



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement des Innern EDI
Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz

Fachbericht MeteoSchweiz Nr. 242

Klimabericht Kanton Graubünden 2012

Im Auftrag des Amtes für Natur und Umwelt Graubünden



ISSN: 2296-0058

Fachbericht MeteoSchweiz Nr. 242

Klimabericht Kanton Graubünden 2012

Autoren:

Dr. Stephan Bader
Michael Begert
Dr. Mischa Croci-Maspoli
Dr. Simon Scherrer
Thomas Schlegel

Projektleitung:

Thomas Schlegel

Auftraggeber

Amt für Umwelt Graubünden
Gürtelstrasse 89
CH – 7000 Chur

Empfohlene Zitierung:

MeteoSchweiz, 2012, Klimabericht Kanton Graubünden 2012, *Fachbericht MeteoSchweiz*, **242**, 56 pp.

Herausgeber:

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz, © 2012

Vorwort

Die mittleren Temperaturen nehmen global zu, jedoch zu langsam für uns um dies wahrzunehmen. Trotzdem spüren wir lokal den globalen Klimawandel und seine Folgen: Der Rückzug der Gletscher und das Fehlen der schneebedeckten Wiesen im Bündner Rheintal zeigen uns, dass Auswirkungen des Klimawandels nicht mehr zu verhindern sind. Das Bündner Klima wird sich weiter ändern. Bis Ende des Jahrhunderts werden die Mitteltemperaturen wahrscheinlich in allen Jahreszeiten um mehrere Grade steigen.

Die Gletscher werden sich weiter zurückziehen, die Schneesicherheit für Wintersportgebiete nimmt ab und invasive fremde Tiere und Pflanzen werden bei uns heimisch. Die Gefahr von Starkniederschlägen, Hochwasser und Murgängen nimmt zu und Hitzewellen im Sommer werden unsere Gesundheit beeinträchtigen. Der Klimawandel bietet aber auch Chancen: So kann der stark vom Tourismus abhängige Bergkanton Graubünden von seiner Höhenlage profitieren, wenn es in anderen Ferienregionen teilweise zu heiss oder zu trocken werden wird.

Der Klimawandel ist ein globales Problem, Gegenmassnahmen zur Reduktion des Ausstosses von Treibhausgasen sind bekannt. Je länger deren Umsetzung jedoch dauert, desto teurer werden die Schadenskosten. Die Luftreinhaltung des Kantons Graubünden verfolgt ihr Ziel in engem Zusammenhang mit den Anstrengungen, den Energieverbrauch – und speziell jenen der fossilen Energieträger – stark zu reduzieren und damit den Ausstoss von Klimagasen herabzusetzen. Diese Aufgabe kann nur in enger Zusammenarbeit unter verschiedenen Politikbereichen wie Landwirtschaft, Energie und Klima erreicht werden. Aber auch die Interessen von Infrastruktur, Verkehrspolitik und Tourismus müssen berücksichtigt werden.

Der Kanton Graubünden wird auch künftig die Klimaänderung beobachten und sich mit geeigneten Gegenmassnahmen vor den Auswirkungen des Klimawandels schützen. Bei diesen Anpassungen handelt es sich um eine gemeinsame Aufgabe von Bund, Kantonen, Gemeinden und Privaten. Wir müssen vermehrt global denken und lokal handeln.

Als Grundlage dafür stellt das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz ihre über 100-jährigen Klimamessdaten aus dem Kanton Graubünden dar und die Klimaentwicklung wird durch ausgewiesene Fachleute berechnet und beschrieben.

Remo Fehr

Vorsteher des Amtes für Natur und Umwelt

Chur, im Oktober 2012

Zusammenfassung

Die globale Klimaänderung beeinflusst das Klima auf verschiedenen räumlichen Skalen. Resultate dazu wurden in diversen internationalen (IPCC 2007), europäischen (WHO 2008) und auch nationalen Studien (CH2011, North et al. 2007, OcCC 2008, AWEL 2007) 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

Die Klimaerwärmung ist in den Messdaten der Stationen im Kanton Graubünden eindeutig nachweisbar. Die Erwärmung seit Beginn der Messungen im 19. Jahrhundert beträgt bis heute im Winter je nach Region zwischen +1°C und etwas über +2°C pro 100 Jahre, im Sommer liegt sie zwischen +1°C und +1.5°C pro 100 Jahre. Betrachtet man die Erwärmung der letzten ca. 50 Jahre so lässt sich feststellen, dass die Trends der Temperaturzunahme in allen Jahreszeiten noch ausgeprägter sind. Die Veränderung des Klimas lässt sich auch in gesellschaftlich relevanten Klimaindikatoren feststellen. Alle Messungen an Bündner Stationen zeigen eine signifikante Abnahme der Frosttage während den letzten 50 Jahren zwischen 15 und 45 Prozent. Dies entspricht einer absoluten Abnahme von 20 bis 50 Tage pro Jahr. Die Sommertage hingegen nehmen markant zu. Abgesehen von hohen Lagen, wo Sommertage noch immer sehr selten sind, kamen alle 10 Jahre zwischen 3 und 12 zusätzliche Sommertage dazu. Relativ gesehen gibt es heute an tiefen und mittleren Lagen rund 50-70% mehr Sommertage als zu Beginn der 1960er Jahre. Eine eindeutige Änderung lässt sich auch in der Lage der Nullgradgrenze feststellen. Mit Ausnahme vom Herbst sind die Anstiege stark signifikant und liegen je nach Jahreszeit zwischen 30 und gut 70 m pro 10 Jahre. Analog zu den Temperaturtrends ist der Anstieg der Nullgradgrenze im Herbst am Niedrigsten und im Sommer am Grössten. In den Sommermonaten liegt die Nullgradgrenze heute im Schnitt ca. 350 m höher als vor 50 Jahren.

Der Niederschlag im Alpenraum weist eine grosse Jahr zu Jahr Variabilität auf. Bei der Analyse der Niederschlagsentwicklung zeigen sich denn auch periodische Schwankungen der Niederschlagssummen als das typische Merkmal. Betreffend einer langfristigen Niederschlagsänderung lassen sich zurzeit noch keine eindeutigen Aussagen machen. Ebenfalls keine statistisch abgesicherten Veränderungen sind in den meisten Gebieten für die indirekten Niederschlagsmessgrössen „Trockenperioden“ und „Starkniederschläge“ seit 1961 ersichtlich.

Der Grossteil der ausgewerteten Stationen im Kanton Graubünden zeigt in den letzten 50 Jahren einen signifikanten Rückgang in der jährlichen Anzahl Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm und ≥ 30 cm sowie der Neuschneesummen und der Tage mit Neuschnee. Die maximale Gesamtschneehöhe pro Jahr zeigt, abgesehen der sehr hoch gelegenen Gebiete, ebenfalls eine deutliche Abnahme. Keine signifikanten Änderungen hingegen sind bei der täglichen maximalen Neuschneesumme zu beobachten. Eine Übersicht zu allen untersuchten Parameter ist in Tabelle A zusammengestellt.

Zukünftige Klimaentwicklung im Kanton Graubünden

Basierend auf den zur Verfügung stehenden Klimamodellen ist zu erwarten, dass das Bündner Klima im Laufe des 21. Jahrhunderts signifikant vom heutigen und vergangenen Zustand abweichen wird. Die Mitteltemperaturen werden sehr wahrscheinlich in allen Jahreszeiten um mehrere Grade ansteigen. Bis Ende des Jahrhunderts dürften die mittleren Niederschlagsmengen im Sommer in ganz Graubünden deutlich abnehmen, die Winterniederschläge in den südalpin beeinflussten Gebieten hingegen wahrscheinlich eher zunehmen. Für die nordalpin beeinflussten Gebiete gibt es im Winter kein eindeutiges Signal. Es kann auch eine Änderung im Charakter von Extremereignissen erwartet werden. Es ist von häufigeren, intensiveren und länger anhaltenden Wärmeperioden und Hitzewellen im Sommer auszugehen, während die Zahl der kalten Wintertage vermutlich abnehmen wird. Projektionen der Häufigkeit und Intensität von Niederschlagsereignissen sind mit grösseren Unsicherheiten behaftet, markante Änderungen können jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Tabelle A: Übersicht der Veränderungen der analysierten Parameter und Klimaindikatoren. Die Trends wurden für den Zeitraum 1961 – 2011 berechnet. Die Stationen Scuol (1972-2011) und Grono (1971-2011) weisen für einzelne Auswertungen kürzere Reihen auf. Signifikant positive Trends sind in rot, signifikant negative Trends in blau dargestellt ($p \leq 0.05$). Die übrigen Änderungsangaben sind statistisch nicht signifikant und können zufällig sein. Detaillierte Angaben zu den Trends werden in den entsprechenden Kapiteln diskutiert.

Veränderung von	Mittlere Temperatur	Mittlerer Niederschlag	Anzahl Frosttage	Anzahl Sommertage	Tage mit Niederschlag ≥ 20 mm	Sehr nasse Tage	Trockenperioden	Gesamtschnee ≥ 5 cm	Gesamtschnee ≥ 30 cm	Neuschneesummen	Maximaler Neuschnee	Maximaler Gesamtschnee	Tage mit Neuschnee
Chur	+0.4	+2.0	-8.4	+4.8	+0.6	+21.3	+0.2	-9.4	-3.4	-21.7	-1.5	-4.2	-3.4
Davos	+0.3	+1.2	-5.9	+1.3	+0.6	+17.9	+0.7	-5.6	-7.1	-39.2	-1.5	-6.9	-1.4
Weissfluhjoch	+0.3	-0.6	-	-	-	-	-	-5.3	-5.3	-46.7	-0.2	-3.9	-4.3
Disentis	+0.4	+2.2	-5.0	+3.4	+0.6	+20.0	+0.3	-6.5	-7.3	-34.8	-2.6	-3.5	-3.6
Arosa	+0.3	+0.5	-	-	-	-	-	-6.3	-8.1	-58.2	-1.9	-11.5	-3.6
Samedan	+0.3	-0.5	-10.0	+0.4	-0.0	+4.2	+0.2	-	-	-	-	-	-
Scuol	+0.3	-0.6	-7.5	+4.3	-0.0	+4.6	+1.2	-	-	-	-	-	-
Segl-Maria	+0.3	+0.7	-	-	-	-	-	-10.1	-12.6	-17.2	+0.4	-12.5	-2.2
Robbia	+0.3	+2.1	-7.0	+4.6	+0.2	+18.4	+1.3	-	-	-	-	-	-
Grono	+0.3	-1.0	-3.9	+11.7	-0.5	-3.1	+0.9	-	-	-	-	-	-
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]

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	9	
1	Datengrundlage & Methoden.....	11
1.1	Bodenmessdaten.....	11
1.2	Messstandorte	11
1.2.1	Datenverfügbarkeit	12
1.2.2	Datenqualität / Datenaufarbeitung	12
1.3	Normperiode / Normwerte	13
1.4	Klimaszenariendaten	13
1.5	Statistische Methoden	14
2	Das Klima von Graubünden – eine kurze Übersicht	15
3	Historische Klimaentwicklung	18
3.1	Einleitung	18
3.2	Temperatur	19
3.2.1	Temperaturentwicklung	19
3.2.2	Temperaturtrends	21
3.3	Niederschlag.....	22
3.3.1	Niederschlagsentwicklung	22
3.3.2	Niederschlagstrends.....	23
3.4	Schnee	24
3.4.1	Tage mit Neuschnee ≥ 1 cm.....	24
3.4.2	Maximaler Tagesneuschnee.....	25
3.4.3	Neuschneesumme.....	26
4	Klimaindikatoren	27
4.1	Einleitung	27
4.2	Klimaindikatoren der Messgrösse Temperatur	29
4.2.1	Frosttage	29
4.2.2	Sommertage	30
4.2.3	Nullgradgrenze	31
4.3	Klimaindikatoren der Messgrösse Niederschlag	32
4.3.1	Tage mit Niederschlag ≥ 20 mm: Starkniederschlag	32
4.3.2	Niederschlag der sehr nassen Tage: Starkniederschlag	33
4.3.3	Trockenperioden.....	34
4.4	Klimaindikatoren der Messgrösse Schnee.....	36
4.4.1	Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm.....	36
4.4.2	Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm	37
4.4.3	Maximale Gesamtschneehöhe	39
4.4.4	Neuschneesummen.....	40
4.4.5	Maximale tägliche Neuschneesumme	41
4.4.6	Tage mit Neuschnee.....	42

5	Zukünftige Klimaentwicklung	43
5.1	Einleitung	44
5.2	Emissionsszenarien.....	44
5.3	Temperaturszenarien.....	45
5.4	Niederschlagsszenarien	49
5.5	Wetterextreme	51
5.6	Die neuen Szenarien im Vergleich mit denen von 2007	53
6	Referenzen	54

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) (Begert et al. 2007) und 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 1.2). 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 1.2.1). 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 1.2.2).

1.2 Messtandorte

Es wurden Daten von ausgewählten 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.

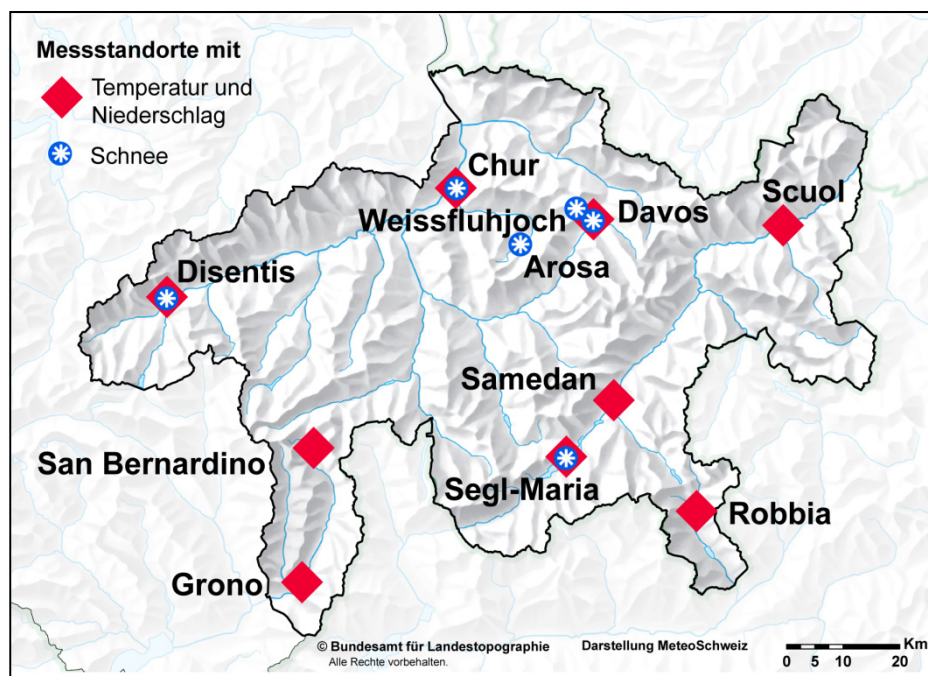


Abbildung 1.1: Geographische Verteilung der Bodenmessstationen im Kanton Graubünden. Die Stationen werden aufgeteilt nach verschiedenen Parametern.

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

1.2.1 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, was bei der Trendanalyse zu berücksichtigen ist. 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 z.T. nicht über den ganzen Zeitraum (1961 – 2011) verfügbar.

Station	Temperatur- / Niederschlagsanalysen	Klima-indikatoren	Neuschnee-analysen	Gesamtschnee-analysen
Chur	1887 – 2011	1961 – 2011	1889 – 2011	1961 – 2011
Davos	1876 – 2011	1961 – 2011	1932 – 2011	1961 – 2011
Weissfluhjoch	–	–	§1961 – 2011	§1961 – 2011
Disentis	–	1961 – 2011	§1961 – 2011	§1961 – 2011
Arosa	–	–	1892 – 2011	1961 – 2011
Samedan	–	1961 – 2011	–	–
Scuol	–	§1972 – 2011	–	–
Segl-Maria	1863 - 2011	1961 – 2011	1865 - 2011	1961 - 2011
Robbia	–	1961 – 2011	–	–
Grono	–	§1971 – 2011	–	–

1.2.2 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 (Begert et al. 2003, Begert et al. 2005) 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.

1.3 Normperiode / Normwerte

Langjährige Mittelwerte (bzw. Normwerte) werden einerseits dazu verwendet um das Klima einer Region zu beschreiben, andererseits angewandt um die aktuelle Witterung einer Region mit dem erwarteten Klima zu vergleichen. Dieser Vergleich lässt Aussagen darüber zu, ob eine Periode zu nass, zu warm oder zu sonnenreich war. In einem sich verändernden Klima ist es allerdings wichtig, dass die Normperiode nicht zu weit in der Vergangenheit liegt, damit die Normwerte als Vergleichsbasis auch tatsächlich dem durchschnittlich zu erwartenden Klima entsprechen. Die Weltmeteorologische Organisation (WMO) empfiehlt deshalb den Wetterdiensten, zusätzlich zur aktuell gültigen Normperiode 1961-1990, auch Normwerte der Periode 1981-2010 bereitzustellen. Im Klimabericht Graubünden 2012 wird das Klima der Kt. Graubünden (Kapitel 2) bereits mit den neuen Normwerten beschrieben. Die historische Klimaentwicklung in Kapitel 3 basiert auf der WMO Standard-Normperiode 1961-1990.

1.4 Klimaszenariendaten

Um ein konkretes Bild über die zukünftige Klimaentwicklung der Schweiz zu erhalten, wurden im Jahr 2011 die Szenarien zur Klimaänderung in der Schweiz CH2011 publiziert (CH2011, 2011). Die Daten für die Szenarien der Temperatur- und Niederschlagsentwicklung in den nächsten Jahrzehnten basieren auf einer grossen Anzahl verschiedener Klimamodellrechnungen des IPCC, des EU-Forschungsprojekt ENSEMBLES sowie Analysen und weiteren Nachbearbeitungen des CH2011-Konsortiums. Mit den heute verfügbaren Mitteln lassen sich allerdings keine hochaufgelösten spezifischen Klimaszenarien, zum Beispiel für die Surselva oder das Prättigau berechnen. Die aktuellen Szenarien liefern Angaben über die zukünftige saisonale Entwicklung der Temperatur und des Niederschlags für die Grossregionen Nordostschweiz und Südschweiz. In diesem Bericht werden für Nord- und Mittelbünden die Werte der Nordostschweiz und für die Bündner Südtäler und das Engadin die Werte der Südschweiz angewandt. Als Ausgangsbasis für die Berechnung der Änderungen wird immer der Zustand von 1980-2009 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.

1.5 Statistische Methoden

Die Auswertungen in diesem Bericht basieren auf verschiedenen statistische Methoden.

Für Temperatur-, Schnee- und Niederschlagsanalysen über sehr lange Zeiträume wird ein 20-jähriger Gauss-Filter auf die Messdaten angewendet. Die Schneeanalysen wurden am Beginn und Ende der Messreihe durch einen einseitigen Gaussfilter ergänzt. Durch den Gaussfilter werden die einzelnen Messwerte einer Zeitreihe geglättet, um die langjährige Variabilität besser sichtbar zu machen.

Zur Berechnung der linearen Trends wird für kontinuierliche Daten eine least-square Regression (Temperatur- und Schneedaten; Wilks 2006) oder der Theil-Sen trend estimator (Niederschlag; Theil 1950; Sen 1968) verwendet. 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 (Dobson 1990, Mc Cullagh et al. 1989). 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 verwendet. Für die so bestimmten saisonalen Nullgradgrenzen (z.B. Sommer 1961-2011) wird dann über eine lineare Regression die zeitliche Veränderung der Nullgradgrenze quantifiziert (Trend in m/10 Jahre sowie Signifikanz über den p-Wert).

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 0.4°C, im Juli bei knapp 18.9°C (Normperiode 1981-2010, Abbildung 2.1). 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 -4.9°C, und der Juli von rund 12.4°C. Im arktischen Klima des Hochgebirges auf rund 3300 m ü.M., Beispiel Piz Corvatsch, sinkt die durchschnittliche Januartemperatur schliesslich auf -11.3°C, während die durchschnittliche Julitemperatur nur noch 2.3°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°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 (Abbildung 2.2). 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.

Sonnig dank Trockenheit und Nebelarmut

Die geringere Niederschlagstätigkeit, verbunden mit einer geringeren Bewölkung, führt in den trockenen Regionen grundsätzlich zu sonnigeren Verhältnissen (Abbildung 2.3). Hinzu kommt die auffallend höhere Sonnenscheindauer im Engadin im Vergleich zum Mittelland während der Herbst- und Wintermonate. Dies ist, neben der erwähnten geschützten Lage, auf das Fehlen von beständigen Nebel- und Hochnebellagen zurückzuführen. Die Statistik zeigt für das Engadin in den Herbst- und Wintermonaten nur einen Nebeltag pro Monat, während im Flachland der Nordseite z.T. mehr als 10 Tage pro Monat auftreten.

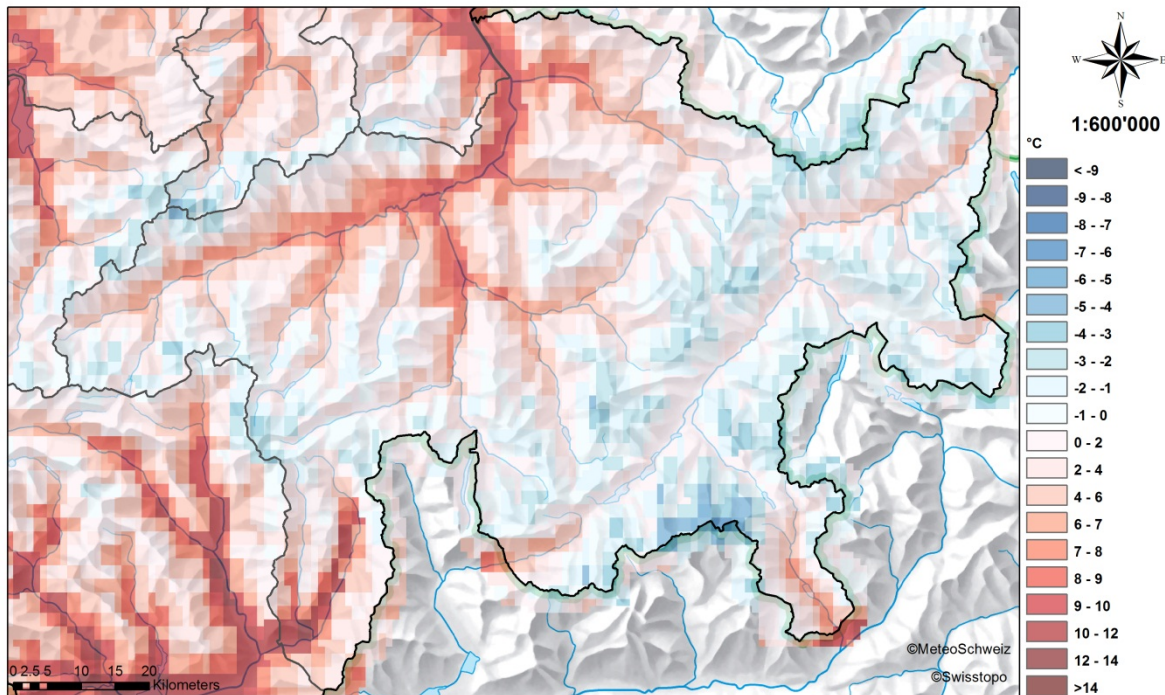


Abbildung 2.1: Mittlere Jahrestemperatur ($^{\circ}\text{C}$) im Kanton Graubünden auf der Basis der Normperiode 1981-2010.

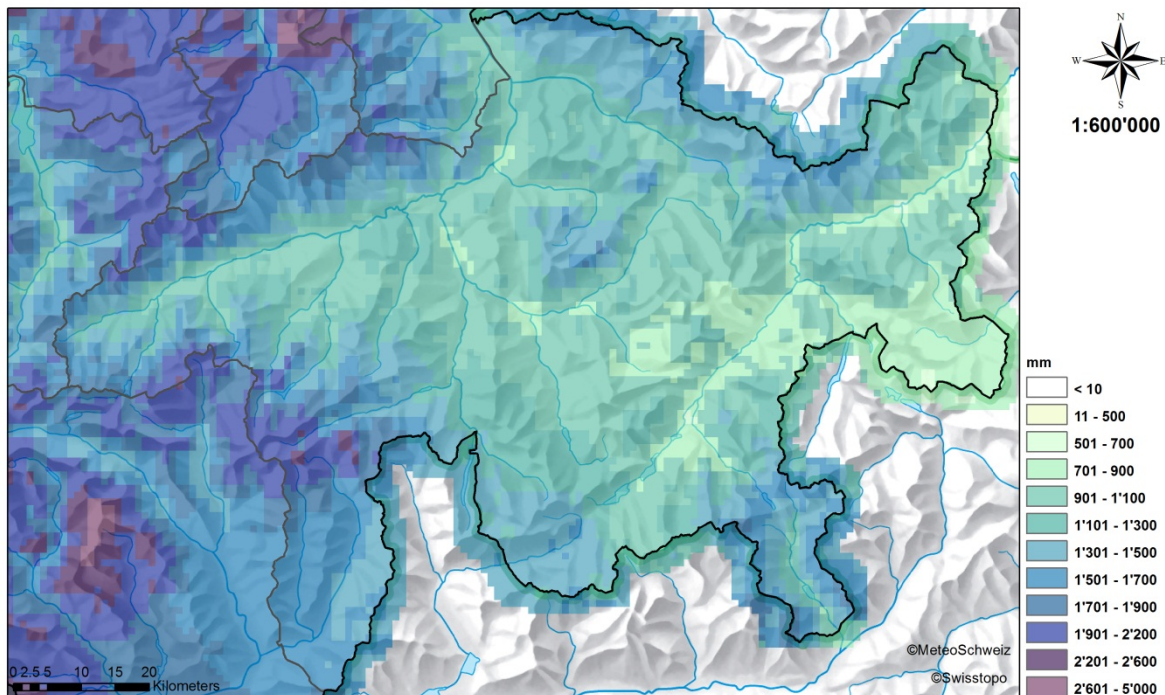


Abbildung 2.2: Mittlerer Jahresniederschlag (mm) im Kanton Graubünden auf der Basis der Normperiode 1981-2010.

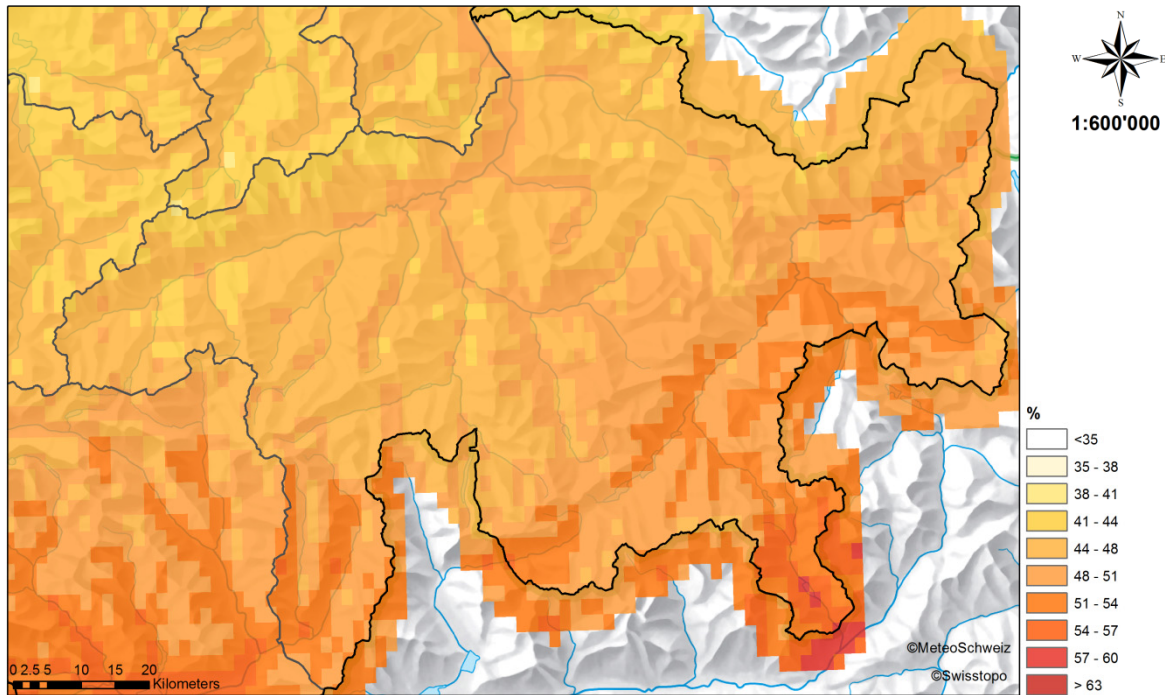


Abbildung 2.3: Mittlere jährliche relative Sonnenscheindauer (%) im Kanton Graubünden auf der Basis der Normperiode 1981-2010. Für die Bestimmung der relativen Sonnenscheindauer werden die tatsächlich gemessenen Sonnenstunden mit den absolut möglichen Sonnenstunden verglichen. Absolut möglich heisst ununterbrochen Sonne vom Sonnenaufgang bis zum Sonnenuntergang. Wenn also die Sonne wegen Wolken nur zur Hälfte der möglichen Zeit scheint, ergibt dies eine relative Sonnenscheindauer von 50 Prozent.

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 und im Sommer (rund 0.1°C bis 0.2°C pro 10 Jahre) gemessen.
- Seit 1961 wird im Winter in Nordbünden und im Engadin ein stark signifikanter und noch ausgeprägter Temperaturtrend (rund 0.2°C bis 0.4°C pro 10 Jahre) gemessen. In der Landschaft Davos ist im Winter in den letzten 50 Jahren keine signifikante Temperaturänderung festzustellen. Im Sommer wird überall ein signifikanter Temperaturtrend (rund 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.
- Es gibt 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.

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 (Frei und Schär 2001, OcCC 2003). In der alltäglichen Klimaentwicklung von Jahr zu Jahr oder von Jahrzehnt zu Jahrzehnt kommen Änderungen hingegen viel eindeutiger zum Ausdruck (Wanner et al. 2000, Begert et al. 2005). 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 unverstandenen alpinen Klimavariabilität (Wanner et al. 2000). 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 (IPCC 2007a, IPCC 2007b).

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.

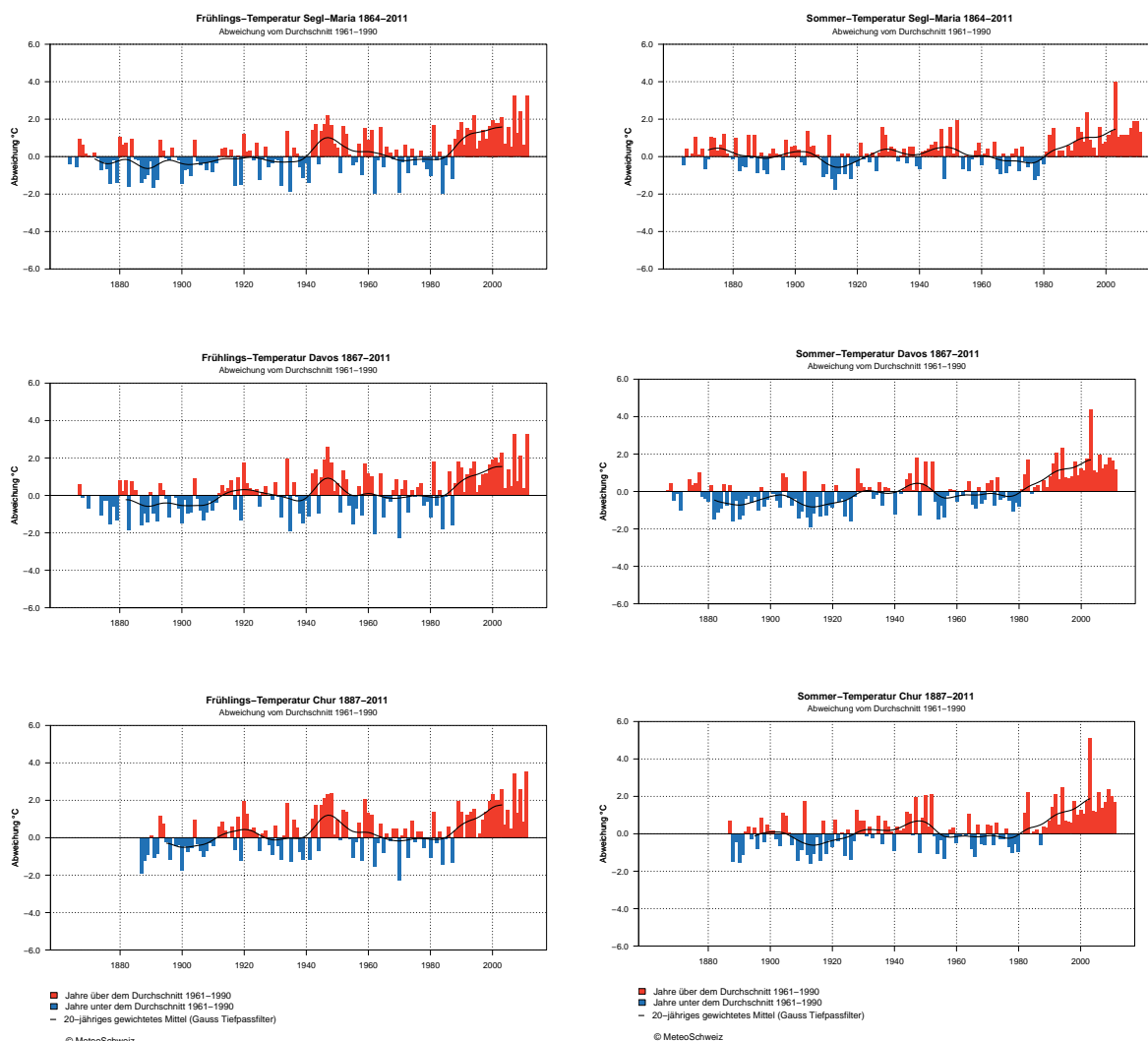


Abbildung 3.1: Langjähriger Verlauf der Frühlingstemperatur (März bis Mai, links) und der Sommertemperaturen (Juni bis August, rechts) an den Messstationen Segl-Maria, Davos und Chur. Dargestellt in rot und blau ist die jährliche Abweichung der Temperatur von der Norm 1961-1990. Die schwarze Kurve zeigt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

In der Zeit von 1864 und 2011 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.

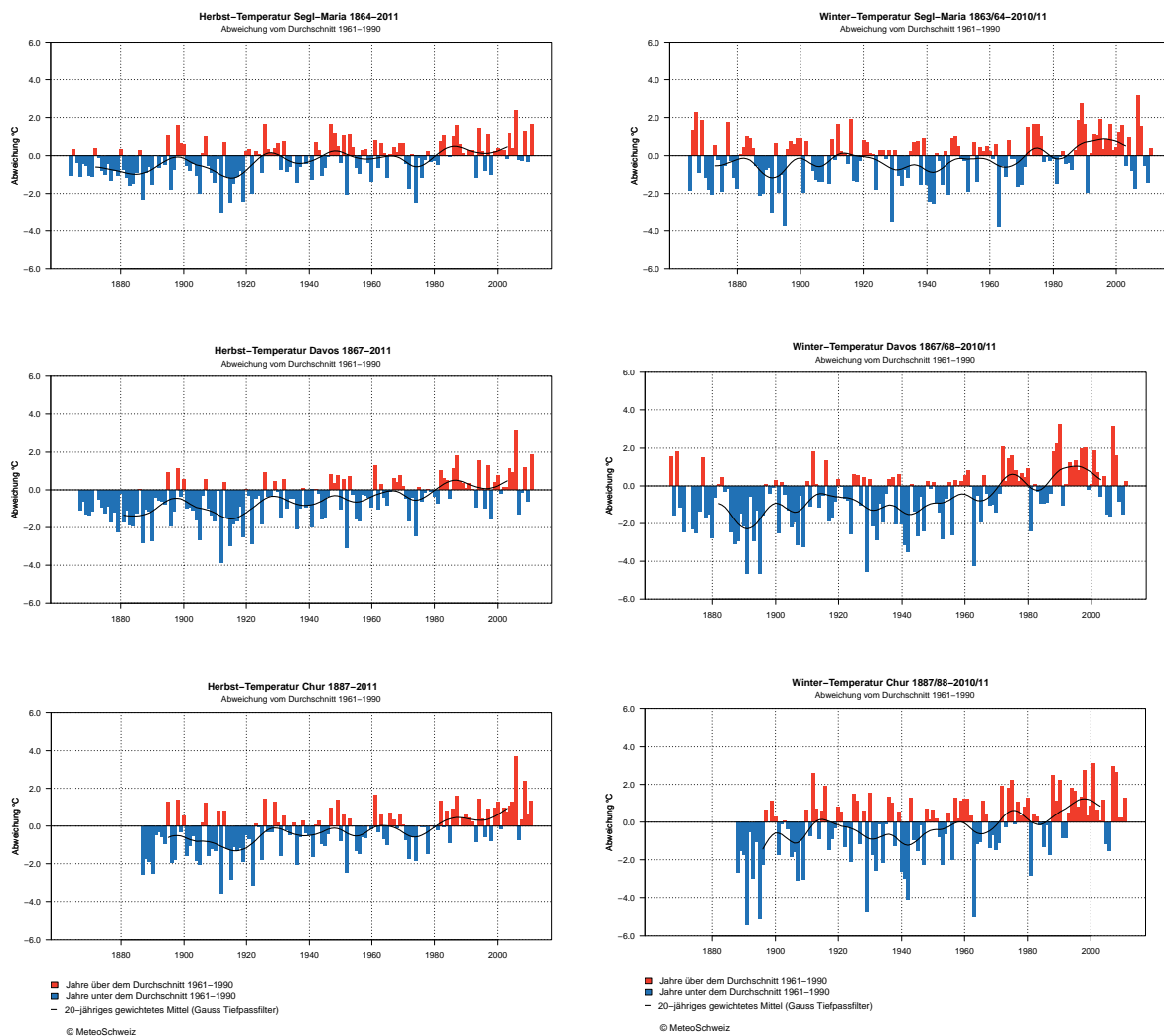


Abbildung 3.2: Langjähriger Verlauf der Herbsttemperatur (September bis November, links) und Wintertemperaturen (Dezember bis Februar, rechts) an den Messstationen Segl-Maria, Davos und Chur. Dargestellt in rot und blau ist die jährliche Abweichung der Temperatur von der Norm 1961-1990. Die schwarze Kurve zeigt den 20-jährigen Gaussfilter. Die Herbst-Normtemperatur 1961-1990 beträgt für Segl-Maria 3.1°C, für Davos 4.0°C und für Chur 9.3°C. Die Winter-Normtemperatur 1961-1990 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 1900-2011 und 1961-2011 (Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2).

Alle drei Messreihen zeigen in der Periode 1900 bis 2011 in allen vier Jahreszeiten stark signifikante Trends zu höheren Temperaturen (Begert et al. 2005, Bader und Bantle 2004, Rebetez und Reinhard 2008, Appenzeller et al. 2008). 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 (Begert et al. 2005, Bader und Bantle 2004, Rebetez und Reinhard 2008). Die Messreihe Segl-Maria zeigt abweichend zu Davos und Chur die grösste jahreszeitliche Erwärmung im Frühling, welche in dieser Jahreszeit die geringste Erwärmung aufweisen.

In der Periode 1961-2011 sind im Frühling und im Sommer an allen drei Messstandorten vergleichbare Temperaturtrends im Bereich von rund einem halben Grad pro Jahrzehnt zu beobachten. Leicht unterschiedlich verlaufen dann jedoch die Jahreszeiten Herbst und Winter. Während Chur und Segl-Maria eine signifikante Temperaturzunahme zeigen, ist am Messstandort Davos im Herbst und im Winter in den letzten 50 Jahren keine signifikante Temperaturänderung festzustellen.

Tabelle 3.1: Saisonale Temperaturtrends in Grad Celsius pro 10 Jahre in der Periode 1900 bis 2011. 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	+ 0.16°C (stark signifikant)	+ 0.12°C (stark signifikant)	+ 0.11°C (stark signifikant)	+ 0.09°C (stark signifikant)
Davos	+ 0.14°C (stark signifikant)	+ 0.17°C (stark signifikant)	+ 0.16°C (stark signifikant)	+ 0.17°C (stark signifikant)
Chur	+ 0.14°C (stark signifikant)	+ 0.16°C (stark signifikant)	+ 0.17°C (stark signifikant)	+ 0.16°C (stark signifikant)

Tabelle 3.2 Saisonale Temperaturtrends in Grad Celsius pro 10 Jahre in der Periode 1961 bis 2011. 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	+ 0.50°C (stark signifikant)	+ 0.44°C (stark signifikant)	+ 0.17°C (signifikant)	+ 0.24°C (signifikant)
Davos	+ 0.48°C (stark signifikant)	+ 0.48°C (stark signifikant)	+ 0.18°C (nicht signifikant)	+ 0.22°C (nicht signifikant)
Chur	+ 0.53°C (stark signifikant)	+ 0.53°C (stark signifikant)	+ 0.29°C (signifikant)	+ 0.36°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.

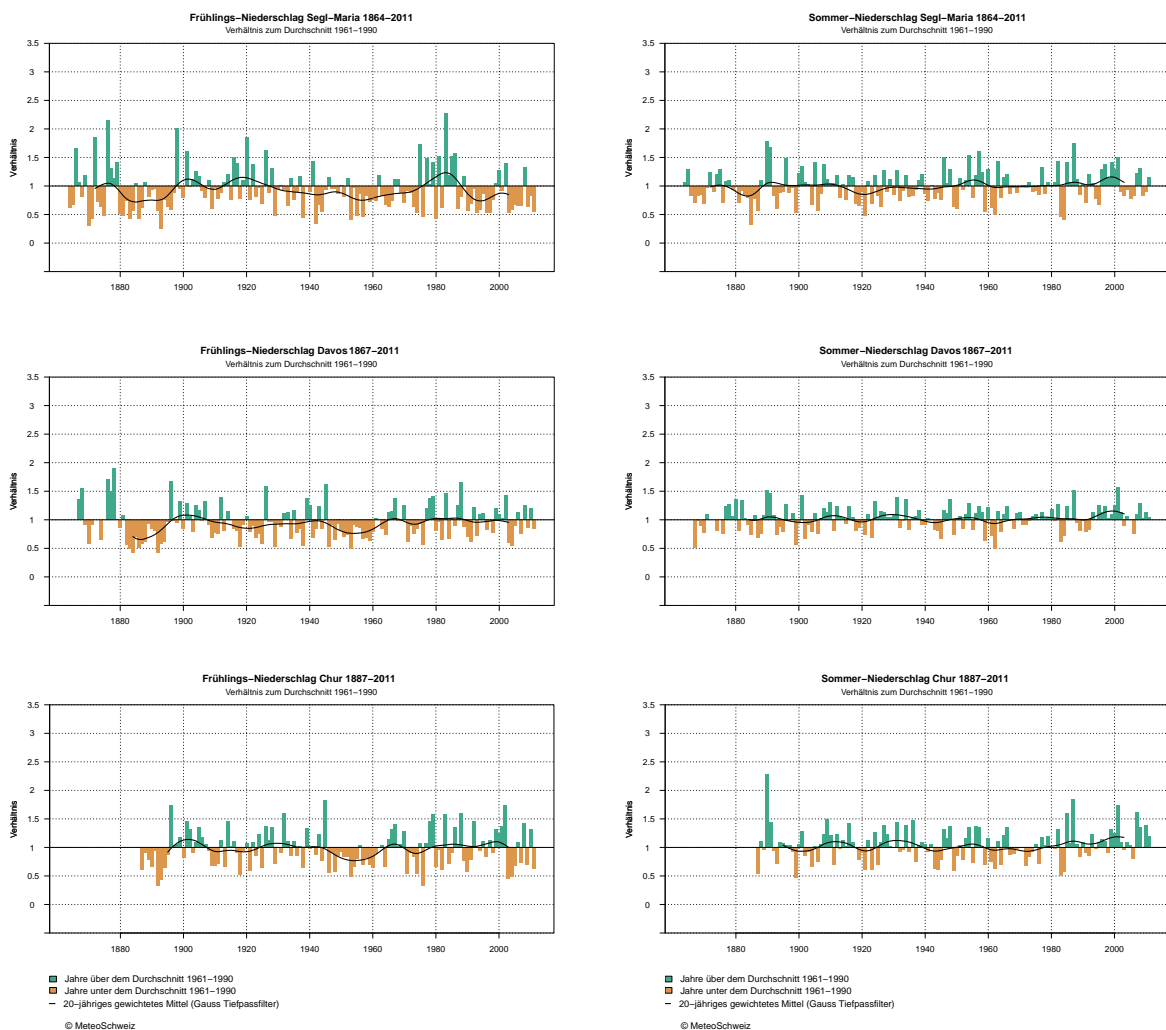


Abbildung 3.3: Langjähriger Verlauf der Frühlingsniederschläge (März bis Mai, links) und Sommerniederschläge (Juni bis August, rechts) an den Messstationen Segl-Maria, Davos und Chur. Dargestellt in grün und orange ist die jährliche Abweichung von der Norm 1961-1990. Die schwarze Kurve zeigt den 20-jährigen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

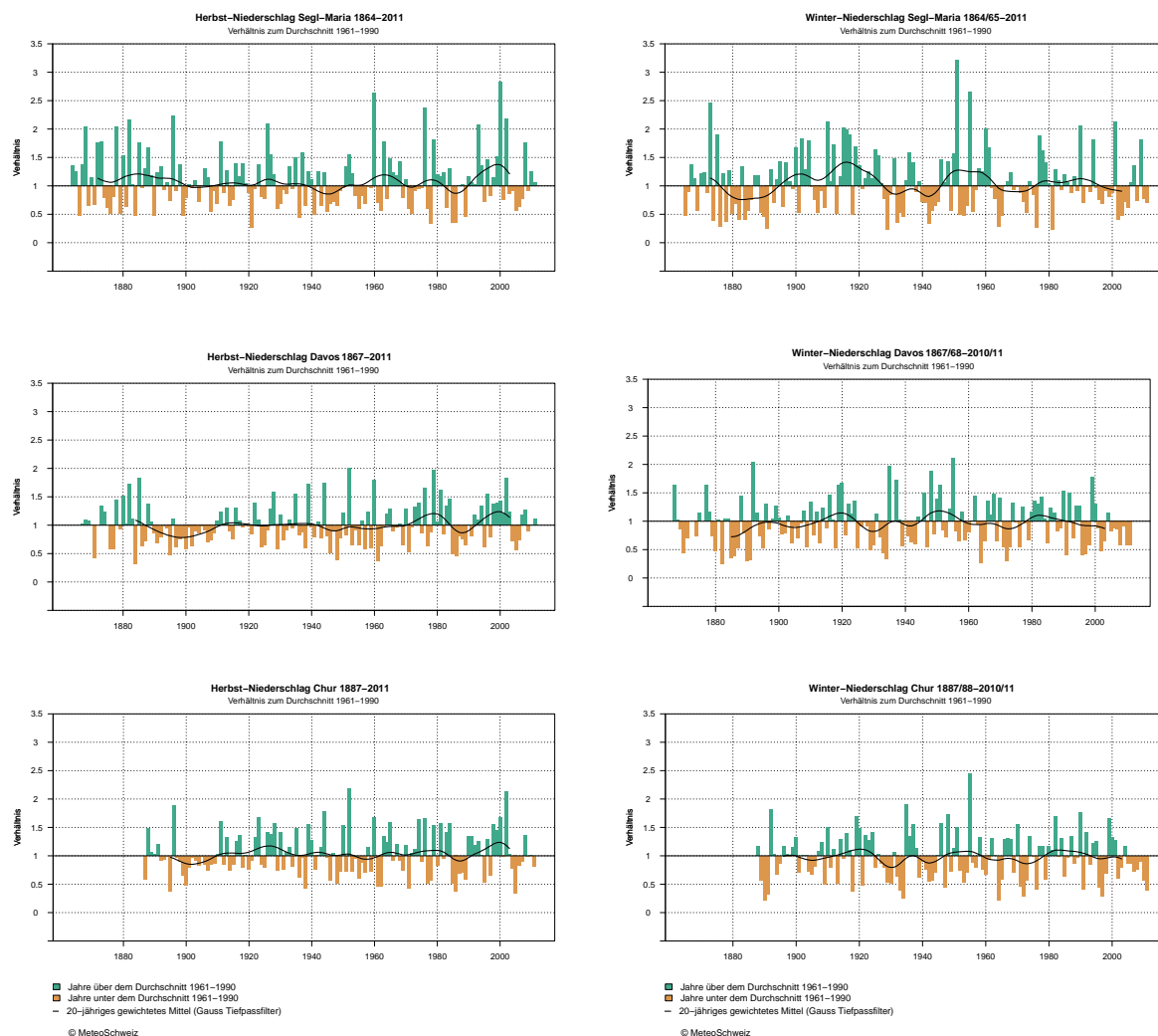


Abbildung 3.4: Langjähriger Verlauf der Herbstniederschläge (September bis November, links) und Winterniederschläge (Dezember bis Februar, rechts) an den Messstationen Segl-Maria, Davos und Chur. Dargestellt in grün und orange ist die jährliche Abweichung von der Norm 1961-1990. Die schwarze Kurve zeigt den 20-jährigen Gaussfilter. Die Herbst-Normniederschlagssumme 1961-1990 beträgt für Segl-Maria 260 mm, für Davos 214 mm und für Chur 193 mm. Die Winter-Normniederschlagssumme 1961-1990 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 1900-2011 und 1961-2011 (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 (Schmidli et al. 2002). Dies wird durch die Berechnung der linearen Trends bestätigt. Ausser der Station Segl-Maria im Frühling für die Periode 1900-2011, 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.

Tabella 3.3: Saisonale Niederschlagstrends in Prozent pro 10 Jahre in der Periode 1900 bis 2011. 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	- 2.4% (signifikant)	+ 0.7% (nicht signifikant)	+ 0.6% (nicht signifikant)	- 2.5% (nicht signifikant)
Davos	+ 0.4% (nicht signifikant)	+ 0.5% (nicht signifikant)	+ 1.4% (nicht signifikant)	- 0.7% (nicht signifikant)
Chur	- 0.3% (nicht signifikant)	+ 0.9% (nicht signifikant)	+ 0.4% (nicht signifikant)	- 0.6% (nicht signifikant)

Tabella 3.4 Saisonale Niederschlagstrends in Prozent pro 10 Jahre in der Periode 1961 bis 2011. 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	- 3.4% (nicht signifikant)	+ 3.0% (nicht signifikant)	+ 2.5% (nicht signifikant)	- 2.6% (nicht signifikant)
Davos	- 0.6% (nicht signifikant)	+ 3.0% (nicht signifikant)	+ 3.9% (nicht signifikant)	- 3.8% (nicht signifikant)
Chur	+ 0.3% (nicht signifikant)	+ 6.5% (stark signifikant)	+ 1.2% (nicht signifikant)	- 3.3% (nicht signifikant)

3.4 Schnee

3.4.1 Tage mit Neuschnee ≥ 1 cm

Abbildung 3.5 zeigt die Entwicklung der Anzahl Tage mit Neuschnee ≥ 1 cm während den letzten 80 (Davos) – 147 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 (20-jähriger Gaussfilter) 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.

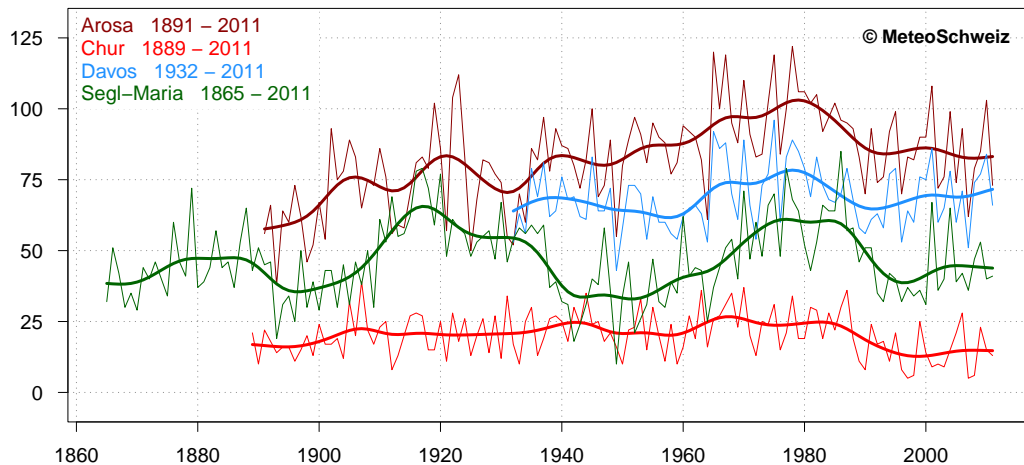


Abbildung 3.5: Zeitlicher Verlauf der Tage mit Neuschnee ≥ 1 cm des hydrologischen Jahres für die Stationen Arosa, Chur, Davos und Segl-Maria. Dargestellt sind die aus den Tagesmesswerten abgeleiteten Tage mit Neuschnee ≥ 1 cm pro Jahr sowie die mit einem 20-jährigen Gaussfilter geglättete Verlaufskurve.

3.4.2 Maximaler Tagesneuschnee

Der zeitliche Verlauf des maximalen Tagesneuschnees des hydrologischen Jahres ist in Abbildung 3.6 gezeigt. Die dünn gezeichneten Kurven zeigen den aus den Tagesmesswerten abgeleiteten maximalen Neuschnee des hydrologischen Jahres. Die dickeren Kurven zeigen die geglättete Entwicklung (20-jähriger Gaussfilter) 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 keine längere Phasen mit eindeutig höheren bzw. tieferen Maxima. Man kann auch keine eindeutigen langfristigen Trends erkennen.

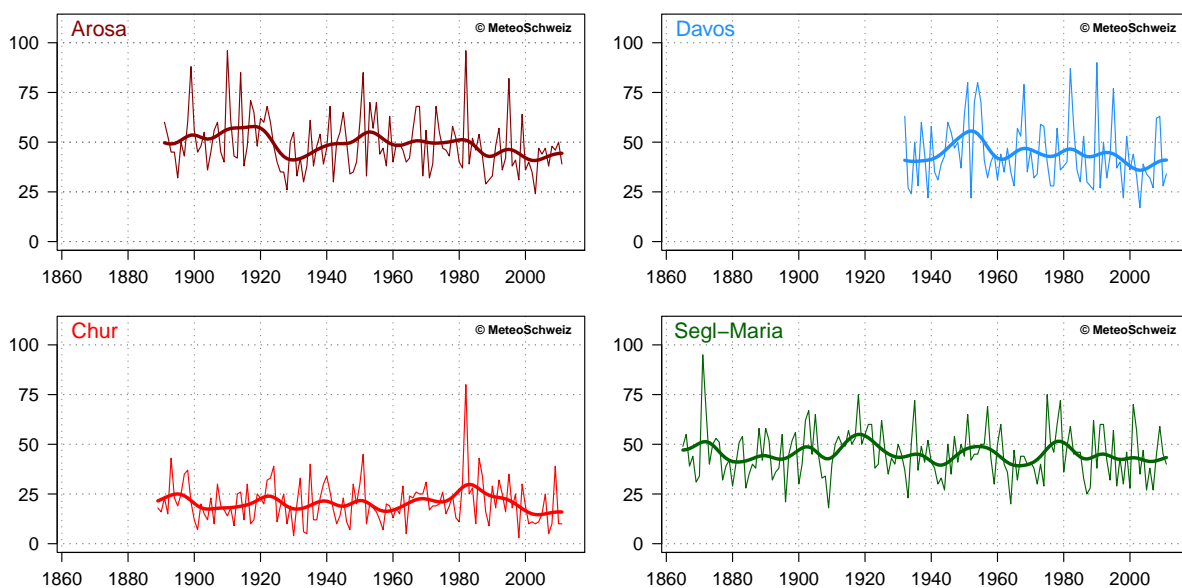


Abbildung 3.6: Zeitliche Verläufe des maximalen Neuschnees pro Tag des hydrologischen Jahres für die Stationen Arosa, Chur, Davos und Segl-Maria. Dargestellt ist der aus den Tagesmesswerten abgeleiteten maximalen Neuschnee pro Jahr sowie die mit einem 20-jährigen Gaussfilter geglättete Verlaufskurve.

3.4.3 Neuschneesumme

Abbildung 3.7 zeigt die Entwicklung der Neuschneesummen während den letzten 80 (Davos) – 147 Jahren (Segl-Maria). Die dünn gezeichneten Kurven zeigen die aus den Tagesmesswerten abgeleiteten Neuschneesummen des hydrologischen Jahres. Die dickeren Kurven zeigen die geglättete Entwicklung (20-jähriger Gausfilter). 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. Mit Ausnahme von Segl-Maria lassen sich bis heute deutliche Abnahmen seit den frühen 1980er Jahren zu erkennen.

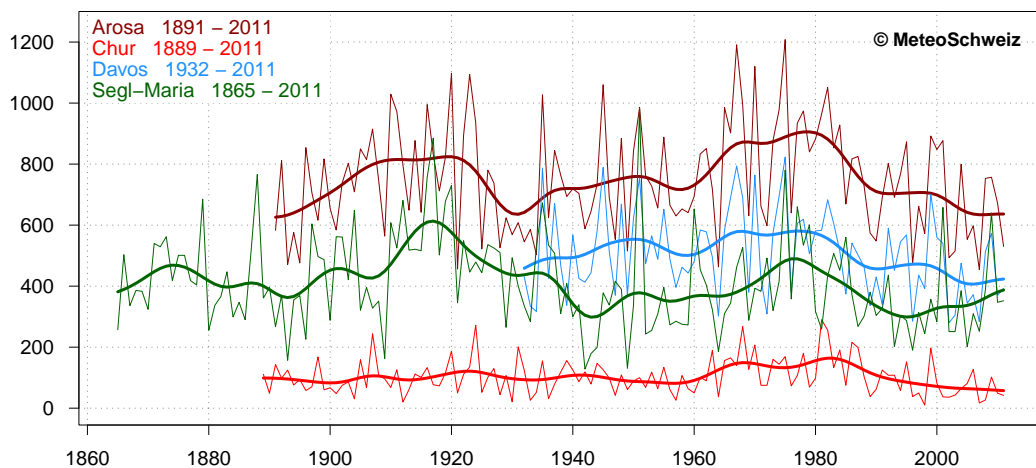


Abbildung 3.7: Zeitliche Verläufe der Neuschneesummen in cm des hydrologischen Jahres für die Stationen Arosa, Chur, Davos und Segl-Maria. Dargestellt sind die Werte der einzelnen Jahre sowie die mit einem 20-jährigen Gausfilter geglättete Verlaufskurve.

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 starken Trends in den vor allem höhenabhängigen Temperaturgrössen (Frosttage, Sommertage, Nullgradgrenze) gibt es einzelne Änderungen in Niederschlagsgrössen (Starkniederschläge, Trockenperioden). 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.**
- **Signifikanter Rückgang der Tage mit Gesamtschneehöhe (≥ 5 cm / ≥ 30 cm) in allen Höhenlagen.**
- **Signifikante Abnahme der Neuschneesummen in den meisten Regionen unterhalb 2000 m ü. M..**
- **Nur teilweise signifikante Abnahme der maximalen Gesamtschneehöhe sowie der Tage mit Neuschnee**

4.1 Einleitung

Die historische Entwicklung ausgewählter Klimaindikatoren gibt Hinweise über die möglichen Auswirkungen der Klimaänderung (North et al. 2007). 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 gut 50 Jahre (1961-2011) besprochen. Die verwendeten Stationen sind in den nachfolgenden Grafiken nach Region wie folgt dargestellt: Nord- und Mittelbünden (links, Stationen Chur, Davos, Disentis), Engadin (Mitte, Stationen Samedan und Scuol) sowie Bündner Südtäler (rechts, Stationen Robbia und Grono).

Tabelle 4.1 zeigt die für diesen Bericht ausgewählten Klimaindikatoren basierend auf den Parametern Temperatur und Niederschlag sowie deren Definition. Es wurden drei Temperaturgrössen sowie drei Niederschlagsgrössen, wovon zwei im Zusammenhang mit Starkniederschlag stehen, ausgewählt. Fünf der sechs Indikatoren sind Klimaindikatoren definiert nach WMO Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI). Der Nullgradgrenzeindikator ist von MeteoSchweiz definiert.

Eine weitere wichtige Klimagrösse für den Kanton Graubünden ist Schnee und wird deshalb ausführlich behandelt. Die verschiedenen Indikatoren in Tabelle 4.2 basieren auf Definitionen von MeteoSchweiz. Schnee und seine Ausprägung sind sowohl aus touristischer (Müller und Weber 2007) als auch aus klimatologischer Sicht von Bedeutung (North et al. 2007). 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 „natürlich“ schneesicher, wenn ohne künstliche Beschneigung 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 (Abegg 1996). Mehrere Studien zu diesem Thema zeigen übereinstimmend eine Abnahme der Schneemengen und der Schneehäufigkeiten gegen Ende des 20. Jahrhunderts (Beniston 1997, Scherrer et al. 2004, Latenser und Schneebeli 2003, Marty 2008, Wüthrich 2008).

Die Entwicklung der Klimagrösse Schnee während den letzten gut 50 Jahren (1961–2011) im Kanton Graubünden wird anhand von sechs Schneemessreihen besprochen. Es sind dies die Stationen Arosa, Chur,

Davos, Disentis/Sedrun, Segl-Maria und Weissfluhjoch. Die Stationsauswahl für die Auswertungen erfolgte hauptsächlich aufgrund der Verfügbarkeit von Schneedaten. Kriterium war eine Datenverfügbarkeit von mindestens 50 Jahren (1961-2011) und dass Neuschnee und Gesamtschneemessungen vorliegen. Die Standorte Disentis/Sedrun und Weissfluhjoch wurden berücksichtigt, obwohl sie nicht über vollständige Daten des gesamten Zeitraumes verfügen. Auf dem Weissfluhjoch wurde seit 2008 im Sommer nicht mehr durchgehend gemessen was zu einer nicht klimatologischen Änderung in der Reihe führen kann. Der Schneemessstandort Disentis/Sedrun wurde im Jahr 2005 von Disentis nach Sedrun verschoben. Die Jahre am Ende der Messreihe sind daher entsprechend vorsichtig zu interpretieren. Die beiden Standorte sind jedoch wichtig, ergänzen sie doch die fehlende Region Surselva (Disentis/Sedrun) bzw. Lagen in grossen Höhen (Weissfluhjoch, 2690 m ü.M.).

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

Die Indikatoren der Tabelle 4.1, ausgenommen der Indikator Nullgradgrenze, werden nach den Regeln und der offiziellen Software des WMO Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) berechnet. Eingangsgrössen 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.

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 der Messgrössen Temperatur und Niederschlag unterteilt nach Bezeichnung, Typ nach Parametergruppe und Definition nach WMO/ETCCDI. Der Indikator Nullgradgrenze basiert auf einer Definition von MeteoSchweiz.

#	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	Nullgradgrenze	Temperatur	Saisonale Nullgradgrenze [m ü.M.] bestimmt mittels linearer Regression von einer Anzahl zur Verfügung stehender Stationen
4	Tage mit starkem Niederschlag	Niederschlag	Tage des Kalenderjahres mit Tagesniederschlag $P \geq 20 \text{ mm}$
5	Niederschlag der sehr nassen Tage	Niederschlag	Niederschlagssumme der Tage im Kalenderjahr wo der Tagesniederschlag $P > 95\text{tes}$ Perzentil der Tagesniederschläge (Referenz: 1961-1990)
6	Max. Anzahl zusammenhängender Trockentage	Niederschlag	Maximale Anzahl zusammenhängender Tage des Kalenderjahres für welche Tagesniederschlag $P < 1 \text{ mm}$

Indikatoren Schnee

Die resultierenden Indikatoren werden alle auf Jahresstufe ausgegeben, d.h. z.B. Anzahl Tage mit Neuschnee pro Jahr. Zu beachten ist, dass sich alle Jahreswerte der Schnee - Indikatoren auf das hydrologische Jahre (1. Oktober bis 30. September) beziehen.

Tabelle 4.2: Liste der verwendeten Indikatoren der Messgrössen Neu- und Gesamtschnee unterteilt nach Bezeichnung, Typ und Definition. Für die Schneeparameter wird jeweils das hydrologische Jahr (1. Oktober – 30. September) verwendet.

#	Bezeichnung	Typ	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	Maximale Gesamtschneehöhe	Gesamtschnee	Maximale Schneehöhe des hydrologischen Jahres
10	Neuschneesummen	Neuschnee	Jährliche Neuschneesumme an Tagen mit Tagesneuschnee ≥ 1 cm
11	Maximaler Neuschnee	Neuschnee	Maximaler Neuschnee pro Tag
12	Tage mit Neuschnee	Neuschnee	Anzahl Tage pro Jahr mit Neuschnee ≥ 1 cm

4.2 Klimaindikatoren der Messgrösse Temperatur

4.2.1 Frosttage

Allgemeines

Abbildung 4.1 zeigt die Entwicklung der Frosttage für Stationen Nord- und Mittelbündens, des Engadins sowie der Bündner Südtäler über die Periode von 1961-2011. Die Anzahl Frosttage ist hauptsächlich von der Höhenlage und der lokalen klimatologischen Gegebenheiten einer Station, wie z.B. eine Tallage mit Kaltluftsee, abhängig. Die regionale Lage spielt eine untergeordnete Rolle. So weist z.B. das im Oberengadiner Kaltluftsee gelegene Samedan (1709 m ü.M.) im langjährigen Mittel 80 Frosttage mehr auf als die Station Arosa (1840 m ü.M.) an Hanglage. Die Spanne der jährlichen Anzahl Frosttage in dauerhaft bewohnten Gebieten des Kantons reicht im Mittel von weniger als 40 (Grono) bis über 250 Tage (Samedan).

Trends

Alle Stationen zeigen einen abnehmenden Trend in der Anzahl der Frosttage. Die Abnahme reicht von -3.9 (Grono) bis -10 Tage pro 10 Jahre (Samedan) und ist eindeutig auf die Zunahme der Temperaturen aufgrund der allgemeinen Klimaerwärmung zurückzuführen. Obwohl die stärkste Abnahme an der höchst und die niedrigste an der tiefst gelegenen Station auftritt, sind die Abnahmen nicht generell in der Höhe grösser als in tiefen Lagen. Insgesamt sind die Trends über alle Höhenstufen betrachtet deutlich ausgeprägt. Das zeigen auch die statistischen Kennzahlen, die besagen, dass mit Ausnahme der Station Grono alle Trends stark signifikant sind. Zu beachten ist hierbei, dass für Grono nur Daten ab 1971 vorhanden sind und somit der Trend nicht direkt mit Angaben zu den anderen Stationen verglichen werden kann. Die relativen Zahlen (Vergleich Ende/Anfang der Beobachtungsperiode) zeigen, dass die Frosttage von 1961 bis 2011 um zwischen 15.1% (Davos) und 44.6% (Chur) zurückgegangen sind. Hier ist der Rückgang an tiefen Stationen generell etwas grösser als an hochgelegenen Stationen.

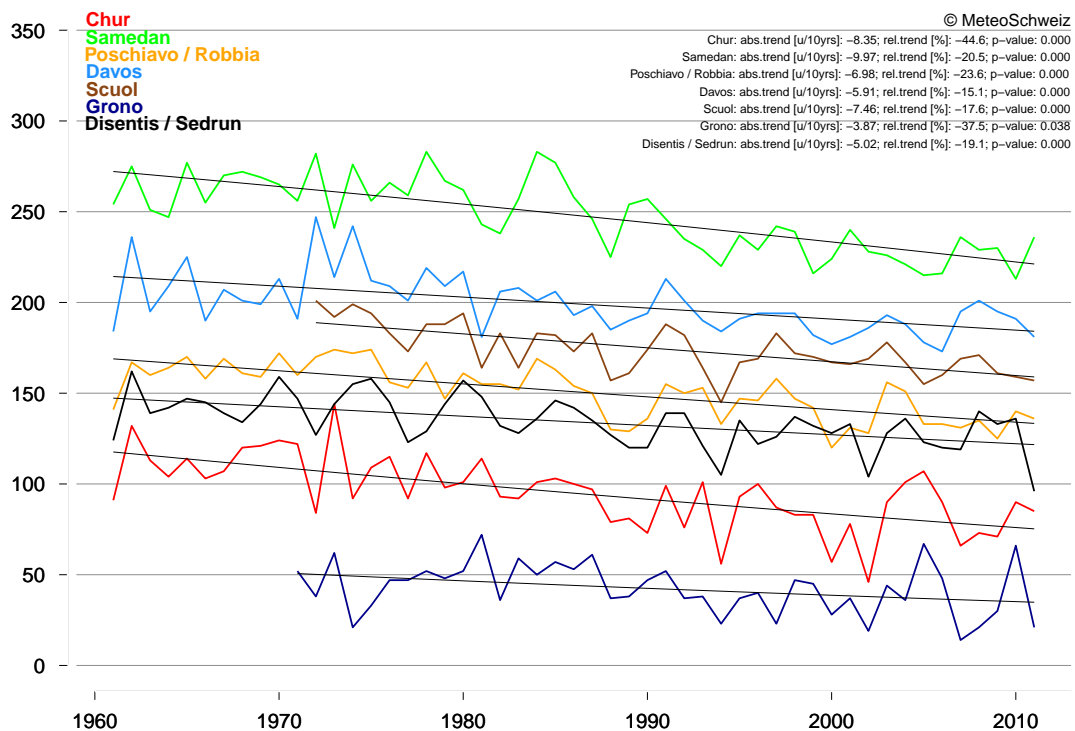


Abbildung 4.1: Zeitlicher Verlauf der Frosttage (Tage des Kalenderjahres mit minimaler Temperatur $< 0^{\circ}\text{C}$) für die Stationen Chur, Davos, Disentis, Samedan, Scuol, Robbia und Grono. Logistische Trends in Tage / 10 Jahre sowie Signifikanzwerte und relative Änderung über die Periode sind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

4.2.2 Sommertage

Allgemeines

Abbildung 4.2 zeigt den zeitlichen Verlauf der Sommertage für Stationen Nord- und Mittelbündens, des Engadins sowie der Bündner Südtäler über die Periode 1961-2011. Wie die Anzahl Frosttage ist auch die Anzahl Sommertage hauptsächlich von der Höhenlage der Station bestimmt. In dauerhaft den bewohnten Gebieten des Kantons reicht die Spanne von einige wenige (z.B. Davos) bis fast 100 Sommertage / Jahr (z.B. Grono).

Trends

Alle Stationen zeigen eine deutliche Zunahme in der Anzahl der Sommertage pro Jahr. Ausser für die Station Samedan sind die Zunahmen signifikant bis stark signifikant. Die Zunahmen in absoluten Zahlen pro 10 Jahre sind besonders gross für tief- und mittelhoch gelegene Stationen (Grono: 11.7, Chur: 4.8, Poschiavo/Robbia: 4.6, Scuol: 4.3, Disentis: 3.4 Tage). Für die zwei höher gelegenen Stationen Davos und Samedan sind die absoluten Trends kleiner (1.3 resp. 0.4 Tage / 10 Jahre) und erst in jüngerer Zeit werden vermehrt einige Sommertage registriert. Die relativen Zunahmen (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 mit zwischen 20 und 50 Tagen pro Jahr viele Sommertage aufwiesen (Scuol, Chur und Grono), beträgt die relative Zunahme zwischen 55 und 65%. Für die Stationen mit zu Beginn der Beobachtungsperiode zwischen 5 und 20 Sommertagen (Disentis und Poschiavo/Robbia) ist die relative Zunahme mit 108 bzw. 165% deutlich grösser. Die grössten relativen Zunahmen finden sich für die Stationen wo zu Beginn der untersuchten Periode kaum Sommertage registriert wurden (Samedan und Davos mit +135 resp. +263%). Der Einfluss des Jahrhundertssommers 2003 und des Rekordjuli 2006 mit deutlich mehr Sommertagen ist an diesen Standorten besonders gross und bewirkt die grossen relativen Zunahmen.

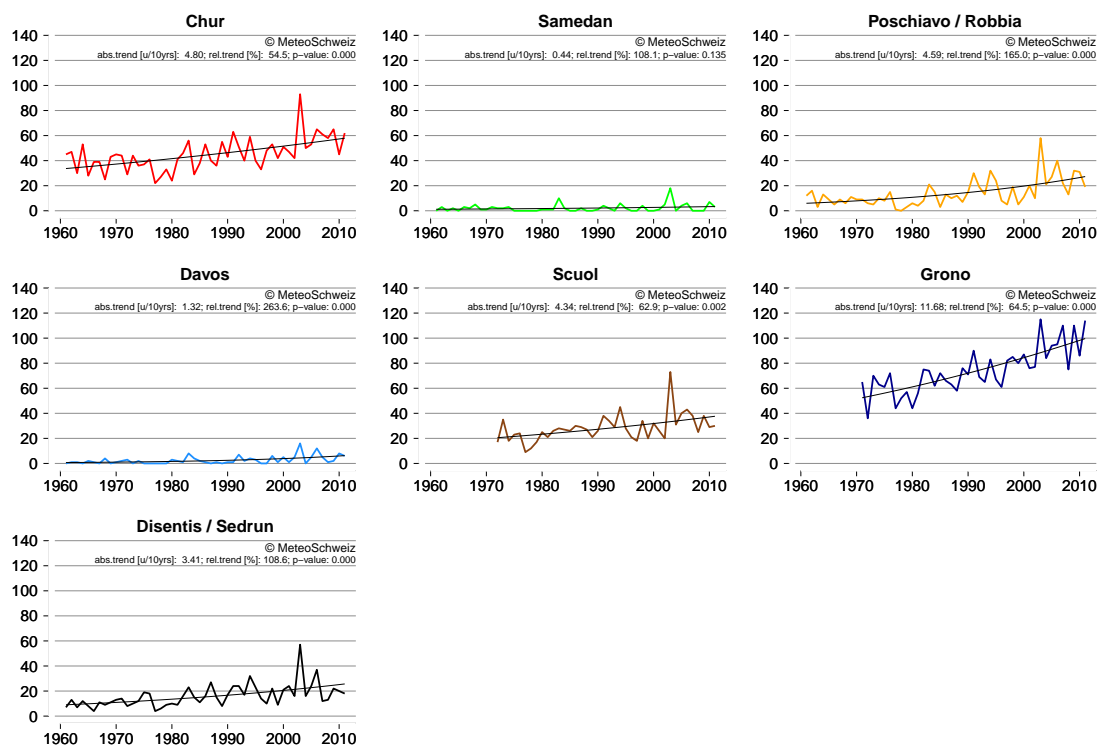


Abbildung 4.2: Zeitlicher Verlauf der Sommertage (=Anzahl Tage des Kalenderjahres mit maximaler Temperatur $\geq 25^{\circ}\text{C}$) für Stationen des Nord- und Mittelbünden (links, Stationen Chur, Davos, Disentis), des Engadins (Mitte, Stationen Samedan und Scuol) sowie den Bündner Südtälern (rechts,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

4.2.3 Nullgradgrenze

Abbildung 4.3 zeigt den Verlauf der Nullgradgrenze berechnet aus Daten von Bodenstationen nach der Methode beschrieben in Kapitel 1.3. Zu beachten ist, dass die Nullgradgrenze je nach Saison verschieden gut bestimmt werden kann. Als zentral für eine gute Bestimmung erwies sich, dass Stationsdaten aller Höhenstufen in die Berechnung einfließen. Weiter nimmt die Unsicherheit mit abnehmender Anzahl Stationen stark zu. Zudem führen Nichtlinearitäten in den Temperaturprofilen bedingt durch Inversionslagen und Frontdurchgänge zu weiteren Ungenauigkeiten. Es zeigt sich, dass die Bestimmung im Winter, wo Nichtlinearitäten eine grosse Rolle spielen, ziemlich ungenau ist. Im Frühling und Sommer hingegen ist die Bestimmung relativ genau möglich. Der Herbst liegt zwischen den anderen Jahreszeiten.

Die klimatologische Nullgradgrenze über Graubünden liegt im Mittel 1961-2012 im Winter bei rund 750 m, im Frühling bei rund 2000 m, im Sommer bei etwa 3450 m und im Herbst bei ungefähr 2450 m ü.M. Diese Werte liegen sehr nah (± 50 m) an den Werten einer gesamtschweizerische Nullgradgrenze, wo eine deutlich grösseren Anzahl Bodenstationen als Input eingehen. Die Jahr-zu-Jahr Schwankungen (Variabilität) sind im Winter am grössten (Standardabweichung ~ 270 m) und im Sommer am kleinsten, wo die Schwankungen nur gut halb so gross sind wie diejenigen im Winter.

Die Nullgradgrenze steigt in allen Jahreszeiten in der Periode 1961-2012 deutlich an. Mit Ausnahme vom Herbst, wo der Anstieg nah an der Signifikanzgrenze liegt ($p=0.06$), sind die Anstiege hoch signifikant. Sie bewegen sich je nach Jahreszeit zwischen 32 und 76 m / 10 Jahre. Wie die Temperaturtrends ist der Anstieg der Nullgradgrenze im Herbst am niedrigsten (32 m / 10 Jahre) und im Frühling und Sommer mit jeweils rund 75 m / 10 Jahre am grössten. Der Winter zeigt einen Anstieg von rund 60 m / 10 Jahre. Allgemein entsprechen diese Werte einem Anstieg der Nullgradgrenze von rund 150-200 m / 1°C Erwärmung.

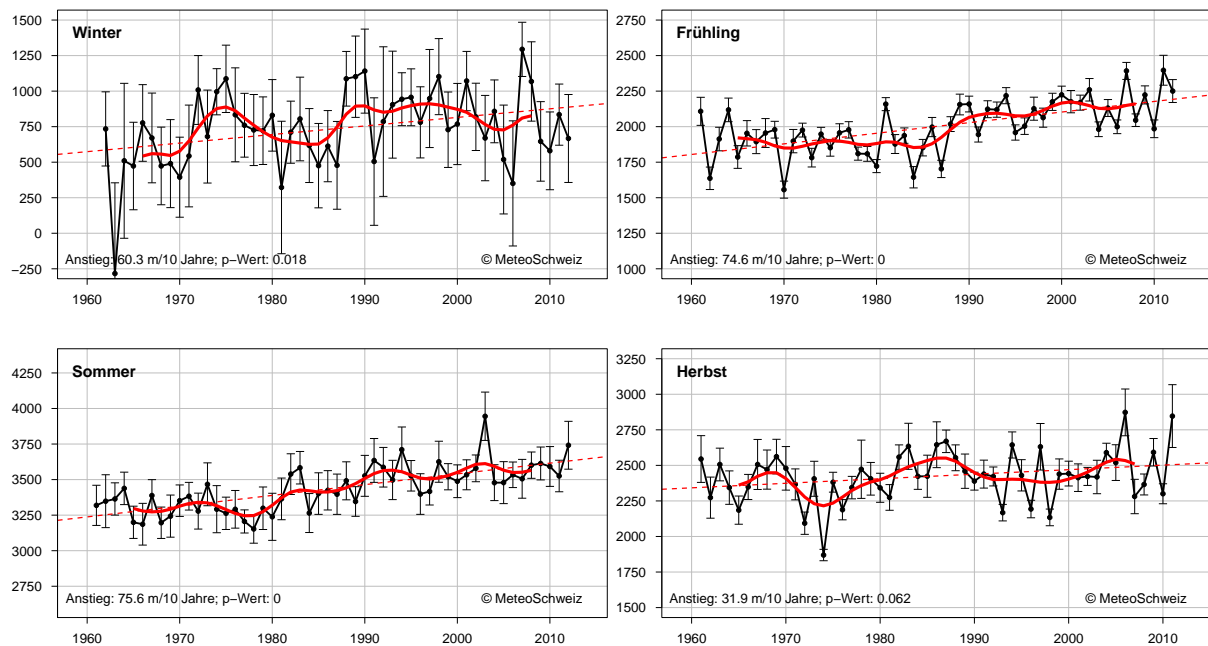


Abbildung 4.3: Verlauf der saisonalen Nullgradgrenze 1961-2011/12 (schwarze Linie in m ü.M.) bestimmt mittels Regression aus homogenisierten Temperaturdaten von 12 MeteoSchweiz Bodenstationen als Näherung für Graubünden. Verwendet wurden die Bündner Stationen Chur, Bad Ragaz, Davos, Weissfluhjoch, Disentis, Segl-Maria, Samedan, Scuol, Bernina Hospiz, Robbia, San Bernardino, sowie die hochgelegene Station Jungfrauojoch. Der lineare Trend als Linie (rot) sowie in Zahlen (m Anstieg pro 10 Jahre) und Signifikanz sind angegeben wie auch die Fehlerbalken der Bestimmung der Nullgradgrenze für jedes einzelne Jahr (vertikale Linien).

4.3 Klimaindikatoren der Messgrösse Niederschlag

4.3.1 Tage mit Niederschlag ≥ 20 mm: Starkniederschlag

Allgemeines

Abbildung 4.4 zeigt die Entwicklung der Tage mit mehr als 20 mm Niederschlag im Kalenderjahr für Stationen Nord- und Mittelbündens, des Engadins sowie der Bündner Südtäler über die Periode 1961-2011. Diese Grösse beschreibt einen Tag mit starkem Niederschlag, wobei starker Niederschlag nicht gleich „schadensbringender Niederschlag“ ist. Der Indikator Tage mit Niederschlag ≥ 20 mm ist vorwiegend von der räumlichen Lage (Region) und weniger von der Höhenlage der Station abhängig. Starke Niederschläge werden oft durch Staulagen (Nord oder Süd) verursacht. Das geschützte inneralpine Gebiet des Engadins ist im Schutze der umliegenden Berge weniger betroffen. Die Spanne der mittleren Anzahl Tage im Kalenderjahr reicht in den dauerhaft bewohnten Gebieten des Kantons von 6-8 Tage im Engadin bis etwa 15-25 Tage in den Bündner Südtälern. Die Gebiete in Nord- und Mittelbünden weisen ca. 9-13 Tage auf.

Trends

Über den ganzen Analysezeitraum 1961-2011 betrachtet weist nur die Station Chur eine knapp statistisch gesicherte Zunahme der Anzahl mit Niederschlag ≥ 20 mm auf. Bei den übrigen Stationen treten keine statistisch signifikanten Trends auf. Die geringfügigen Ab-/Zunahmen sind hier zufällig und lassen keine Aussage über langfristige Änderungen zu.

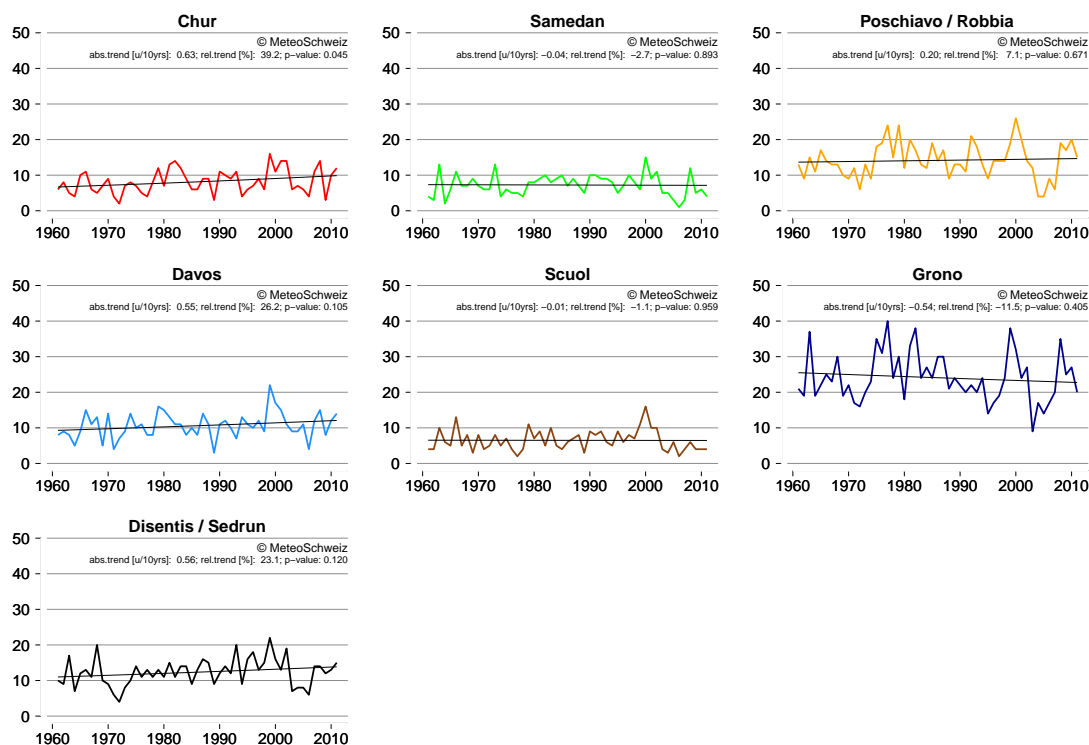


Abbildung 4.4: Zeitlicher Verlauf der Tage mit starkem Niederschlag (=Anzahl Tage des Kalenderjahres mit Tagesniederschlag ≥ 20 mm) für Stationen des Nord- und Mittelbündens (links, Stationen Chur, Davos, Disentis), des Engadins (Mitte, Stationen Samedan und Scuol) sowie den Bündner Südtälern (rechts, Stationen Robbia und Grono). Logistische Trends in Tage / 10 Jahre sowie Signifikanzwerte und relative Änderung über die Periode sind für jede Station angegeben.

4.3.2 Niederschlag der sehr nassen Tage: Starkniederschlag

Allgemeines

Abbildung 4.5 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) für Stationen Nord- und Mittelbündens, des Engadins sowie der Bündner Südtäler über die Periode 1961-2011. Diese Grösse ermöglicht eine Aussage, ob sich auch die Niederschlagsmenge der einzelnen Starkniederschläge über die Zeit verändert hat. Also ob sich die Veränderungen in der Anzahl (vergl. Abbildung 4.4) auch in der Summe widerspiegelt. Wie für die Anzahl Tage im Kalenderjahr mit Niederschlag ≥ 20 mm 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 im Mittel von 150-200 mm im Engadin bis 250-350 mm in den Bündner Südtälern. In Nord- und Mittelbündens betragen die Summen 200-300 mm.

Trends

Analog zu den Tagen mit starkem Niederschlag (≥ 20 mm) zeigt einzig die Station Chur eine signifikante Zunahme. Die Zunahme an der Station Davos ist knapp nicht signifikant. Für die anderen Stationen sind keine gesicherten Aussagen möglich. Aufgrund der starken Variabilität des Niederschlags sind Aussagen zum Trend starker Niederschläge wie auch nasser Tage grundsätzlich schwierig. Je nach verwendeter Trendperiode können deshalb Abweichungen des Trends entstehen (Schmidli und Frei 2005).

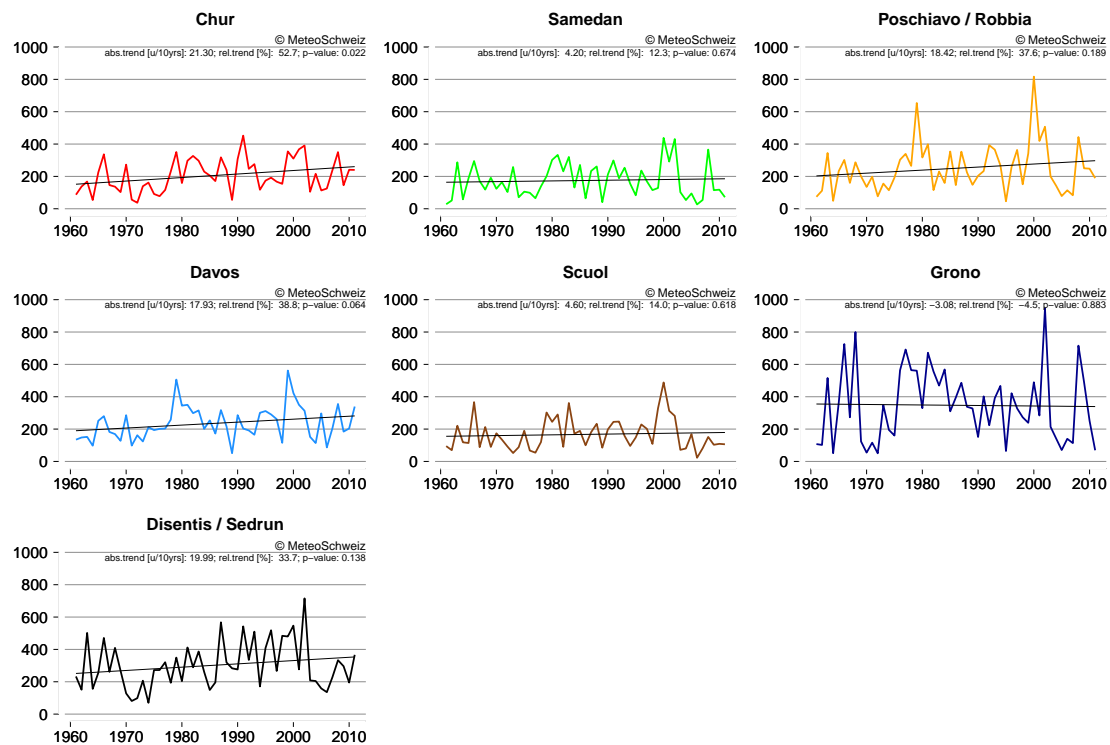


Abbildung 4.5: Zeitlicher Verlauf des Niederschlags der sehr nassen Tage (=Niederschlagssumme in mm der Tage im Kalenderjahr wo der Tagesniederschlag > 95stes Perzentil der Tagesniederschläge mit Referenz: 1961-1990) für Stationen des Nord- und Mittelbündens (links, Stationen Chur, Davos, Disentis), 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 Änderung über die Periode sind für jede Station angegeben.

4.3.3 Trockenperioden

Allgemeines

Die Entwicklung der maximalen Anzahl zusammenhängender Tage des Kalenderjahres für welche der Tagesniederschlag <1 mm (Trockentage) ist in Abbildung 4.6 für Stationen Nord- und Mittelbündens, des Engadins sowie der Bündner Südtäler für die Periode 1961-2011 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 Mittelbündens sowie knapp 30-40 im Engadin und den Bündner Südtälern. Betrachtet man die Trockenperioden getrennt nach Sommer- und Winterhalbjahr (Abbildung 4.7, Abbildung 4.8) so fällt auf, dass die Perioden im Winterhalbjahr insbesondere im Süden länger sind.

Trends

Über den Analysezeitraum 1961-2011 betrachtet treten keine statistisch signifikanten Trends in der Anzahl zusammenhängender Trockentage auf. Die geringfügigen Ab-/Zunahmen sind zufällig und lassen im Moment keine Aussage über langfristige Änderungen zu. Auch eine Unterscheidung in Sommer- und Winterhalbjahr führt zu demselben Resultat. Kleine Trends hin zu längeren Trockenperioden wurden in Studien für die gesamte Schweiz gefunden (Schmidli und Frei 2004), allerdings ohne Berücksichtigung der letzten 12 Jahre.

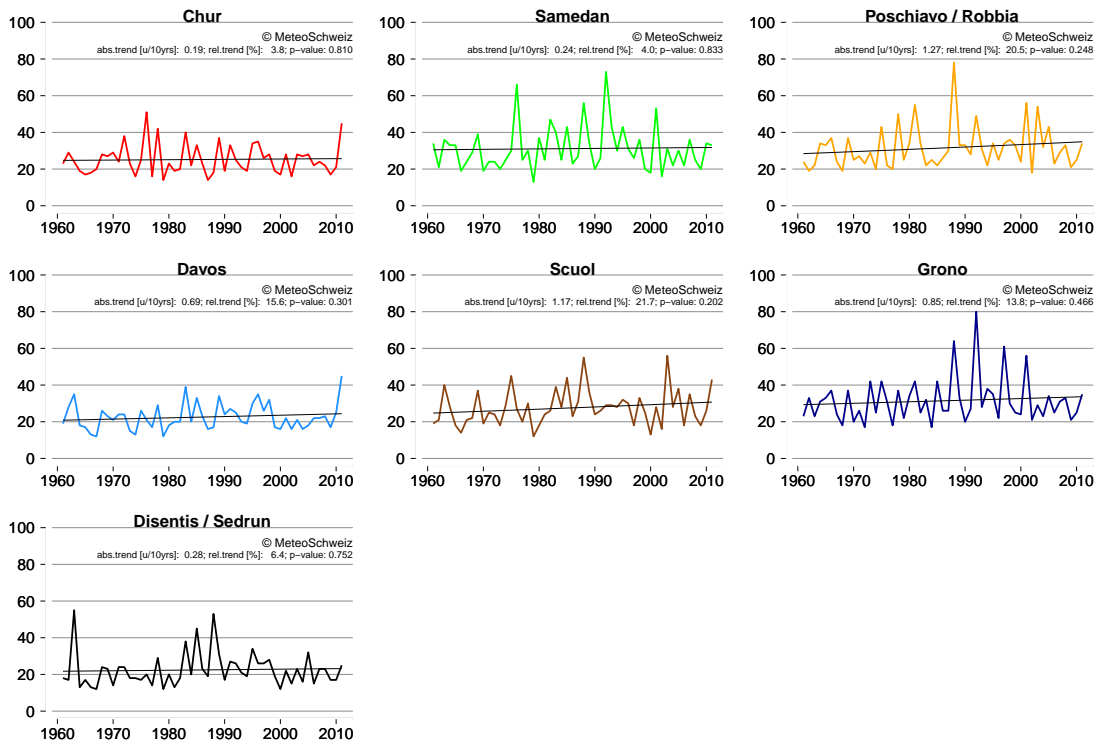


Abbildung 4.6: Zeitlicher Verlauf der maximalen Anzahl zusammenhängender Tage des Kalenderjahres für welche Tagesniederschlag <1 mm (Trockentage) für Stationen des Nord- und Mittlbünden (links, Stationen Chur, Davos, Disentis / Sedrun), des Engadins (Mitte, Stationen Samedan und Scuol) sowie der Bündner Südtäler (rechts, Stationen Robbia und Grono). Logistische Trends in Tage / 10 Jahre sowie Signifikanzwerte und relative Änderung über die Periode sind für jede Station angegeben.

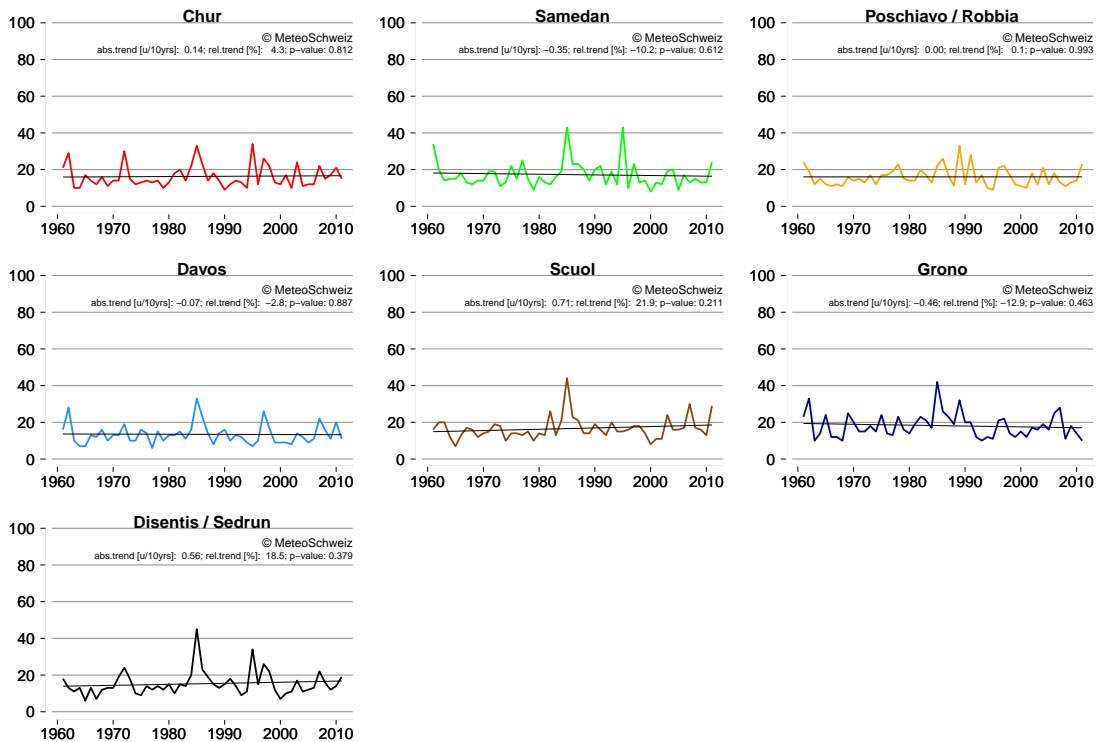


Abbildung 4.7: Wie Abbildung 4.6 aber für das Sommerhalbjahr.

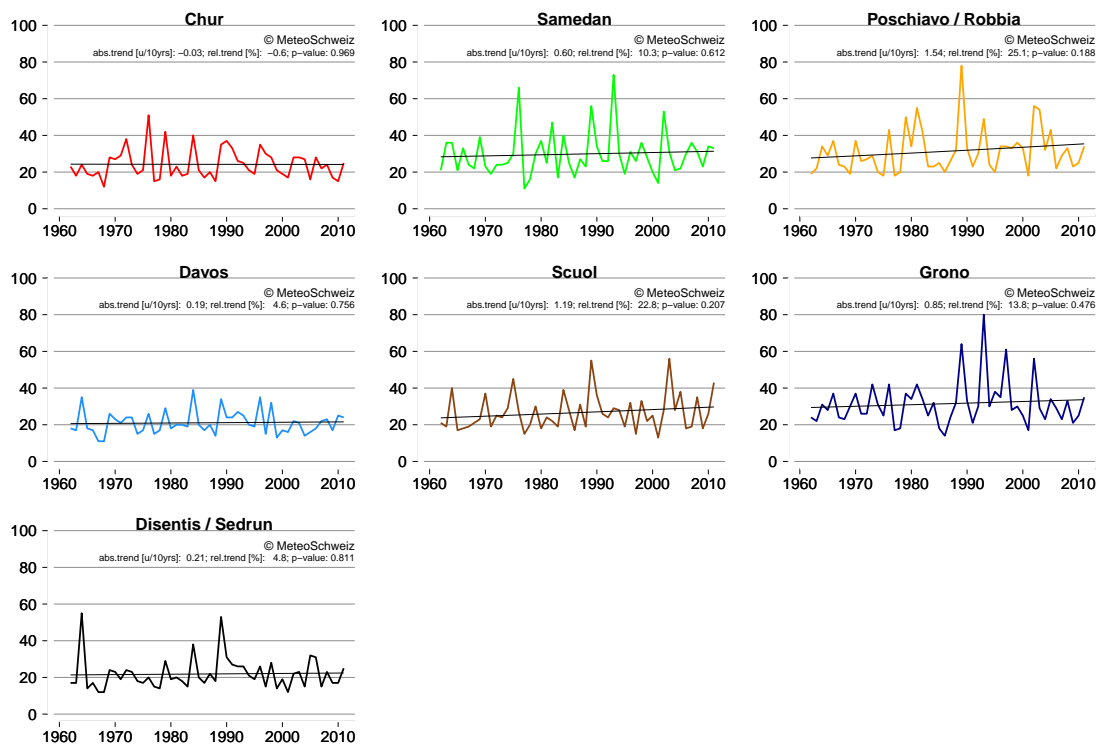


Abbildung 4.8: Wie Abbildung 4.6 aber für das Winterhalbjahr.

4.4 Klimaindikatoren der Messgrösse Schnee

4.4.1 Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm

Allgemeines

Abbildung 4.9 zeigt die Entwicklung der Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm für Stationen Nord- und Mittelbündens, des Engadins sowie der Bündner Südtäler für die Periode 1961-2011. Die Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm im hydrologischen Jahr (Oktober bis September) sind stark von der Höhenlage des Messstandortes abhängig. Auch die räumliche Lage und Exposition der Stationen spielt eine Rolle. Die räumliche Lage im Kanton hat einen Einfluss auf die Niederschlagsmenge (vergl. Abb. 3.4) während die Exposition massgebend die Schmelzprozesse beeinflusst. Stationsverschiebungen im Laufe der Analyseperiode 1961-2011 können aus diesen Gründen den klimatologischen Trend beeinflussen. Die Spanne der Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm reicht im Mittel pro Jahr von ca. 25 Tage in Chur bis über 250 Tage auf dem Weissfluhjoch.

Trends

Alle Stationen zeigen eine signifikante bis stark signifikante Abnahme der „Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm“. Auffällig ist die über alle Höhenlage in etwa ähnliche Abnahme. Die Abnahme der Anzahl Tage / 10 Jahre beträgt in Segl-Maria -10.1 Tage, in Chur -9.4 Tage, in Disentis/Sedrun -6.5 Tage, in Arosa -6.3 Tage, in Davos -5.6 Tage und auf dem Weissfluhjoch -5.3 Tage. Die grösste relative Abnahme weist Chur mit -118% auf, die geringste das Weissfluhjoch mit -10%. Relative Abnahmen sind aber immer in Relation zu den absoluten Werten zu betrachten. Aufgrund der tiefen absoluten Anzahl Tage in Chur / der hohen Anzahl auf dem Weissfluhjoch und der erwähnten gleichförmigen Abnahme über alle Höhenstufen ist folglich die relative Änderung in Chur am grössten.

Obwohl die Abnahme in den Anzahl Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm in allen Messreihen unbestritten ist, müssen bei der absoluten Betrachtung der Werte stationspezifische Gegebenheiten berücksichtigt werden. Die Station in Segl-Maria wurde 1998 in Richtung Südhang verlegt, was eine beschleunigte Ausaperung zur Folge haben könnte. Die Stationsverschiebung im Jahre 2005 von Disentis nach Sedrun, ca 300 m höher und schneereicher, hingegen dürfte einen etwas kleineren Trend bewirken als wenn die Station nach wie vor in Disentis stehen würde. Bei Weissfluhjoch gilt es zu beachten, dass ab 2008 im Sommerhalbjahr nicht mehr systematisch gemessen wird und somit die Werte zu tief ausfallen. Die Abnahme ist also kleiner und allenfalls nicht statistisch gesichert

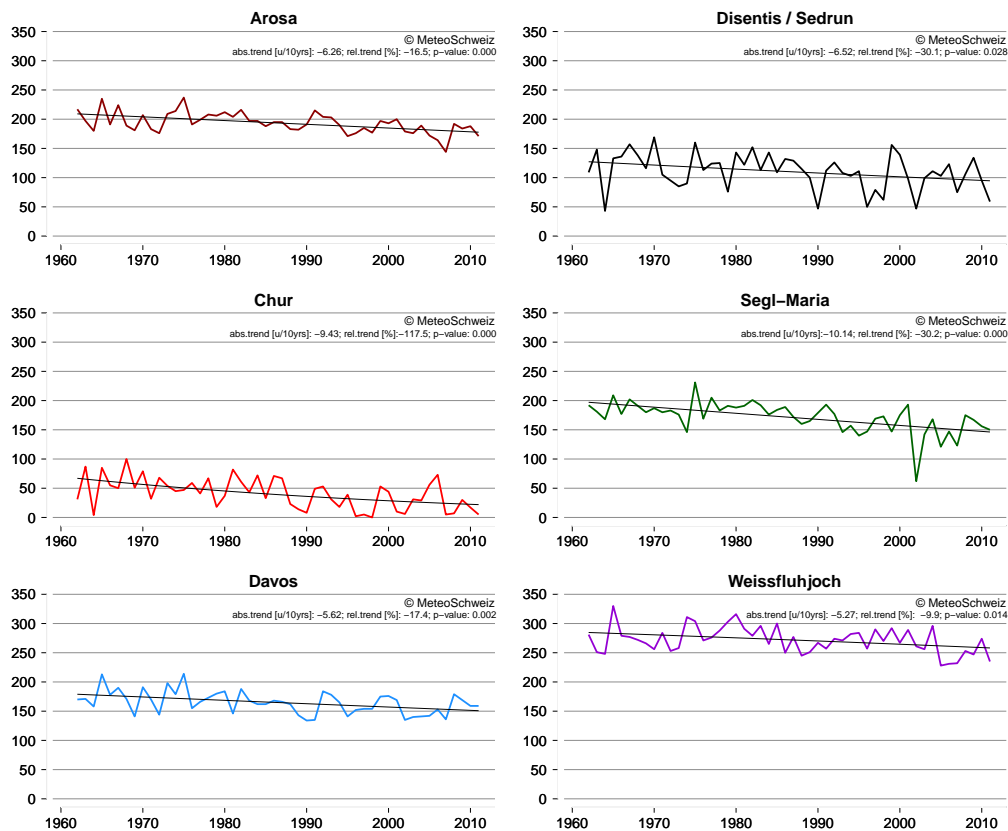


Abbildung 4.9: Zeitlicher Verlauf der jährlichen Anzahl Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm (Anzahl Tage des hydrologischen Jahres mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm) für die Stationen Arosa, Chur, Davos, Disentis/Sedrun, Segl-Maria und Weissfluhjoch. Logistische Trends in Tage / 10 Jahre sowie Signifikanzwerte und relative Änderung über die Periode sind in der Legende gegeben.

4.4.2 Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm

Allgemeines

Abbildung 4.10 zeigt die Entwicklung der Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm für Stationen Nord- und Mittelbündens, des Engadins sowie der Bündner Südtäler für die Periode 1961-2011. Der Parameter „Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm“ ist analog zu Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm abhängig von der Höhe, der räumlichen Lage und der Exposition des Messstandortes (vgl. 4.4.1). Die Spanne der Ereignisse „Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm“ reicht im Mittel von wenige Tage 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 sehr selten und die Jahre an denen mehr als 30 cm Schnee gar nicht auftrat 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, wobei die Werte ab 2008 aufgrund der fehlenden Sommermessungen vermutlich etwas zu tief ausfallen.

Trends

Alle Stationen, ausgenommen Disentis/Sedrun, zeigen eine signifikante bis stark signifikante Abnahme in der Anzahl Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm. Die Verschiebung des Standortes im Jahre 2005 von Disentis nach Sedrun, ca. 300 m höher und schneereicher, könnte eine mögliche Erklärung sein. Obwohl die Abnahme in den Anzahl Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm unbestritten ist, müssen bei der Betrachtung der einzelnen Werte stationenspezifische Gegebenheiten berücksichtigt werden (vergl. Kapitel 4.4.1). Analog zu den Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm zeigt Segl-Maria mit knapp -13 Tagen / 10 Jahre (-47.3% über die gesamte Periode) die grösste Abnahme der Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm. In Arosa, Davos und Disentis/Sedrun beträgt die statistisch stark signifikante Abnahme zwischen -7 und -8 Tage und auf dem Weissfluhjoch ca. -5 Tage / 10 Jahre. Im Allgemeinen nehmen die „Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm“ stärker ab, als die Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 5 cm. Einzelne 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 und von Bedeutung für den Wintertourismus (Abegg 1996).

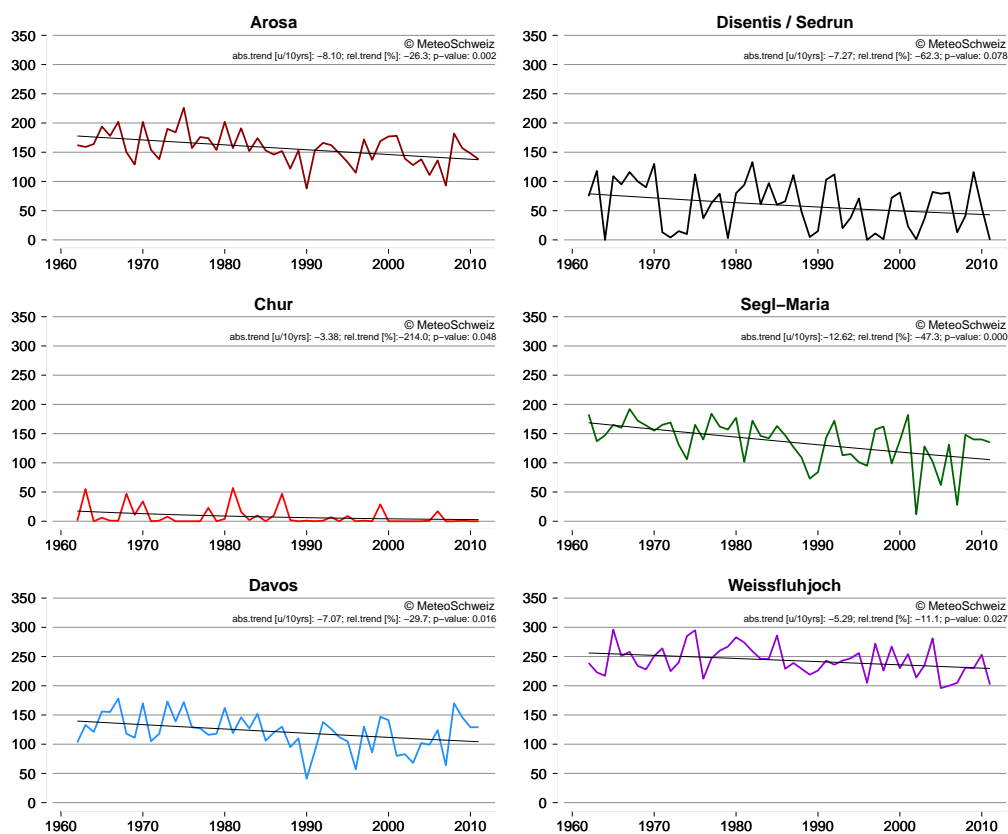


Abbildung 4.10: Zeitlicher Verlauf der jährlichen Anzahl der Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm (Anzahl Tage des hydrologischen Jahres mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm) für die Stationen Arosa, Chur, Davos, Disentis/Sedrun, Segl-Maria und Weissfluhjoch. Logistische Trends in Tage / 10 Jahre sowie Signifikanzwerte und relative Änderung über die Periode sind in der Legende gegeben.

4.4.3 Maximale Gesamtschneehöhe

Allgemeines

Die Entwicklung der maximalen Gesamtschneehöhe des hydrologischen Jahres ist in Abbildung 4.11 für Stationen Nord- und Mittelbündens, des Engadins sowie der Bündner Südtäler für die Periode 1961-2011 dargestellt. Analog zu den anderen Parametern der Gesamtschneehöhe ist diese Grösse von der Höhenlage und der räumlichen Lage abhängig. Die Variabilität der jährlichen maximalen Gesamtschneehöhen der untersuchten Bündner Schneereihen ist gross und 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 auf dem Weissfluhjoch (2690 m ü.M.) bislang noch keine signifikante Änderung der maximalen Gesamtschneehöhe in den letzten 50 Jahren aufgetreten ist, sind die Abnahmen mit ca. -12 cm / 10 Jahre in Segl-Maria und Arosa respektive 4-7 cm in Chur und Davos signifikant. Die Reihe von Disentis/Sedrun weist bislang keine Änderung betreffend den maximalen Schneehöhen auf, was aber wiederum auf die Verschiebung nach Sedrun im Jahre 2005 zurückzuführen sein könnte. Allgemein müssen bei der Betrachtung der einzelnen Werte stationsspezifische Gegebenheiten berücksichtigt werden (vergl. Betrachtung Trends Kapitel 4.4.1).

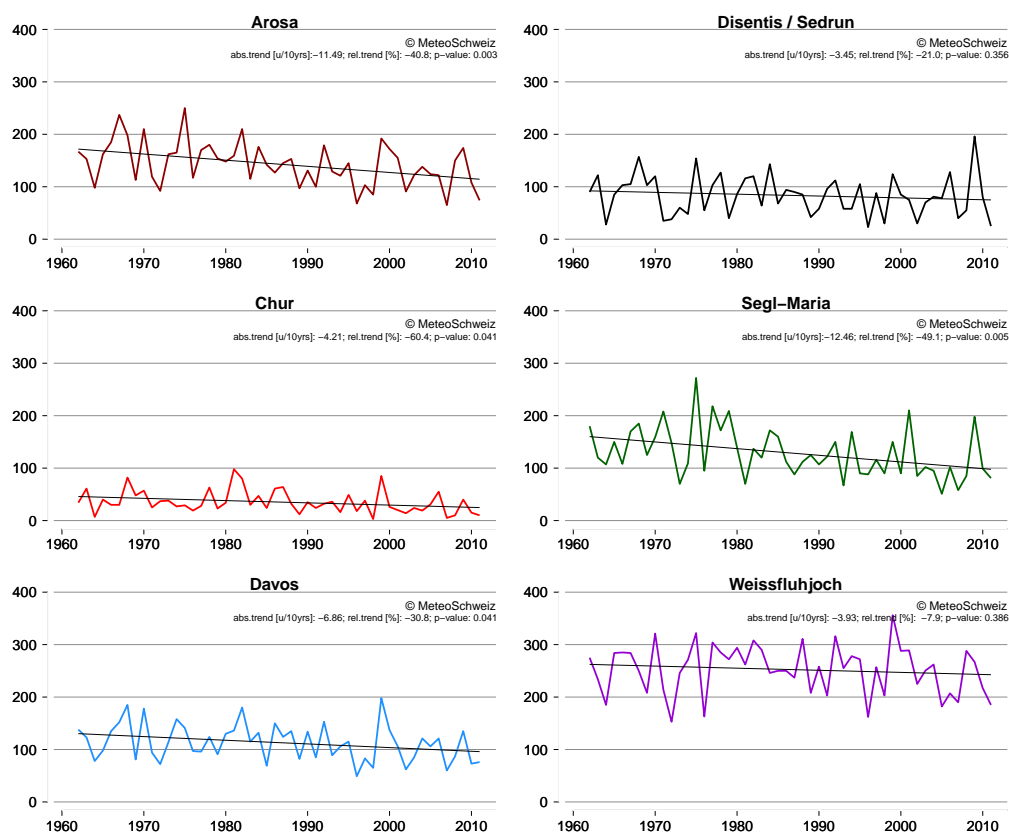


Abbildung 4.11: Zeitliche Verläufe der maximalen jährlichen Gesamtschneehöhe in cm (Maximale Gesamtschneehöhe des hydrologischen Jahres) für die Stationen Arosa, Chur, Davos, Disentis/Sedrun, Segl-Maria und Weissfluhjoch. Lineare Trends in Tage / 10 Jahre sowie Signifikanzwerte und relative Änderung über die Periode sind in den Legenden gegeben.

4.4.4 Neuschneesummen

Allgemeines

Die Entwicklung der jährlichen Neuschneesummen für Stationen Nord- und Mittelbündens, des Engadins sowie der Bündner Südtäler über die Periode 1961-2011 ist in Abbildung 4.12 dargestellt. Diese Grösse ist einerseits von der räumlichen Lage und andererseits von der Höhenlage abhängig. Die regionale Lage ist bedeutend für die Niederschlagsverteilung (vergl. Kap. 2) während die Höhe das Verhältnis von Schnee zu Regen bestimmt. Die Variabilität der jährlichen Neuschneesummen ist sehr gross und reicht von 10 cm in Chur (1998) bis zu 1358 cm auf dem Weissfluhjoch (1966).

Trends

Mit Ausnahme der Messreihe von Segl-Maria zeigen alle Stationen einen signifikanten Trend hin zu einer Abnahme der jährlichen Neuschneesummen pro Jahr. Auffallend ist die Korrelationen zwischen der relativen Abnahme [%] und der Höhenlage der Standorte, unabhängig von der Region. Je tiefer eine Station gelegen ist, desto massiver die relative Abnahme der Neuschneesummen pro Jahr. In Chur reduzierte sich die Neuschneesumme in den letzten 50 Jahren um fast 100%. Absolut zeigt Arosa mit einer Abnahme der Neuschneesumme von -58.2 cm die grösste und Chur mit -15.9 cm / 10 Jahre die geringste Abnahme. Bei den übrigen Stationen bewegen sich Abnahmen zwischen -17 und -45 cm / 10 Jahre. Im Gegensatz zu den Analysen der Gesamtschneehöhe spielen bei der Betrachtung der einzelnen Trends Exposition und kleinräumige Verschiebungen keine bedeutende Rolle, da bei einem Schneefallereignis eine regional gleichmässige Verteilung der Mengen angenommen werden kann und keine Schmelzprozesse die Messgrösse beeinflussen. Zu berücksichtigen ist jedoch das teilweise Fehlen der Sommermessungen auf dem Weissfluhjoch.

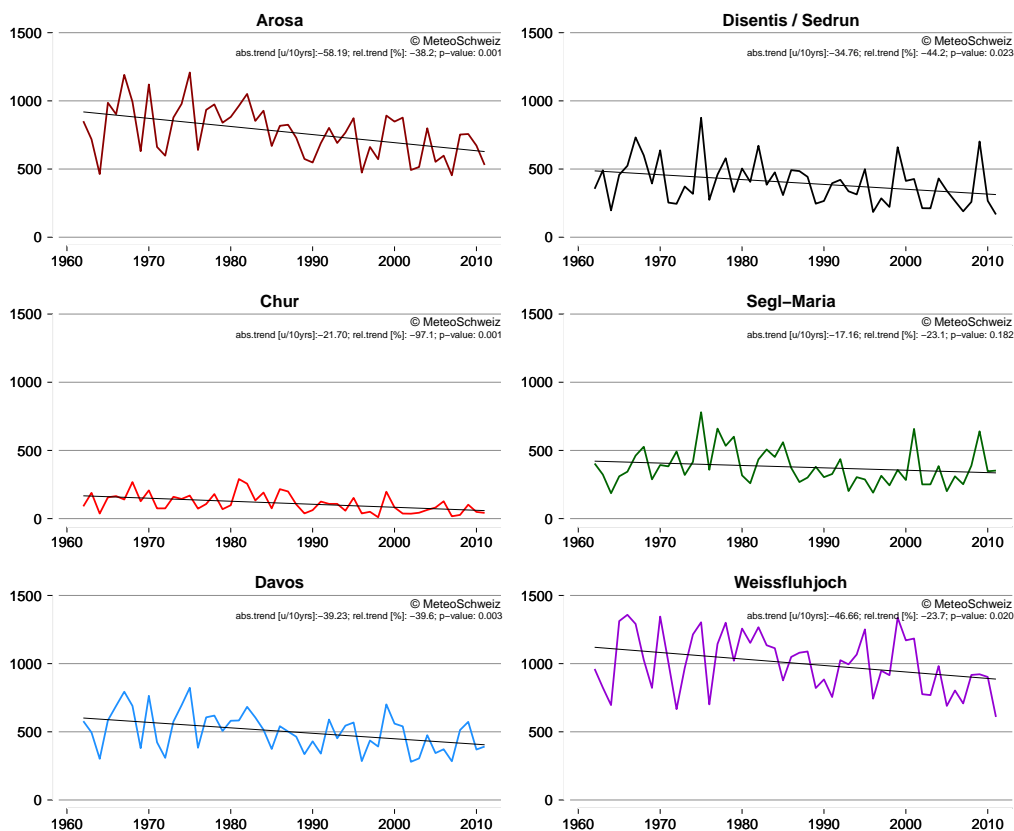


Abbildung 4.12: Zeitlicher Verlauf der jährlichen Neuschneesummen in cm (Neuschneesumme des hydrologischen Jahres) für die Stationen Arosa, Chur, Davos, Disentis/Sedrun, Segl-Maria und Weissfluhjoch. Lineare Trends in Tage / 10 Jahre sowie Signifikanzwerte und relative Änderung über die Periode sind in der Legende gegeben.

4.4.5 Maximale tägliche Neuschneesumme

Allgemeines

Abbildung 4.13 zeigt die Entwicklung der maximalen täglichen Neuschneesumme pro Jahr für Stationen Nord- und Mittelbündens, des Engadins sowie der Bündner Südtäler über die Periode 1961-2011. Bei allen Standorten kann eine grosse Jahr-zu-Jahr Variabilität beobachtet werden. Die jährlichen maximalen Summen bewegen sich in tiefen Lagen (z.B. Chur, 556 m ü.M.) zwischen einigen Zentimetern und 80 cm. In hohen Lagen (z.B. Arosa, 1840 m ü.M.) schwankt die maximale tägliche Menge zwischen gut 20 cm und knapp einem Meter. Eine Abhängigkeit von der räumlichen Lage und der Höhe ist vorhanden, gilt jedoch nur bezogen auf langjährige Mittel und nicht bezüglich des höchsten Wertes der Reihe.

Trend

Über den Analysezeitraum 1961-2011 betrachtet treten keine statistisch signifikanten Trends in der Anzahl zusammenhängender Trockentage auf. Die geringfügigen Ab-/Zunahmen sind zufällig und lassen im Moment keine Aussage über langfristige Änderungen zu. Extreme Schneefallereignisse sind stark von einzelnen Wetterlagen wie z.B. Nordstaulagen für die Region Nordbünden oder Südstaulagen für das Oberengadin abhängig. Es gibt zurzeit keine Anzeichen, dass sich die Häufigkeit oder Ausprägung dieser Wetterlagen über den analysierten Zeitraum systematisch verändert haben. Im Gegensatz zu den Analysen der Gesamtschneehöhe spielen bei der Betrachtung der einzelnen Trends Exposition und kleinräumige Verschiebungen keine bedeutende Rolle, da bei einem Schneefallereignis eine regional gleichmässige Verteilung der Mengen angenommen werden kann und keine Schmelzprozesse die Messgrösse beeinflussen.

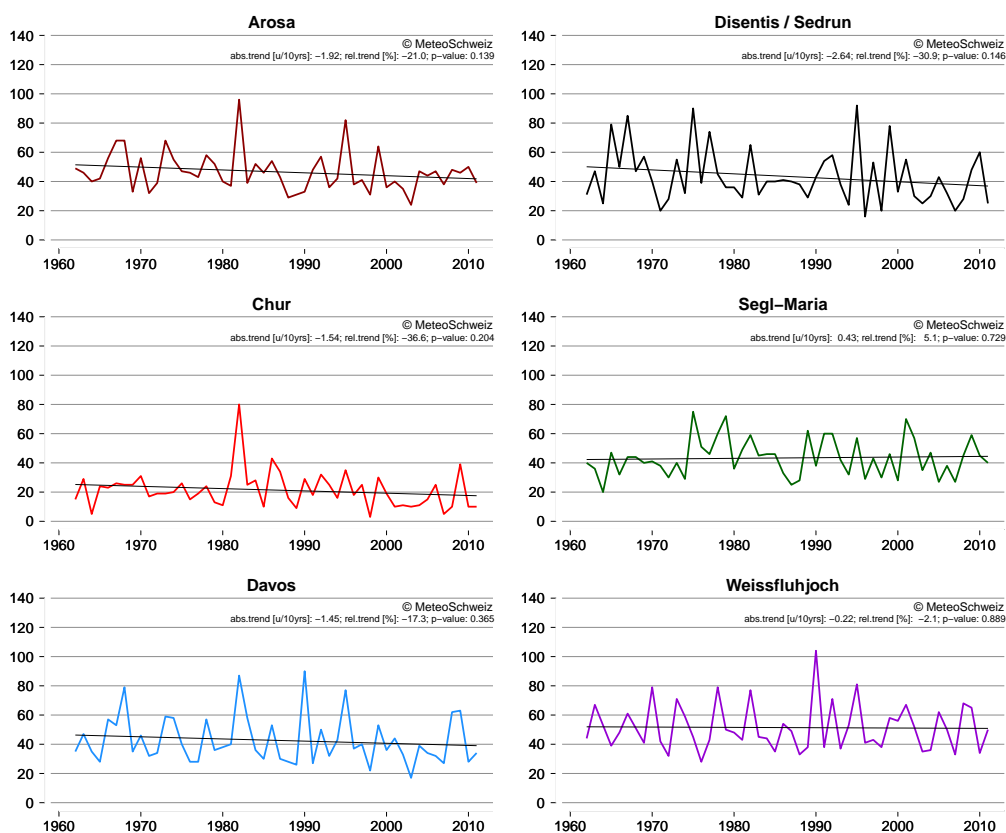


Abbildung 4.13: Zeitliche Verläufe der maximalen täglichen Neuschneesumme pro Jahr in cm (Maximaler Neuschnee pro Tag des hydrologischen Jahres) für die Stationen Arosa, Chur, Davos, Disentis/Sedrun, Segl-Maria und Weissfluhjoch. Lineare Trends in Tage / 10 Jahre sowie Signifikanzwerte und relative Änderung über die Periode sind in den Legendes gegeben.

4.4.6 Tage mit Neuschnee

Allgemeines

Abbildung 4.14 zeigt die Entwicklung der Tage mit Neuschnee ≥ 1 cm für Stationen Nord- und Mittelbündens, des Engadins sowie der Bündner Südtäler über die Periode 1961-2011. Die Anzahl Tage mit Neuschnee ist einerseits von der Höhenlage und andererseits von der räumlichen Lage (Nord/Süd/Inneralpin) abhängig. Die regionale Lage ist bedeutend für die Niederschlagsverteilung (vergl. Kap. 2) während die Höhe das Verhältnis von Schnee zu Regen bestimmt. Die Spannweite reicht im langjährigen Mittel von 10-15 Tage in tiefen Lagen (Chur, 556 m ü.M.) bis ca. 125 Tage pro Jahr in hohen Lagen (Weissfluhjoch, 2690 m ü.M.).

Trends

Alle Stationen zeigen einen Trend hin zu abnehmender Anzahl Tage mit Neuschnee. Die Trends reichen von -1.3 Tage (Davos) bis -4.3 Tage pro 10 Jahre (Weissfluhjoch). Die Trends der Stationen Davos und Segl-Maria sind statistisch nicht signifikant. Interessant ist die Tatsache, dass die absoluten Trends, also die Abnahme in Tage / 10 Jahre über alle Höhen und Regionen ähnlich ist. Als Folge davon sind die relativen Trends bei Standorten mit geringer Anzahl Tage/Jahr am grössten und umgekehrt. So weist z.B. Chur für die Periode 1961-2011 eine Abnahme von 86% auf, also fast eine Halbierung der Anzahl der Tage mit Schneefall. Im Gegensatz zu den Analysen der Gesamtschneehöhe spielen bei der Betrachtung der einzelnen Trends Exposition und kleinräumige Verschiebungen keine bedeutende Rolle, da bei einem Schneefallereignis eine regional gleichmässige Verteilung der Mengen angenommen werden kann und keine Schmelzprozesse die Messgrösse beeinflussen. Zu berücksichtigen ist das teilweise Fehlen der Sommermessungen auf dem Weissfluhjoch.

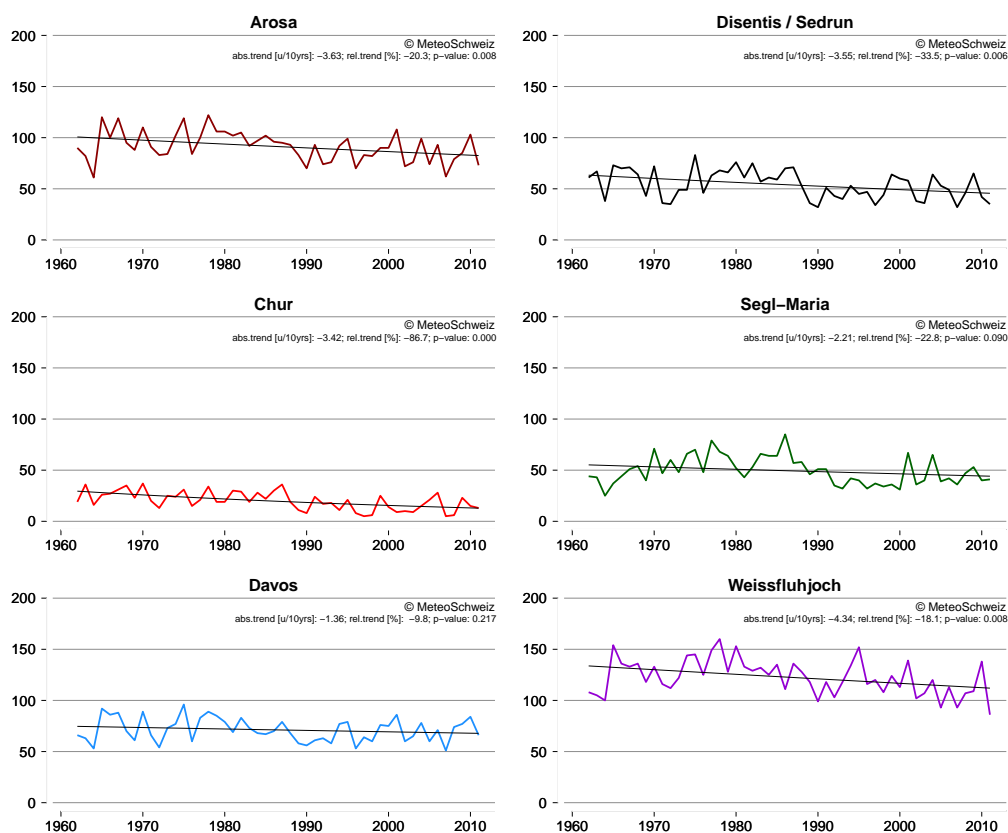


Abbildung 4.14: Zeitlicher Verlauf der jährlichen Anzahl Tage mit Neuschnee (Tage des hydrologischen Jahres mit Neuschnee ≥ 1 cm) für die Stationen Arosa, Chur, Davos, Disentis/Sedrun, Segl-Maria und Weissfluhjoch. Logistische Trends in Tage / 10 Jahre sowie Signifikanzwerte und relative Änderung über die Periode sind in der Legende gegeben.

5 Zukünftige Klimaentwicklung

Es ist zu erwarten, dass das Bündner Klima im Laufe des 21. Jahrhunderts signifikant vom heutigen und vergangenen Zustand abweichen wird. Die Mitteltemperaturen werden sehr wahrscheinlich in allen Jahreszeiten um mehrere Grade ansteigen. Bis Ende des Jahrhunderts dürften die mittleren Niederschlagsmengen im Sommer in ganz Graubünden deutlich abnehmen, die Winterniederschläge in den südalpin beeinflussten Gebiete hingegen wahrscheinlich eher zunehmen. Für die nordalpin beeinflussten Gebiete gibt es im Winter kein eindeutiges Signal. Im Frühling und Herbst können die Niederschläge gemäss Modellaussagen zu- oder abnehmen.

Es kann auch eine Änderung im Charakter von Extremereignissen erwartet werden. Es ist von häufigeren, intensiveren und länger anhaltenden Wärmeperioden und Hitzewellen im Sommer auszugehen, während die Zahl der kalten Wintertage vermutlich abnehmen wird. Projektionen der Häufigkeit und Intensität von Niederschlagsereignissen sind mit grösseren Unsicherheiten behaftet, markante Änderungen können jedoch nicht ausgeschlossen werden.

Gegen Ende des 21. Jahrhunderts wird das Graubündner Klima massgeblich durch den zukünftigen Verlauf des globalen Ausstosses von Treibhausgasen beeinflusst. Die Klimamodelle zeigen, dass mit Reduktionsmassnahmen von Treibhausgasen, die auf ein 2°C-Ziel ausgerichtet sind, die Erwärmung in Graubünden mit etwa 1.4°C als wahrscheinlichster Wert zwei bis drei Mal tiefer ausfallen würde, als wenn keine Reduktionsmassnahmen ergriffen werden. Eine zusätzliche Erwärmung von 1.4°C entspricht etwa der schon beobachteten Erwärmung zwischen 1864 und 2010.

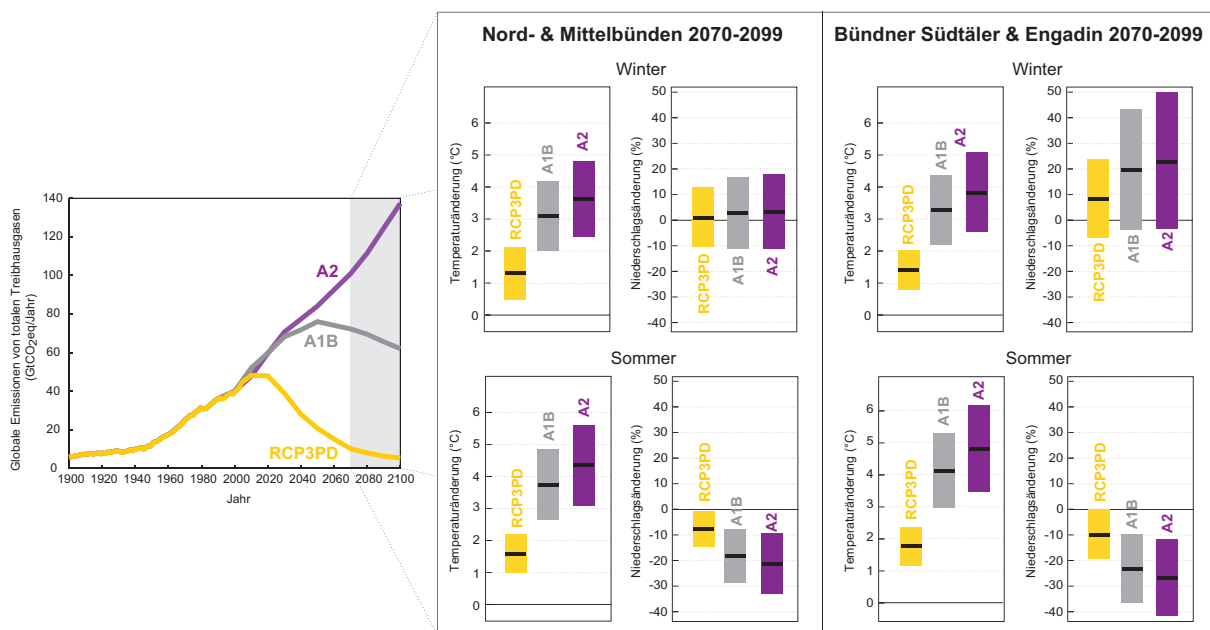


Abbildung 5.1: Links: Totale globale anthropogene Treibhausgasemissionen der drei in diesem Bericht berücksichtigten IPCC Emissionsszenarien RCP3PD (gelb), A1B (grau) und A2 (lila) für die Jahre 1900-2100. Rechts: Projizierte Temperatur- (°C) und Niederschlagsänderungen (%) für 2070-2099 gegenüber 1980-2009 für Nord- und Mittelbünden (links) und die Bündner Südtäler und das Engadin (rechts) jeweils für Winter (oben) und Sommer (unten).

5.1 Einleitung

Gemäss Klimaprojektionen muss im 21. Jahrhundert mit einer starken globalen Erwärmung gerechnet werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass die mittlere globale Temperatur von 1990 bis 2100 zwischen 1.4°C und 5.8°C zunehmen wird (IPCC, 2007). Dieser Bereich ergibt sich aus den verschiedenen Klimamodellen und den Emissionsszenarien, die mögliche Entwicklungen der Bevölkerung, Wirtschaft und Technologie berücksichtigen. Was bedeuten diese Projektionen für die Klimazukunft im Kanton Graubünden?

Genauso wie sich die Klimaentwicklung des Kantons Graubünden in der Vergangenheit von der globalen Klimaentwicklung unterscheidet, sind in Zukunft Unterschiede zwischen der globalen und der lokalen Klimaentwicklung im Kanton Graubünden zu erwarten. Um ein konkretes Bild über die zukünftige Klimaentwicklung der Schweiz zu erhalten, wurden im Jahr 2011 die Szenarien zur Klimaänderung in der Schweiz CH2011 publiziert (CH2011, 2011). Die Szenarien basieren auf einer grossen Anzahl verschiedener Klimamodellrechnungen des IPCC, des EU-Forschungsprojekt ENSEMBLES sowie Analysen und weiteren Nachbearbeitungen des CH2011-Konsortiums.

Klimamodelle erlauben *keine* Aussagen zu Temperatur oder Niederschlag für ein konkretes Jahr und einen spezifischen Ort (Bsp. 12°C am 12. Mai 2068 in Chur). Was Klimamodelle aber leisten können sind Aussagen zur Veränderungen der mittleren Temperatur und des mittleren Niederschlags im Vergleich zu heute. Unter einer mittleren Temperatur kann man sich die Durchschnittstemperatur über mehrere Jahre (Bsp. 2070-2099) und eine bestimmte Region vorstellen (Bsp. Alpensüdseite). „Heute“ bezieht sich auf den Durchschnittswert der Jahre 1980 bis 2009.

Berechnungen des zukünftigen Klimas sind mit relativ grossen Unsicherheiten verbunden. Einerseits gibt es grosse Unsicherheiten in der Entwicklung des globalen Ausstosses von Treibhausgasen, die von schwierig zu bestimmenden Faktoren wie z.B. Entwicklung der Bevölkerung, Wirtschaft und Technologie abhängen. Um diesen Unsicherheiten Rechnung zu tragen, werden drei mögliche Emissionsszenarien (Annahmen des möglichen Ausstosses von Treibhausgasen in Zukunft) vorgestellt (siehe Kap. Emissionsszenarien). Da auch Klimamodelle mit Fehlern behaftet sind und deswegen mit Unsicherheiten verbunden sind, wird für jedes Emissionsszenario neben den „wahrscheinlichsten“ Änderungen immer auch ein Unsicherheitsbereich gezeigt. Im Folgenden besprechen wir nach einer kurzen Vorstellung der Emissionsszenarien zuerst die Szenarien für die Temperaturentwicklung, danach diejenigen für die Niederschlagsentwicklung und zum Schluss mögliche Änderungen von Wetterextremen.

Es ist zu beachten, dass die Klimaerwärmung bereits voll im Gange ist und die Temperaturen heute (1980-2009) diejenigen der vorindustriellen Verhältnisse des 19. Jahrhunderts um rund 1°C übertreffen.

5.2 Emissionsszenarien

Das Ausmass der Klimaänderung im Kanton Graubünden ist von der Jahreszeit und insbesondere vom Verlauf der zukünftigen globalen Treibhausgasemissionen abhängig. Die nachfolgenden Resultate entsprechen demnach einer Projektion und sind keine Vorhersagen, da sie auf drei vorgegebenen Emissionspfaden beruhen. Solche Emissionspfade sind mögliche Entwicklungen wie sich die Welt entwickeln könnte (demografisch, gesellschaftlich, technologisch, wirtschaftlich und energetisch). Dabei spielen natürlich die Entscheidungen, welche heute und in Zukunft getroffen werden eine entscheidende Rolle. Man sollte deshalb die Resultate von Szenarien immer als „was wenn“ Situationen betrachten und sich deren Hintergrund bewusst halten.

Eine grosse Anzahl von verschiedenen Emissionsszenarien wurde für die IPCC Berichte entwickelt (Nakicenovic and Swart 2000; Moss et al. 2010). Eine Auswahl davon ist in Abbildung 5.2 dargestellt. In diesem Bericht verwenden wir drei verschiedene Emissionsszenarien:

- **A2**: keine Interventionsmassnahmen. Stetige Zunahme der Treibhausgasemissionen bis 2100 (Fig. 1, lila)
- **A1B**: keine Interventionsmassnahmen. Zunahme der Treibhausgasemissionen bis ca. 2060, dann leichte Abnahme (Fig. 1, grau)
- **RCP3PD**: mit Interventionsmassnahmen. Emissionen werden bis 2050 um etwa 50 % gesenkt (Fig. 1, gelb)

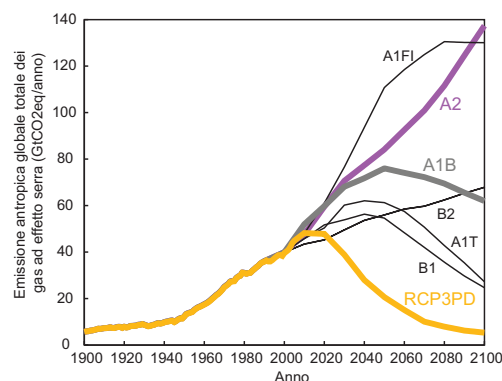


Abbildung 5.2: Links Totale globale anthropogene Treibhausgasemissionen für ausgewählte IPCC Emissionsszenarien. Kohlendioxidäquivalent (CO₂eq) ist eine Referenzeinheit, mit der alle anderen Treibhausgase ausser CO₂ in CO₂ Einheiten ausgedrückt werden können. Die drei Emissionsszenarien dieses Berichts sind in fett dargestellt.

5.3 Temperaturszenarien

Tabelle 5.1 zeigt, dass gemäss aktuellen Klimamodellen alle Regionen des Kantons Graubünden (d.h. sowohl die eher nordalpin- wie auch die eher südalpin beeinflussten) während des 21. Jahrhunderts in allen Jahreszeiten deutlich wärmer werden. Diese Aussage ist unabhängig vom betrachteten Emissionsszenario und der betrachteten Periode. Die grössten Erwärmungen sind in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts zu erwarten. So ergeben sich für das A1B Szenario und je nach Jahreszeit in den nordalpin beeinflussten Regionen Nord- und Mittelbündens mittlere Erwärmungen im Vergleich zu heute (Periode 1980-2009) von 0.9-1.3°C um 2035, 2.0-2.6°C um 2060 und 2.7-3.7°C um 2085. In den südalpin beeinflussten Regionen der Bündner Südtäler und im Engadin sind die die mittleren Erwärmungen 1.0-1.4°C um 2035, 2.3-2.9°C um 2060 und 3.1-4.1°C um 2085. Wegen Unsicherheiten durch klimatische Fluktuationen und Modellungenauigkeiten müssen aber auch deutlich höhere oder tiefere Werte als möglich angesehen werden. So sind z.B. für das Jahr 2085 in den südalpin beeinflussten Regionen sowohl moderate Erwärmungen von 2.2-3.0°C (tiefe Abschätzung) als auch relativ starke Erwärmungen von 4.0-5.3°C (hohe Abschätzung) konsistent mit den vorliegenden Modellsimulationen.

Bis 2035 hat die Wahl des Emissionsszenarios wenig Einfluss auf die Resultate und klimatische Fluktuationen und Modellungenauigkeiten dominieren. Danach werden aber die Unterschiede der verschiedenen Emissionsszenarien augenscheinlich. Um 2085 betragen die Unterschiede im Vergleich zu heute mehrere Grade. So ist zum Beispiel die mittlere Erwärmung des A2 Szenarios nordalpin zwischen 3.2 und 4.4°C, diejenige des RCP3PD Szenarios nur 1.2-1.6°C. Die saisonalen Unterschiede des Erwärmungssignals sind eher klein, werden aber gegen Ende des 21. Jahrhunderts grösser. Die Klimamodelle zeigen stärkere Temperaturanstiege im Sommer als im Winter. So beträgt zum Beispiel die mittlere Erwärmung des A1B Szenarios südalpin im Sommer

4.1°C, im Winter hingegen nur 3.3°C. Die Herbstwerte sind ähnlich wie die Winterwerte, wobei die Frühlingwerte mit 3.1°C noch ein wenig kleiner sind. Ähnliches gilt für die Alpennordseite wobei sich die Werte leicht unterscheiden.

Tabelle 5.1: Projizierte Temperaturänderungen (in °C) für die Alpennord- (oben) und Alpensüdseite (unten) gegenüber der Periode 1980-2009. Die Werte für 2035, 2060 und 2085 sind Mittelwerte der Temperaturwerte für die Perioden 2020-2049, 2045-2074 und 2070-2099. Winter: Dezember-Januar-Februar; Frühling: März-April-Mai; Sommer: Juni-Juli-August; Herbst: September-Oktober-November. Änderungen grösser 1.5 und kleiner 3°C sind orange, solche grösser gleich 3°C rot dargestellt.

Alpennordseite										
Jahreszeit	Szenario	2035			2060			2085		
		tief	mittel	hoch	tief	mittel	hoch	tief	mittel	hoch
Winter	A2	0.3	1.1	2.0	1.3	2.3	3.2	2.5	3.6	4.8
	A1B	0.4	1.3	2.1	1.4	2.3	3.3	2.0	3.1	4.2
	RCP3PD	0.3	1.2	2.1	0.6	1.4	2.2	0.5	1.3	2.2
Frühling	A2	0.3	0.8	1.4	1.2	2.0	2.7	2.2	3.2	4.3
	A1B	0.3	0.9	1.6	1.2	2.0	2.8	1.9	2.7	3.7
	RCP3PD	0.3	0.9	1.5	0.7	1.2	1.7	0.7	1.2	1.7
Sommer	A2	0.5	1.2	1.8	1.8	2.5	3.3	3.1	4.4	5.6
	A1B	0.6	1.3	1.9	1.8	2.6	3.4	2.7	3.7	4.8
	RCP3PD	0.6	1.2	1.9	1.0	1.6	2.1	1.0	1.6	2.2
Herbst	A2	0.6	1.1	1.6	1.3	2.1	3.0	2.4	3.7	5.0
	A1B	0.7	1.3	1.8	1.3	2.2	3.0	2.1	3.2	4.3
	RCP3PD	0.7	1.2	1.7	0.8	1.3	1.8	0.8	1.4	1.9

Alpensüdseite										
Jahreszeit	Szenario	2035			2060			2085		
		tief	mittel	hoch	tief	mittel	hoch	tief	mittel	hoch
Winter	A2	0.6	1.2	1.8	1.5	2.4	3.2	2.6	3.8	5.1
	A1B	0.7	1.3	1.9	1.6	2.4	3.3	2.2	3.3	4.4
	RCP3PD	0.6	1.2	1.9	0.8	1.5	2.1	0.8	1.4	2.0
Frühling	A2	0.3	0.9	1.6	1.5	2.2	3.0	2.7	3.7	4.7
	A1B	0.3	1.0	1.7	1.5	2.3	3.1	2.3	3.1	4.0
	RCP3PD	0.3	1.0	1.6	0.8	1.4	1.9	0.8	1.3	1.9
Sommer	A2	0.7	1.3	1.9	2.0	2.8	3.7	3.5	4.8	6.2
	A1B	0.8	1.4	2.1	2.1	2.9	3.7	3.0	4.1	5.3
	RCP3PD	0.8	1.4	2.0	1.2	1.7	2.3	1.2	1.8	2.4
Herbst	A2	0.7	1.2	1.7	1.4	2.3	3.1	2.6	3.8	5.1
	A1B	0.8	1.4	1.9	1.5	2.3	3.1	2.2	3.3	4.4
	RCP3PD	0.7	1.3	1.8	0.8	1.4	1.9	0.9	1.4	1.9

Um die zukünftigen Temperaturänderung (Tabelle 5.1) mit der historischen Temperaturentwicklung 1864-2011 im Kanton Graubünden anschaulich vergleichen zu können, werden in Abbildung 5.3 die Messreihe von Chur, welche eher nordalpin beeinflusst ist, sowie die Messreihe von Segl-Maria, welche eher südalpin beeinflusst ist, für die Winter-, Frühling-, Sommer- und Herbsttemperatur zusammen mit den entsprechenden Modellszenarien im zeitlichen Verlauf grafisch dargestellt. Der Schwankungsbereich der A1B Szenario Modellresultate für jedes Jahr zwischen 1950 und 2100 ist als graues Band dargestellt.

Nord- und Mittelbünden
Bsp. Chur 1888-2011/12

Bündner Südtäler und Engadin
Bsp. Segl-Maria 1864-2011/12

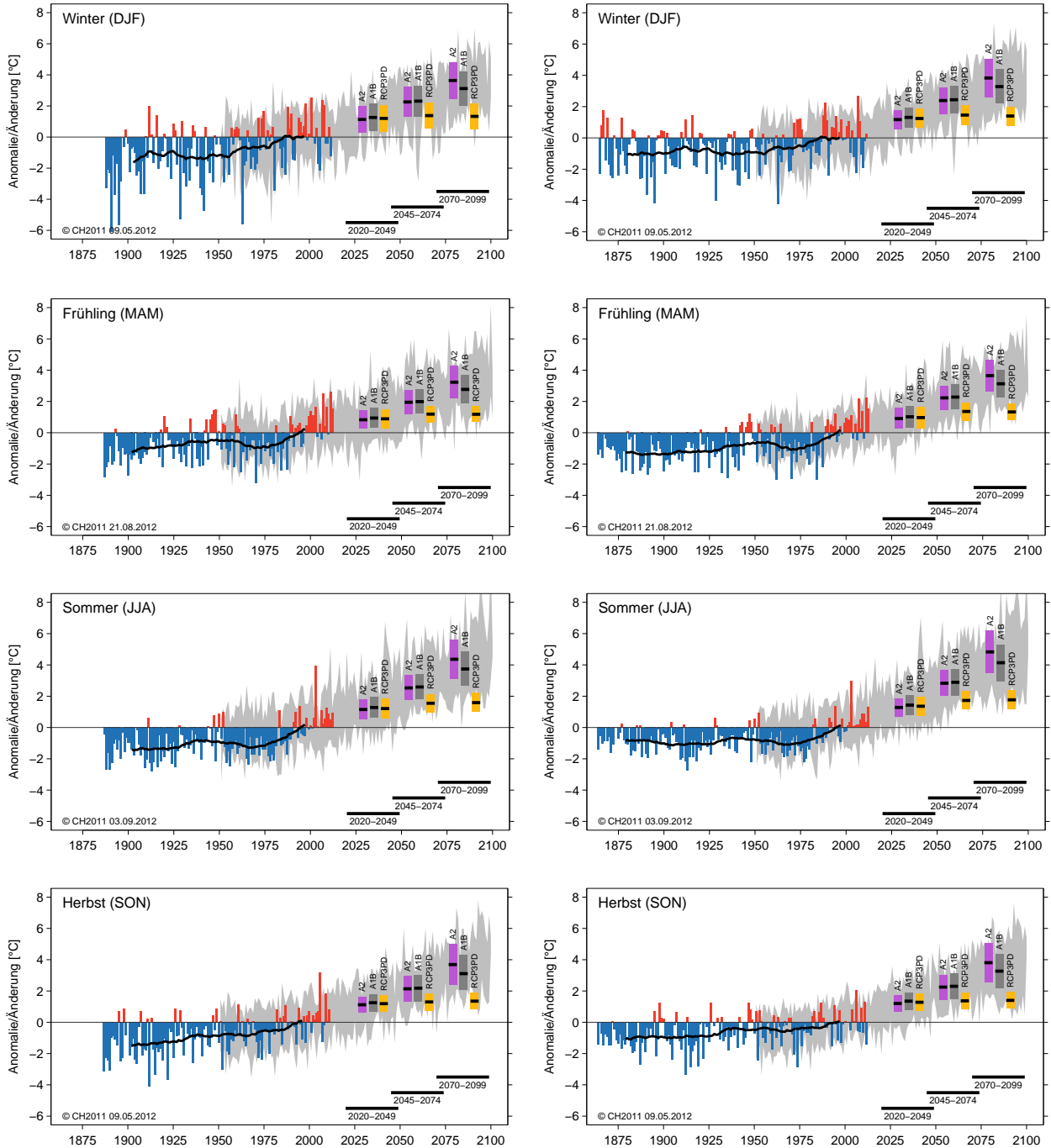


Abbildung 5.3: Vergangene und zukünftige Änderungen der saisonalen Temperatur (in °C) gezeigt am Beispiel von Chur, welches eher nordalpin beeinflusst ist (linke Spalte, Beobachtungen seit 1888), sowie Segl-Maria, welches eher südalpin beeinflusst wird (rechte Spalte, Beobachtungen seit 1864). Die Änderungen beziehen sich auf den Referenzzeitraum 1980-2009. Die dünnen farbigen Balken zeigen die jährlichen Abweichungen vom gemessenen Durchschnitt über den Referenzzeitraum, die dicken schwarzen Linien sind die entsprechenden über 30 Jahre geglätteten Durchschnittswerte. Die graue Schattierung gibt die Spannweite der jährlichen Abweichungen an, wie sie die Klimamodelle für das A1B Szenario prognostizieren (das 5-95 Perzentil für jedes Jahr über den ganzen Modellsatz). Die dicken farbigen Balken zeigen die besten Schätzungen der Projektionen in die Zukunft und den damit verbundenen Unsicherheitsbereich für ausgewählte Zeiträume von 30 Jahren und für drei verschiedene Szenarien von Treibhausgasemissionen (A1B, A2 und RCP3PD).

Es zeigt sich, dass das Modellensemble sowohl die beobachteten Jahr-zu-Jahr Schwankungen wie auch die beobachteten Trends gut abbilden. Die farbigen dicken Balken in lila, grau und gelb geben die Schwankungsbreite der 3 Emissionsszenarien A1B, A2 und RCP3PD für die 30-Jahresperioden 2020-2049, 2045-2074 und 2070-2099 wider. Man erkennt, dass die zukünftigen Temperaturen deutlich ansteigen werden. Temperaturen wie im heissen Sommer 2003 könnten in der 2. Hälfte des 21. Jahrhunderts normal und entsprechend die warmen Extreme noch einmal deutlich wärmer werden. Die kalten Temperaturen des 19. und 20. Jahrhunderts hingegen dürften kaum noch auftreten (vgl. Kapitel über Extremereignisse). Weiter zeigt Abbildung 5.3, wie oben schon erwähnt, deutliche Unterschiede zwischen den Szenarien für die Perioden 2045-2074 und vor allem 2070-2099. Es macht also einen grossen Unterschied, ob global die Treibhausgasemissionen weiter stark ansteigen (A1B oder A2) oder die Emissionen bald drastisch reduziert werden können (RCP3PD).

Tabelle 5.2: Temperaturen (°C) für ausgewählte Bündner Stationen und den "best estimate" A1B. Winter: Mittel für Dezember-Januar-Februar; Sommer: Mittel für Juni-Juli-August. Heute: Mittel 1980-2009. Temperaturen (T) unter 0°C sind blau geschrieben, solche über 20°C rot. Für die Stationen Chur, Davos und Disentis wurde die Erwärmung der Alpennordseite verwendet für die anderen Stationen die Erwärmung der Alpensüdseite. Die Entwicklung der Winterwerte von Samedan sind wegen der Kaltluftseelage recht unklar und in Klammer gesetzt.

Jahreszeit	Station	heute	2035	2060	2085
Winter	Grono (382m)	4.0	5.3	6.4	7.3
	Chur (556m)	1.2	2.5	3.5	4.3
	Robbia (1078m)	-1.2	0.1	1.2	2.1
	Disentis (1197m)	-1.0	0.3	1.3	2.1
	Scuol (1304m)	-3.7	-2.4	-1.3	-0.4
	Davos (1594m)	-4.4	-3.1	-2.1	-1.3
	San Bernardino (1639m)	-3.3	-2.0	-0.9	0.0
	Samedan (1709m)	-8.1	(-6.8)	(-5.7)	(-4.8)
Sommer	Grono (382m)	20.7	22.1	23.6	24.8
	Chur (556m)	17.9	19.2	20.5	21.6
	Robbia (1078m)	15.2	16.6	18.1	19.3
	Disentis (1197m)	14.5	15.8	17.1	18.2
	Scuol (1304m)	14.2	15.6	17.1	18.3
	Davos (1594m)	11.4	12.7	14.0	15.1
	San Bernardino (1639m)	11.9	13.3	14.8	16.0
	Samedan (1709m)	11.1	12.4	14.0	15.2

Bisher haben wir nur Änderungswerte gegenüber der Referenzperiode angegeben. Zur besseren Einordnung auf lokaler Stufe gibt Tabelle 5.2 zusätzlich einen Überblick über absolute Winter- und Sommertemperaturen an einer grösseren Anzahl von Graubündner Stationen. Gezeigt werden projizierte Mittelwerte des A1B Szenarios. So zeigt sich zum Beispiel für das Winterhalbjahr, dass

- für Chur zwischen 2060 und 2085 etwa Temperaturen wie heute im südalpinen Grono zu erwarten sind
- Robbia (1078 m ü.M.) und Disentis (1197 m ü.M.) 2060 ähnliche Temperaturen erreichen dürfte wie Chur (556 m ü.M.) heute
- Davos (1597 m ü.M.) 2085 ähnliche Temperaturen erreichen dürfte wie das südalpine Robbia (1078 m ü.M.) heute
- San Bernardino (1639 m ü.M.) 2060 so warm sein könnte wie Disentis (1197 m ü.M.) heute

Für das Sommerhalbjahr findet man zum Beispiel, dass

- das südalpine Robbia (1078 m ü.M.) 2060 ähnliche Temperaturen erreichen dürfte wie Chur (556 m ü.M.) heute
- Davos (1597 m ü.M.) und Samedan (1709 m ü.M.) 2060 ähnlich warm sein dürften wie das Engadiner Scuol (1304 m ü.M.) heute
- Grono etwa 2070 ähnlich warme Temperaturen erreichen dürfte wie Florenz und Rom heute

5.4 Niederschlagszenarien

Die zukünftigen Änderungen der Niederschläge sind nicht so eindeutig wie diejenigen der Temperaturen und unterscheiden sich stark je nach Jahreszeit und Region. Um diese jahreszeitlichen Muster zu verstehen, muss man die grossskaligen Muster für Europa analysieren. Auf europäischer Skala zeigen sich deutliche geografische Unterschiede, die sich gegen Ende des 21. Jahrhunderts verstärken. Während die Simulationen für Nordeuropa eine Zunahme der Niederschläge projizieren, sehen sie Abnahmen in Südeuropa, speziell stark im Sommer. Im Frühling und Herbst befindet sich die Schweiz auf oder nah an der Grenze wo sich die beiden Gebiete (Zu- bzw. Abnahme) treffen. Das heisst, dass es für die Übergangsjahreszeiten sogar schwierig wird das Vorzeichen der zukünftigen Änderung zu bestimmen. Im Sommer befindet sich die Grenze in Nordeuropa und es ist in der Schweiz mit beträchtlichen Niederschlagsreduktionen zu rechnen, speziell stark in den südalpin beeinflussten Regionen des Kantons Graubünden, dem Engadin und den Bündner Südtälern. Im Winter hingegen kann im Engadin und den Bündner Südtälern mit einer Zunahme der Niederschläge gerechnet werden. Die Werte der projizierten Änderungen sind in Tabelle 5.3 sowohl für die Alpennordseite, wie für die Alpensüdseite gegeben. Die Projektionsunsicherheiten sind mit 10-20% über/unter der mittleren Abschätzung relativ gross.

Tabelle 5.3: Projizierte Niederschlagsänderungen (in %) auf der Alpennord- (oben) und Alpensüdseite (unten) gegenüber der Periode 1980-2009. Die Schätzwerte für 2035, 2060 und 2085 sind Mittelwerte der Niederschlagswerte in den 30-Jahrperioden 2020-2049, 2045-2074, und 2070-2099. Definition der Jahreszeiten wie in Tab. 5.1. Abnahmen grösser 20% sind braun, Zunahmen grösser 20% grün dargestellt.

Alpennordseite										
Jahreszeit	Szenario	2035			2060			2085		
		tief	mittel	hoch	tief	mittel	hoch	tief	mittel	hoch
Winter	A2	-16	-1	14	-14	0	14	-11	3	18
	A1B	-17	-2	14	-14	0	14	-11	3	17
	RCP3PD	-17	-2	14	-12	0	12	-10	1	13
Frühling	A2	-7	3	13	-7	3	14	-7	7	21
	A1B	-7	3	13	-7	3	14	-6	6	18
	RCP3PD	-7	3	13	-7	2	11	-7	2	11
Sommer	A2	-9	-1	8	-19	-10	-2	-33	-21	-10
	A1B	-9	-1	8	-19	-10	-2	-29	-18	-8
	RCP3PD	-9	-1	8	-13	-6	1	-15	-8	-1
Herbst	A2	-13	1	16	-16	1	18	-19	0	20
	A1B	-14	2	17	-16	1	18	-18	0	18
	RCP3PD	-14	1	17	-14	1	15	-14	0	14

Alpensüdseite										
Jahreszeit	Szenario	2035			2060			2085		
		tief	mittel	hoch	tief	mittel	hoch	tief	mittel	hoch
Winter	A2	-12	5	22	-12	10	32	-3	23	50
	A1B	-12	5	23	-12	10	32	-4	20	44
	RCP3PD	-12	5	22	-11	6	23	-7	8	24
Frühling	A2	-19	-2	16	-24	-6	11	-29	-10	9
	A1B	-20	-2	16	-24	-7	11	-27	-9	10
	RCP3PD	-19	-2	16	-20	-4	12	-20	-4	13
Sommer	A2	-13	-2	10	-24	-13	-2	-42	-27	-12
	A1B	-14	-2	10	-24	-13	-2	-36	-23	-10
	RCP3PD	-14	-2	10	-17	-8	2	-20	-10	0
Herbst	A2	-17	-3	11	-20	-4	13	-30	-9	13
	A1B	-18	-3	11	-21	-4	13	-26	-9	12
	RCP3PD	-17	-3	11	-16	-2	11	-16	-3	10

Diese grossen Unsicherheiten sind zum Teil bedingt durch die grosse dekadische Variabilität, welche die Unsicherheiten in den nächsten 10-30 Jahren dominiert. Das erklärt auch, weshalb für 2035 keine klaren Trends in den Niederschlagsprojektionen auszumachen sind (Abbildung 5.4).

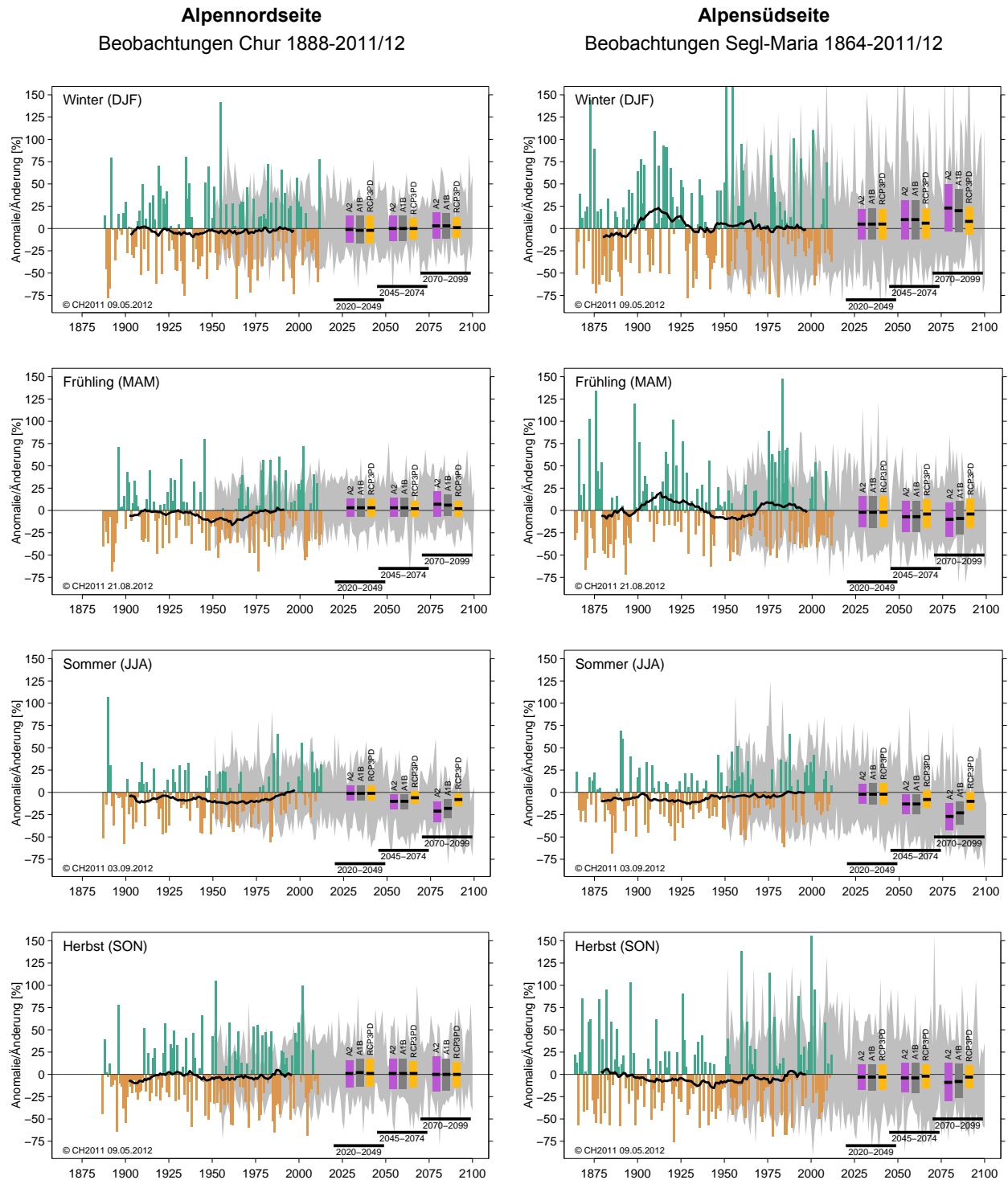


Abbildung 5.4: Wie Fig. 2 aber für saisonale Niederschlagssummen (in % gegenüber dem Wert 1980-2009).

Für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts können klarere Aussagen gemacht werden. Im Sommer ist mit deutlichen Reduktionen zu rechnen. Die mittlere Schätzung der drei Szenarien projizieren für die Alpensüdseite (Engadin und die Bündner Südtäler) Abnahmen von 8-13% bis 2060 und 10-27% bis 2085. Für die Alpennordseite, wozu wir Nord- und Mittelbünden zählen, sind die Abnahmen zwischen 6-10% bis 2060 und 8-21% bis 2085. Entsprechend könnte damit auch eine Abnahme der nassen Tage verbunden sein (vgl. Kap. Extremwerte).

Während in den nordalpin beeinflussten Regionen im Winter keine eindeutigen Veränderungen der Niederschläge projiziert werden, kann für die Alpensüdseite auch im Winter mit relativ deutlichen Niederschlagsänderungen gerechnet werden: +6-10% bis 2060 und +8-23% bis 2085 für die mittlere Schätzung des A1B Szenarios. In den anderen Jahreszeiten sind die Unsicherheiten so gross, dass sowohl Zunahmen wie Abnahmen nicht ausgeschlossen werden können. Die mittleren Änderungsabschätzungen sind unter 10% und somit relativ klein.

Wie für die Temperaturprojektionen hat die Wahl des Emissionsszenarios in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts keinen grossen Einfluss auf die Niederschlagssignale. Ganz anders in der zweiten Hälfte: für 2035 ändert sich die mittlere Schätzung der Änderung des Sommerniederschlags um maximal 1% für die drei verschiedenen Szenarios; für 2085 hingegen projiziert das RCP3PD Szenario je nach Region eine mittlere Abnahme von 8-10% (Bereich 0-20%), das A2 Szenario hingegen eine von 21-27% (Bereich 10-42%).

Um die Zahlenwerte der Niederschlagsänderungen (Tabelle 5.3) mit der historischen Niederschlagsentwicklung im Kanton Graubünden anschaulich vergleichen zu können, werden in Abbildung 5.4 die Messreihe von Chur, welche eher nordalpin beeinflusst ist, sowie die Messreihe von Segl-Maria, welche eher südalpin beeinflusst ist, für die Winter-, Frühling-, Sommer- und Herbstniederschläge zusammen mit den entsprechenden Modellszenarios im zeitlichen Verlauf grafisch dargestellt. Analog zur Temperatur zeigt sich, dass das Modellensemble die beobachteten grossen Jahr-zu-Jahr Schwankungen recht gut abbildet. Die beobachteten Trends sind zu klein um genaue Vergleiche machen zu können. Man kann gut erkennen, dass die zukünftigen Niederschläge sich weniger deutlich von den beobachteten Schwankungen absetzen als bei der Temperatur. Auch hier zeigt sich allerdings schön, dass sich gegen Ende des 21. Jahrhunderts beträchtliche Unterschiede zwischen den Szenarios ergeben.

5.5 Wetterextreme

Zusammen mit den Änderungen der mittleren Temperatur und des Niederschlags ist auch eine Änderung von Wetterextremen zu erwarten. Tabelle 5.4 gibt eine Übersicht der zu erwartende Änderungen von verschiedenen Arten von Extremereignissen. Die Abschätzung ist für einige Grössen relativ sicher (d.h. Prozesse sind bekannt und werden von den Modellen aufgelöst), während sie für andere sehr unsicher ist (Prozesse in Modellen schlecht erfasst oder zu feinskalig). Deshalb wird für jede Art Extremereignis auch ein Mass angegeben, das beschreibt, wie gut das Verständnis der Prozesse ist, die am jeweiligen Extremtyp beteiligt sind. Weiter werden die prozessbasierte Erwartung und die beobachtete Änderung der letzten Jahrzehnte aufgelistet.

Am klarsten und am besten verstanden ist die Entwicklung der **Temperaturextreme** (Verständnis hoch bis sehr hoch). Schon heute gibt es einen klaren Trend hin zu mehr heissen Tagen und wärmeren Nächten (z.B. Fischer and Schär 2010). Gegen Ende des 21. Jahrhunderts könnte jeder zweite Sommer so warm oder gar wärmer sein als der Sommer 2003 (Schär et al. 2004). Weitere Studien zeigen einen klaren Trend hin zu mehr und länger anhaltenden Hitzewellen zusammen mit zunehmender Variabilität der Temperaturen (Fischer and Schär 2009; Giorgi et al. 2004; Seneviratne et al. 2006). Im Gegenzug ist von einer abnehmenden Häufigkeit von Kälteperioden und von weniger Frost- und Eistagen auszugehen (Meehl et al. 2004).

Für den Kanton Graubünden dürfte sich das Auftreten von heutigen kalten Winternächten bis 2050 um 40-80% und bis gegen Ende des Jahrhunderts sogar um 70-90% reduzieren (cf. CH2011, Fig. A7). Allgemein sind die Erwärmungssignale für die Südschweiz etwas grösser als für den Rest der Schweiz. Deshalb muss in den Bündner Südtälern und im Engadin mit etwas stärkeren Signalen gerechnet werden als für den Rest des Kantons.

Tabelle 5.4: Zusammenfassende Tabelle der Änderungen von Wetterextremen in der Schweiz

Extremtyp	Prozessbasierte Erwartung	Beobachtete Änderung der letzten Jahrzehnte	zukünftige Änderungen	Verständnis
Hitzwellen / warme Extreme	steigende Häufigkeit, Intensität zusammen mit Erwärmung und erhöhter Variabilität / Verstärkung durch Bodenaustrocknung	steigende Häufigkeit, Intensität und Dauer	steigende Häufigkeit, Intensität und Dauer	hoch bis sehr hoch
Kältewellen / kalte Extreme	allgemeine Abnahme zusammen mit Erwärmung, möglicherweise verstärkt durch Schnee-Albedo Feedback	schwach abnehmende Häufigkeit und Dauer	abnehmende Häufigkeit, Intensität und Dauer	mittel bis hoch
Starkniederschlag	Intensivierung als Resultat von höherem Wassergehalt in warmer Luft	steigende Häufigkeit von starken Winterniederschlägen	schwache Tendenz zu intensiveren Regenfällen im Herbst, potentielle Intensivierung im Sommer und Winter, grosse Änderungen können nicht ausgeschlossen werden	mittel
Trockenperioden	erhöhtes Risiko für Sommertrockenheit durch erhöhte Verdunstung, frühere Schneeschmelze und Vegetationsbeginn, was zu verstärkter Bodenaustrocknung führt	kein robuster Trend, schwache Tendenz zu höherer Häufigkeit in der Südschweiz	Tendenz zu erhöhtem Risiko für Dürren und längeren Trockenperioden zusammen mit sommerlicher Austrocknung	mittel
Winterstürme	Verstärkung von Zyklonen wegen grösserer latenter Wärmefreisetzung, Änderungen der breitenabhängigen Temperaturgradienten beeinflusst Sturmbahnen	kein robuster Trend	keine kohärenten Hinweise für Änderungen, gewisse Modelle zeigen abnehmende Häufigkeit aber steigende Intensität	tief
Hagel	unklar	keine Hinweise auf Veränderungen in Beobachtungen	keine Hinweise auf Veränderungen in Modellen (räumliche Skala zu klein)	sehr tief
Tornados	Vorzeichen unklar, abnehmende Windscherung und Anfeuchtung/Erwärmung von Grenzschicht laufen einander entgegen	nur wenige gut dokumentierte Fälle, keine Hinweise auf Veränderungen	keine Hinweise auf Veränderungen in Modellen (räumliche Skala zu klein)	sehr tief
starke Schneefälle (Tieflogen)	Vorzeichen unklar, winterliche Erwärmung und Niederschlagszunahme laufen einander entgegen (v.a. in tiefen Lagen)	keine Hinweise auf Veränderungen in Beobachtungen	keine Hinweise auf Veränderungen in Modellen	tief

Die Häufigkeit, Intensität und Dauer von **Niederschlagsextremen** könnte sich bei steigenden Treibhausgaskonzentrationen verändern. Diese Änderungen sind allerdings komplex und von verschiedenen sich teilweise konkurrierenden Mechanismen abhängig. Deshalb sind die Änderungen sehr unsicher und können je nach Jahreszeit verschieden ausfallen. Im Winter zeigt sich kein konsistentes Bild betreffend Änderungen der maximalen Niederschläge (1-5 Tagessummen). Allerdings führen die steigenden Temperaturen zu einem Anstieg der Schneefallgrenze und somit dürfte mehr Niederschlag in Form von Regen anstatt Schnee fallen. Obwohl im Sommer die Niederschlagssummen insgesamt abnehmen, gibt es Studien (z.B. Christensen and Christensen 2007; Frei et al. 2006), die einen Anstieg der Starkniederschläge postulieren. Es gibt allerdings grosse Unsicherheiten über diese Änderungen und nicht alle Modelle finden diesen Anstieg.

Ein anderer wichtiger Effekt im Zusammenhang mit Niederschlagsextremen sind **Trockenperioden**. Für Sommer zeigen die Modellresultate klare Tendenzen hin zu längeren Phasen ohne Niederschlag. Allerdings sind auch hier die Unsicherheiten gross und je nach Modell ändert sich die Länge der Phasen ohne Niederschlag von nicht signifikant bis hin zu einer Zunahme von 60% gegen Ende des 21. Jahrhunderts. Diese Phasen längerer Trockenheit, zusammen mit weniger Niederschlag und erhöhter Verdunstung bei wärmeren Temperaturen könnte das Risiko für Dürren erhöhen. Quantitative Aussagen dazu sind allerdings im Moment sehr unsicher.

Ein beträchtliches Schadenspotential geht von Windstürmen aus. Da hier die genaue Kenntnis von Windspitzen zentral ist, aber heutige Klimamodelle diese noch nicht explizit simulieren können, ist das Vertrauen in Projektionen von Stürmen tief (cf. Tab. 4). Zudem gibt es keine robusten Projektionen für starke Windstürme, obwohl Änderungen nicht ganz ausgeschlossen werden können. Während nördlich der Schweiz eher stärkere Windstürme erwartet werden (Donat et al. 2010; Leckebusch et al. 2006; Schwierz et al. 2010) gibt es Tendenzen für schwächere Winterstürme in der Mittelmeerregion. Quantitative Aussagen können nicht gemacht werden, zumal die Abschätzungen stark von den verwendeten Definitionen abhängen (Raible et al. 2008).

Sehr unklar sind die Änderung von komplexen Extremereignissen wie Hagel, Tornados oder starken Schneefällen. Bei diesen Phänomenen fehlen sowohl eine prozessbasierte Erwartung, wie auch Tendenzen in den Modellen, da die Phänomene zu kleinräumig sind, um aufgelöst zu werden.

5.6 Die neuen Szenarien im Vergleich mit denen von 2007

Die neuen Resultate von CH2011 stimmen weitgehend mit den früher publizierten Szenarien von 2007 überein. Unterschiede können zum grössten Teil einer neuen Generation von Klimamodellen, verbesserten statistischen Methoden und der Verwendung einer aktuelleren Referenzperiode zugeschrieben werden. Klimamodelle und statistische Methoden werden in den kommenden Jahren weiter entwickelt werden. Auch werden mehr Messdaten zur Verfügung stehen. Als Folge davon werden regelmässige Aufdatierungen der Klimaänderungsszenarien im Abstand von wenigen Jahren notwendig sein.

6 Referenzen

- Abegg B., 1996: Klimaänderung und Tourismus. Klimafolgenforschung am Beispiel des Wintertourismus in den Schweizer Alpen. Zürich.
- Amt für Natur und Umwelt Graubünden, 2009: Klimawandel in Graubünden.
- 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.
- Bader S. und H. Bantle, 2004: Das Schweizer Klima im Trend. Temperatur- und Niederschlagsentwicklung 1864-2001. Veröffentlichung der MeteoSchweiz Nr. 68, Zürich.
- Baudirektion Kanton Zürich, AWEL, 2007: Auswirkungen des Klimawandels und mögliche Anpassungsstrategien, 2007, Zürich.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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
- CH2011 (2011), *Swiss Climate Change Scenarios CH2011*, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 pp. ISBN: 978-3-033-03065-7.
- Christensen, J. H., and O. B. Christensen, 2007: A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. *Climatic Change*, 81, 7–30, doi: 10.1007/s10584-006-9210-7.
- Dobson A.J., 1990: *Introduction to Generalized Linear Models*. Chapman and Hall, 174 pp.
- Donat, M. G., G. C. Leckebusch, J. G. Pinto, and U. Ulbrich, 2010: European storminess and associated circulation weather types: future changes deduced from a multi-model ensemble of GCM simulations. *Climate Research*, 42, 27–43, doi: 10.3354/cr00853.
- Fischer, E. M., and C. Schär, 2009: Future changes in daily summer temperature variability: driving processes and role for temperature extremes. *Climate Dynamics*, 33, 917–935, doi:10.1007/s00382-008-0473-8.
- Fischer, E. M., and C. Schär, 2010: Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. *Nature Geoscience*, 3, 398–403, doi: 10.1038/ngeo866.
- 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.
- Frei, C., 2006: Eine länderübergreifende Niederschlagsanalyse zum August Hochwasser 2005, Ergänzung zum Arbeitsbericht 211. Vol. 213, MeteoSchweiz.
- Frei C., 2006: Die Klimazukunft der Schweiz – eine probabilistische Projektion. Bericht verfügbar unter www.meteoschweiz.ch.

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.

Giorgi, F., X. Bi, and J. Pal, 2004: Mean, interannual variability and trends in a regional climate change experiment over Europe. II: climate change scenarios (2071–2100). *Climate Dynamics*, 23, 839–858, doi: 10.1007/s00382-004-0467-0.

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.

IPCC, 2007b: *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.

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

Leckebusch, G. C., and U. Ulbrich, 2004: On the relationship between cyclones and extreme windstorm events over Europe under climate change. *Global and Planetary Change*, 44, 181–193, doi: 10.1016/j.gloplacha.2004.06.011.

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

Mc Cullagh P. and Nelder J. A., 1989: *Generalized Linear Models*, 2nd ed. Monogr. on Statistics and Appl. Probability, No. 37, Chapman and Hall, 511 pp.

Meehl, G. A., C. Tebaldi, and D. Nychka, 2004: Changes in frost days in simulations of twentyfirst century climate. *Climate Dynamics*, 23, 495–511, doi: 10.1007/s00382-004-0442-9.

Moss, R. H., and Coauthors, 2010: The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747–756, doi: 10.1038/nature08823.

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.

Nakicenovic, N., and R. Swart, 2000: *IPCC Special Report on Emissions Scenarios*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 570 pp.

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.

OcCC 2003: *Extremereignisse und Klimaänderung*. Herausgeber: Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung (OcCC), Bern.

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.

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.

ProClim-Forum for Climate and Global Change, 2005: *Hitzesommer 2004*, Synthesebericht, Bern.

Raible, C. C., P. M. Della-Marta, C. Schwierz, H. Wernli, and R. Blender, 2008: Northern hemisphere extratropical cyclones: A comparison of detection and tracking methods and different reanalyses. *Monthly Weather Review*, 136, 880–897, doi: 10.1175/2007MWR2143.1.

Rebetez M, Reinhard M., 2008: Monthly air temperature trends in Switzerland 1901-2000 and 1975-2004, *Theor. Appl. Climatol.*, 91, 27-34.

Schär, C., P. L. Vidale, D. Lüthi, C. Frei, C. Häberli, M. A. Liniger, and C. Appenzeller, 2004: The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 427, 332–336, doi: 10.1038/nature02300.

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: 10.1029/2004GL020255.

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.

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.

Schwierz, C., P. Köllner-Heck, E. Zenklusen Mutter, D. N. Bresch, P. L. Vidale, M. Wild, and C. Schär, 2010: Modelling European winter wind storm losses in current and future climate. *Climatic Change*, 101, 485–514, doi: 10.1007/s10584-009-9712-1.

Sen, P.K., 1968: Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau, *Journal of the American Statistical Association* 63: 1379-1389.

Seneviratne, S. I., D. Lüthi, M. Litschi, and C. Schär, 2006: Land-atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature*, 443, 205–209, doi: 10.1038/nature05095.

Theil, H., 1959: A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. I, II, III, *Nederl. Akad. Wetensch., Proc.* 53: 386-392, 521-525, 1397-1412.

Wanner H., D. Gyalistras, J. Luterbacher, R. Rickli, E. Salvisberg, C. Schmutz, 2000: Klimawandel im Schweizer Alpenraum. vdf Hochschulverlag AG, ETH Zürich.

WHO, 2008: Impacts of Europe's changing climate – 2008 indicator-based assessment, EEA Report No 4/2008. doi 10.2800/48117.

Wilks D; 2006: Statistical methods in atmospheric sciences, 2nd edition, Academic Press, Amsterdam.

Wüthrich C., 2008: Lange Schneemessreihen der Schweiz, Aufarbeitung der längsten Schneemessreihen und Trendanalyse ausgewählter Schneeparameter, Geographisches Institut der Universität Bern, Diplomarbeit, pp. 102.