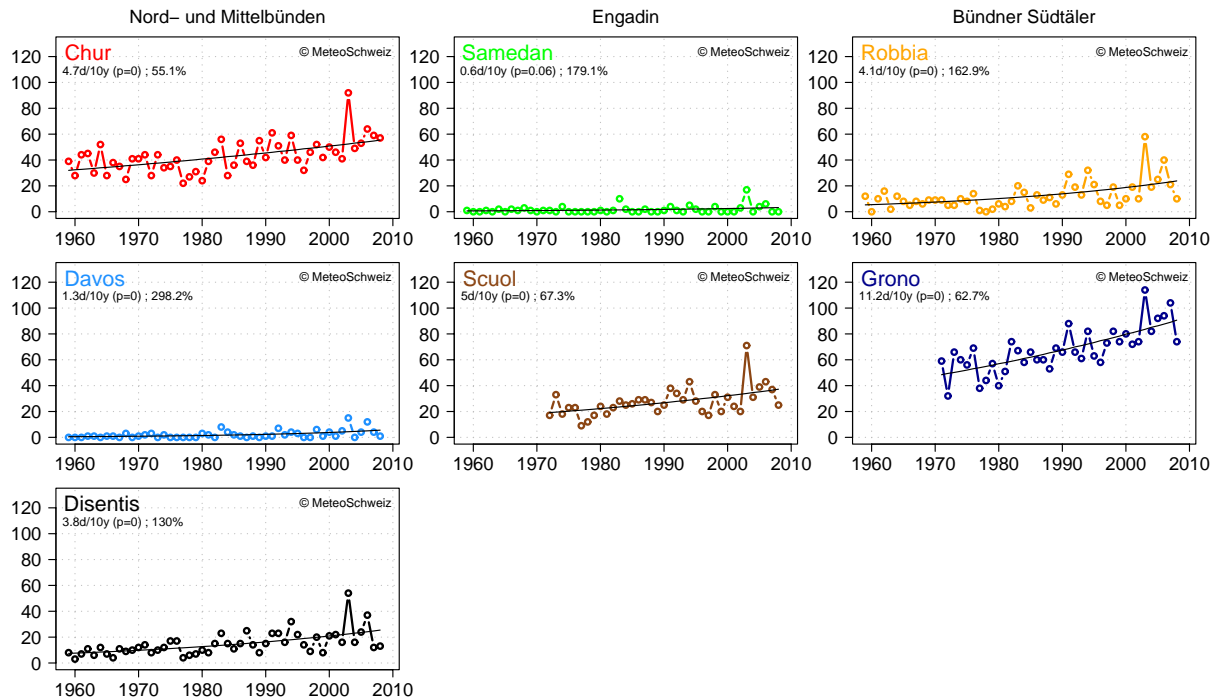


Abbildung 4.2: Zeitlicher Verlauf der Sommertage (=Anzahl Tage des Kalenderjahres mit maximaler Temperatur $\geq 25^{\circ}\text{C}$) für Stationen des Nord- und Mittelbünden (links, Stationen Chur, Davos, Disentis), des Engadins (Mitte, Stationen Samedan und Scuol) sowie den Bündner Südtälern (rechts, Stationen Robbia und Grono). Logistische Trends in Tage / 10 Jahre sowie Signifikanzwerte und relative Abnahme über die Periode sind für jede Station angegeben.

4.2.3 Starkniederschlag: Tage mit Niederschlag ≥ 20 mm

Allgemeines

Abbildung 4.3 zeigt die Entwicklung der Tage mit mehr als 20 mm Niederschlag im Kalenderjahr. Diese Grösse ist vorwiegend von der räumlichen Lage (Region) und weniger von der Höhenlage der Station abhängig. Die Spanne der Anzahl Tage im Kalenderjahr mit Niederschlag ≥ 20 mm in dauerhaft bewohnten Gebieten des Kantons reicht von im Mittel etwa 6-8 Tagen im Engadin bis etwa 15-25 Tagen in den Bündner Südtälern. Nord- und Mittelbünden liegt mit etwa 9-13 Tagen zwischen dem Engadin und den Bündner Südtälern.

Trends

Im Allgemeinen zeigen die Stationen Nord- und Mittelbündens sowie des Engadins eine Tendenz zu einer Zunahme der Tage mit Niederschlag ≥ 20 mm. Die Zunahmen sind allerdings momentan nur für Chur statistisch stark signifikant (+1.3 Tage / 10 Jahre, $p=0.01$). Für die Stationen Davos, Disentis und Samedan sind die Zunahmen mit um 0.6 Tagen / 10 Jahre eher klein und nicht signifikant. Für Scuol findet man einen noch kleineren Trend von +0.2 Tage / 10 Jahre, der allerdings wegen der verkürzten Datengrundlage erst ab 1972 nicht direkt vergleichbar ist. Für die Stationen in den Bündner Südtälern gibt es eine ganz leichte Tendenz zu abnehmenden Tagen mit Niederschlag ≥ 20 mm (-0.1/-2.3 Tage / 10 Jahre für Robbia resp. Grono).

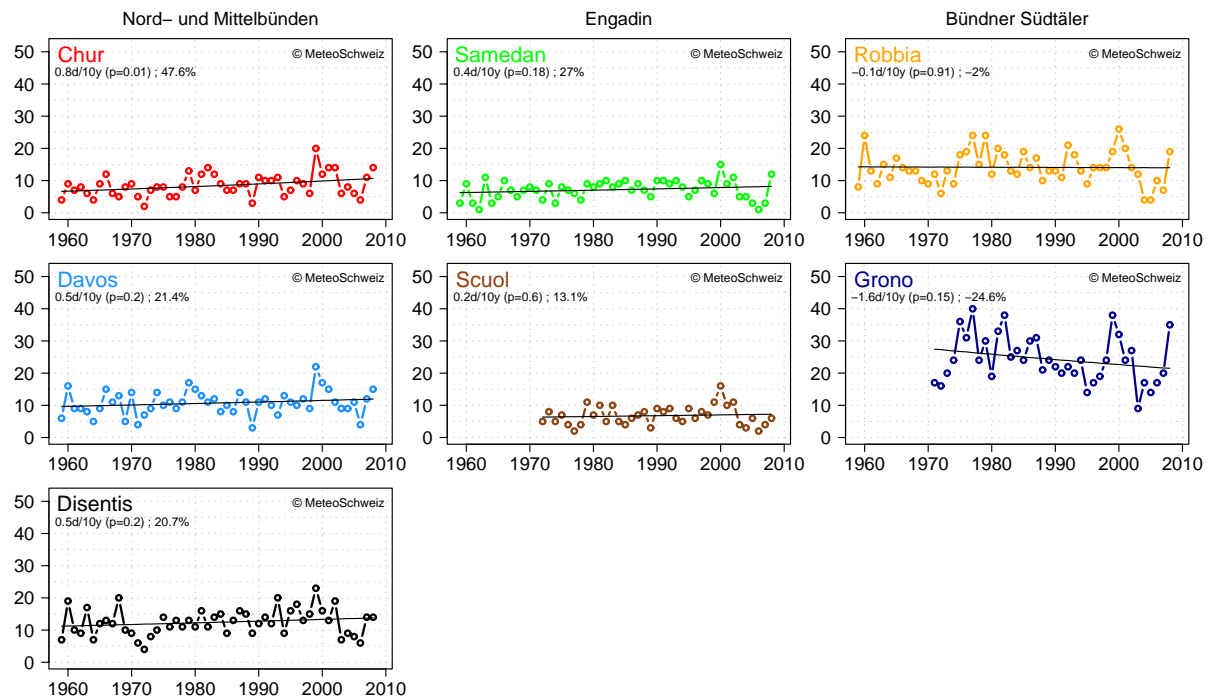


Abbildung 4.3: Zeitlicher Verlauf der Tage mit starkem Niederschlag (=Anzahl Tage des Kalenderjahres mit Tagesniederschlag ≥ 20 mm) für Stationen des Nord- und Mittelbündens (links, Stationen Chur, Davos, Disentis), des Engadins (Mitte, Stationen Samedan und Scuol) sowie den Bündner Südtälern (rechts, Stationen Robbia und Grono). Logistische Trends in Tage / 10 Jahre sowie Signifikanzwerte und relative Abnahme über die Periode sind für jede Station angegeben.

4.2.4 Starkniederschlag: Niederschlag der sehr nassen Tage

Allgemeines

Abbildung 4.4 zeigt die Entwicklung des Niederschlags der sehr nassen Tage (=Niederschlagssumme der Tage im Kalenderjahr, welche zu den 5% der höchsten Tagesniederschläge gehören, Referenz: 1961-1990). Wie für die Anzahl Tage im Kalenderjahr mit Niederschlag ≥ 20 mm (siehe oben) ist diese Grösse vorwiegend von der räumlichen Lage (Region) und weniger von der Höhenlage der Station abhängig. Die Spanne des Niederschlags der sehr nassen Tage in dauerhaft bewohnten Gebieten des Kantons reicht von im Mittel etwa 150-200 mm im Engadin bis etwa 250-350 mm in den Bündner Südtälern. Nord- und Mittelbünden liegt mit etwa 200-300 mm zwischen dem Engadin und Bündner Südtälern.

Trends

Analog zu den Tagen mit starkem Niederschlag (≥ 20 mm) zeigen die Stationen Nord- und Mittelbündens sowie des Engadins eine Tendenz zu einer Zunahme des Niederschlags der sehr nassen Tage. Die Zunahmen sind allerdings momentan nur für Chur und Davos statistisch signifikant. Für die anderen Stationen sind die Zunahmen mit 9.3-21.9 mm / 10 Jahre nicht signifikant. Für die Südbündner Stationen ergibt sich ein uneinheitliches Bild. Während sich für Robbia eine leichte Zunahme ergibt, findet sich für Grono eine leichte Abnahme. Beide Trends sind nicht signifikant (p-Werte 0.1 resp. 0.63) und weiter zu beachten ist, dass für Grono erst ab 1972 Daten verfügbar sind, die sich nicht direkt vergleichen lassen. Aufgrund der starken Variabilität des Niederschlags sind Aussagen zum Trend starker Niederschläge wie auch nasser Tage schwierig. Je nach verwendeter Trendperiode können deshalb Abweichungen des Trends entstehen [24].

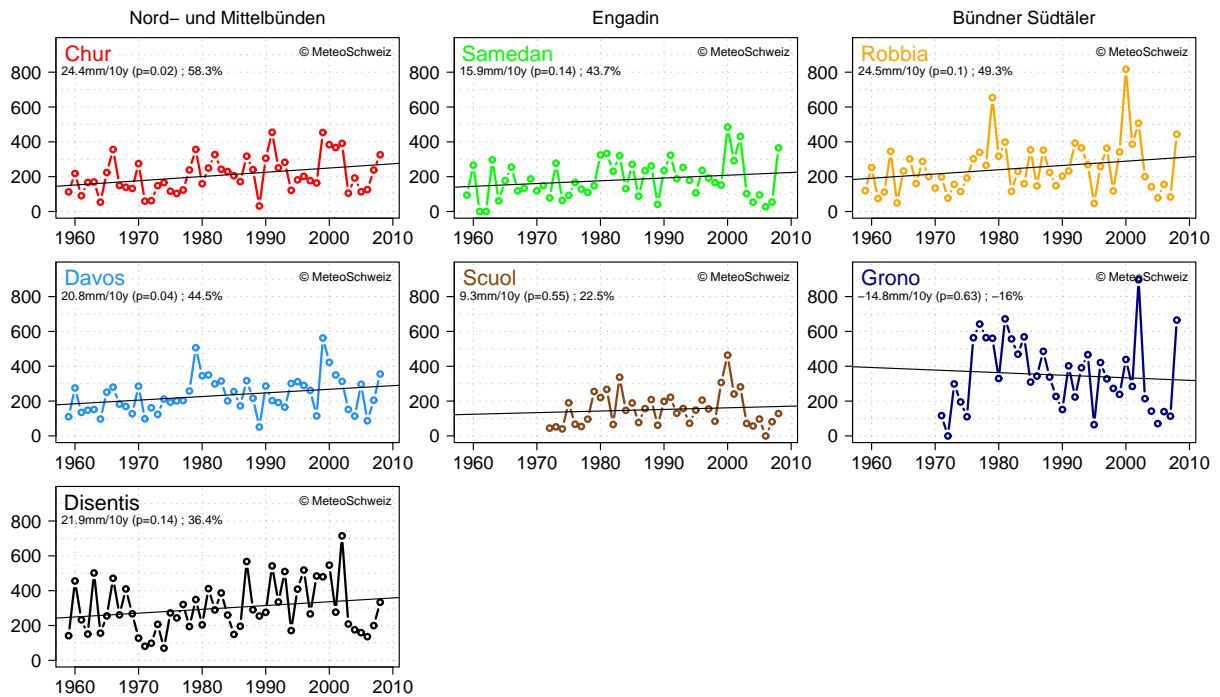


Abbildung 4.4: Zeitlicher Verlauf des Niederschlags der sehr nassen Tage (=Niederschlagssumme in mm der Tage im Kalenderjahr wo der Tagesniederschlag > 95stes Perzentil der Tagesniederschläge mit Referenz: 1961-1990) für Stationen des Nord- und Mittelbünden (links, Stationen Chur, Davos, Disentis), des Engadins (Mitte, Stationen Samedan und Scuol) sowie den Bündner Südtälern (rechts, Stationen Robbia und Grono). Logistische Trends in Tage / 10 Jahre sowie Signifikanzwerte und relative Abnahme über die Periode sind für jede Station angegeben.

4.2.5 Trockenperioden

Allgemeines

Die Entwicklung der maximalen Anzahl zusammenhängender Tage des Kalenderjahres für welche der Tagesniederschlag <1 mm (Trockentage) ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Wie für die anderen Niederschlagsindikatoren ist diese Grösse vorwiegend von der räumlichen Lage (Region) und weniger von der Höhenlage der Station abhängig. Die Spanne der maximalen Anzahl zusammenhängender Trockentage in dauerhaft bewohnten Gebieten des Kantons reicht von im Mittel gut 20-25 im Nord- und Mittelbünden sowie knapp 30-33 im Engadin und den Bündner Südtälern.

Trends

Alle Stationen zeigen eine gewisse Tendenz zu einer grösseren Anzahl zusammenhängender Trockentage. Allerdings sind die Trends für alle Stationen mit Ausnahme von Robbia ($p=0.05$) nicht signifikant und deshalb darf nicht von einer gesicherten Aussage gesprochen werden. Es zeigt sich ein leichter Unterschied zwischen den Regionen. Während in Nord- und Mittelbünden die Trends mit Ausnahme von Disentis fast verschwindend klein sind (0.1 Tage / 10 Jahre), sind die Trends im Engadin mit 0.6-0.7 Tagen / 10 Jahre und vor allem in den Bündner Südtälern mit absolut 1.3-2.3 Tagen / 10 Tagen grösser. Ein ähnliches Bild zeigt sich für die relativen Zunahmen von unter 3% für Nord- und Mittelbünden, rund 10% im Engadin und 15-35% in den Bündner Südtälern. Ähnlich kleine Trends der Trockenperioden wurden in Studien für die gesamte Schweiz gefunden [24].

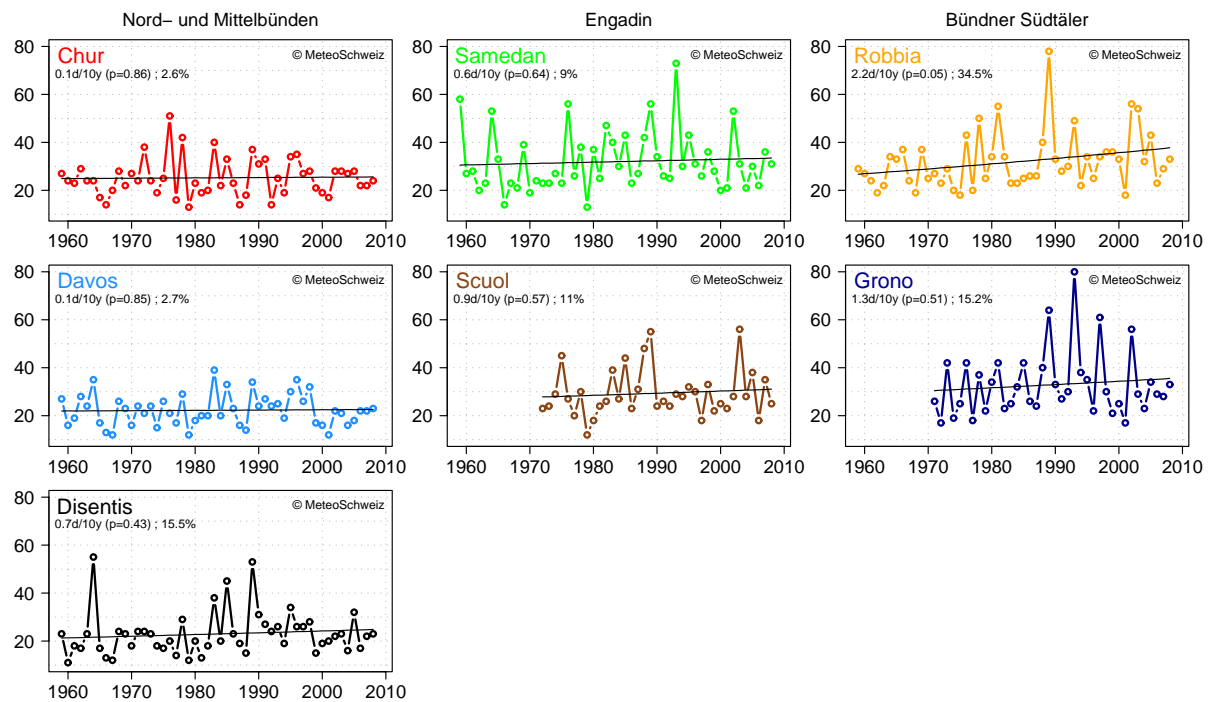


Abbildung 4.5: Zeitlicher Verlauf der maximalen Anzahl zusammenhängender Tage des Kalenderjahres für welche Tagesniederschlag < 1 mm (Trockentage) für Stationen des Nord- und Mittelbündens (links, Stationen Chur, Davos, Disentis), des Engadins (mitte, Stationen Samedan und Scuol) sowie der Bündner Südtäler (rechts, Stationen Robbia und Grono). Logistische Trends in Tage / 10 Jahre sowie Signifikanzwerte und relative Abnahme über die Periode sind für jede Station angegeben.

4.2.6 Nullgradgrenze

Abbildung 4.6 zeigt die Werte und den Verlauf der Nullgradgrenze, berechnet nach der Methode beschrieben in Kapitel 1.3, einmal mit allen Swiss NBCN Stationen [8] als Input (linke Spalten) und einmal bestimmt nur mit den 9 Bündner Stationen aus (rechte Spalten).

Mittel und Variabilität

Für Graubünden liegt die klimatologische Nullgradgrenze im Mittel (1959-2008) im Winter bei rund 850 m, im Frühling bei knapp 1900 m, im Sommer bei etwa 3250 m und im Herbst bei ungefähr 2200 m. Die für die gesamte Schweiz vermutlich repräsentativere Nullgradgrenze berechnet mit Swiss NBCN Stationsinput beträgt im Mittel für denselben Zeitraum im Winter gut 750 m, im Frühling etwa 1900 m, im Sommer etwas über 3300 m und im Herbst ungefähr 2400 m. Die Abweichungen Graubünden/gesamte Schweiz sind also im Herbst (200 m Differenz) und Winter (rund 100 m Differenz) am grössten, im Frühling und Sommer vernachlässigbar.

Zu beachten ist, dass die Nullgradgrenzenbestimmung je nach Saison verschieden fehlerbehaftet ist (graue Fehlerbalken in Abbildung 4.6). Im Frühling und Herbst ist die Bestimmung relativ genau möglich, da sowohl recht gute lineare Beziehungen zwischen Temperatur und Höhe besteht, wie auch die Nullgradgrenze noch in Höhen liegt, wo Messstationen vorhanden sind. Im Winter und speziell im Sommer ist die Bestimmung unsicherer, allerdings aus verschiedenen Gründen. Im Winter ist die Bestimmung schwierig, da Kaltluftseen und Nebel sowie Frontdurchgänge die Beziehung zwischen Temperatur und Höhe stark verwischen und keine schöne lineare Beziehung zwischen Temperatur und Höhe besteht. Im Sommer ist die Beziehung zwar ziemlich linear allerdings liegt die Höhe der Nullgradgrenze weit über den verfügbaren Stationen, womit kleinste Unsicherheiten der Temperatur-Höhen Beziehung grosse Auswirkungen auf den Fehlerbereich der Nullgradgrenze hat. Die Fehlerbalken der Bündner Stationen sind tendenziell grösser da weniger Stationen in die Berechnung einfließen und somit die Unsicherheit der Schätzung vergrössern.

Trends

Die Nullgradgrenze steigt in allen Jahreszeiten in der Periode 1959-2008 deutlich an (Abbildung 4.6). Mit Ausnahme vom Herbst sind die Anstiege hoch signifikant. Sie bewegen sich je nach Jahreszeit und ausgewähltem Stationsset zur Bestimmung zwischen 30 und knapp 80 m / 10 Jahre. Wie die Temperaturtrends ist der Anstieg der Nullgradgrenze im Herbst am niedrigsten (gut 30 m / 10 Jahre) und im Sommer am grössten (rund 70 m / 10 Jahre). Allgemein entsprechen diese Werte einem Anstieg der Nullgradgrenze von rund 150-200 m / °C Erwärmung.

Die Trends sind grösser wenn alle Stationen des Swiss NBCN miteinbezogen werden im Vergleich zu nur Bündner Stationen. Dieser Unterschied ist für die meisten Saisons nicht sehr gross aber besonders augenfällig im Winter (74 vs. 49 m / 10 Jahre Anstieg). Ein Grund dafür dürfte sein, dass im Swiss NBCN während des Winters im Gegensatz zu Graubünden viele Stationen häufig im Nebel und/oder Kaltluftseen liegen, die über die Zeit beide eher abgenommen haben und deshalb grössere Trends zustande kommen als für die Bündner Stationen.

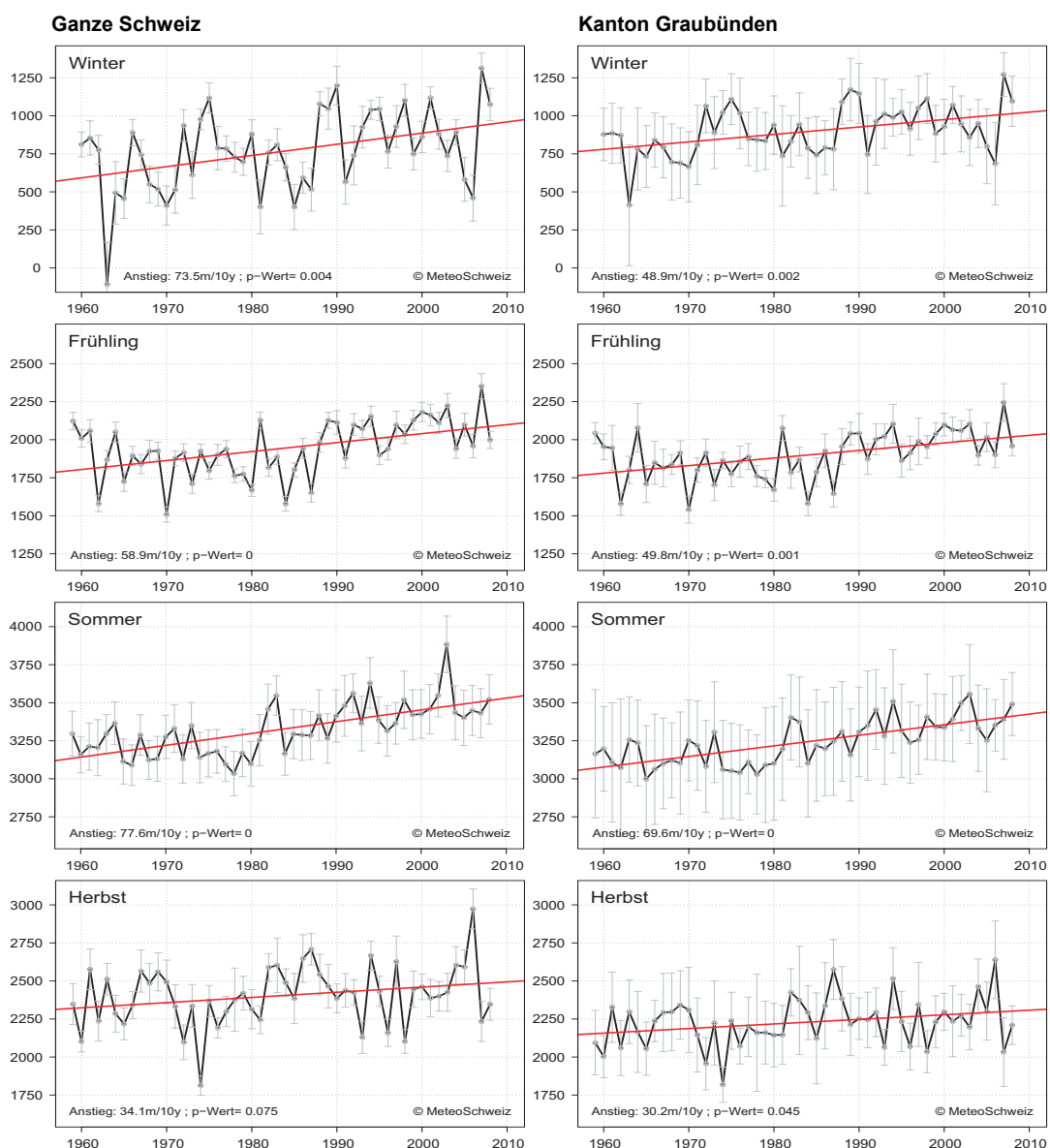


Abbildung 4.6: Verlauf der saisonalen Nullgradgrenze (schwarze Linie in m ü.M.) mit homogenisierten Temperaturdaten der 29 MeteoSchweiz Bodenstationen des Swiss NBCN (links) und den Bündner Stationen Davos, Segl-Maria, Chur, Samedan, Disentis, Scuol, Grono, Robbia und San Bernardino (rechts). Der lineare Trend als Linie (rot) sowie in Zahlen (m Anstieg pro 10 Jahre) und Signifikanz sind angegeben wie auch die Fehlerbalken der Nullgradgrenzenbestimmung für jedes einzelne Jahr (vertikale graue Linien).

5 Schneeklimatologie

Die wichtigsten Resultate zur Entwicklung der Klimagrösse Schnee der letzten 50 Jahre im Kanton Graubünden können wie folgt zusammengefasst werden:

- signifikanter Rückgang der Tage mit Gesamtschneehöhe (≥ 5 cm / ≥ 30 cm) in allen Höhenlagen ausser in Höhen über 2000 m ü.M.
- stark signifikante Abnahme der Neuschneesummen über das hydrologische Jahr unterhalb 2000 m ü.M.
- nur teilweise signifikante Abnahme der maximalen Gesamtschneehöhe in mittleren Lagen sowie der Tage mit Neuschnee in tiefen und hohen Lagen.

Die Auswertungen der langen Neuschneereihen der Standorte Arosa, Chur, Davos und Segl-Maria zeigen:

- grosse dekadische Schwankungen bei den Tagen mit Neuschnee und Neuschneesummen. Beim Parameter Maximaler Neuschnee sind die dekadischen Schwankungen eher klein, die Variabilitäten jedoch gross.
- ähnlich tiefe Werte wie heute wurden bei den Neuschneesummen bereits zwischen 1930 und 1940 und bei den Tagen mit Neuschnee vor 1900, sowie in der Mitte des 20. Jahrhunderts gemessen.

5.1 Einleitung

Die Entwicklung der Klimagrösse Schnee während den letzten 50 Jahren (1959 – 2008) im Kanton Graubünden wird anhand von sechs Schneemessreihen besprochen (Kapitel 5.3). Zusätzlich wird von vier langen Schneereihen, die teilweise über Daten zurück bis ins 19. Jahrhundert verfügen, die Entwicklung ausgewählter Schneeparameter über die letzten 140 Jahre gezeigt (Kapitel 5.4).

Der Schnee und seine Ausprägung sind sowohl aus touristischer [25] als auch aus klimatologischer Sicht von Bedeutung [5]. Die Schneehäufigkeit und die Schneemengen sind in komplexer Weise von der Temperatur und dem Niederschlag abhängig. Insbesondere die Anzahl Tage an denen eine ausreichend mächtige Schneedecke für Wintersport liegt interessiert im Tourismus. Ein Gebiet gilt als schneesicher, wenn in mindestens sieben von zehn Wintern, von anfangs Dezember bis Mitte April, an mindestens 100 Tagen eine für den Schneesport ausreichende Schneedecke von mindestens 30 cm liegt [26]. Mehrere Studien zu diesem Thema zeigen übereinstimmend eine Abnahme der Schneemengen und der Schneehäufigkeiten gegen Ende des 20. Jahrhunderts [27], [28], [29], [30], [31].

Die Stationsauswahl für die Auswertungen erfolgte hauptsächlich aufgrund der Verfügbarkeit von Schneedaten. Kriterium war eine Datenverfügbarkeit von mindestens 50 Jahren (1959 - 2008). Die Standorte Disentis (ab 1961) und Weissfluhjoch (ab 1960) sind berücksichtigt, obwohl sie nicht über Daten während dem gesamten Zeitraum verfügen. Sie ergänzen fehlende Regionen (Disentis, Surselva) bzw. Lagen in grossen Höhen (Weissfluhjoch, 2690 m ü.M.). Der Schneemessstandort Disentis der MeteoSchweiz wurde zudem im Jahr 2005 von Disentis nach Sedrun verschoben. Um bei der Trendanalyse plausible Resultate zu gewährleisten und die Vergleichbarkeit mit den übrigen Stationen sicherzustellen wurde bei der Auswertung der Schneemessreihe von Disentis ab 2005 die Daten des WSL – Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF verwendet. Der Messstandort des WSL-SLF befindet sich an derselben Stelle, wo bis 2005 MeteoSchweiz Schnee gemessen hat.

5.2 Ausgewählte Schneeparameter

Die Schneedaten auf den folgenden Seiten sind für das hydrologische Jahr (1. Oktober bis 30. September) ausgewertet. Diese Jahreseinteilung ist für die Auswertung von Schneeparametern vorteilhaft, da bereits im Herbst Niederschlag in Form von Schnee fallen und gespeichert werden kann. Für Auswertungen in der Schneeklimatologie gibt es keine international eindeutig vordefinierten Indikatoren. Tabelle 5.1 zeigt die in diesen Bericht ausgewerteten Schneeparameter und deren Definition, sowie die zugrundeliegende Messreihe. Die Parameter wurden von MeteoSchweiz gewählt und aus Tagesmesswerten abgeleitet, welche jeweils um 05.40 UTC gemessen werden. Die „Tage mit Neuschnee“ und der „maximale Neuschnee“ sind u.a. bedeutend für den Verkehr bzw. für die Schneeräumung. Die Parameter „Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm“ und „ ≥ 30 cm“ sind Grössen, die hauptsächlich für den Wintertourismus, bzw. den Wintersport von Relevanz sind. Im speziellen aus der Sicht der Dimensionierung von Gebäuden, aber auch des Tourismus ist der Parameter „maximale Gesamtschneehöhe“ von Interesse. Des Weiteren gibt die „Neuschneesumme“ Aufschluss über die Niederschlagsdynamik im Winter.

Tabelle 5.1: Liste der verwendeten Schneeparameter nach Bezeichnung, zugrunde liegende Messreihe und Definition. Für die Schneeparameter wird jeweils das hydrologische Jahr (1. Oktober – 30. September) verwendet.

| # | Bezeichnung | Messreihe | Definition |
|----|--|--------------|---|
| 7 | Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm | Gesamtschnee | Anzahl Tage pro Jahr an denen die Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm beträgt |
| 8 | Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm | Gesamtschnee | Anzahl Tage pro Jahr an denen die Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm beträgt |
| 9 | Neuschneesummen | Neuschnee | Jährliche Neuschneesumme an Tagen mit Tagesneuschnee ≥ 1 cm |
| 10 | Maximaler Neuschnee | Neuschnee | Maximaler Neuschnee pro Tag |
| 11 | Maximale Gesamtschneehöhe | Gesamtschnee | Maximale Schneehöhe des hydrologischen Jahres |
| 12 | Tage mit Neuschnee | Neuschnee | Anzahl Tage pro Jahr mit Neuschnee ≥ 1 cm |

5.3 Schneetrendanalysen

5.3.1 Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm

Allgemeines

Abbildung 5.1 zeigt die Entwicklung der „Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm“ für ausgewählte Stationen. Die „Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm“ im hydrologischen Jahr sind stark von der Höhenlage des Messstandortes abhängig. Auch die räumliche Lage der Stationen spielt eine Rolle. Segl-Maria (1798 m ü.M.) im Engadin hat im Vergleich mit Arosa (1840 m ü.M.) trotz praktisch ähnlicher Höhenlage im Mittel deutlich weniger „Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm“. Die Spanne der „Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm“ reicht von im Mittel 35 – 40 Tagen in Chur bis zu etwa 280 Tagen auf dem Weissfluhjoch.

Trends

Alle Stationen mit Ausnahme von Disentis zeigen eine signifikante bis stark signifikante Abnahme der „Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm“. Stark signifikant ist die Abnahme in Segl-Maria mit -10.6 Tagen / 10 Jahre. Die Stationen Arosa, Chur, Davos und Disentis zeigen eine signifikante Abnahme in einem ähnlichen Umfang von ca. -6 Tagen / 10 Jahre. Die Station Weissfluhjoch zeigt eine nicht signifikante Abnahme ($p=0.09$) von -3.8 Tagen / 10 Jahren. Die grösste relative Abnahme weist Chur auf mit -75%, die geringste das Weissfluhjoch mit -7%. Bei den übrigen vier Stationen bewegen sich die relativen Abnahmen zwischen 15 und 31%.

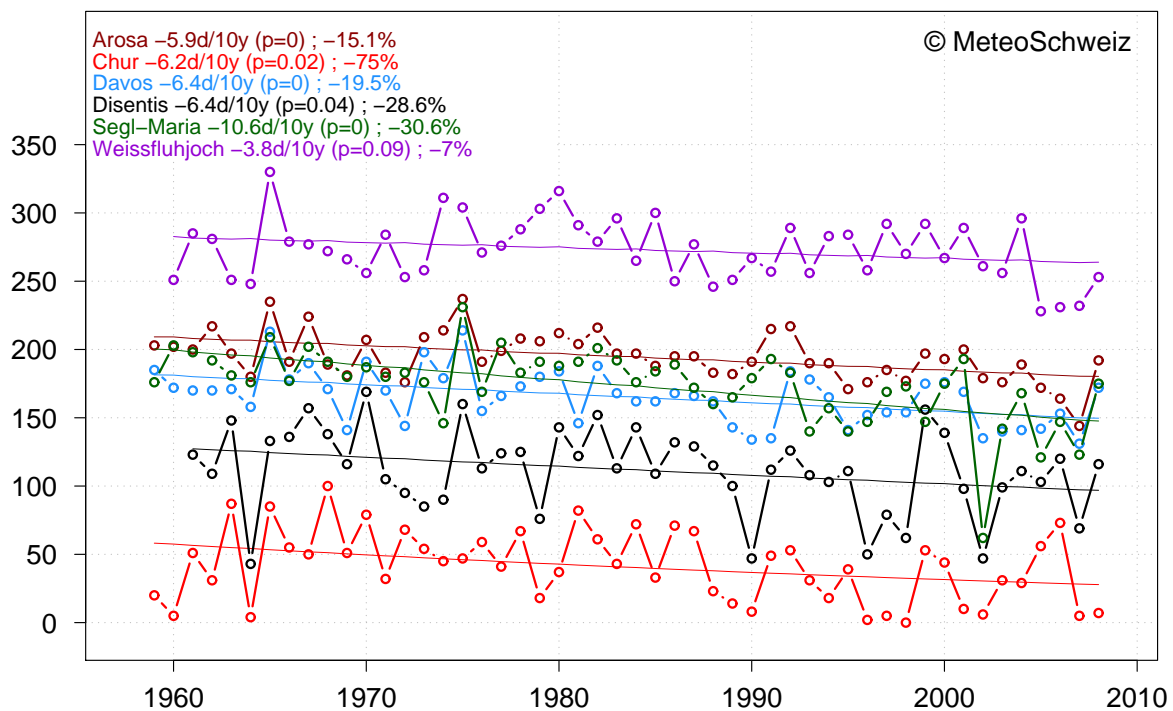


Abbildung 5.1: Zeitlicher Verlauf der „Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm“ (Anzahl Tage des hydrologischen Jahres mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm) für die Stationen Arosa, Chur, Davos, Disentis, Segl-Maria und Weissfluhjoch. Logistische Trends in Tage / 10 Jahre sowie Signifikanzwerte und relative Abnahme über die Periode sind in der Legende gegeben.

5.3.2 Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm

Allgemeines

Abbildung 5.2 zeigt die Entwicklung der „Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm“ für ausgewählte Stationen. Der Parameter „Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm“ ist analog zu „Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm“ (vgl. 5.3.1) abhängig von der räumlichen Lage und der Höhenlage des Messstandortes. Die Spanne der Ereignisse „Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm“ reicht von im Mittel einigen wenigen Tagen in Chur (556 m ü.M.) bis zu etwa 250 Tagen auf dem Weissfluhjoch (2690 m ü.M.). In Chur sind „Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm“ selten, d.h. jene Jahre an denen nie mehr als 30 cm Schnee lag dominieren die Zeitreihe. Der statistische Trend ist aus diesem Grund nur beschränkt interpretierbar. Auf dem Weissfluhjoch kann in schneereichen Wintern an bis zu knapp 300 Tagen (z.B. 1965) eine Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm existieren. In den letzten 20 Jahren lag allerdings im Mittel an weniger als 250 Tagen eine Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm.

Trends

Alle Stationen (ausgenommen Chur) zeigen eine signifikante bis stark signifikante Abnahme. Analog zu den „Tagen mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm“ zeigt Segl-Maria mit knapp -15 Tagen / 10 Jahren (-54.1% über die gesamte Periode) die intensivste Abnahme der „Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm“. Im Allgemeinen nehmen die „Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm“ stärker ab, als die „Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm“. In Arosa ($p=0$), Davos ($p=0$) und Disentis ($p=0.03$) beträgt die statistisch stark signifikante Abnahme zwischen -8 und -9 Tagen / 10 Jahren und auf dem Weissfluhjoch ($p=0.05$) knapp -5 Tage / 10 Jahre. Gewisse Messstandorte verfügen heute im Mittel nur noch an wenig mehr als 100 Tagen über eine Schneedecke von 30 cm oder mehr. Dies ist im Vergleich zum Beginn der Messreihe eine markante Änderung.

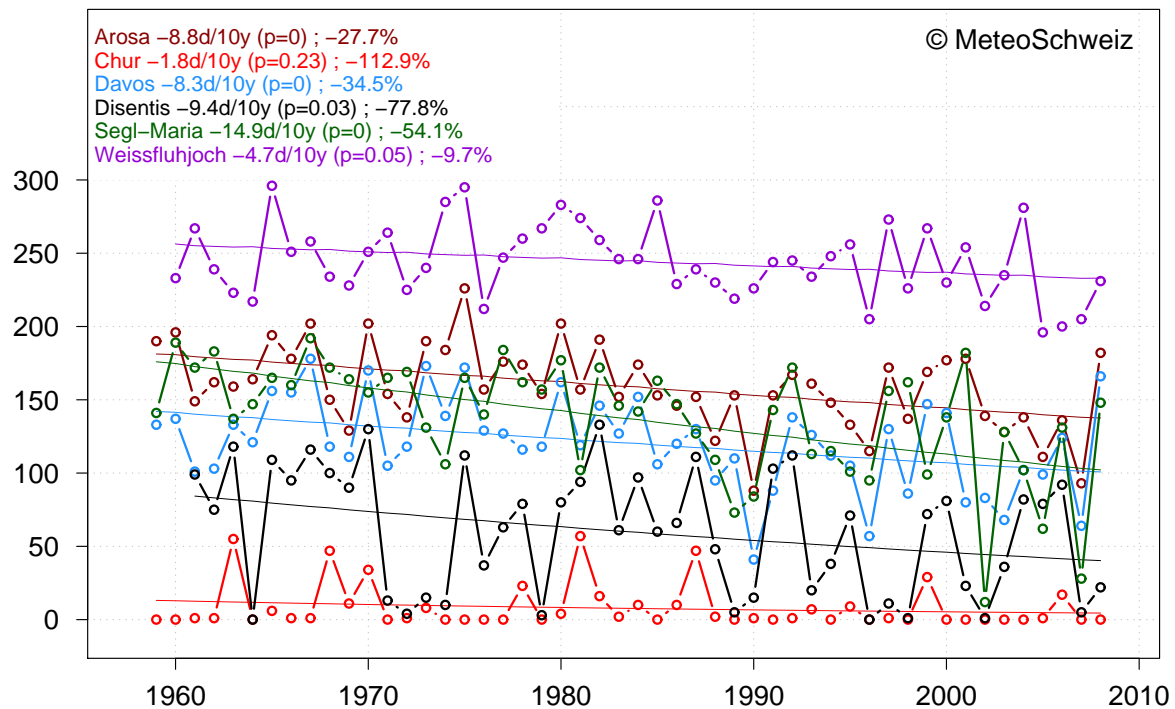


Abbildung 5.2: Zeitlicher Verlauf der „Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm“ (Anzahl Tage des hydrologischen Jahres mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm) für die Stationen Arosa, Chur, Davos, Disentis, Segl-Maria und Weissfluhjoch. Logistische Trends in Tage / 10 Jahre sowie Signifikanzwerte und relative Abnahme über die Periode sind in der Legende gegeben.

5.3.3 Neuschneesummen

Allgemeines

Die Entwicklung der Neuschneesummen während des hydrologischen Jahres sind in Abbildung 5.3 dargestellt. Diese Grösse ist einerseits von der räumlichen Lage und andererseits von der Höhenlage abhängig. Die Spanne der Neuschneesummen pro Jahr ist sehr gross und reicht von 10 cm in Chur (1998) bis zu 1358 cm auf dem Weissfluhjoch (1966).

Trends

Mit Ausnahme von Disentis ($p=0.05$) und des Weissfluhjochs ($p=0.14$) zeigen alle Stationen einen stark signifikanten Trend hin zu einer Abnahme der Neuschneesummen pro Jahr (Abbildung 5.3). Auffallend ist die Korrelationen zwischen der relativen Abnahme [%] und der Höhenlage der Standorte, unabhängig von der Region. Je tiefer die Station gelegen ist, desto massiver die relative Abnahme [%] der Neuschneesummen pro Jahr. Absolut zeigt Arosa mit einer Abnahme der Neuschneesumme von -46.4 cm / 10 Jahre die grösste Abnahme, Chur mit -15.9 cm / 10 Jahre die geringste. Bei den übrigen vier Stationen bewegen sich Abnahmen zwischen -28 und -36 cm / 10 Jahre.

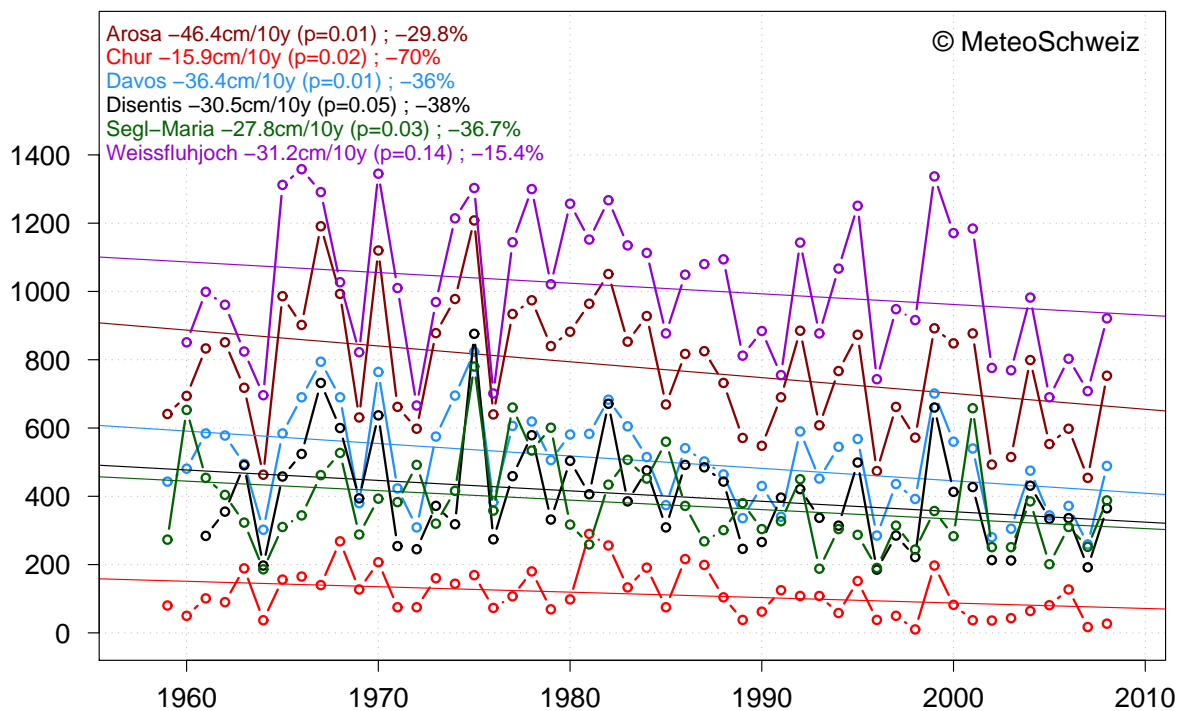


Abbildung 5.3: Zeitlicher Verlauf der Neuschneesummen in cm (Neuschneesumme des hydrologischen Jahres) für die Stationen Arosa, Chur, Davos, Disentis, Segl-Maria und Weissfluhjoch. Lineare Trends in Tage / 10 Jahre sowie Signifikanzwerte und relative Abnahme über die Periode sind in der Legende gegeben.

5.3.4 Maximaler Neuschnee

Allgemeines

Abbildung 5.4 zeigt die Entwicklung des maximalen Neuschnees für ausgewählte Stationen. Diese Grösse weist bei allen Standorten eine riesige Variabilität auf. Diese bewegt sich in tiefen Lagen (Chur, 556 m ü.M.) zwischen einigen Zentimetern und 80 cm. In hohen Lagen (z.B. Arosa, 1840 m ü.M.) schwankt der maximale Neuschnee zwischen gut 20 cm und knapp einem Meter. Es besteht zwar auch beim Parameter „Maximaler Neuschnee“ eine Höhenabhängigkeit, diese kommt jedoch nur bezogen auf langjährige Mittel und nicht bezüglich 50-jährigen Maxima.

Trend

Abgesehen vom Weissfluhjoch (2690 m ü.M., 0.5 cm / 10 Jahre) zeigen alle Stationen eine Abnahme. Keine der ausgewerteten Standorte zeigt einen statistisch signifikanten Trend. Für die Standorte in Nord- und Mittelbünden zeichnen sich stärkere Abnahmen ab, als für Segl-Maria (-0.1 cm / 10 Jahre) im Engadin.

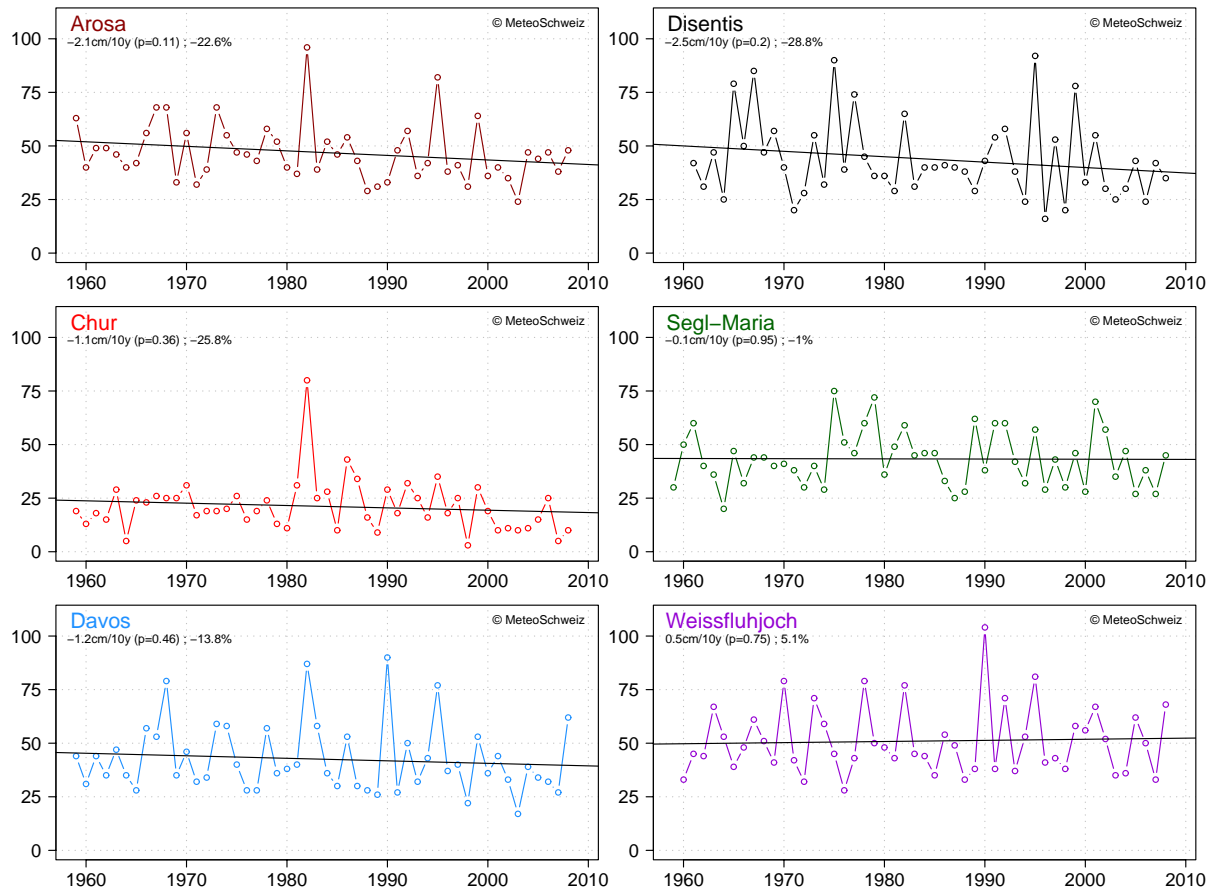


Abbildung 5.4: Zeitliche Verläufe des maximalen Neuschnee in cm (Maximaler Neuschnee pro Tag des hydrologischen Jahres) für die Stationen Arosa, Chur, Davos, Disentis, Segl-Maria und Weissfluhjoch. Lineare Trends in Tage / 10 Jahre sowie Signifikanzwerte und relative Abnahme über die Periode sind in den Legenden gegeben.

5.3.5 Maximale Gesamtschneehöhe

Allgemeines

Die Entwicklung der maximalen Gesamtschneehöhe des hydrologischen Jahres ist in Abbildung 5.5 gezeigt. Analog zu den anderen Parametern der Gesamtschneehöhe ist diese Grösse von der Höhenlage und der räumlichen Lage abhängig. Die Spanne der maximalen Gesamtschneehöhen der untersuchten Bündner Schneereihen reicht von wenigen Zentimetern (Chur, 3 cm, 1998) bis zu über 350 cm auf dem Weissfluhjoch (356 cm, 1999).

Trends

Es zeigt sich ein markanter Unterschied zwischen den Höhenlagen einerseits und andererseits zwischen Nord- und Mittelbünden und dem Engadin. Während man auf dem Weissfluhjoch (2690 m ü M) mit -0.2 cm / 10 Jahre praktisch keine Änderung der maximalen Gesamtschneehöhe in den letzten 50 Jahren erkennen kann ist die Abnahme mit -14.8 cm / Jahre (-56.3%) in Segl-Maria gross und stark signifikant. Ebenfalls eine stark signifikante Abnahme verzeichnet Arosa mit einer Abnahme von -9.9 cm / 10 Jahre. Davos und Disentis zeigen eine nicht signifikante Abnahme von -5.4 cm bis -6.6 cm pro 10 Jahre.

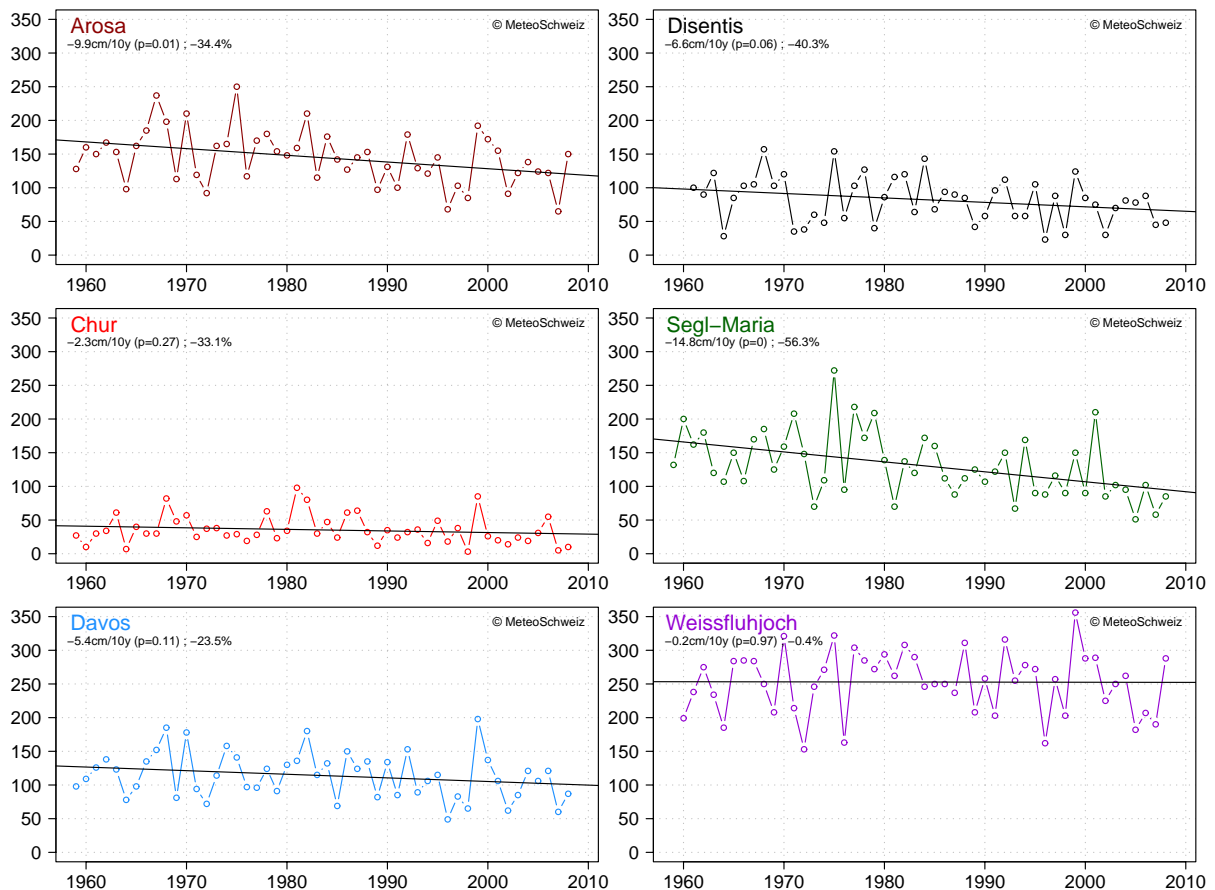


Abbildung 5.5: Zeitliche Verläufe der maximalen Gesamtschneehöhe in cm (Maximale Gesamtschneehöhe des hydrologischen Jahres) für die Stationen Arosa, Chur, Davos, Disentis, Segl-Maria und Weissfluhjoch. Lineare Trends in Tage / 10 Jahre sowie Signifikanzwerte und relative Abnahme über die Periode sind in den Legenden gegeben.

5.3.6 Tage mit Neuschnee

Allgemeines

Abbildung 5.6 zeigt die Entwicklung der „Tage mit Neuschnee ≥ 1 cm“ für ausgewählte Stationen. Die Anzahl Tage mit Neuschnee ist einerseits von der Höhenlage und andererseits von der räumlichen Lage (Nord/Süd/Inneralpin) abhängig. Die Spannweite reicht von einigen Tagen mit Neuschnee in tiefen Lagen (Chur, 556 m ü.M.) bis zu 150 Tagen (Weissfluhjoch, 2690 m ü.M.) pro Jahr.

Trends

Alle Stationen zeigen einen Trend hin zu abnehmender Anzahl Tage mit Neuschnee. Die Trends reichen von -1.3 Tagen pro 10 Jahre (Davos) bis -3.3 Tage pro 10 Jahre (Weissfluhjoch). Diese negativen Trends sind für die Station Chur stark signifikant (p -Wert ≤ 0.01). Die Standorte Arosa und Weissfluhjoch zeigen einen signifikanten Rückgang (p -Wert ≤ 0.05). Die Abnahmen an den Stationen Davos, Disentis und Segl-Maria sind nicht signifikant. In relativen Zahlen haben die Tage mit Neuschnee um 9 (Davos) – 75% (Chur) abgenommen, wobei die meisten Stationen Abnahmen zwischen 15% und 30% verzeichnen.

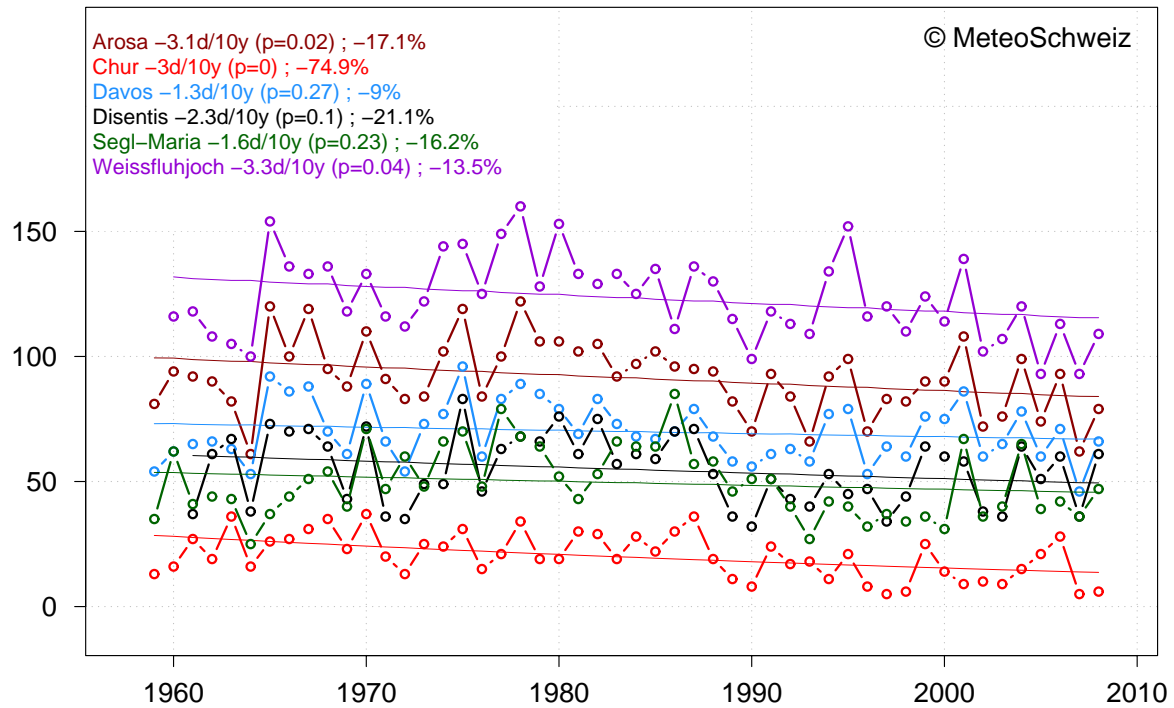


Abbildung 5.6: Zeitlicher Verlauf der Tage mit Neuschnee (Tage des hydrologischen Jahres mit Neuschnee $\geq 1\text{cm}$) für die Stationen Arosa, Chur, Davos, Disentis, Segl-Maria und Weissfluhjoch. Logistische Trends in Tage / 10 Jahre sowie Signifikanzwerte und relative Abnahme über die Periode sind in der Legende gegeben.

5.4 Lange Schneereihenanalyse

Die Stationen Arosa, Chur, Davos und Segl-Maria verfügen über ausgesprochen lange Neuschneemessreihen in Tagesauflösung. In den Abschnitten 5.4.1 bis 5.4.3 werden die Parameter „Tage mit Neuschnee“, „Maximaler Neuschnee“ und „Neuschneesummen“ in ihrem gesamten zeitlichen Verlauf dargestellt. Segl-Maria ist die längste gemessene Neuschneereihe der Schweiz (1864 – 2008) und auch Arosa (1892 - 2008) und Chur (1889 – 2008) verfügen über Schneemessreihen zurück bis ins 19. Jahrhundert.

5.4.1 Tage mit Neuschnee ≥ 1 cm

Abbildung 5.7 zeigt die Entwicklung der Anzahl Tage mit Neuschnee ≥ 1 cm während den letzten 76 (Davos) – 143 Jahren (Segl-Maria). Die dünn gezeichneten Kurven zeigen die aus den Tagesmesswerten abgeleiteten Tage mit Neuschnee ≥ 1 cm des hydrologischen Jahres. Die dickeren Kurven zeigen die geglättete Entwicklung um langfristige Schwankungen besser sichtbar zu machen. Auffallend sind die Maxima um 1980. In Arosa wird um 1980 eine Phase der steten Zunahme der Tage mit Neuschnee abgeschlossen. Im Weiteren fallen die starken Schwankungen und ein weiteres Maximum vor 1920 im südlich beeinflussten Segl-Maria auf. Der einheitlich negative Trend in den letzten 25 Jahren ist gut zu erkennen. Abgesehen von Chur wurden bereits um 1900 und teilweise auch in der Mitte des 20. Jahrhunderts ähnlich tiefe Werte beobachtet wie heute.

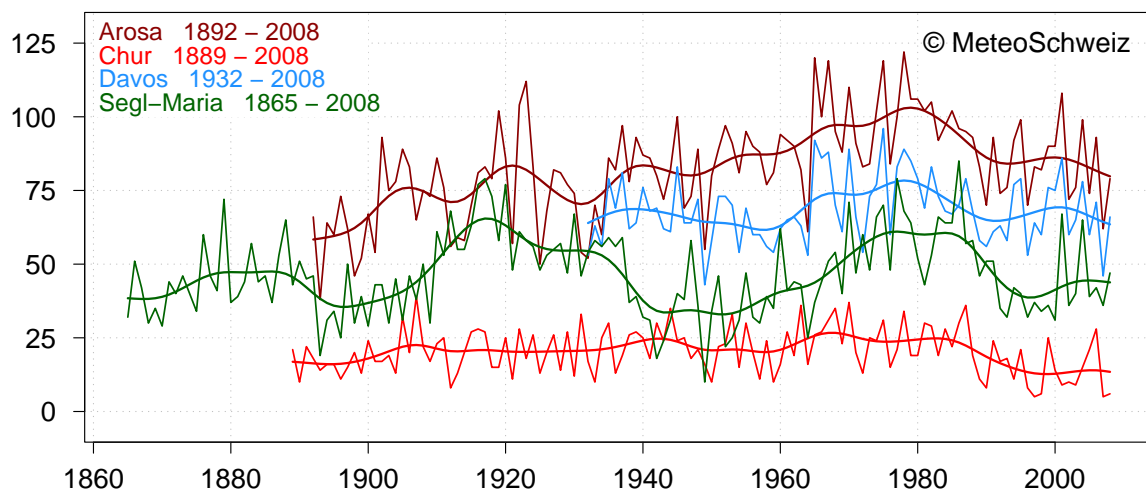


Abbildung 5.7: Zeitlicher Verlauf der Tage mit Neuschnee ≥ 1 cm des hydrologischen Jahres für die Stationen Arosa, Chur, Davos und Segl-Maria. Dargestellt sind die aus den Tagesmesswerten abgeleiteten Tage mit Neuschnee ≥ 1 cm pro Jahr sowie die mit einem 20-jährigen Gaussfilter geglättete Verlaufskurve.

5.4.2 Maximaler Tagesneuschnee

Der zeitliche Verlauf des maximalen Tagesneuschnees des hydrologischen Jahres ist in Abbildung 5.8 gezeigt. Die dünn gezeichneten Kurven zeigen den aus den Tagesmesswerten abgeleiteten maximalen Neuschnee des hydrologischen Jahres. Die dickeren Kurven zeigen die geglättete Entwicklung um langfristige Schwankungen besser sichtbar zu machen. Beachtlich sind die Maxima von 1982 in Chur (80 cm) und Arosa (96 cm) sowie das 140-jährige Maximum der Station Segl-Maria von 1871 (95 cm). Der maximale Neuschnee ist äusserst Variabel und zeigt grosse Schwankungen. Die dekadischen Schwankungen allerdings sind eher klein, d.h. es gibt längere Phasen mit eindeutig höheren bzw. tieferen Maxima.

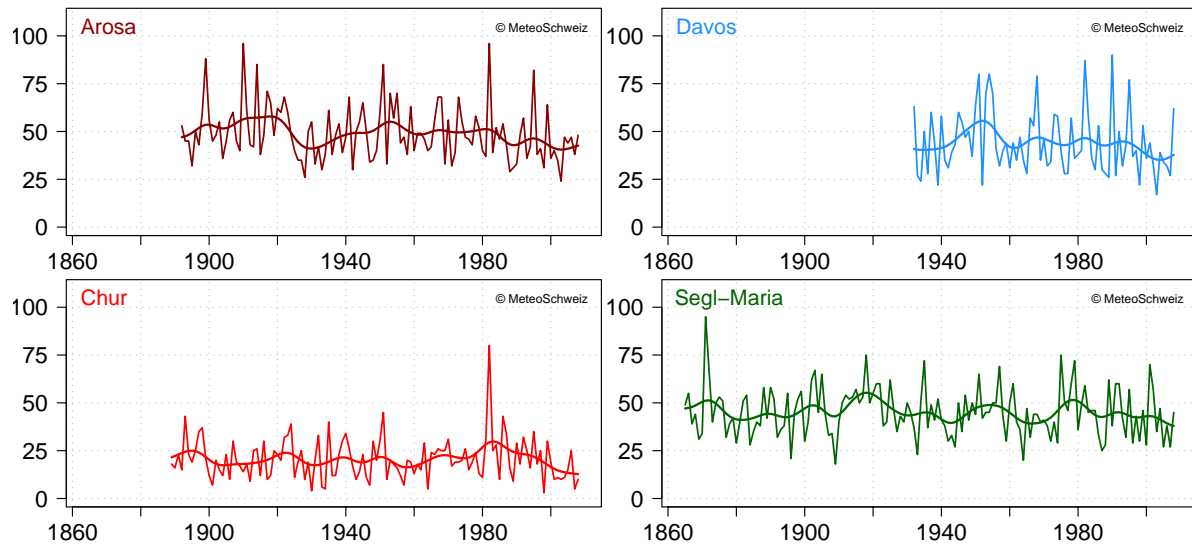


Abbildung 5.8: Zeitliche Verläufe des maximalen Neuschnees pro Tag des hydrologischen Jahres für die Stationen Arosa, Chur, Davos und Segl-Maria. Dargestellt ist der aus den Tagesmesswerten abgeleiteten maximalen Neuschnee pro Jahr sowie die mit einem 20-jährigen Gaussfilter geglättete Verlaufskurve.

5.4.3 Neuschneesumme

Abbildung 5.9 zeigt die Entwicklung der Neuschneesummen während den letzten 76 (Davos) – 143 Jahren (Segl-Maria). Die dünn gezeichneten Kurven zeigen die aus den Tagesmesswerten abgeleiteten Neuschneesummen des hydrologischen Jahres. Die dickeren Kurven zeigen den 20-jährigen Gaussfilter. Zur Berechnung des 20-jährigen Gaussfilters wurden für die fehlenden Werte der Station Segl-Maria (1911, 1914, 1915 und 1950) neue Werte berechnet, dabei wurden 20-jährige Mittelwerte verwendet. Im Allgemeinen fallen starke dekadische Schwankungen in den Zeitreihen auf, insbesondere bei den Standorten Arosa und Segl-Maria. Ein erstes Maximum wird zwischen 1910 und 1920 erreicht, ein zweites zwischen 1970 und 1980. Um 1940 wurden bereits ähnlich tiefe Werte wie heute erreicht.

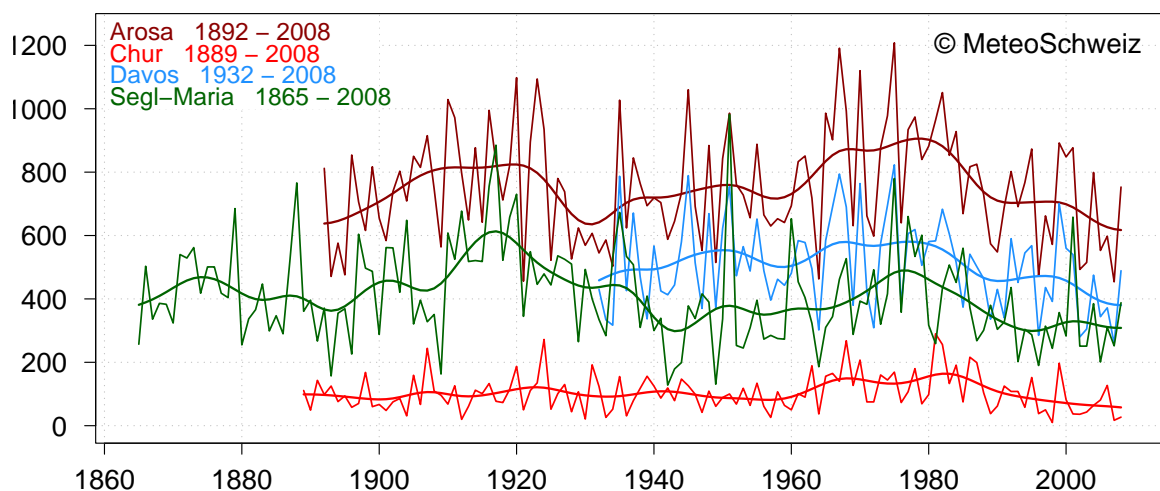


Abbildung 5.9: Zeitliche Verläufe der Neuschneesummen in cm des hydrologischen Jahres für die Stationen Arosa, Chur, Davos und Segl-Maria. Dargestellt sind die Werte der einzelnen Jahre sowie die mit einem 20-jährigen Gaussfilter geglättete Verlaufskurve.

6 Zukünftige Klimaentwicklung

Basierend auf heutigen Klimaszenarien wird sich das Klima auch in Zukunft beträchtlich verändern und die Veränderungen werden sich noch beschleunigen. Obwohl es für die Schweiz verschiedene Szenarien für die Alpennord- und Südseite gibt, sind die Unterschiede relativ klein. Zusammenfassend kann für den Kanton Graubünden von folgenden Änderungen gegenüber dem Jahr 1990 ausgegangen werden, sofern keine Einschränkungen der Treibhausgasemissionen gemacht werden:

- es muss davon ausgegangen werden, dass sich die mittleren Wintertemperaturen bis im Jahr 2050 um +0.9°C bis +3.4°C erhöhen wird.
- für die Sommertemperaturen wird eine Erwärmung von +1.4°C bis 4.9°C erwartet.
- gemäss Modellen werden die mittleren Niederschläge im Winter bis im Jahr 2050 eher zunehmen (von -1% bis +26%). Für den Sommer zeichnet sich eine Niederschlagsabnahme ab (von -6% bis -36%).
- bezüglich Klimaextreme sind für den Kt. Graubünden keine spezifischen Aussagen möglich. Schweizweit ist von einer Zunahme von Hitzeperioden, Starkniederschlag und Trockenperioden bis im Jahr 2050 auszugehen.

6.1 Einleitung

Gemäss Klimamodellen wird es auch im 21. Jahrhundert auf der Erde wärmer werden. Es muss davon ausgegangen werden, dass die mittlere globale Temperatur von 1990 bis 2100 zwischen 1.4°C und 5.8°C zunehmen wird. Dieser Bereich ergibt sich aus den verschiedenen Klimamodellen und den Emissionsszenarien, die mögliche Entwicklungen der Bevölkerung, Wirtschaft und Technologie berücksichtigen [2], [3]. Was bedeutet diese Prognose für die Klimazukunft der Schweiz?

Genauso wie sich die Klimaentwicklung in der Schweiz in der Vergangenheit von der globalen Klimaentwicklung unterscheidet, sind in Zukunft Unterschiede zwischen der globalen und der regionalen schweizerischen Klimaentwicklung zu erwarten. Um ein konkretes Bild über die zukünftige Klimaentwicklung in der Schweiz zu erhalten, wurde im Jahre 2006/07 ein regionales Temperatur- und Niederschlagsszenario publiziert [32], [33]. Das Szenario basiert auf einer grossen Zahl globaler und regionaler Klimamodellrechnungen aus dem EU-Forschungsprojekt PRUDENCE [11]. Mit den heute verfügbaren Mitteln lassen sich allerdings keine hoch aufgelösten spezifischen Klimaszenarien zum Beispiel für das Oberengadin oder die Landschaft Davos berechnen. Die aktuellen Szenarien liefern Angaben über die zukünftige saisonale Entwicklung der mittleren Temperatur und des Niederschlags im Grossraum Alpennordseite und Alpensüdseite. Als Ausgangsbasis für die Berechnung der Änderungen wird immer der Zustand von 1990 verwendet.

Szenarienrechnungen sind mit relativ grossen Unsicherheiten verbunden. Deshalb wird neben der Berechnung der Temperatur- und Niederschlagsänderung immer auch der dazu gehörende Unsicherheitsbereich der Aussage bestimmt. Im Folgenden wird jeweils das 95% Vertrauensintervall angegeben. Das bedeutet, dass sich die Änderung mit 95% Wahrscheinlichkeit innerhalb der angegebenen Unsicherheits-Bandbreite bewegen wird.

6.2 Mittlere Temperaturszenarien

Bis 2050 wird es gemäss Szenarien in allen Landesteilen der Schweiz und in allen Jahreszeiten wärmer werden. Nördlich der Alpen wird im Winter eine mittlere Erwärmung um $+1.8^{\circ}\text{C}$ (Unsicherheits-Bandbreite $+0.9$ bis $+3.4^{\circ}\text{C}$) und im Sommer eine Erwärmung um $+2.7^{\circ}\text{C}$ (Unsicherheits-Bandbreite $+1.4$ bis $+4.7^{\circ}\text{C}$) erwartet (Tabelle 6.1). Auf der Alpensüdseite wird von einer unwesentlich stärkeren Erwärmung ausgegangen. Die Modelle prognostizieren für den Winter ebenfalls $+1.8^{\circ}\text{C}$ (Unsicherheits-Bandbreite $+0.9$ bis $+3.1^{\circ}\text{C}$), und für den Sommer $+2.8^{\circ}\text{C}$ (Unsicherheits-Bandbreite $+1.5$ bis $+4.9^{\circ}\text{C}$). In den Übergangsjahreszeiten Frühling und Herbst sind beidseits der Alpen ähnliche Temperaturzunahmen wie im Winter zu erwarten [32], [33].

Um die Zahlenwerte aus Tabelle 6.1 zur zukünftigen Temperaturänderung mit der historischen Temperaturentwicklung im Kanton Graubünden anschaulich vergleichen zu können, werden die Messreihen der Winter- und Sommertemperatur von Segl-Maria, Davos und Chur mit den entsprechenden Szenarien grafisch dargestellt (Abbildung 6.1). Dabei werden die Messreihen Davos und Chur dem Szenario der Alpennordseite, und die Messreihe Segl-Maria dem Szenario der Alpensüdseite zugeordnet.

In Abbildung 6.1 ist im jeweiligen linken Bildteil die gemessene saisonale Abweichung der Temperatur von der Norm dargestellt. Die zu warmen Jahreszeiten sind rot, die zu kalten blau angegeben. Die schwarze Linie zeigt den linearen Trend 1887-2008. Die gestrichelten Linien geben die Bandbreite der mittleren saisonalen Temperaturschwankungen in der Normperiode 1961–1990 (± 1 Standardabweichung). Die rote Linie im rechten Bildteil zeigt die erwartete zukünftige Temperaturänderung der entsprechenden Jahreszeit. Die grauen Keile wiedergeben die Unsicherheits-Bandbreite, wobei hellgraue weniger wahrscheinliche Entwicklungen und dunkelgraue wahrscheinliche Entwicklungen angeben. Der äusserste hellgraue Keil umfasst das 95% Vertrauensintervall, welches in Tabelle 6.1 festgehalten ist.

6.3 Mittlere Niederschlagsszenarien

Gemäss Klimaszenarien werden die Niederschläge bis im Jahr 2050 im Winter in allen Landesteilen zunehmen. Für die Alpennordseite zeigt das Szenario eine Zunahme der Winterniederschläge um rund $+8\%$ (Bandbreite -1% bis $+21\%$), für die Alpensüdseite eine Zunahme von $+11\%$ (Bandbreite $+1\%$ bis $+26\%$) (Tabelle 6.2). In umgekehrter Richtung weisen die Niederschlags-Szenarien für den Sommer. Auf der Alpennordseite ist bis 2050 mit einer Abnahme um -17% (Bandbreite -7% bis -31%), auf der Alpensüdseite mit einer Abnahme um -19% (Bandbreite -6% bis -36%) zu rechnen. Im Frühling und Herbst sind sowohl Niederschlagszu- als auch Niederschlagsabnahmen möglich [32], [33].

Um die Zahlenwerte aus Tabelle 6.2 zur zukünftigen Niederschlagsänderung mit der historischen Niederschlagsentwicklung im Kanton Graubünden anschaulich vergleichen zu können, werden analog zur Temperatur in diesem Abschnitt die Messreihen der Winter- und Sommerniederschläge von Segl-Maria, Davos und Chur mit den entsprechenden Szenarien grafisch dargestellt (Abbildung 6.2). Dabei werden die Messreihen Davos und Chur dem Szenario der Alpennordseite, und die Messreihe Segl-Maria dem Szenario der Alpensüdseite zugeordnet.

In Abbildung 6.2 ist im jeweiligen linken Bildteil die gemessene saisonale Abweichung des Niederschlags von der Norm dargestellt. Die zu trockenen Jahreszeiten sind gelb, die zu feuchten grün angegeben. Die schwarze Linie zeigt den linearen Trend 1887-2008. Die gestrichelten Linien geben die Bandbreite der mittleren saisonalen Niederschlagsschwankungen in der Normperiode 1961–1990 (± 1 Standardabweichung). Die rote Linie im rechten Bildteil zeigt die erwartete zukünftige Niederschlagsänderung der entsprechenden Jahreszeit. Die grauen Keile wiedergeben die Unsicherheits-Bandbreite, wobei hellgraue weniger wahrscheinliche Entwicklungen und dunkelgraue wahrscheinliche Entwicklungen angeben. Der äusserste hellgraue Keil umfasst das 95% Vertrauensintervall, welches in Tabelle 6.2 festgehalten ist.

Tabelle 6.1: Erwartete Änderung der jahreszeitlichen Temperatur bis ins Jahr 2050 gegenüber 1990. Die Unsicherheits-Bandbreite umfasst das 95% Vertrauensintervall. Das bedeutet, dass sich die erwartete Änderung mit 95 % Wahrscheinlichkeit innerhalb der angegebenen Unsicherheits-Bandbreite bewegen wird. Daten aus [32].

| Region | Jahreszeit | Mittlere Temperaturänderung in °C gegenüber 1990 | Unsicherheits- Bandbreite in °C |
|----------------------|------------|---|------------------------------------|
| Nordschweiz bis 2050 | Winter | + 1.8 | + 0.9 bis + 3.4 |
| | Frühling | + 1.8 | + 0.8 bis + 3.3 |
| | Sommer | + 2.7 | + 1.4 bis + 4.7 |
| | Herbst | + 2.1 | + 1.1 bis + 3.5 |
| Südschweiz bis 2050 | Winter | + 1.8 | + 0.9 bis + 3.1 |
| | Frühling | + 1.8 | + 0.9 bis + 3.3 |
| | Sommer | + 2.8 | + 1.5 bis + 4.9 |
| | Herbst | + 2.2 | + 1.2 bis + 3.7 |

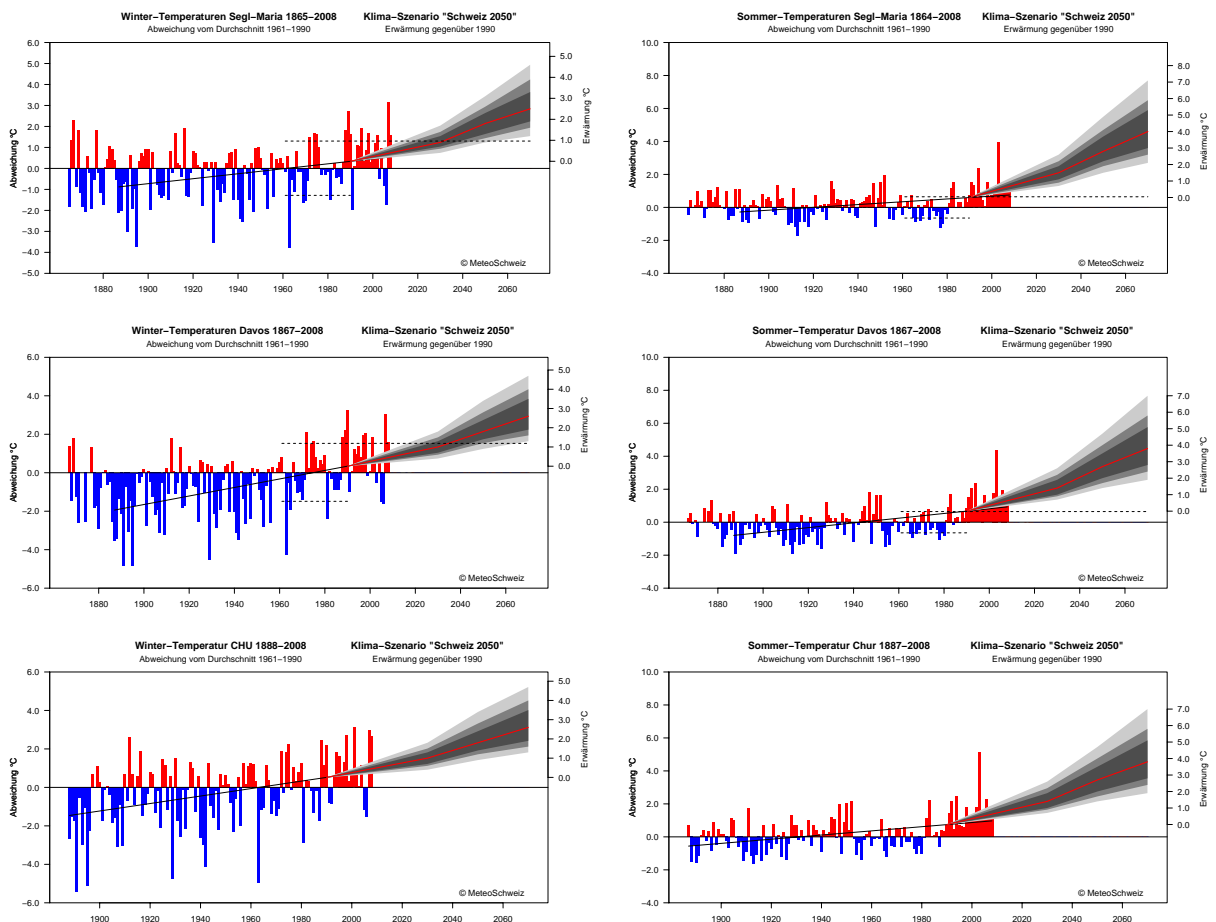


Abbildung 6.1: Langjähriger Verlauf der Wintertemperatur (Dezember bis Februar, links) und der Sommertemperatur (Juni-August, rechts) an den Messstation Segl-Maria, Davos und Chur. Der linke Bildteil zeigt die bisherige Entwicklung gemäss den Messdaten, der rechte Bildteil die erwartete zukünftige Änderung. Nähere Erläuterungen zur Grafik sind im Text zu finden.

Tabelle 6.2: Erwartete Änderung der jahreszeitlichen Niederschläge bis ins Jahr 2050 gegenüber 1990. Die Unsicherheits-Bandbreite umfasst das 95% Vertrauensintervall. Das bedeutet, dass sich die erwartete Änderung mit 95% Wahrscheinlichkeit innerhalb der angegebenen Unsicherheits-Bandbreite bewegen wird. Daten aus [32].

| Region | Jahreszeit | Mittlere Niederschlagsänderung in % gegenüber 1990 | Unsicherheits- Bandbreite in % |
|----------------------|------------|---|-----------------------------------|
| Nordschweiz bis 2050 | Winter | + 8 | -1 bis + 21 |
| | Frühling | 0 | -11 bis + 10 |
| | Sommer | - 17 | -31 bis -7 |
| | Herbst | - 6 | -14 bis -1 |
| Südschweiz bis 2050 | Winter | + 11 | +1 bis +26 |
| | Frühling | - 4 | -15 bis +5 |
| | Sommer | - 19 | -36 bis -6 |
| | Herbst | - 4 | -14 bis +4 |

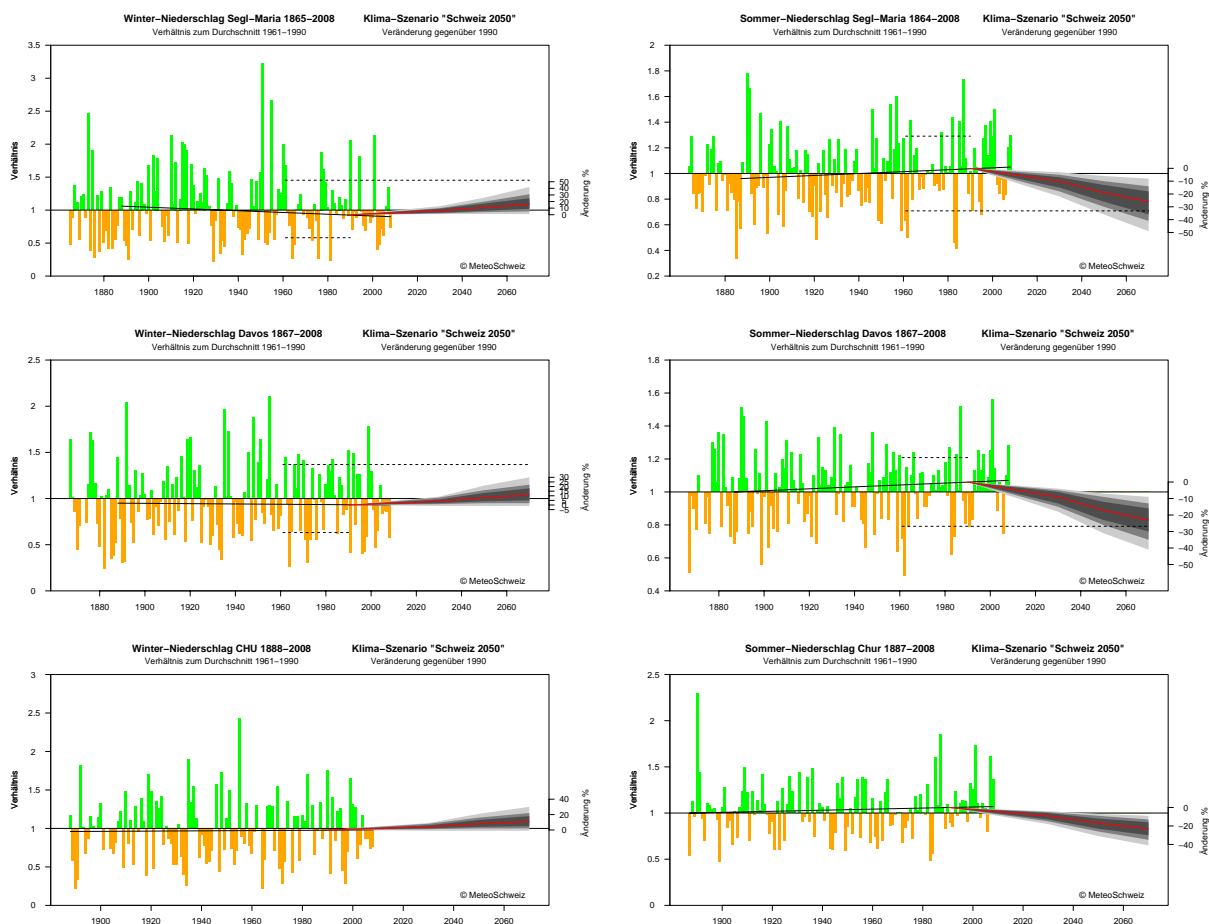


Abbildung 6.2: Langjähriger Verlauf der Winterniederschläge (Dezember bis Februar, links) und der Sommerniederschläge (Juni-August, rechts) an der Messstation Segl-Maria, Davos und Chur. Der linke Bildteil zeigt die bisherige Entwicklung gemäss den Messdaten, der rechte Bildteil die erwartete zukünftige Änderung. Nähere Erläuterungen zur Grafik sind im Text zu finden.

6.4 Extremereignisse

In der folgenden Zusammenstellung wird eine kurze Zusammenfassung der Resultate der OcCC Studie aus dem Jahre 2007 darstellt [32]. Die physikalischen Kenntnisse der meteorologischen Prozesse und des Klimasystems lassen erwarten, dass gewisse Extremereignisse zu- und andere abnehmen werden. Die Veränderungen dürften regional unterschiedlich ausfallen. Heutige Klimamodelle können die feinskaligen Prozesse bei Extremereignissen nur näherungsweise erfassen. Szenarien zur Entwicklung von Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen sind deshalb noch sehr unsicher. Auch statistische Aussagen über aktuelle Trends bei den Extremen sind wegen der Seltenheit der Ereignisse schwierig und nur für wenige Extremereigniskategorien möglich.

Am Klarsten ist die Entwicklung bei den **Temperaturextremen**. Bei einem Anstieg der mittleren Sommertemperatur ist davon auszugehen, dass Hitzeperioden mit höheren Temperaturen auftreten. Modelldaten prognostizieren, dass auch die Variabilität der mittleren Sommertemperaturen zunehmen wird ([34], [35]), was ebenfalls zu mehr Hitzeperioden mit höheren Temperaturen führen kann. Gemäss vorliegendem Szenario werden im Jahr 2050 im Sommer Verhältnisse wie im Hitzesommer 2003 [36] bei einer schwachen Erwärmung weiterhin sehr selten, bei einer mittleren Erwärmung alle paar Jahrzehnte und bei einer starken Erwärmung alle paar Jahre auftreten. Im Gegenzug ist von einer abnehmenden Häufigkeit von Kälteperioden und von weniger Frosttagen auszugehen

Bei den **Niederschlagsextremen** zeigen neue Analysen in Mitteleuropa eine Zunahme von extremen 1- bis 5-tägigen Niederschlägen im Winterhalbjahr [37]. Aktuelle Modelle zeigen, dass Starkniederschläge wie sie heute nur alle 8 bis 20 Jahre vorkommen bis Ende Jahrhundert durchschnittlich alle 5 Jahre auftreten werden. Weniger klar ist die Situation im Sommer. Obwohl die Modelle eine markante Abnahme des mittleren Niederschlags simulieren, nimmt der 5-jährliche Extremwert in den meisten Modellen leicht zu.

Es ist davon auszugehen, dass **Extreme Trockenperioden** – entsprechend der Abnahme der mittleren Niederschläge und der Anzahl der Niederschlagstage – im Sommer länger und häufiger auftreten werden. Die Kombination von Niederschlagsabnahme und höherer Verdunstung kann regional zu einer Abnahme des Feuchtigkeitsgehalts im Boden führen. Mit der Abnahme der Schneereserven in den Alpen werden zudem Flüsse, die heute im Sommer von Schmelzwasser gespiesen werden, häufiger austrocknen sowie die saisonale Wasserspeicherung in den Alpen abnehmen.

Referenzen

- [1] Amt für Natur und Umwelt Graubünden, 2009: Klimawandel in Graubünden
- [2] IPCC, 2007: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [3] IPCC, 2007: Klimaänderung 2007: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. Vierter Sachstandsbericht IPCC (AR4). Deutsche Übersetzung herausgegeben von scnat, ProClim-, Umweltbundesamt (D) und die deutsche IPCC Koordinationsstelle. Bern, Wien, Berlin.
- [4] WHO, 2008: Impacts of Europe's changing climate – 2008 indicator-based assessment, EEA Report No 4/2008. doi 10.2800/48117.
- [5] North N., Kljun N., Kasser F., Heldstab J., Maibach M., Reutimann J., Guyer M., 2007: Klimaänderung in der Schweiz. Indikatoren zu Ursachen, Auswirkungen, Massnahmen. Umwelt-Zustand Nr. 0728. Bundesamt für Umwelt, Bern, 77 S.
- [6] OcCC, 2008: Das Klima ändert – was nun? Der neue UN-Klimabericht (IPCC 2007) und die wichtigsten Ergebnisse aus Sicht der Schweiz, OcCC – Organe consultatif sur les changements climatiques, Bern, 47 pp. ISBN: 978-3-907630-33-4
- [7] Baudirektion Kanton Zürich, AWEL, 2007: Auswirkungen des Klimawandels und mögliche Anpassungsstrategien, 2007, Zürich.
- [8] Begert M., et. al.: 2007: Die Überführung der klimatologischen Referenzstationen der Schweiz in das Swiss National Basic Climatological Network (Swiss NBCN), Arbeitsberichte der MeteoSchweiz, 215, 43 p
- [9] Begert M., G. Seiz, Th. Schlegel, M. Musa, G. Baudraz, M. Moesch, 2003: Homogenisierung von Klimamessreihen der Schweiz und Bestimmung der Normwerte 1961-1990. Schlussbericht des Projekts NORM90. MeteoSchweiz, Zürich.
- [10] Begert M., Schlegel T. and Kirchhofer W., 2005: Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000. Int. J. Climatol., 25, 65–80.
- [11] Christensen J.H., T. Carter, and F. Giorgi, 2002: PRUDENCE employs new methods to assess European climate change. In: EOS, 82, 147.
- [12] Wilks D; 2006: Statistical methods in atmospheric sciences, 2nd edition, Academic Press, Amsterdam
- [13] Dobson A.J., 1990: Introduction to Generalized Linear Models. Chapman and Hall, 174 pp.
- [14] Mc Cullagh P. and Nelder J. A., 1989: Generalized Linear Models, 2n ed. Monogr. on Statistics and Appl. Probability, No. 37, Chapman and Hall, 511 pp.
- [15] siehe <http://www.r-project.org>
- [16] Frei C. and C. Schär, 2001: Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. Journal of Climate 14: 1568-1584.
- [17] OcCC 2003: Extremereignisse und Klimaänderung. Herausgeber: Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung (OcCC), Bern.
- [18] Bader S. und H. Bantle, 2004: Das Schweizer Klima im Trend. Temperatur- und Niederschlagsentwicklung 1864-2001. Veröffentlichung der MeteoSchweiz Nr. 68, Zürich.
- [19] Wanner H., D. Gyalistras, J. Luterbacher, R. Rickli, E. Salvisberg, C. Schmutz, 2000: Klimawandel im Schweizer Alpenraum. vdf Hochschulverlag AG, ETH Zürich.
- [20] Rebetz M, Reinhard M., 2008: Monthly air temperature trends in Switzerland 1901-2000 and 1975-2004, Theor. Appl. Climatol., 91, 27-34

- [21] Appenzeller C., Begert M., Zenklusen E., Scherrer S., 2008: Monitoring climate at Jungfrauoch in the high Swiss Alpine region, *Sci. Tot. Env.*, 391, 262-268, doi:10.1016/j.scitotenv.2007.10.005
- [22] Schmidli J., Schmutz C., Frei C., Wanner H., Schär C., 2002: Mesoscale precipitation variability in the region of the European alps during the 20th century, *Int. J. Climatol.*, 22, 1049-1074
- [23] siehe <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/>
- [24] Schmidli J., Frei C., 2005: Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century, *Int. J. Climatol.*, 25, 753-771
- [25] Müller H., Weber F., 2007: Klimaänderung und Tourismus – Szenarienanalyse für das Berner Oberland 2030, *Forschungsinstitut für Freizeit und Tourismus (FIF) der Universität Bern, Bern*, 87 S.
- [26] Abegg B., 1996: Klimaänderung und Tourismus. Klimafolgenforschung am Beispiel des Wintertourismus in den Schweizer Alpen. Zürich.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Laternser M., Schneebeli M., 2003: Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931-99). *International Journal of Climatology* 23: 733 – 750.
- [30] Marty C., 2008: Regime shift of snowdays in Switzerland, *Geophys. Res. Lett.* 35, L12501, doi: 10.1029/2008GL033998.
- [31] Wüthrich C., 2008: Lange Schneemessreihen der Schweiz, Aufarbeitung der längsten Schneemessreihen und Trendanalyse ausgewählter Schneeparameter, *Geographisches Institut der Universität Bern, Diplomarbeit*, pp. 102
- [32] OcCC, 2007: Klimaänderung und die Schweiz 2050 – Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. ISBN 978-3-907630-26-6, OcCC (Organe consultatif sur les changements climatiques) and ProClim, Bern, Switzerland, 172 pp.
- [33] Frei C., 2006: Die Klimazukunft der Schweiz – eine probabilistische Projektion. Bericht verfügbar unter www.meteoschweiz.ch
- [34] Beniston M., Goyette S., 2006: Changes in variability and persistence of climate in Switzerland: Exploring 20th century observations and 21st century simulations, *Global and Planetary Change* 57 (2007), 1-15
- [35] Schär C., Vidale P.L., Lüthi D., Frei C., Häberli C., Liniger M.A., Appenzeller C., 2004, The role of increasing temperature variability for European summer heat waves, *Nature*, 427, 332-336
- [36] ProClim-Forum for Climate and Global Change, 2005: Hitzesommer 2004, *Synthesebericht*, Bern
- [37] Frei C., Schöll R., Schmidli J., Fukutome S., Vidale P.L., 2006: Future change of precipitation extremes in Europe: An intercomparison of scenarios from regional climate models, *Int. J. Geophys. Res.*, 111, D06105, doi:10.1029/2005JD005965

