



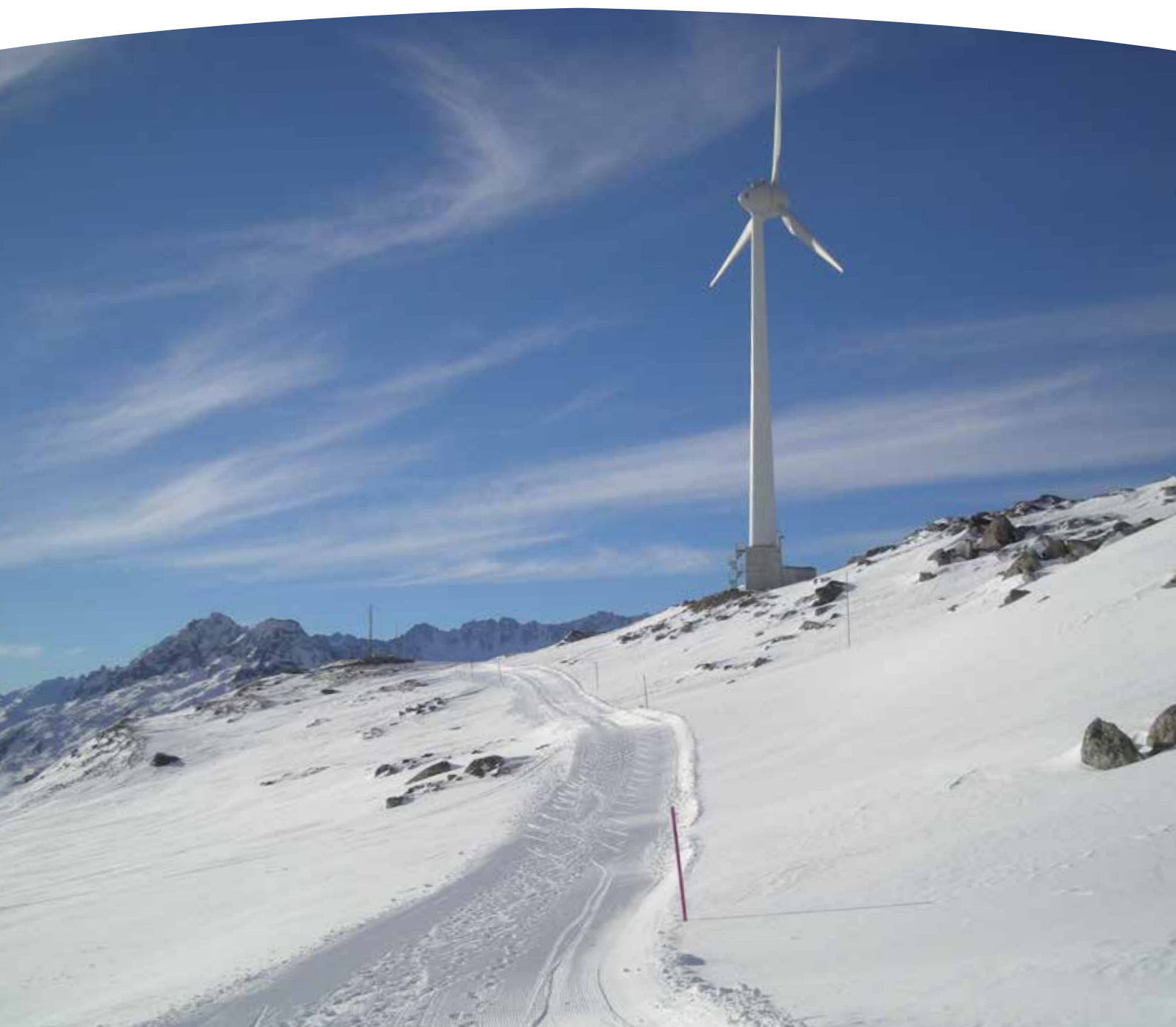
Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement des Innern EDI
Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz

Fachbericht MeteoSchweiz Nr. 246

Klimabericht Urschweiz 2013

Im Auftrag der Kantone Uri, Schwyz, Nidwalden, Obwalden



Klimabericht Urschweiz 2013

Autoren MeteoSchweiz

Dr. Stephan Bader
Michael Begert
Dr. Mischa Croci-Maspoli
Dr. Regula Gehrig
Dr. Simon Scherrer
Thomas Schlegel
Dr. Elias Zubler

Teilkapitel Gletscher

Dr. Andreas Bauder (ETH Zürich)

Projektleitung

Thomas Schlegel, MeteoSchweiz
Christian Wüthrich, Kanton Uri

Auftraggeber

Amt für Umweltschutz, Kanton Uri
Amt für Umweltschutz, Kanton Schwyz
Amt für Umwelt, Kanton Nidwalden
Amt für Landwirtschaft und Umwelt, Kanton Obwalden

Titelfoto

Windrad Gütsch, © Andermatt-Urserntal Tourismus

Papier

Plano Art, FSC Mix (aus vorbildlich bewirtschafteten
Wäldern und anderen kontrollierten Herkünften)

Empfohlene Zitierung

MeteoSchweiz, 2013, Klimabericht Urschweiz 2013,
Fachbericht MeteoSchweiz, 246, 66 pp.

Herausgeber

Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie,
MeteoSchweiz, © 2013

Vorwort

Der Klimawandel lässt sich wissenschaftlich klar belegen. Dass der Mensch mit seinem Handeln wesentlich dazu beiträgt, wird heute kaum mehr bezweifelt. Viele Aspekte des Klimawandels, wie beispielsweise die stetig zunehmende mittlere Temperatur, sind für uns Menschen schwierig wahrzunehmen. Die Erwärmung verläuft langsam und zieht sich über mehrere Jahrzehnte hin. Andere Auswirkungen des Klimawandels, wie der Rückgang unserer Alpengletscher, sind jedoch für uns alle offensichtlich. Wir müssen uns den Herausforderungen des Klimawandels stellen, weltweit, aber auch auf regionaler Ebene, dort wo wir leben.

„Beobachte was früher war, dann weisst Du was kommen wird,“ besagt ein Sprichwort. In diesem Sinne liefert die vorliegende Arbeit eine wichtige Grundlage für Massnahmen, die es im Kontext des Klimawandels zu ergreifen gilt. Der vorliegende Bericht wurde im Auftrag der Kantone Uri, Schwyz, Nidwalden und Obwalden verfasst. Er beschreibt den beobachteten Klimawandel und die zu erwartenden Veränderungen bis ins Jahr 2060 im Gebiet der Urschweiz. Wie weit ist der Klimawandel bei uns bereits fortgeschritten? Mit welchen Veränderungen müssen wir in Zukunft rechnen? Wie stark werden wir betroffen sein? Dies sind Fragen, die sich wohl jeder schon einmal gestellt hat.

Massnahmen im Kanton Uri, aber auch in der übrigen Schweiz, sollten in zweierlei Hinsicht ergriffen werden. Einerseits müssen wir alle einen Beitrag leisten, um den Klimawandel zu vermindern. Das CO₂-Gesetz des Bundes ist ein erster Schritt

dazu. Mittelfristig müssen wohl noch höhere Ziele angestrebt werden. Andererseits rücken regionale und lokale Anpassungsmassnahmen immer mehr ins Zentrum unseres Tuns im Umgang mit dem Klimawandel. Anpassungsmassnahmen sollen die Folgen des Klimawandels abfedern und die Verletzlichkeit von Infrastruktur, Raumordnung, Wirtschaft und Gesellschaft reduzieren.

Der Kanton Uri will sich den Herausforderungen, des Klimawandels stellen. Die regionalen Veränderungen der Vergangenheit und der Zukunft zu kennen, ist eine wichtige Voraussetzung dafür. Der vorliegende Bericht liefert dazu einen entscheidenden und wissenschaftlich abgestützten Beitrag. Er schafft die Grundlage um Gefahren und Chancen des Klimawandels richtig einzuschätzen und entsprechend zu handeln. Mein Dank gilt den Wissenschaftlern des Bundesamts für Meteorologie und Klimatologie (MeteoSchweiz) und der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), die die Klimadaten aufgearbeitet und die Erkenntnisse in diesem fundierten Bericht zusammengetragen haben.

Barbara Bär, Regierungsrätin Kanton Uri



Zusammenfassung

4

Die Klimaänderung in den letzten Jahrzehnten hin zu wärmeren Temperaturen lässt sich in den globalen Mittelwerten der Temperaturmessungen eindeutig nachweisen. Verschiedene Studien haben gezeigt, dass die Klimaerwärmung auch auf europäischer und nationaler Ebene messbar ist. Wie dieser Bericht zeigt, ist die Klimaänderung auch im Gebiet der Urschweiz (Kantone Uri, Schwyz, Nidwalden, Obwalden) feststellbar. Die Auswirkungen sind vielfältig und sind nicht nur in der Temperatur, sondern auch im Niederschlag und beim Schnee sichtbar.

Historische Klimaentwicklung im Gebiet der Urschweiz

Die Klimaerwärmung ist in den Messdaten der Stationen im Gebiet der Urschweiz eindeutig nachweisbar. Die Erwärmung seit Beginn der Messungen im 19. Jahrhundert beträgt bis heute im Winter je nach Region zwischen +1 Grad C und etwas über +2 Grad C pro 100 Jahre, im Sommer liegt sie zwischen +1 Grad C und +1.5 Grad 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 stärker ausgeprägt sind.

Die Veränderung des Klimas lässt sich auch in gesellschaftlich relevanten Klimaindikatoren feststellen. Alle Messungen an den Urschweizer Messstationen 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 Tagen. Die Sommertage hingegen nehmen markant zu. Abgesehen von hohen Lagen, wo Sommertage noch immer sehr selten sind, kamen alle 10 Jahre zwischen drei und zwölf zusätzliche Sommertage dazu. Relativ gesehen gibt es heute an tiefen und mittleren Lagen rund 50 bis 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 Anstieg der Temperatur wirkt sich auch auf die Gletscher und die Vegetation der Urschweiz aus. Sowohl bezüglich ihrer Länge wie auch bezüglich ihrer Mächtigkeit weisen die Gletscher in den letzten Jahren einen sichtbaren Rückgang auf. Die Vegetation beginnt sich im Frühjahr früher zu entwickeln und die Vegetationsperiode hat sich verlängert. Der Niederschlag im Alpenraum und somit auch im Gebiet der Urschweiz weist grosse Schwankungen von Jahr zu Jahr auf. Jahre bzw. Phasen mit viel Niederschlag wechseln sich mit trockeneren Perioden ab. 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. Ein Teil der ausgewerteten Stationen im Gebiet der Urschweiz zeigt in den letzten 50 Jahren einen signifikanten Rückgang in der jährlichen Anzahl Tage mit Gesamtschneehöhen ≥ 30 cm sowie der Tage mit Neuschnee. Eine Übersicht zu allen untersuchten Parametern ist in Tabelle A zusammengestellt.



Tell-Museum, Bürglen
© Angel Sanchez



Gelebtes Brauchtum, Altdorf
© Angel Sanchez

[illegible]

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	6
1 Datengrundlage & Methoden	8
1.1 Messstandorte	8
1.2 Bodenmessdaten	8
1.3 Datenqualität / Datenaufarbeitung	8
1.4 Normperiode / Normwerte	9
1.5 Klimaszenariendaten	9
1.6 Statistische Methoden	9
2 Das Klima der Urschweiz	11
3 Historische Klimaentwicklung	15
3.1 Einleitung	15
3.2 Temperatur	16
3.2.1 Temperaturentwicklung	16
3.2.2 Temperaturtrends	18
3.3 Niederschlag	19
3.3.1 Niederschlagsentwicklung	19
3.3.2 Niederschlagstrends	21
3.4 Entwicklung der Föhnhäufigkeit	22
3.5 Lange Schneereihen	24
3.5.1 Tage mit Neuschnee ≥ 1 cm	24
3.5.2 Maximaler Tagesneuschnee	25
3.5.3 Neuschneesumme	26
4 Klimaindikatoren	29
4.1 Einleitung	29
4.2 Klimaindikatoren der Messgrösse Temperatur	31
4.2.1 Frosttage	31
4.2.2 Sommertage	32
4.2.3 Nullgradgrenze	33
4.3 Klimaindikatoren der Messgrösse Niederschlag	34
4.3.1 Tage mit Niederschlag ≥ 20 mm: Starkniederschlag	34
4.3.2 Trockenperioden	35
4.4 Klimaindikatoren der Messgrösse Schnee	37
4.4.1 Tage mit Neuschnee	37
4.4.2 Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm	38
4.5 Gletscher der Urschweiz als Klimaindikator	39
4.5.1 Allgemein	39
4.5.2 Gletscherveränderungen	40
4.5.3 Bedeutung und Konsequenzen	43
4.6 Vegetation der Urschweiz als Klimaindikator	44
4.6.1 Der Frühlingsindex	45
4.6.2 Ausgewählte Phänologische Reihen der Urschweiz	46
5 Zukünftige Klimaentwicklung	51
5.1 Einleitung	52
5.2 Emissionsszenarien	53
5.3 Szenarien für Temperatur und Niederschlag	54
5.4 Klimaindikatoren	57
5.5 Wetterextreme	62
6 Referenzen	64



1 | Datengrundlage & Methoden

1.1 Messstandorte

Es wurden Daten von ausgewählten Bodenmessstandorten im Gebiet der Urschweiz verwendet. Die geographische Verteilung dieser Stationen ist in Abbildung 1.1 ersichtlich. Die genaue Lage der Stationen und deren Höhe sind in Tabelle 1.1 enthalten.

Tabelle 1.1:

Liste der verwendeten Stationen mit Name, Höhe über Meer und CH-Koordinaten.

Station	Abkürzung	Höhe m ü.M.	CH-Koordinaten
Altdorf	ALT	438	690174 / 193558
Einsiedeln	EIN	910	699982 / 221059
Engelberg	ENG	1036	674157 / 186097
Andermatt	ANT	1442	687476 / 165040
Gütsch ob Andermatt	GUE	2287	690140 / 167590
Stans	SNS	438	668918 / 202459
Sarnen	SRN	475	661570 / 193640
Göschenen	GOS	1099	687775 / 169085
Urnerboden	URB	1395	712650 / 195250
Lachen	LAC	426	707420 / 227220

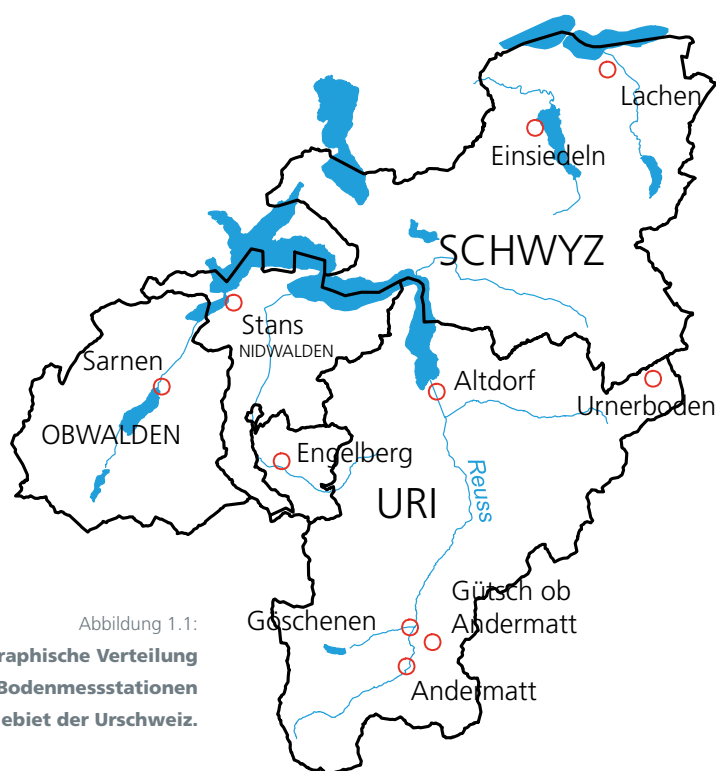


Abbildung 1.1:
Geographische Verteilung der Bodenmessstationen im Gebiet der Urschweiz.

1.2 Bodenmessdaten

Die Datengrundlage dieses Berichts basiert auf Stationen des MeteoSchweiz Messnetzes im Gebiet der Urschweiz (Kantone Uri, Schwyz, Nidwalden, Obwalden). Dazu wurden Stationen des schweizerischen Klimabeobachtungs-Messnetzes (Swiss NBCN) (Begert et al. 2007) und des schweizerischen Klimaergänzungs-Messnetzes (NSCN) verwendet. Die Stationsauswahl wird dabei aufgrund verschiedener Kriterien festgelegt. In erster Linie sollen die Stationen die verschiedenen klimatologischen Gegebenheiten der Gebirgskantone abdecken (Kapitel 1.2). Zudem müssen die Datenreihen genügend weit in die Vergangenheit zurückreichen, damit allfällige Veränderungen überhaupt feststellbar sind.

Die Datenverfügbarkeit sollte hierfür mehrere Jahrzehnte betragen. 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 1.3). Ein umfassender Datensatz liegt für die Zeitspanne 1961 bis 2012 in aufgearbeiteter Form vor (langjährige Normperioden 1961-1990 und 1981-2010).

1.3 Datenqualität und Datenaufarbeitung

Sämtliche verwendeten Daten wurden vorgängig auf ihre Qualität hin überprüft. Dies geschieht an der MeteoSchweiz routinemässig mit automatischen und manuellen Verfahren.

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.

1.4 Normperiode und 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 bestimmte Periode nasser, wärmer oder sonnenreicher war als die Referenz.

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 zu erwartenden Klima entsprechen. In diesem Bericht wird grundsätzlich die Normperiode 1981-2010 verwendet. Die Beschreibung der historischen Klimaentwicklung (Kapitel 3) basiert auf der Normperiode 1961-1990 (Begert et al. 2013).

1.5 Klimaszenariendaten

Um ein Bild über die zukünftige Klimaentwicklung der Schweiz zu erhalten, wurden im Jahr 2011 die Szenarien zur Klimaänderung in der Schweiz CH2011 publiziert (CH2011 2011). Wie sich die Klimaänderung in den verschiedenen Regionen der Schweiz auswirkt wird im MeteoSchweiz Fachbericht „Klimaszenarien Schweiz – eine regionale Übersicht“ beschrieben (MeteoSchweiz 2013).

In diesem Bericht werden quantitative Aussagen zur erwartenden Änderung der mittleren Temperatur, des mittleren Niederschlags, sowie einer Auswahl von Klimaindikatoren präsentiert. Szenarien sind mit relativ grossen Unsicherheiten verbunden. Deshalb wird neben der Berechnung der Temperatur- und Niederschlagsänderung immer auch der dazu gehörende Unsicherheitsbereich der Aussage bestimmt.

1.6 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.

Bei Trendanalysen wird jeweils angegeben wie eindeutig der Trend ist. Dabei werden drei verschiedene Signifikanzniveaus von a) stark signifikant, b) signifikant zu c) nicht signifikant unterschieden (Tabelle 1.2). 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 die so bestimmten saisonalen Nullgradgrenzen (z.B. Sommer 1961 bis 2012) wird dann über eine lineare Regression die zeitliche Veränderung der Nullgradgrenze quantifiziert (Trend in m pro 10 Jahre sowie Signifikanz über den p-Wert).

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.

Tabelle 1.2:
Darstellung und Beschreibung der im Bericht verwendeten Signifikanzniveaus.



Talboden von Schwyz mit Vierwaldstättersee, Rigi Hochflue und Lauerzersee



Urnersee mit Gitschen und Urirotstock



Kite-Surfer auf dem Urnersee

2| Das Klima der Urschweiz

11

Auf der Alpennordseite, sowie im Gebiet der Urschweiz wird das Klima primär durch Luftströmungen vom 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.

Der Föhn als spezielles Klimaelement

Eine Eigenheit des Urschweizer Klimas ist der Föhn (Gutermann et al. 2012). Föhn tritt überall dort auf, wo Gebirgsketten von kräftigen Winden überströmt werden. Als wesentlicher Effekt des Föhns treten auf der strömungsabgewandten Seite des Gebirges warme und vor allem trockene Fallwinde auf, welche häufig Sturmstärke erreichen. In den betroffenen Gebieten stellt der Föhn eine der markantesten Wettererscheinungen dar. Im Alpenraum ist er vor allem im Frühling und etwas weniger häufig im Herbst aktiv. Während des Sommers sind Föhnlagen hingegen seltener.

Die klassische Süd-Föhnsituation ist mit einer Staubeiwölkung am Alpensüdhang verbunden. Die Wolkenwand am Alpensüdhang wird von der Nordseite her als sogenannte Föhnmauer wahrgenommen. Nicht selten reichen dabei die Wolken etwas über den Alpenkamm hinweg nach Norden, sodass auch etwas nördlich des Alpenkamms noch Niederschlag fallen kann, z.B. über den Gotthard hinweg bis in die Region Andermatt. Mit dem Absinken der Luftmassen lösen sich die Wolken jedoch auf. Dieser Bereich mit sehr klarer Luft und blauem Himmel wird als Föhnfenster bezeichnet.

Durch die erwärmte Föhnluft und die dank Wolkenauflösung erhöhte Sonnenscheindauer wird das Klima der Föhngebiete vergleichsweise milder. Die rasche Schneeschmelze und die herbstlichen Föhnlagen verlängern die Vegetationsperiode und führen damit zu einer bemerkenswerten landwirtschaftlichen Begünstigung. Neben dieser klimatischen Begünstigung ist der Föhn jedoch wegen seines erheblichen Potenzials für Sturmschäden gefürchtet.



Schächental
© D. Gerstgrasser

Die Temperaturen – von mild bis arktisch

Die Temperaturen in der Urschweiz sind primär abhängig von der Höhenlage. In den Tieflagen der Täler, Beispiel Altdorf (438 m ü.M.), liegt die Durchschnittstemperatur im Januar bei rund 1 Grad C, im Juli bei knapp 19 Grad C. Die mittlere Jahrestemperatur erreicht knapp 10 Grad C (Normperiode 1981-2010). In Höhenlagen um 1000 m ü.M., Beispiele Einsiedeln und Engelberg, erreicht die Januartemperatur -2 Grad C, die Julitemperatur zwischen 15 Grad C und 16 Grad C. Im arktischen Klima des Hochgebirges auf rund 2300 m ü.M., Beispiel Gütsch ob Andermatt, sinkt die durchschnittliche Januartemperatur auf -6 Grad C, während die durchschnittliche Julitemperatur nur noch 8.5 Grad C erreicht (Abbildung 2.1).

Winterliche Kaltluftseen

Kalte Luft sammelt sich im Winterhalbjahr in den Hochtälern der Alpen - sogenannte Kaltluftseen. Bei winterlichen Schönwetterlagen kann hier die Luft während der langen Nächte sehr stark auskühlen. Andermatt (1500 m ü.M.) im hochgelegenen Urserental zeigt mit einer Januartemperatur von knapp -5 Grad C das typische Kaltluftsee-Klima. Eine solche Januartemperatur ist sonst erst auf rund 2000 m ü.M. zu erwarten.

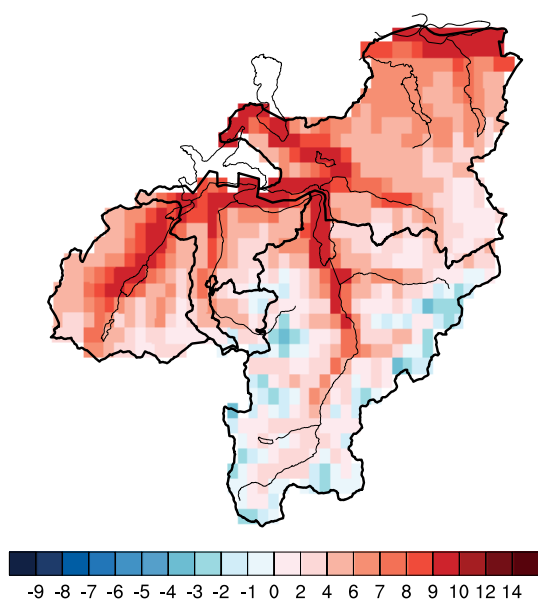


Abbildung 2.1:

Mittlere Jahrestemperatur (°C) in der Urschweiz auf der Basis der Normperiode 1981-2010. Die Gittergrösse beträgt rund 2 x 2 km.

Niederschlagsreicher Alpennordrand

Der Alpennordrand im Bereich Muotathal, Sihlsee, Wägitalersee ist zusammen mit dem Gebiet Maggia-Verzasca im Tessin die niederschlagsreichste Region der Schweiz. Die Messstationen liefern durchschnittliche Jahresmengen von knapp 1900 mm bis 2500 mm (Abbildung 2.2). Im Mittelland fallen als Vergleich im Durchschnitt 1000 mm bis 1100 mm pro Jahr. Die Messstation Hoch-Ybrig zeigt mit 2504 mm die dritthöchste durchschnittliche Jahresniederschlagsmenge der Schweiz. Die grössten Niederschlagsmengen fallen in den Sommermonaten. Am Messstandort Alpthal liefert der Juli im Durchschnitt rund 250 mm, der Januar mit 130 mm nur rund die Hälfte davon.

In den grossen Taleinschnitten Richtung Gotthard und Brünig ist das Niederschlagsregime weit weniger intensiv. Es sind primär topographische Eigenschaften, welche zur verhältnismässig geringen Niederschlagstätigkeit an den Stationen Altdorf, Stans und Sarnen beitragen. Diese Täler sind einerseits durch Gebirgszüge von den vorwiegend aus westlichen Richtungen über die Schweiz ziehenden Niederschlagszonen etwas abgeschirmt, andererseits tragen vermutlich auch die häufigen Föhnperioden zur geringeren Niederschlagstätigkeit bei. Altdorf, Stans und Sarnen erhalten im Jahresdurchschnitt Niederschlagsmengen zwischen rund 1200 mm und 1300 mm. Auch hier fallen in den Sommermonaten grössere Mengen als in den Wintermonaten.

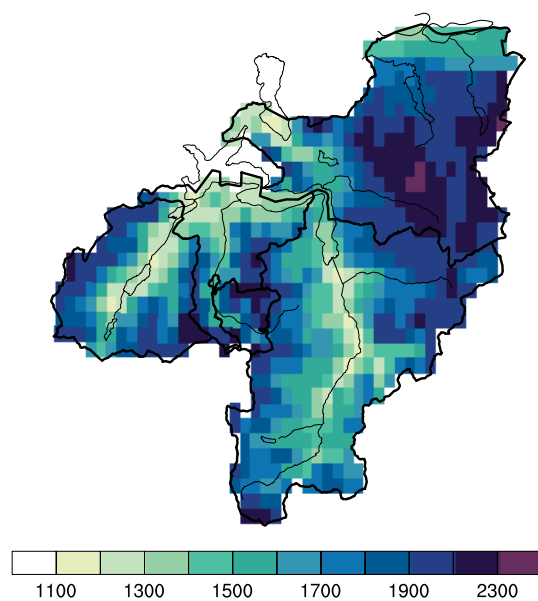


Abbildung 2.2:

Mittlerer Jahresniederschlag (mm) in der Urschweiz auf der Basis der Normperiode 1981-2010. Die Gittergrösse beträgt rund 2 x 2 km.

Mehr Sonne im Alpeninnern als am Alpennordrand

Die durchschnittliche jährliche Sonnenscheindauer wird entscheidend über die herbstlichen und winterlichen Nebel-lagen gesteuert. Begünstigt sind dementsprechend höher gelegene Regionen oberhalb der Nebelgrenze (Abbildung 2.3). Auffallend ist die hohe relative Sonnenscheindauer im Reusstal zwischen Altdorf und Andermatt. Auch hier muss bei der Interpretation wie beim reduzierten Niederschlag die wolkenauflösende Föhnwindwirkung berücksichtigt werden.

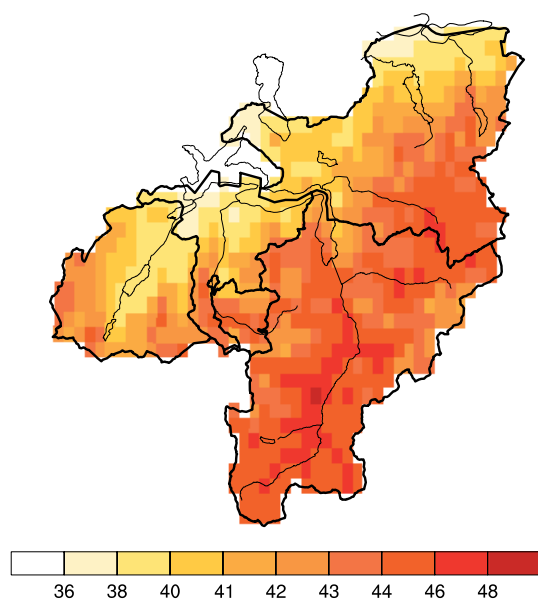


Abbildung 2.3:

Mittlere jährliche relative Sonnenscheindauer (%) in der Urschweiz 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. Die Gittergrösse beträgt rund 2 x 2 km.

Kühe auf dem Surenenpass
© D. Gerstgrasser



Laghi della Valletta
© Andermatt-Urserntal Tourismus



Rigi im Abendrot
© D. Gerstgrasser



Furkagebiet
© Angel Sanchez



3| Historische Klimaentwicklung

15

Die Klimaerwärmung in der Urschweiz ist in den Messdaten der Temperatur eindeutig nachweisbar. Beim mittleren Niederschlag lassen sich grossräumig bislang keine langfristigen Änderungen nachweisen. Die wichtigsten Resultate können wie folgt zusammengefasst werden:

Seit 1864 wird ein stark signifikanter positiver Temperaturtrend in allen Jahreszeiten von rund 0.1 Grad C pro 10 Jahre gemessen.

In der Periode 1961 bis 2012 sind im Frühling und im Sommer Temperaturtrends im Bereich von rund 0.5 Grad C pro 10 Jahre bzw. leicht darunter zu beobachten. Schwächere Temperaturtrends von rund 0.2 bis 0.3 Grad C sind für den Herbst und Winter feststellbar.

Grosse Schwankungen über Perioden von mehreren Jahren sind das Merkmal bei den Tagen mit Neuschnee und Neuschneesummen. Bei den maximalen täglichen Neuschneesummen sind diese Schwankungen eher klein, die Schwankungen von Jahr zu Jahr aber gross.

Die geringste Anzahl Tage mit Neuschnee und die kleinsten Neuschneesummen treten in den 1990er und 2000er Jahren auf. Fast so tiefe Werte wurden in den 1930er Jahren sowie in den späten 1950er Jahren gemessen. Die höchsten Werte dieser Grössen findet man in den 1970er und frühen 1980er Jahren.

3.1 Einleitung

Die Diskussion um die langfristige Klimaentwicklung wird in der Öffentlichkeit immer wieder dann aktuell, wenn sich Naturkatastrophen ereignen. Solche kurzfristige Extremereignisse wie Überflutungen durch anhaltende Starkniederschläge, Hitzewellen oder auch Lawinenwinter sind für jedermann wahrnehmbar. Daher wird in diesen Situationen das Thema Klimaänderung oft nur auf Extremereignisse und insbesondere auf die Änderungen in deren Häufigkeit und Intensität reduziert. Doch gerade hierzu sind heutzutage meist noch 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, wie zum Beispiel die allgemeine Temperaturzunahme, viel eindeutiger zum Ausdruck (Wanner et al. 2000; Begert et al. 2005). Das Klima, wie wir es erleben, ist nicht konstant, sondern eine Abfolge von deutlich wechselnden Bedingungen. Je nach Jahreszeit haben sich in der langfristigen Klimaentwicklung dabei nicht nur Wechsel, sondern eigentliche Klimasprünge ereignet, welche durchaus auch mit einer gewissen Dramatik verbunden sind.

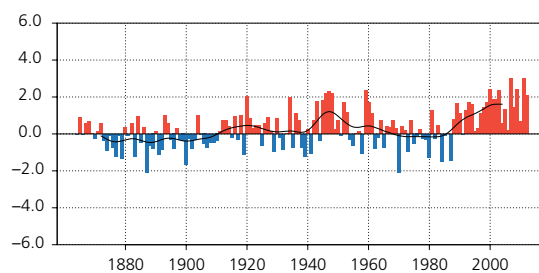
Verursacher klimatischer Änderungen und Sprünge sind seit jeher eine Reihe natürlicher Klimafaktoren, wie zum Beispiel die Schwankungen der Sonnenaktivität, Vulkanausbrüche oder auch Änderungen von Ozeanströmungen. Diese Klimafaktoren überlagern sich in vielfältiger Weise und führen schliesslich zu der zwar bekannten, aber bisher immer noch recht unverständenen alpinen Klimavariabilität (Wanner et al. 2000). Seit Beginn der Industrialisierung im 19. Jahrhundert ist der Mensch als wesentlicher Klimafaktor hinzugekommen. Mittels Emissionen von Treibhausgasen und Aerosolpartikeln aus Industrie, Verkehr und Haushalt, sowie mittels 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; IPCC 2013).

3.2 Temperatur

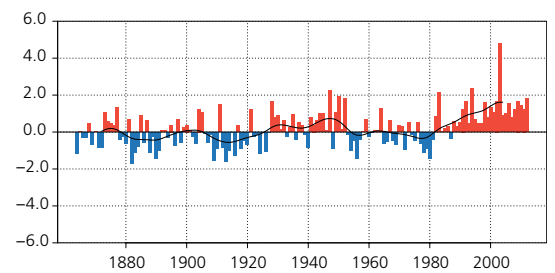
3.2.1 Temperaturentwicklung

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 ausgeprägten Temperatursprung im Laufe der 1980er Jahre (Abbildung 3.1). Ein ausgesprochen gleichmässiger langfristiger Temperaturverlauf im Frühling und Sommer ist zwischen 1960 und 1980 festzustellen. Die Frühlingstemperaturen weisen zudem auch vor 1940 eher geringe Variabilität in der langfristigen Temperaturentwicklung auf.

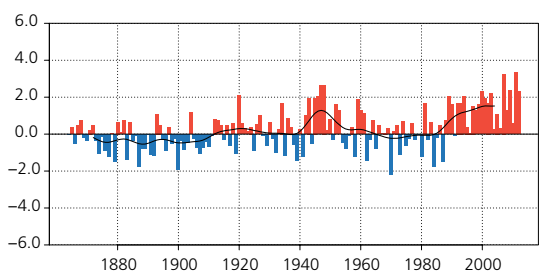
Altdorf, Frühling



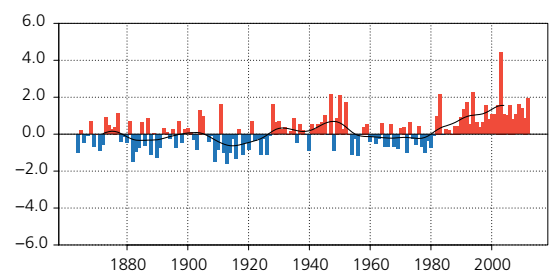
Altdorf, Sommer



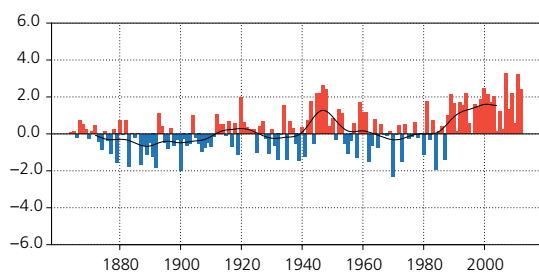
Engelberg, Frühling



Engelberg, Sommer



Einsiedeln, Frühling



Einsiedeln, Sommer

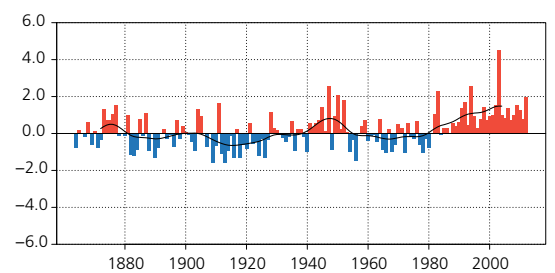


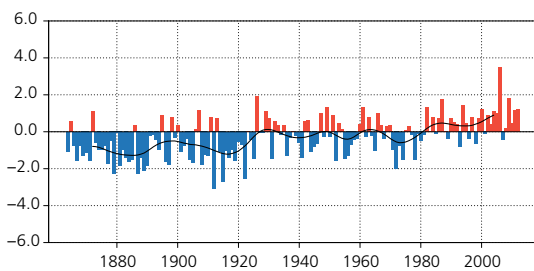
Abbildung 3.1:

Langjähriger Verlauf der Frühlingstemperatur (März bis Mai, links) und der Sommertemperaturen (Juni bis August, rechts) an den Messstationen Altdorf (oben), Engelberg (Mitte) und Einsiedeln (unten). 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 Altdorf 8.5°C, für Engelberg 4.8°C und für Einsiedeln 5.0°C. Die Sommer-Normtemperatur 1961-1990 beträgt für Altdorf 16.7°C, für Engelberg 13.2°C und für Einsiedeln 13.9°C.

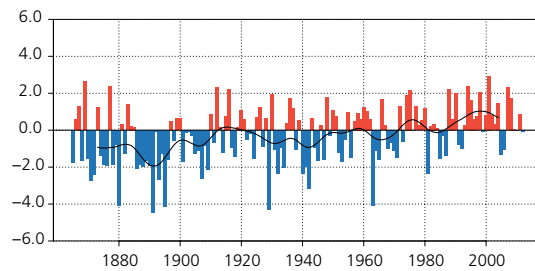
In den Jahreszeiten Herbst und Winter hat sich das Temperaturregime in der Zeit von 1864 und 2012 zweimal grundlegend geändert (Abbildung 3.2). Zwischen 1880 und 1900 sanken die Temperaturen insbesondere im Winter innert weniger Jahre für kurze Zeit auf ein bedeutend tieferes Niveau. Eine weitere Phase 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.

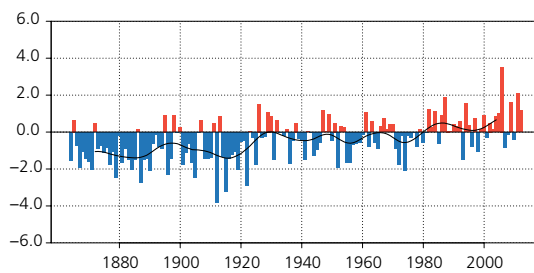
Altdorf, Herbst



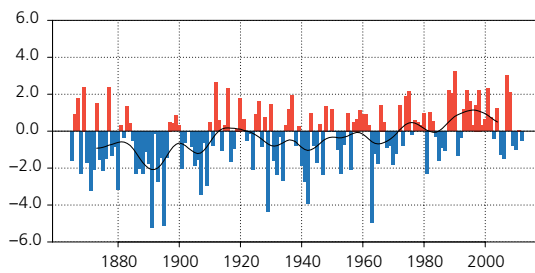
Altdorf, Winter



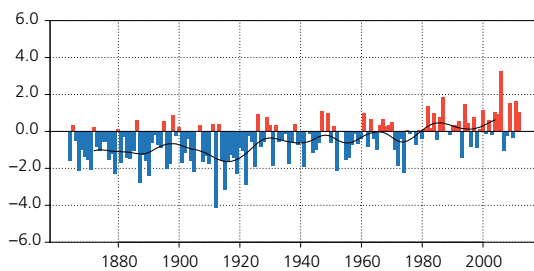
Engelberg, Herbst



Engelberg, Winter



Einsiedeln, Herbst



Einsiedeln, Winter

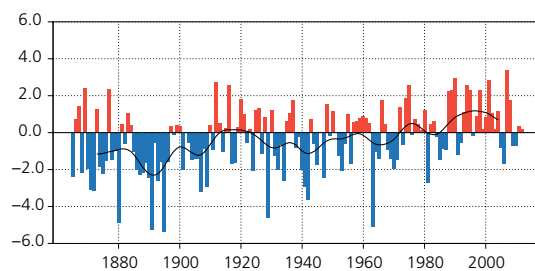


Abbildung 3.2:

Langjähriger Verlauf der Herbsttemperaturen (September bis November, links) und Wintertemperaturen (Dezember bis Februar, rechts) an den Messstationen Altdorf (oben), Engelberg (Mitte) und Einsiedeln (unten). 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 Altdorf 9.5°C, für Engelberg 6.4°C und für Einsiedeln 6.9°C. Die Winter-Normtemperatur 1961-1990 beträgt für Altdorf 1.3°C, für Engelberg -2.1°C und für Einsiedeln ebenfalls -2.1°C.

3.2.2 Temperaturtrends

Alle drei Messreihen (Altdorf, Engelberg, Einsiedeln) zeigen in der Periode 1864 bis 2012 in allen vier Jahreszeiten stark signifikante Trends zu höheren Temperaturen, was in guter Übereinstimmung mit früheren Auswertungen zu Temperaturtrends in der Schweiz steht (Begert et al. 2005; Bader und Bantle 2004; Rebetez und Reinhard 2008; Appenzeller et al. 2008). Die Temperaturtrends 1864 bis 2012 liegen alle um 0.1 Grad C pro Jahrzehnt. Leicht höhere Trends ergeben sich für die Messreihe Einsiedeln im Herbst und im Winter (Tabelle 3.1).

In der Periode 1961 bis 2012 sind im Frühling und im Sommer an allen drei Messstandorten vergleichbare Temperaturtrends im Bereich von rund einem halben Grad pro Jahrzehnt bzw. leicht darunter zu beobachten. Deutlich schwächere Temperaturtrends sind für den Herbst und Winter feststellbar, wobei Engelberg im Winter in den letzten 50 Jahren keine signifikante Temperaturänderung zeigt (Tabelle 3.2).

Tabelle 3.1:
Saisonale Temperaturtrends in Grad Celsius pro 10 Jahre in der Periode 1864 bis 2012. Signifikante Trends sind fett und rot (positiv) oder blau (negativ) dargestellt.

Station	Frühling (Mär. – Mai)	Sommer (Jun. – Aug.)	Herbst (Sep. – Nov.)	Winter (Dez. – Feb.)
Altdorf	+ 0.10°C (stark signifikant)	+ 0.10°C (stark signifikant)	+ 0.12°C (stark signifikant)	+ 0.12°C (stark signifikant)
Engelberg	+ 0.11°C (stark signifikant)	+ 0.09°C (stark signifikant)	+ 0.11°C (stark signifikant)	+ 0.12°C (stark signifikant)
Einsiedeln	+ 0.11°C (stark signifikant)	+ 0.08°C (stark signifikant)	+ 0.13°C (stark signifikant)	+ 0.14°C (stark signifikant)

Tabelle 3.2:
Saisonale Temperaturtrends in Grad Celsius pro 10 Jahre in der Periode 1961 bis 2012. Signifikante Trends sind fett und rot (positiv) oder blau (negativ) dargestellt.

Station	Frühling (Mär. – Mai)	Sommer (Jun. – Aug.)	Herbst (Sep. – Nov.)	Winter (Dez. – Feb.)
Altdorf	+ 0.47°C (stark signifikant)	+ 0.42°C (stark signifikant)	+ 0.25°C (stark signifikant)	+ 0.29°C (signifikant)
Engelberg	+ 0.51°C (stark signifikant)	+ 0.44°C (stark signifikant)	+ 0.22°C (signifikant)	+ 0.28°C (nicht signifikant)
Einsiedeln	+ 0.53°C (stark signifikant)	+ 0.43°C (stark signifikant)	+ 0.20°C (signifikant)	+ 0.33°C (signifikant)



Kletterer am Axen
© perretfoto.ch



Schächentaler Höhenweg
© Angel Sanchez



Biker im Furkagebiet
© Angel Sanchez

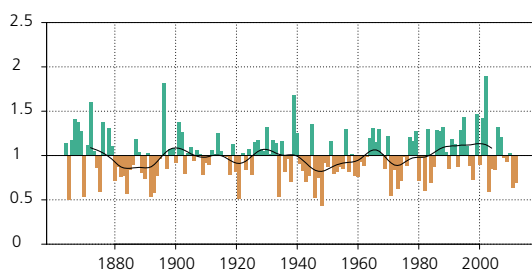
3.3 Niederschlag

3.3.1 Niederschlagsentwicklung

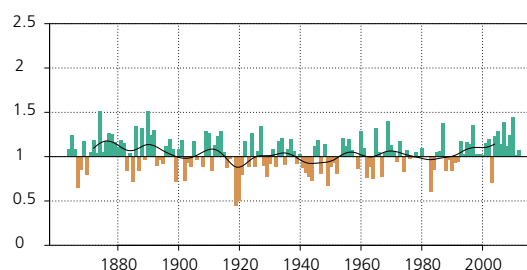
In den Niederschlags-Messreihen treten regional zum Teil recht verschiedene Muster auf. Insbesondere sind periodische Änderungen unterschiedlich stark ausgeprägt. Auffallend am Messstandort Einsiedeln ist die markante Frühlingstrockenheit in den 1880er und 1890er Jahren sowie in den 1940er Jahren und die ebenfalls markante Sommertrockenheit Ende 1940er und Anfang 1950er Jahre (Abbildung 3.3). Demgegenüber sind die sehr feuchten Sommer am Messstandort Engelberg Ende 1880er und Anfang 1890er Jahre in Einsiedeln nicht zu finden. Auch die aktuell wieder feuchteren Sommer in Engelberg sind in der Reihe von Einsiedeln nicht ausgeprägt ersichtlich.

Zu den extrem tiefen Sommerniederschlägen der beiden Jahre 1919 und 1920 in der Messreihe Altdorf bedarf es folgender Erklärung: Ende 1920 musste die Station leicht verlegt werden, weil Bäume in der näheren Umgebung die Messungen beeinflussten. In den Jahren 1919 und 1920 sind die Monatssummen im Sommer deutlich zu tief, was allenfalls mit diesen Bäumen im Zusammenhang steht. Das Problem ist nur in den Sommermonaten zu sehen und lässt sich mittels Bearbeitung (Homogenisierung) nicht beheben. Es führt aber leider dazu, dass die Sommer-Summen der Jahre 1919 und 1920 die tiefsten der gesamten Messreihe sind, was jedoch nicht der Wirklichkeit entspricht.

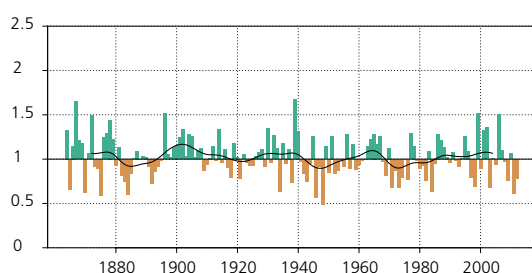
Altdorf, Frühling



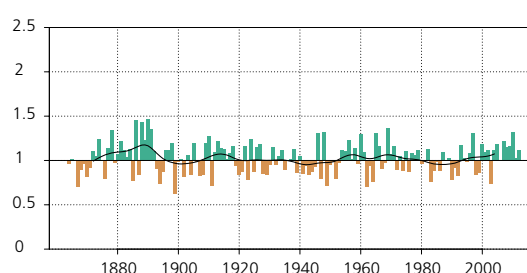
Altdorf, Sommer



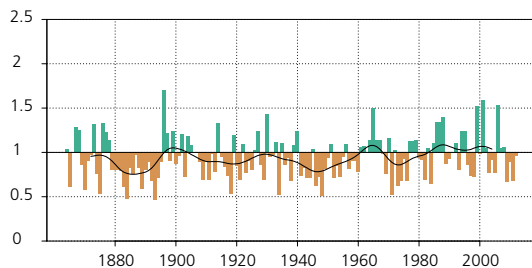
Engelberg, Frühling



Engelberg, Sommer



Einsiedeln, Frühling



Einsiedeln, Sommer

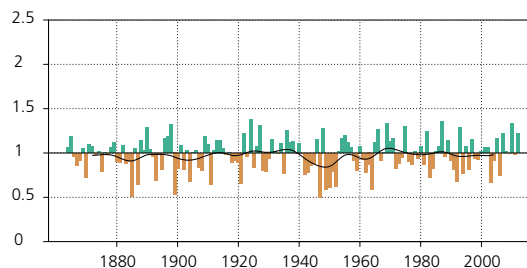
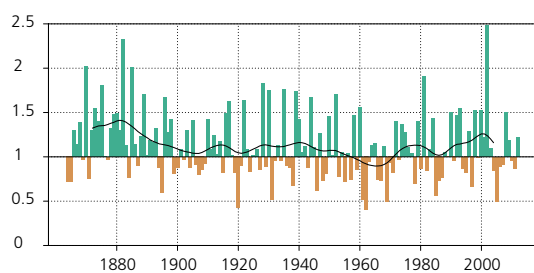


Abbildung 3.3:

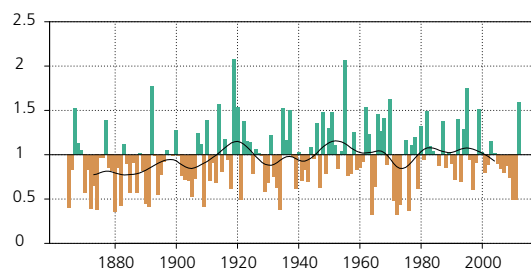
Langjähriger Verlauf der Frühlingsniederschläge (März bis Mai, links) und Sommerniederschläge (Juni bis August, rechts) an den Messstationen Altdorf (oben), Engelberg (Mitte) und Einsiedeln (unten). Dargestellt in grün und orange ist die jährliche Abweichung von der Norm 1961-1990. Die schwarze Kurve zeigt den 20-jährigen Gaussfilter. Die Frühlings-Normniederschlagssumme 1961-1990 beträgt für Altdorf 257 mm, für Engelberg 364 mm und für Einsiedeln 427 mm. Die Sommer-Normniederschlagssumme 1961-1990 beträgt für Altdorf 391 mm, für Engelberg 548 mm und für Einsiedeln 611 mm.

In guter Übereinstimmung an allen drei Messstandorten ist die lang anhaltende Periode mit sehr trockenen Wintern am Ende des 19. Jahrhunderts und auch die Tendenz zu wieder trockeneren Wintern in jüngster Zeit (Abbildung 3.4).

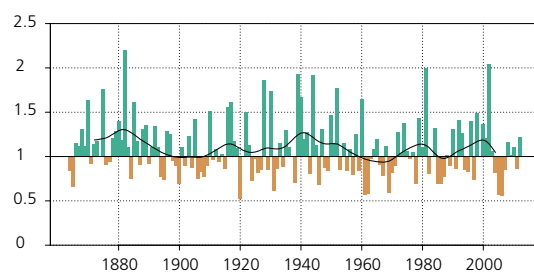
Altdorf, Herbst



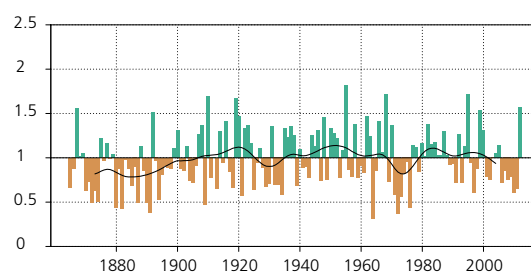
Altdorf, Winter



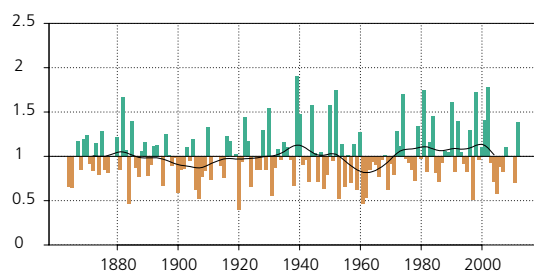
Engelberg, Herbst



Engelberg, Winter



Einsiedeln, Herbst



Einsiedeln, Winter

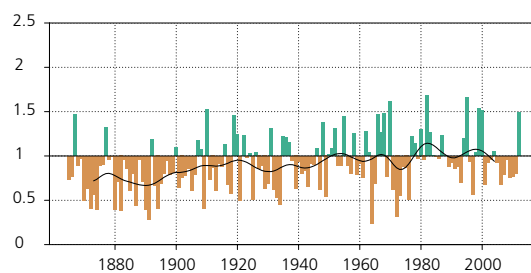


Abbildung 3.4:

Langjähriger Verlauf der Herbstniederschläge (September bis November, links) und Winterniederschläge (Dezember bis Februar, rechts) an den Messstationen Altdorf (oben), Engelberg (Mitte) und Einsiedeln (unten). 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 Altdorf 245 mm, für Engelberg 317 mm und für Einsiedeln 373 mm. Die Winter-Normniederschlagssumme 1961-1990 beträgt für Altdorf 206 mm, für Engelberg 278 mm und für Einsiedeln 343 mm.

3.3.2 Niederschlagstrends

Wie im vorangehenden Abschnitt diskutiert, sind periodische Schwankungen der Niederschlagssummen das typische Merkmal der Messreihen von Altdorf, Engelberg und Einsiedeln. 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 Messreihe Einsiedeln im Winter für die Periode 1864 bis 2012, zeigt keine der drei Messreihen in keiner der vier Jahreszeiten im langfristigen Verlauf einen signifikanten Trend zu mehr oder weniger Niederschlag. In der Urschweiz ist demnach,

basierend auf den drei Messreihen Altdorf, Engelberg und Einsiedeln, über die gesamte verfügbare Messperiode keine langfristige Änderung des mittleren Niederschlags nachzuweisen (Tabelle 3.3). In den letzten 50 Jahren (Periode 1961 bis 2012) ist einzig am Messstandort Altdorf für den Sommer ein signifikanter Trend zu mehr Niederschlag zu beobachten (Tabelle 3.4). Allerdings ist der Trend von ca. 4% pro zehn Jahre, wie auch der signifikante Trend in der Winterreihe von Einsiedeln mit knapp 2%, sehr klein. Die genannten Prozentzahlen entsprechen einer Zunahme von ca. 15 mm (Sommer Altdorf) und 7 mm (Winter Einsiedeln) pro 10 Jahre.

Station	Frühling (Mär. – Mai)	Sommer (Jun. – Aug.)	Herbst (Sep. – Nov.)	Winter (Dez. – Feb.)
Altdorf	+ 0.2% (nicht signifikant)	0.0% (nicht signifikant)	- 1.2% (nicht signifikant)	+ 1.2% (nicht signifikant)
Engelberg	- 0.5% (nicht signifikant)	+ 0.2% (nicht signifikant)	- 0.8% (nicht signifikant)	+ 0.9% (nicht signifikant)
Einsiedeln	+ 0.7% (nicht signifikant)	+ 0.2% (nicht signifikant)	+ 0.3% (nicht signifikant)	+ 1.9% (stark signifikant)

Tabelle 3.3:

Saisonale Niederschlags-trends in Prozent pro 10 Jahre in der Periode 1864 bis 2012. Signifikante Trends sind fett und rot (positiv) oder blau (negativ) dargestellt.

Station	Frühling (Mär. – Mai)	Sommer (Jun. – Aug.)	Herbst (Sep. – Nov.)	Winter (Dez. – Feb.)
Altdorf	- 0.2% (nicht signifikant)	+ 4.3% (signifikant)	+ 5.0% (nicht signifikant)	- 5.5% (nicht signifikant)
Engelberg	- 1.2% (nicht signifikant)	+ 2.4% (nicht signifikant)	+ 2.7% (nicht signifikant)	- 3.4% (nicht signifikant)
Einsiedeln	- 1.5% (nicht signifikant)	+ 1.4% (nicht signifikant)	+ 3.3% (nicht signifikant)	- 1.9% (nicht signifikant)

Tabelle 3.4:

Saisonale Niederschlags-trends in Prozent pro 10 Jahre in der Periode 1961 bis 2012. Signifikante Trends sind fett und rot (positiv) oder blau (negativ) dargestellt.



3.4 Entwicklung der Föhnhäufigkeit

Für den Messstandort Altdorf, in einer der klassischen alpinen Föhnregionen gelegen, liegt mit über 145 Jahren die wohl längste klimatologische Föhnreihe des Alpenraums vor (Gutermann et al. 2012). Für die übrigen Regionen im Untersuchungsgebiet gibt es keine vergleichbar langen und geeigneten Föhnreihen. Die Reihe von Altdorf darf aber als repräsentativ für die Föhnklimatologie der Urschweiz betrachtet werden.

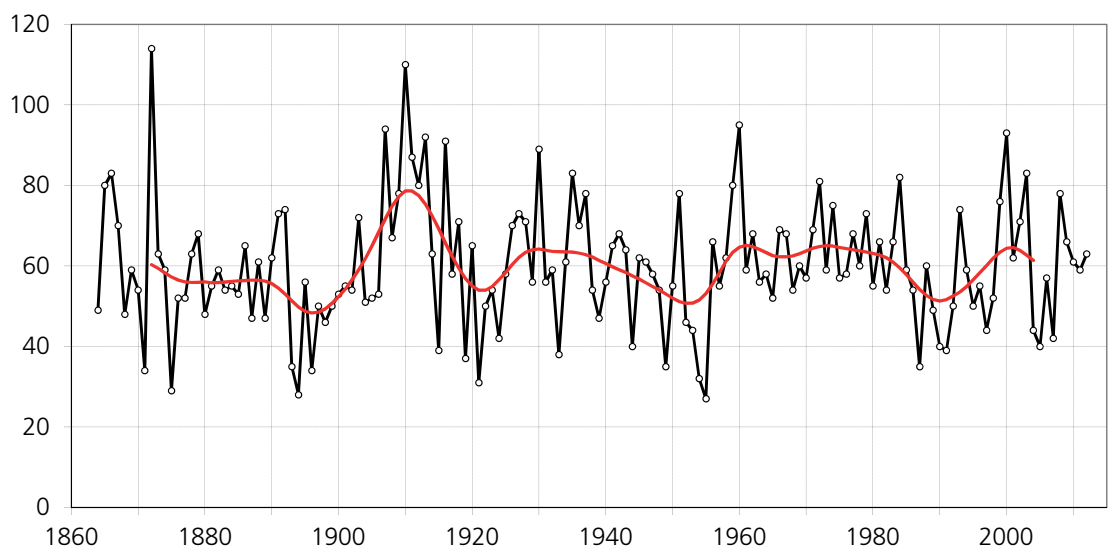
Das hauptsächliche Merkmal im langjährigen Verhalten der Föhnhäufigkeit in Altdorf ist deren ausgeprägte Ausgeglichenheit. Ein langfristiger Trend zu mehr oder weniger Föhn ist nicht ersichtlich. Der Jahresdurchschnitt 1864 bis 2012 liegt bei 60 Beobachtungen. Die einzige markante Abweichung stellt die Phase um 1910 mit einer deutlich höheren Föhnhäufigkeit dar (Abbildung 3.5). Die Beurteilung Föhn/nicht Föhn wird aus den Daten der Beobachtungstermine (Ableseung der Messungen durch den Stationsbetreuer) bestimmt. Pro Tag sind ab Messbeginn drei Beobachtungen verfügbar (07:00 h, 13:00 h sowie 21:00 h bzw. ab 1971 19:00 h). Pro Tag können also maximal drei Beobachtungen mit Föhn auftreten (Definition s. Gutermann et al. 2012).

Die grössten Föhnhäufigkeiten zeigen die Jahre 1872 (114 Beobachtungen), 1910 (110 Beobachtungen), 2000 (93 Beobachtungen) sowie 1960 (95 Beobachtungen). Mit Ausnahme

des Maximaljahres 1872 treten Jahre mit hohen Föhnhäufigkeiten bevorzugt in mehrjährigen Phasen mit verstärkter Föhntätigkeit auf. Vergleichbares in umgekehrter Richtung gilt für die Minimaljahre. Die geringsten Föhnhäufigkeiten verzeichnen die Jahre 1955 (27 Beobachtungen), 1894 (28 Beobachtungen), 1875 (29 Beobachtungen) sowie 1921 (31 Beobachtungen). Jahre mit sehr geringen Föhnhäufigkeiten sind oft in mehrjährigen Phasen mit abgeschwächter Föhntätigkeit zu finden. Der Wechsel von Phasen mit verstärkter und abgeschwächter Föhntätigkeit erfolgt mehr oder weniger rhythmisch im Laufe der Zeit.

Saisonal dominiert bezüglich Föhnhäufigkeit der Frühling. Im langjährigen Durchschnitt (1864-2012) werden im Frühling 25 Föhnbeobachtungen registriert. Der Frühling bestimmt im Wesentlichen auch den langjährigen Verlauf der Jahres-Föhnhäufigkeit. Die Saison mit der geringsten Föhnhäufigkeit ist eindeutig der Sommer mit durchschnittlich nur gerade 7 Föhnbeobachtungen. Herbst und Winter zeigen ähnliche Föhnhäufigkeiten mit durchschnittlich 15 bzw. 14 Beobachtungen.

Abbildung 3.5:
Jährliche Anzahl Beobachtungstermine mit Föhn an der Station Altdorf in der Periode 1864-2012. Beobachtungstermine sind 07:00 h, 13:00 h sowie 21:00 h (ab 1971 19:00 h). Die ausgezogene Linie zeigt das über 20 Jahre gleitende Mittel (Gauss-Tiefpassfilter).



In der Klimatologie des Jahresgangs (Föhnhäufigkeit der 12 Monate) ist vor allem in jüngster Zeit eine auffallende Veränderung feststellbar (Abbildung 3.6). In der gesamten Periode 1864 bis 2012 kommt klar zum Ausdruck, dass an der Messstation Altdorf das Maximum der Föhnaktivität in den Monaten März bis Mai, also im meteorologischen Frühling, auftritt. In jüngerer Zeit konzentriert sich das Maximum nur noch auf die beiden Monate April und Mai. Sehr ausgeprägt zeigt sich dies in der aktuell verwendeten Klimaperiode 1981-2010. Der März hat seine Stellung als Monat mit hoher Föhnaktivität verloren.

Die bereits erwähnte Föhnflaute in den Sommermonaten Juni bis August kommt im Jahresgang gut zur Geltung. Wieder erhöhte Föhnhäufigkeiten sind anschliessend in den Monaten Oktober bis Februar, bzw. neu bis März zu beobachten. Im Oktober oder November zeichnet sich, je nach Analyseperiode, ein sekundäres Föhnmaximum ab. Allerdings sind die erreichten durchschnittlichen Föhnhäufigkeiten nur geringfügig höher als in den übrigen Herbst- und Wintermonaten.



Wind-Surfer auf dem Urnersee
© D. Gerstgrasser

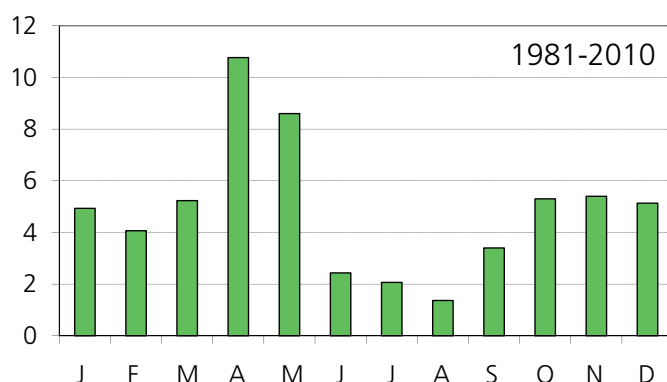
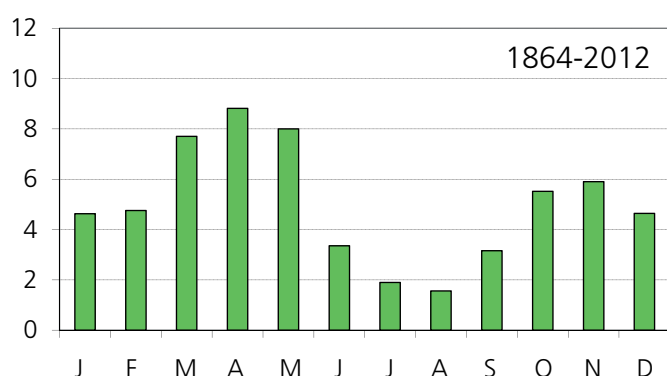


Abbildung 3.6:

Durchschnittliche Anzahl der monatlichen Föhnbeobachtungen für verschiedene Klimaperioden.
Oben: durchschnittlicher Jahresgang über die gesamte Periode 1864-2012. Unten: durchschnittlicher Jahresgang der aktuell verwendeten Klimaperiode 1981-2010.

3.5 Lange Schneereihen

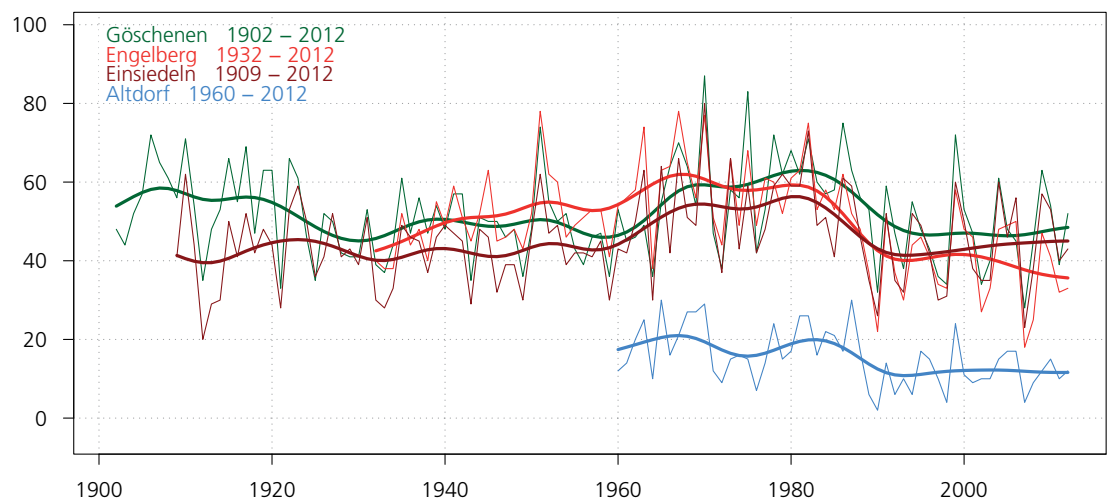
3.5.1 Tage mit Neuschnee ≥ 1 cm

Die MeteoSchweiz Stationen Göschenen, Engelberg, Einsiedeln und Altdorf verfügen über lange Neuschneemessreihen welche täglich gemessen werden. In den Abschnitten 3.5.1 bis 3.5.3 werden die Parameter „Tage mit Neuschnee“, „Maximaler Neuschnee“ und „Neuschneesummen“ in ihrem zeitlichen Verlauf dargestellt.

Abbildung 3.7 zeigt die Entwicklung der Anzahl Tage mit Neuschnee ≥ 1 cm während den letzten gut 50 bis 111 Jahren. Die dünn gezeichneten Kurven zeigen die aus den Tagesmesswerten abgeleiteten Tage mit Neuschnee ≥ 1 cm des hydrologischen Jahres (Oktober bis September). Die dickeren Kurven zeigen die geglättete Entwicklung (20-jähriger Gaussfilter) um langfristige Schwankungen besser sichtbar zu machen. Auffallend sind die Maxima in den 1970er und frühen 1980er

Jahren sowie der starke Abfall um 1990 und das Verharren auf tiefem Niveau danach. Im Weiteren fallen die starken Schwankungen und ein weiteres Maximum in den späten 1960er Jahren auf. Zudem deuten die Reihen von Einsiedeln und Göschenen an, dass um 1930 und Ende der 1950er Jahre fast so tiefe Werte beobachtet wurden wie in den 1990er und 2000er Jahren.

Abbildung 3.7:
Zeitlicher Verlauf der Anzahl Tage mit Neuschnee ≥ 1 cm des hydrologischen Jahres für die Stationen Göschenen, Engelberg, Einsiedeln und Altdorf. Dargestellt sind die aus den Tagesmesswerten abgeleiteten Tage mit Neuschnee ≥ 1 cm pro Jahr sowie die mit einem 20-jährigen Gaussfilter geglättete Verlaufskurve.



Gletschereis



Furkagebiet mit Gross Muttenhorn
© Andermatt-Uriertal Tourismus



Blätter mit Rauhreif



Mythenregion
© D. Gerstgrasser

3.5.2 Maximale tägliche Neuschneemenge

Der zeitliche Verlauf der maximalen täglichen Neuschneemenge des hydrologischen Jahres ist in Abbildung 3.8 dargestellt. Die dünn gezeichneten Kurven zeigen den aus den Tagesmesswerten abgeleiteten maximalen Neuschnee. Beachtlich sind die Maxima von 100 cm im April 1976 in Göschenen und die 95 cm im Februar 1938 in Engelberg. Der maximale Neuschnee ist äusserst variabel und zeigt grosse jährliche Schwankungen. Die periodischen Schwankungen allerdings sind eher klein, d.h. es gibt selten längere Phasen mit eindeutig höheren bzw. tieferen Maxima. Weiter sind auch keine eindeutigen langfristigen Trends erkennbar.

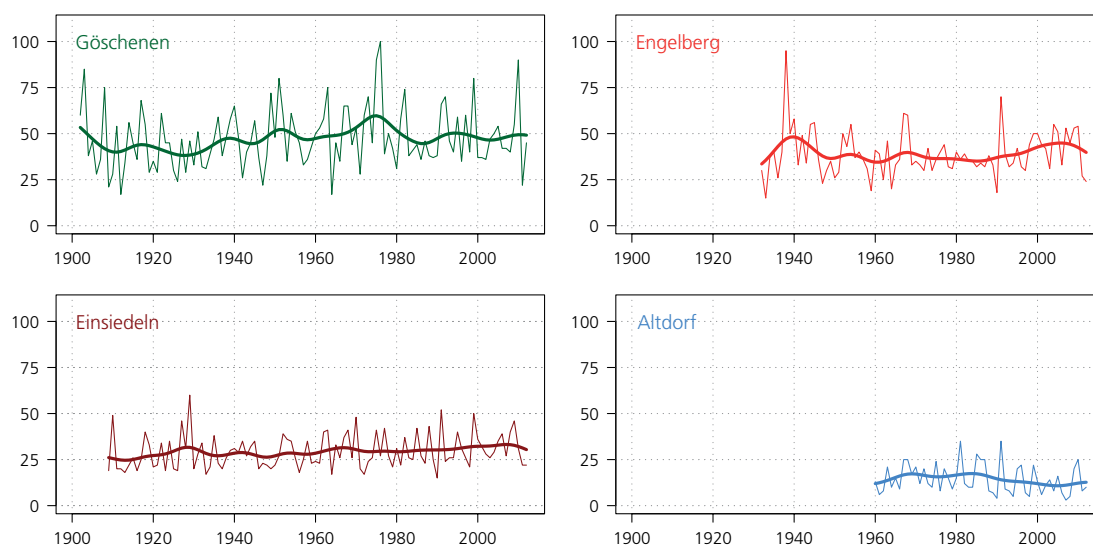


Abbildung 3.8:
Zeitliche Verläufe des maximalen Neuschnees pro Tag (in cm) des hydrologischen Jahres für die Stationen Göschenen, Engelberg, Einsiedeln und Altdorf. Dargestellt ist der aus den Tagesmesswerten abgeleiteten maximalen Neuschnee pro Jahr sowie die mit einem 20-jährigen Gaussfilter geglättete Verlaufskurve.

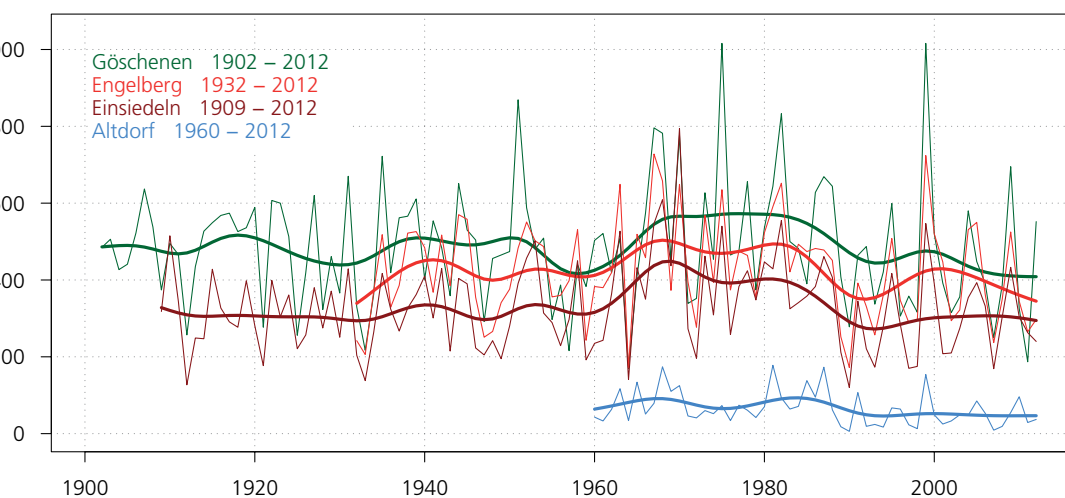


3.5.3 Neuschneesumme

Abbildung 3.9 zeigt die Entwicklung der Neuschneesummen während den letzten gut 50 bis 111 Jahren. Im Allgemeinen fallen starke dekadische Schwankungen in den Zeitreihen auf. Ein deutliches Maximum zeigt sich in den 1970er und frühen 1980er Jahren. Um 1930 und Ende der 1950er Jahre wurden zum Teil fast so tiefe Werte wie in den 1990er und 2000er Jahren, nach dem starken Rückgang in den 1980er Jahren erreicht (Marty 2008).

Abbildung 3.9:

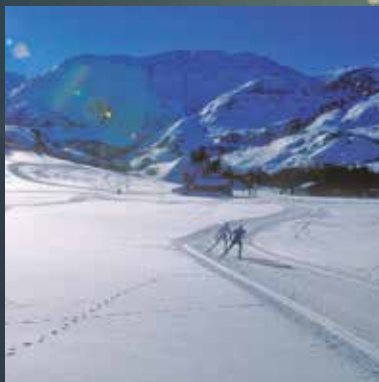
Zeitliche Verläufe der Neuschneesummen (in cm) des hydrologischen Jahres für die Stationen Göschenen, Engelberg, Einsiedeln und Altdorf. Dargestellt sind die Werte der einzelnen Jahre (dünne Kurven) sowie die mit einem 20-jährigen Gaussfilter geglättete Verlaufskurve (dicke Kurven).



St. Annafrn
© Archiv VAW / ETH Zürich



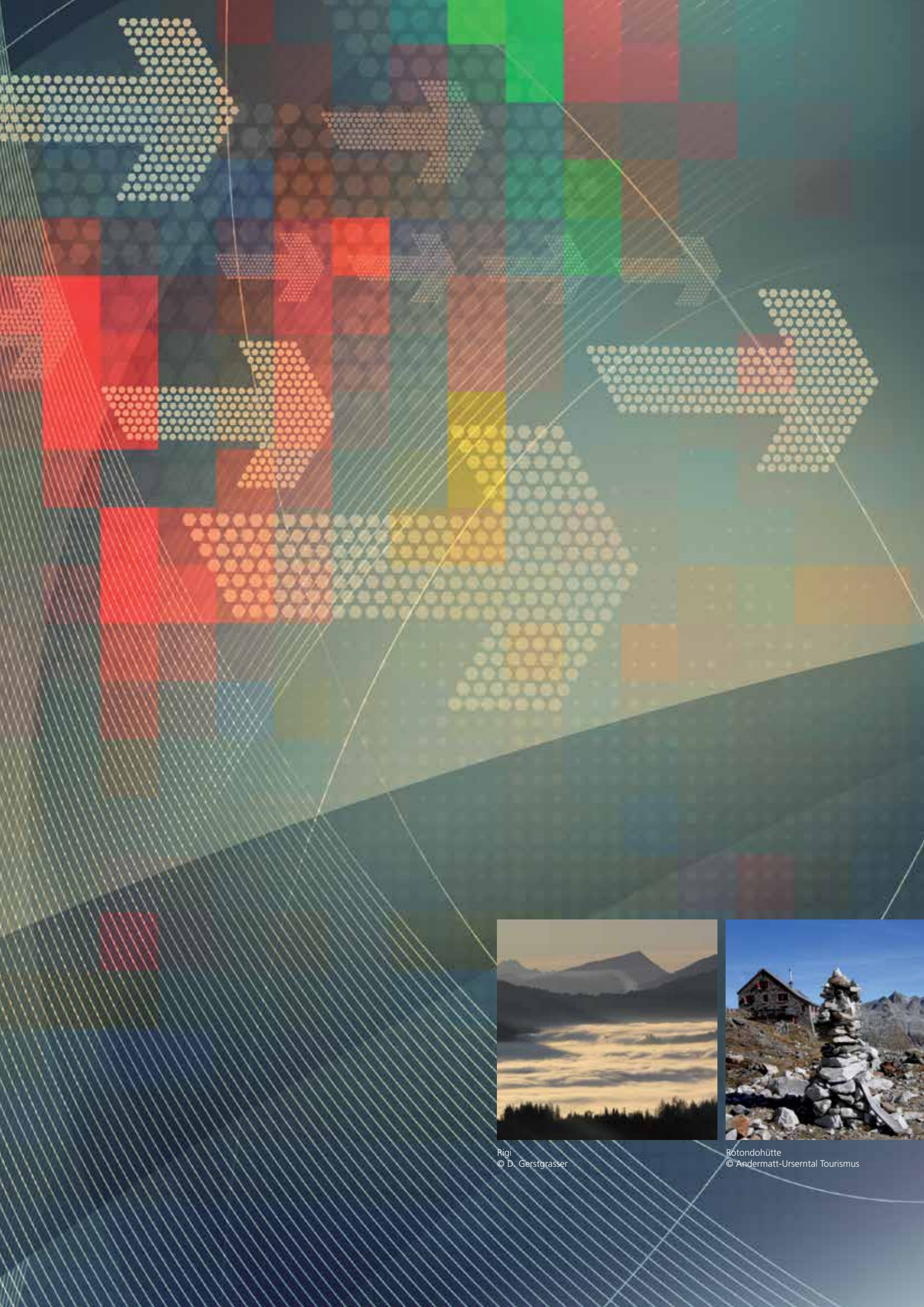
Gefrorener Sihlsee
© D. Gerstgrasser



Langläufer im Urserntal
© Andermatt-Urserntal Tourismus



Schlittlerin am Nätschen
© perretfoto.ch



Rigi
© D. Gerstgrasser



Rotondohütte
© Andermatt-Urserntal Tourismus

4| Klimaindikatoren

29

Klimaindikatoren zeigen während der letzten 50 Jahre markante Änderungen des Klimas im Gebiet der Urschweiz. Das hat auch einen Einfluss auf Gesellschaft, Wirtschaft, Umwelt und den Tourismus. Neben starken Trends bei Frosttagen, Sommertagen oder der Nullgradgrenze gibt es nur kleine Änderungen bei Starkniederschlägen oder Trockenperioden. Die wichtigsten Resultate für die Region Urschweiz sind in Kürze:

Stark signifikante Abnahme der Frosttage in allen Regionen und auf allen Höhenstufen.

Signifikante Zunahme der Sommertage in allen Regionen und auf allen Höhenstufen.

Deutlicher Anstieg der Nullgradgrenze in allen Jahreszeiten (nur im Herbst nicht signifikant). Die Nullgradgrenze steigt rund 150-200 m pro 1 Grad C Erwärmung.

Signifikanter Rückgang der Tage mit Neuschnee (≥ 1 cm) in allen Höhenlagen.

Rückgang der Gletscherlänge und der Gletschervolumen.

Früherer Austrieb der Vegetation im Frühling.

4.1 Einleitung

Klimaindikatoren können Hinweise geben über mögliche Auswirkungen der Klimaänderung (North et al. 2007). Tabelle 4.1 zeigt die für diesen Bericht ausgewählten Klimaindikatoren basierend auf Temperatur, Niederschlag und Schnee, sowie deren Definition. Es wurden drei Temperaturgrössen, zwei Niederschlagsgrössen, und zwei Schneegrössen ausgewählt. Vier der sieben Indikatoren sind Klimaindikatoren definiert von der WMO (World Meteorological Organisation).

Der Indikator Nullgradgrenze ist kein offizieller Klimaindikator der WMO, allerdings für Bergregionen der Schweiz von beträchtlicher Bedeutung (Gletscher, Permafrost etc.). 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.

Auch die beiden Schneeindikatoren in Tabelle 4.1 sind keine offizielle Klimaindikatoren der WMO. 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 Auswirkungen der Klimaänderung zeigen sich zunehmend auch in den Gletschern des Alpenraums, insbesondere in deren Länge und deren Mächtigkeit. Zudem hat die Klimaänderung Auswirkungen auf die Zusammensetzung der Vegetation und die Länge der Vegetationsperiode. Die Auswirkungen auf die Gletscher und Vegetation sind bereits sichtbar und machen daher die Klimaänderung fassbar. Somit dienen auch Gletscher und Vegetation als Klimaindikatoren und werden daher in diesem Kapitel diskutiert.

Tabelle 4.1:

**Liste der verwendeten
Klimaindikatoren nach
Bezeichnung, Typ und
Definition nach
WMO/ETCCDI und
Definitionen
MeteoSchweiz.**

#	Bezeichnung	Typ	Definition
1	Frosttage	Temperatur	Tage des Kalenderjahres mit minimaler Temperatur $T_{min} < 0^{\circ}C$
2	Sommertage	Temperatur	Tage des Kalenderjahres mit maximaler Temperatur $T_{max} \geq 25^{\circ}C$
3	Nullgradgrenze	Temperatur	Saisonale Nullgradgrenze [m ü.M.] bestimmt mittels linearer Regression von einer Anzahl zur Verfügung stehender Stationen
4	Tage mit starkem Niederschlag	Starkniederschlag	Tage des Kalenderjahres mit Tagesniederschlag $P \geq 20$ mm
5	Max. Anzahl zusammenhängender Trockentage	Niederschlag	Maximale Anzahl zusammenhängender Tage des Kalenderjahres für welche Tagesniederschlag $P < 1$ mm
6	Tage mit Neuschnee	Neuschnee	Anzahl Tage pro Jahr mit Neuschnee ≥ 1 cm
7	Tage mit Gesamt-schneehöhe ≥ 30 cm	Gesamtschnee	Anzahl Tage pro Jahr an denen die Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm beträgt

4.2 Klimaindikatoren der Messgrösse Temperatur

4.2.1 Frosttage

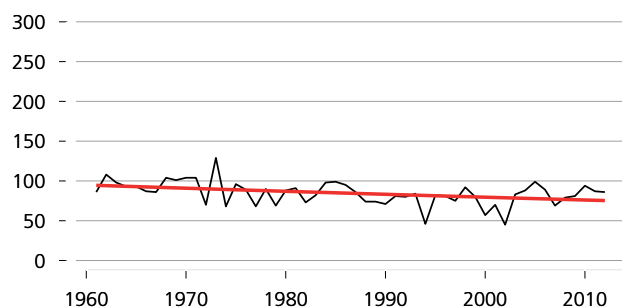
Allgemeines

Abbildung 4.1 zeigt die Entwicklung der Frosttage (Tagesminimum $<0^{\circ}\text{C}$) für ausgewählte Stationen über die Periode von 1961 bis 2012. Die Anzahl Frosttage ist hauptsächlich von der Höhenlage und den lokalen klimatologischen Gegebenheiten einer Station, wie z.B. eine Tallage mit Kaltluftsee, abhängig. Die Spanne der jährlichen Anzahl Frosttage variiert an den untersuchten Standorten der Urschweiz im Mittel zwischen knapp 100 Tagen in den Tieflagen (Altdorf) bis über 200 Tage in den hochgelegenen Gebieten (Gütsch).

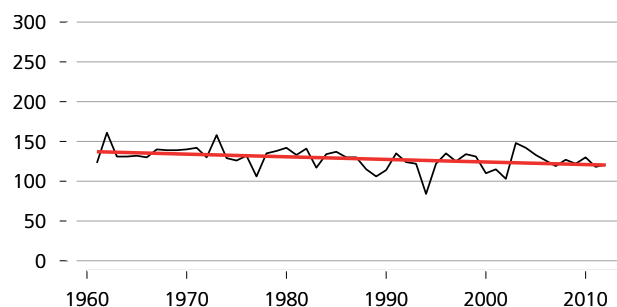
Trends

Alle Stationen zeigen einen abnehmenden stark signifikanten Trend in der Anzahl der Frosttage. Die Abnahme reicht von -3.2 (Einsiedeln) bis -6.5 Tage pro 10 Jahre (Engelberg) und ist eindeutig auf die Zunahme der Temperaturen zurückzuführen. Die Unterschiede zwischen den Stationen lassen sich im Fall von Engelberg auf die unterschiedliche Länge der Datenreihe und auf die lokalen klimatologischen Verhältnisse wie zum Beispiel die Gipfellage beim Gütsch zurückführen. Insgesamt sind die Trends über alle Höhenstufen betrachtet ähnlich deutlich ausgeprägt.

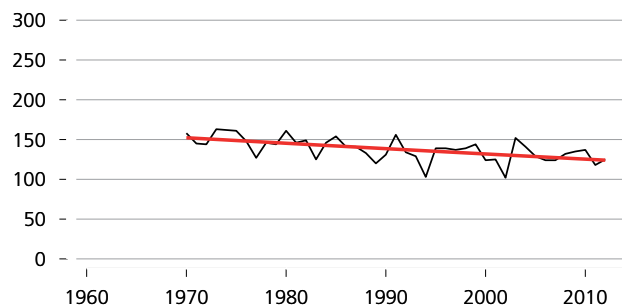
Altdorf



Einsiedeln



Engelberg



Gütsch ob Andermatt

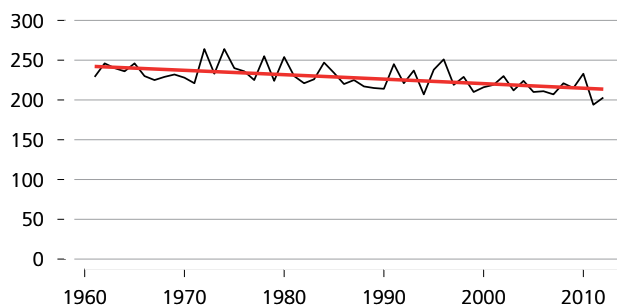


Abbildung 4.1:

Zeitlicher Verlauf der Anzahl Frosttage (Tage des Kalenderjahres mit minimaler Temperatur $<0^{\circ}\text{C}$) sowie die entsprechenden Trends. Die Abnahme der Frosttage ist statistisch signifikant und weist pro 10 Jahre folgende Werte auf: Altdorf -3.7 Tage, Einsiedeln -3.2 Tage, Engelberg -6.5 Tage und Gütsch ob Andermatt -5.5 Tage.

4.2.2 Sommertage

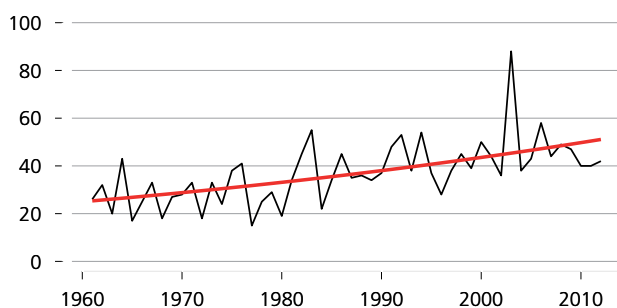
Allgemeines

Abbildung 4.2 zeigt den zeitlichen Verlauf der Sommertage (Tagesmaximum $\geq 25^\circ\text{C}$) für ausgewählte Stationen über die Periode 1961 bis 2012. Wie die Anzahl Frosttage ist auch die Anzahl Sommertage hauptsächlich von der Höhenlage der Station bestimmt. An den betrachteten Stationen des Untersuchungsgebietes werden in den tiefsten Gebieten (Altdorf) ca. 50 Sommertage pro Jahr erreicht. Die Zahl der Sommertage nimmt mit der Höhe sukzessive ab. In den hochgelegenen Gebieten wie z.B. auf dem Gütsch werden keine Sommertage erreicht. Auffallend ist die im Verhältnis zu den übrigen Jahren deutlich grössere Anzahl Sommertage während des Jahrhundertssommers 2003.

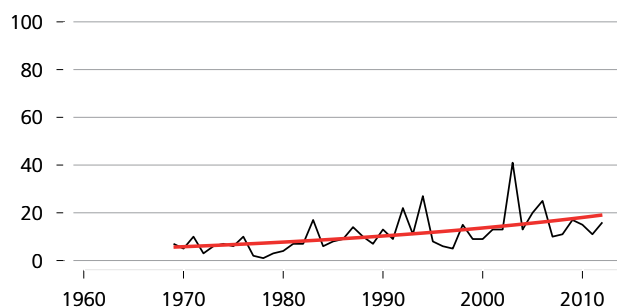
Trends

Alle Stationen zeigen eine deutliche, stark signifikante Zunahme in der Anzahl der Sommertage pro Jahr. Absolut betrachtet ist die Zunahme mit ca. 3 bis 5 Tage pro 10 Jahre ähnlich bzw. die Unterschiede können durch die unterschiedlich langen Datenreihen erklärt werden. Relativ betrachtet ist die Zunahme in den mittleren Höhenlagen (Engelberg, Einsiedeln) deutlich grösser. In diesen Gebieten hat sich die Anzahl der Sommertage mehr als verdoppelt und erreicht heute im Mittel etwa 20 Tage pro Jahr. Der Einfluss des Jahrhundertssommers 2003 und des Rekordjuli 2006 mit deutlich mehr Sommertagen als üblich, ist an diesen Standorten besonders gross und bewirkt die grossen relativen Zunahmen.

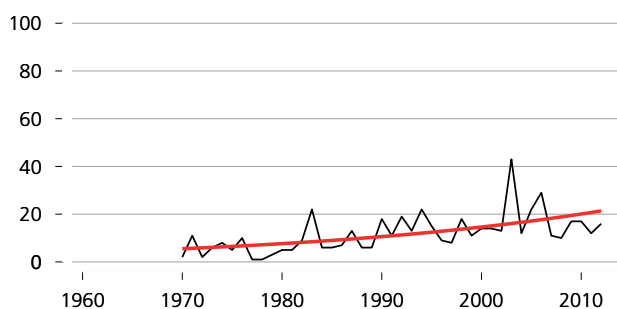
Altdorf



Einsiedeln



Engelberg



Gütsch ob Andermatt

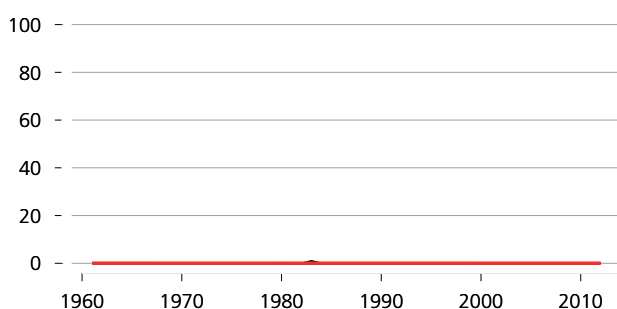


Abbildung 4.2:

Zeitlicher Verlauf der Anzahl Sommertage (Tage des Kalenderjahres mit maximaler Temperatur $\geq 25^\circ\text{C}$) sowie die entsprechenden Trends. Die Zunahme der Sommertage ist statistisch signifikant und weist pro 10 Jahre folgende Werte auf: Altdorf 5.0 Tage, Einsiedeln 3.2 Tage, Engelberg 3.2 Tage und Gütsch ob Andermatt 0 Tage.

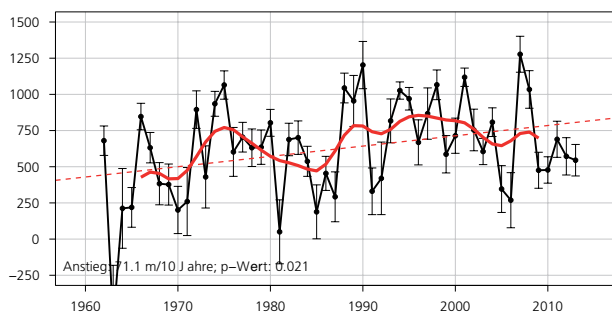
4.2.3 Nullgradgrenze

Abbildung 4.3 zeigt den Verlauf der Nullgradgrenze berechnet aus Daten von Bodenstationen nach der Methode beschrieben in Kapitel 1.6. Der Verlauf der saisonalen Nullgradgrenze 1961 bis 2011/12 wurde mittels Regression aus homogenisierten Temperaturdaten von 17 MeteoSchweiz Bodenstationen (Engelberg, Einsiedeln, Luzern, Altdorf, Andermatt, Güttsch ob Andermatt, Elm, Grimsel Hospiz, Meiringen, Adelboden, Disentis, Ebnat-Kappel, Glarus, Interlaken, Langnau im Emmental und Jungfrauoch) als Näherung für die Urschweiz bestimmt. 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. Es zeigt sich, dass die Bestimmung im Winter, wo die Temperaturabnahme mit der Höhe insbesondere bei Hochdrucklagen (Inversionen) nicht immer gegeben ist, nur auf ± 75 bis 250 m genau ist. Im Frühling und Sommer hingegen ist die Bestimmung mit etwa ± 50 bis 150 m relativ genau möglich. Die Werte des Herbstes liegen zwischen den anderen Jahreszeiten.

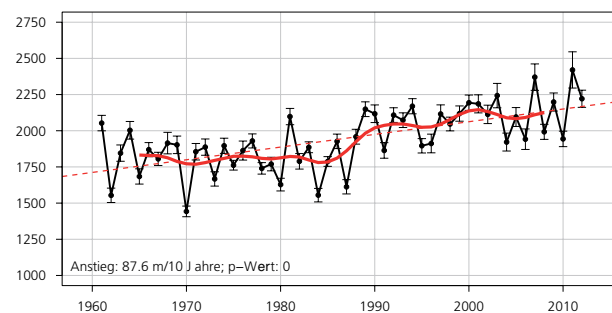
Die klimatologische Nullgradgrenze über der Urschweiz liegt im Mittel 1961 bis 2012 im Winter bei rund 625 m ü.M., im Frühling bei rund 1950 m ü.M., im Sommer bei etwa 3450 m ü.M. und im Herbst bei ungefähr 2500 m ü.M. Diese Werte liegen ausser im Winter nah an den Werten einer gesamtschweizerischen Nullgradgrenze, wo eine deutlich grössere Anzahl Bodenstationen in die Berechnungen eingingen. Die jährlichen Schwankungen sind im Winter am grössten (Standardabweichung ca. 340 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 bis 2012 deutlich an. Mit Ausnahme vom Herbst, wo der Anstieg knapp nicht signifikant ist, sind die Anstiege signifikant (p kleiner 0.05). Sie bewegen sich je nach Jahreszeit zwischen 34 und 88 m pro 10 Jahre. Wie die Temperaturtrends ist der Anstieg der Nullgradgrenze im Herbst am niedrigsten (34 m pro 10 Jahre) und im Frühling und Sommer mit rund 80 bis 88 m pro 10 Jahre am grössten. Der Winter zeigt einen Anstieg von rund 70 m pro 10 Jahre. Allgemein entsprechen diese Werte einem Anstieg der Nullgradgrenze von im Mittel rund 200 m pro Grad C Erwärmung.

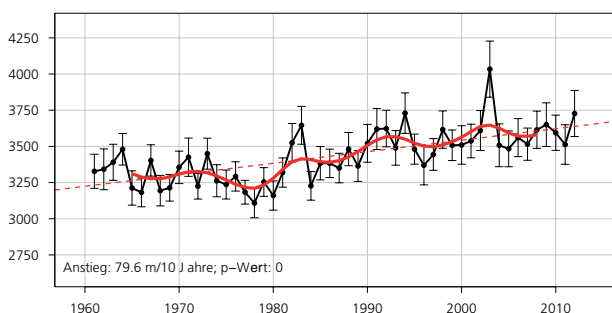
Winter



Frühling



Sommer



Herbst

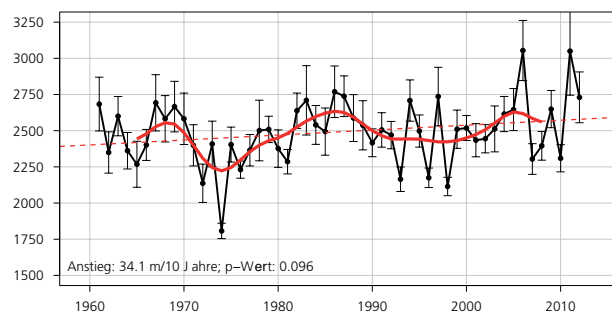


Abbildung 4.3:

Verlauf der saisonalen Nullgradgrenze 1961-2011/12 (schwarze Linie in m ü.M.) bestimmt mittels Regression für die Urschweiz. 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). Der Anstieg im Herbst ist knapp nicht signifikant.

4.3 Klimaindikatoren der Messgrösse Niederschlag

4.3.1 Tage mit Niederschlag ≥ 20 mm: Starkniederschlag

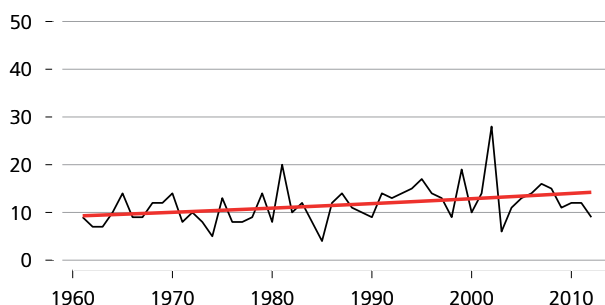
Allgemeines

Abbildung 4.4 zeigt die Entwicklung der Tage mit Niederschlag >20 mm im Kalenderjahr für ausgewählte Stationen der Urschweiz über die Periode 1961 bis 2012. 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 regionalen Lage und weniger von der Höhenlage der Station abhängig. Starke Niederschläge werden oft durch Staulagen oder Gewitter verursacht. Die Spanne der mittleren Anzahl Tage im Kalenderjahr reicht von ca. 10 Tagen in den Regionen um Altdorf und Sarnen bis etwa 20 bis 30 Tage in den klassischen Staulagen sowie bekannten Gewitterregionen (vgl. Einsiedeln und Lachen).

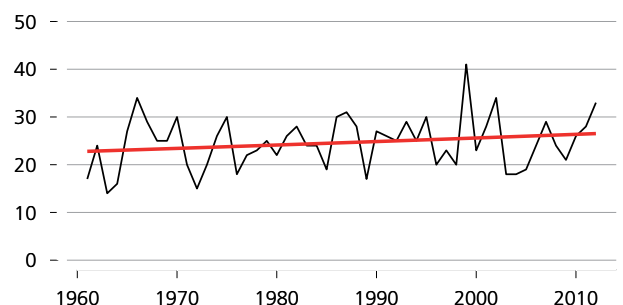
Trends

Über den ganzen Analysezeitraum 1961 bis 2012 betrachtet kann grundsätzlich eine leichte Zunahme der Tage mit starkem Niederschlag festgestellt werden. Allerdings ist diese Zunahme nicht an allen Stationen signifikant und ist zudem mit maximal 1.5 Tagen pro 10 Jahren nicht sehr gross. Somit darf nicht von einer gesicherten allgemeinen Zunahme gesprochen werden. Betrachtet man die Tage mit starkem Niederschlag gesondert nach Winter- und Sommersaison (nicht dargestellt aufgrund der geringen Anzahl Werte), wird ersichtlich, dass die Zunahmen eher im Sommerhalbjahr auftreten. Auf was die Zunahme zurückzuführen ist kann aus heutiger Sicht nicht erklärt werden.

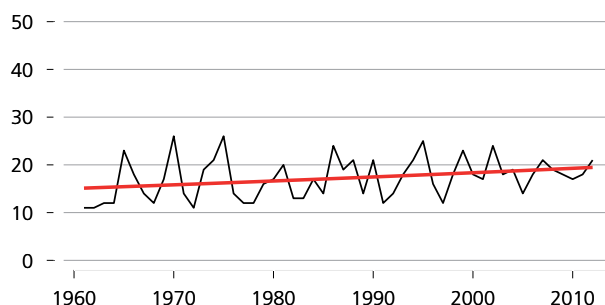
Altdorf



Einsiedeln



Lachen



Sarnen

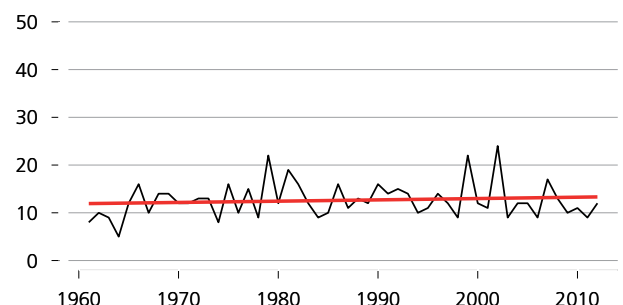


Abbildung 4.4:

Zeitlicher Verlauf der Tage mit starkem Niederschlag (Tage des Kalenderjahres mit Niederschlag ≥ 20 mm) sowie die entsprechenden Trends. Die Zunahme der Tage mit starkem Niederschlag zeigt sich in den meisten Reihen ist aber nicht an allen Standorten statistisch signifikant und weist pro 10 Jahre folgende Werte auf: Altdorf 1.0 Tage (nicht signifikant), Einsiedeln 0.7 Tage (nicht signifikant) Tage, Lachen 0.8 Tage (schwach signifikant) und Sarnen 0.3 Tage (nicht signifikant).

4.3.2 Trockenperioden

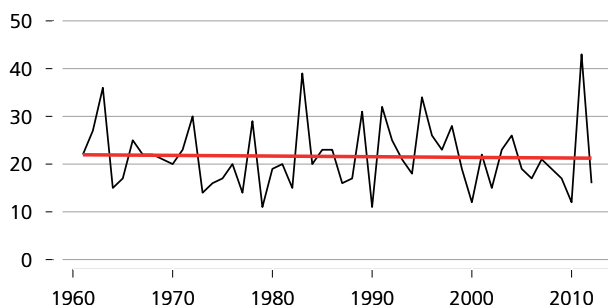
Allgemeines

Die Entwicklung der maximalen Anzahl zusammenhängender Tage des Kalenderjahres für welche der Tagesniederschlag <1 mm (Trockentage) beträgt ist in Abbildung 4.5 für ausgewählte Standorte der Urschweiz für die Periode 1961 bis 2012 dargestellt. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Standorten sind verhältnismässig gering. Dies erstaunt nicht, da sich die für eine Trockenperiode notwendige stabile Hochdrucklage auf das kleine Untersuchungsgebiet ähnlich auswirkt. Betrachtet man die Trockenperioden getrennt nach Sommer- und Winterhalbjahr (Abbildung 4.6, Abbildung 4.7) so fällt auf, dass die Perioden im Mittel im Winterhalbjahr geringfügig länger sind und auch die längste Trockenperioden im Winterhalbjahr auftreten. Auffallend ist die lange Periode im Winterhalbjahr 2011/2012 wo es im Oktober/November 2011 während deutlich mehr als einem Monat keinen messbaren Niederschlag gab.

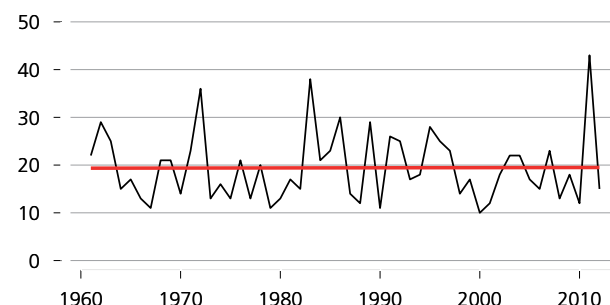
Trends

Über den Analysezeitraum 1961 bis 2012 betrachtet treten keine statistisch signifikanten Trends in der Anzahl zusammenhängender Trockentage auf. Die geringfügigen Ab-/Zunahmen sind statistisch gesehen 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 2005), allerdings ohne Berücksichtigung der letzten zwölf Jahre. Da Trockenperioden im Sommerhalbjahr in Verbindung mit grosser Verdunstung eine grössere Problematik darstellen wie in den Wintermonaten (Landwirtschaft, Grundwasser etc.) werden Sommer- und Winterhalbjahr getrennt aufgeführt.

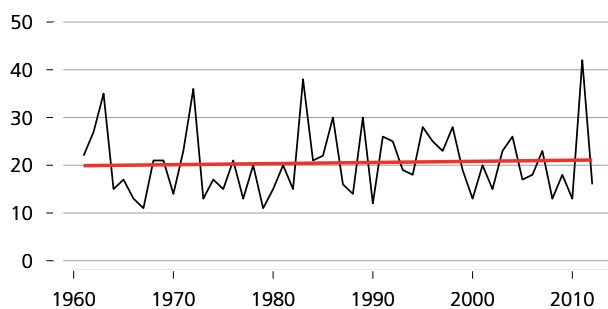
Altdorf



Einsiedeln



Lachen



Sarnen

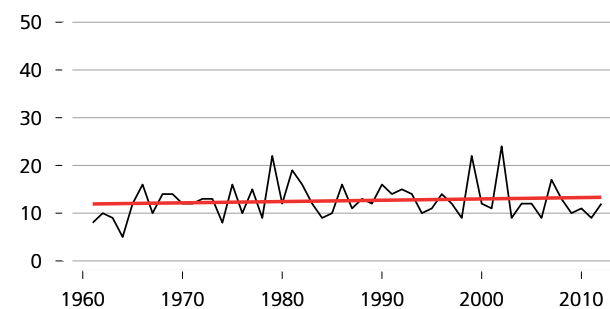
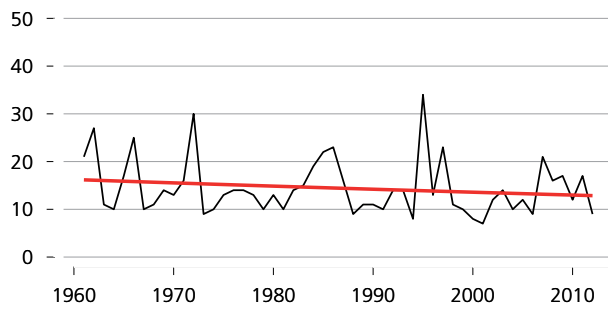


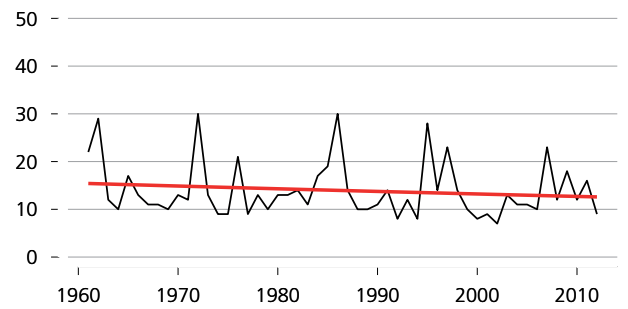
Abbildung 4.5:

Zeitlicher Verlauf der maximalen Anzahl zusammenhängender Tage des Kalenderjahres für welche der Tagesniederschlag <1 mm ist. Es lassen sich keine Trends in den Messreihen feststellen.

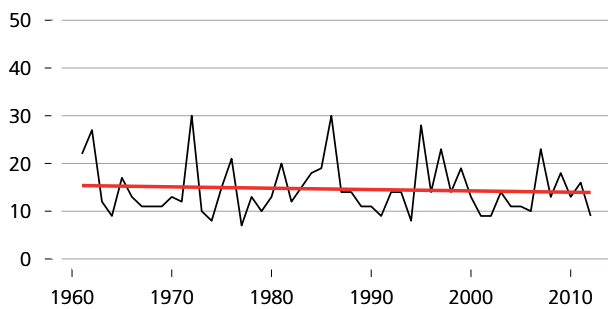
Altdorf



Einsiedeln



Lachen



Sarnen

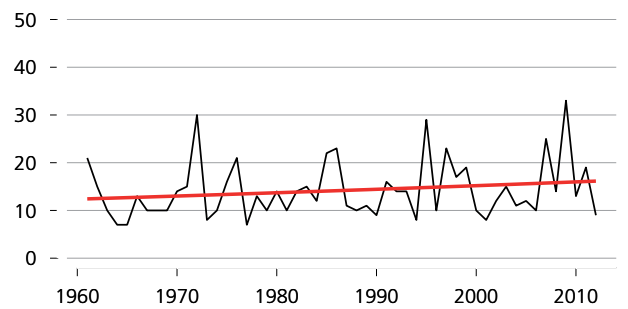
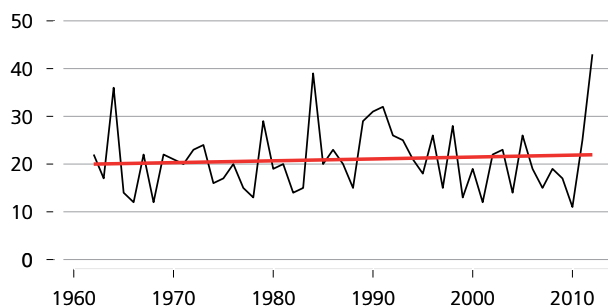


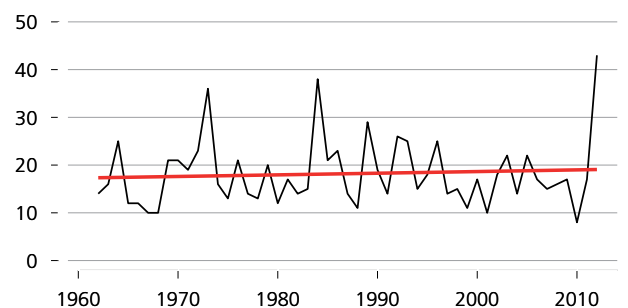
Abbildung 4.6:

Wie Abbildung 4.5 aber für das Sommerhalbjahr.

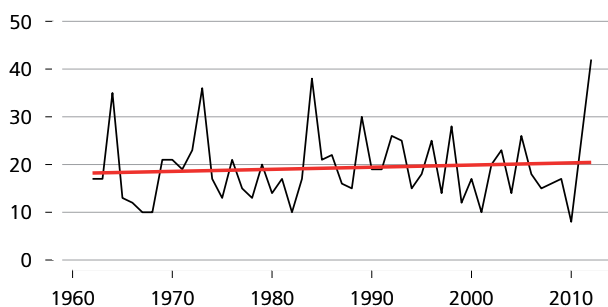
Altdorf



Einsiedeln



Lachen



Sarnen

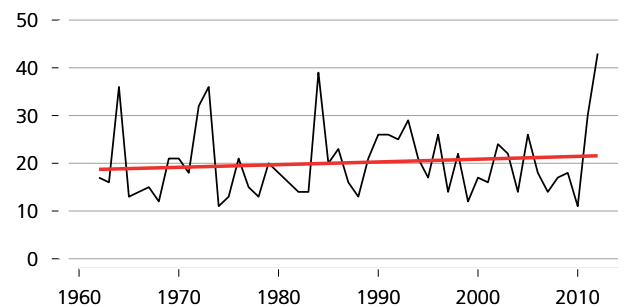


Abbildung 4.7:

Wie Abbildung 4.5 aber für das Winterhalbjahr.

4.4 Klimaindikatoren der Messgrösse Schnee

4.4.1 Tage mit Neuschnee

37

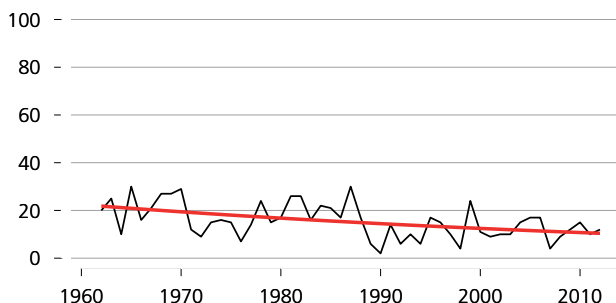
Allgemeines

Abbildung 4.8 zeigt die Entwicklung der Anzahl Tage mit Neuschnee >1 cm für ausgewählte Standorte des Untersuchungsgebietes über die Periode 1961 bis 2012. Die Anzahl Tage mit Neuschnee ist in erster Linie von der Höhenlage und in geringerem Ausmass von der regionalen Lage abhängig. Die regionale Lage ist bedeutend für die Niederschlagsverteilung während die Höhe das Verhältnis von Schnee zu Regen bestimmt. Die Spannweite reicht im langjährigen Mittel von rund 15 Tagen in den tiefsten Tallagen (Altdorf) bis über 60 Tage in mittleren Höhenlagen (Andermatt).

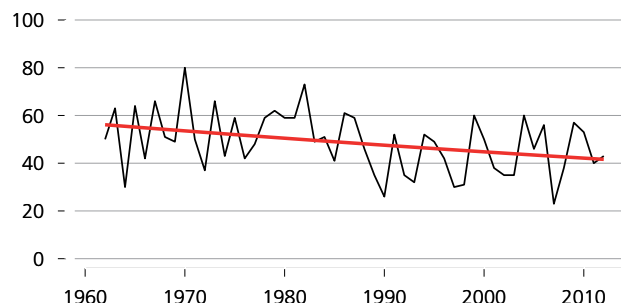
Trends

Alle Stationen zeigen einen signifikanten Trend hin zu abnehmender Anzahl Tage mit Neuschnee. Die Abnahme bewegt sich bei allen betrachteten Stationen im Untersuchungsgebiet in der Grössenordnung von 2 bis 3 Tage pro 10 Jahre. In den tiefsten Lagen der Region haben sich die Neuschneetage in den letzten 50 Jahren in etwa halbiert. Das Beispiel Altdorf zeigt eine Reduktion von rund 20 auf ca. 10 Tage. Vergleicht man diese Trends mit den verhältnismässig geringen und meist nicht signifikanten Änderungen im Niederschlag, wird klar, dass die Temperaturänderung und der damit verbundene Anstieg der Nullgradgrenze (siehe Kapitel 4.2.3.) und damit die Schneefallgrenze (nicht gezeigt) der antreibende Faktor für den Rückgang der Tage mit Neuschnee sein muss. Während die Häufigkeit des Gesamtniederschlags praktisch unverändert bleibt, nimmt der Anteil Schneefall am Gesamtniederschlag ab.

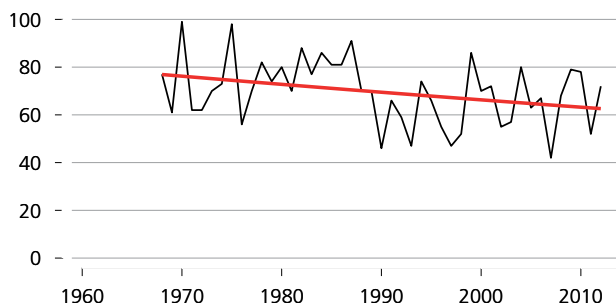
Altdorf



Einsiedeln



Andermatt



Engelberg

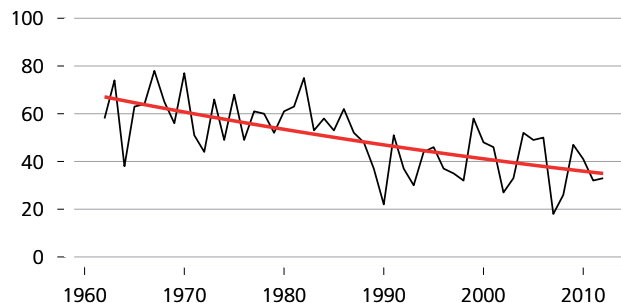


Abbildung 4.8:

Zeitlicher Verlauf der Tage mit Neuschnee (Tage des hydrologischen Jahres Okt.-Sept. mit Neuschnee ≥ 1 cm) sowie die entsprechenden Trends. Die Abnahme der Tage mit Neuschnee zeigt sich in allen Reihen. Sie ist bei allen Standorten statistisch signifikant und weist pro 10 Jahre folgende Werte auf: Altdorf -2.3 Tage, Einsiedeln -2.9 Tage, Andermatt -3.2 Tage und Engelberg -6.4 Tage. Achtung: Engelberg weist in der Periode 1998-2008 keine Messungen im Sommerhalbjahr auf. Dies kann den Trend in Richtung Abnahme verstärken.

4.4.2 Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm

Allgemeines

Abbildung 4.9 zeigt die Entwicklung der Anzahl Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm für ausgewählte Standorte des Untersuchungsgebietes über die Periode 1961 bis 2011. Der Parameter Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm ist abhängig von der Höhe, der räumlichen Lage und der Exposition des Messstandortes). Die Spanne der Ereignisse Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm reicht im Mittel von praktisch „null“ in Altdorf bis über 100 Tage in Andermatt. In noch höheren Lagen steigt die Anzahl Tage natürlich auf noch grössere Werte an.

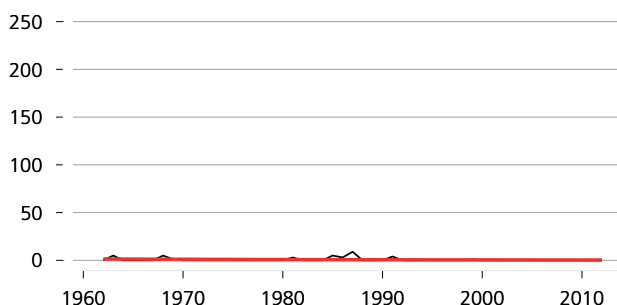
Trends

In Altdorf 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

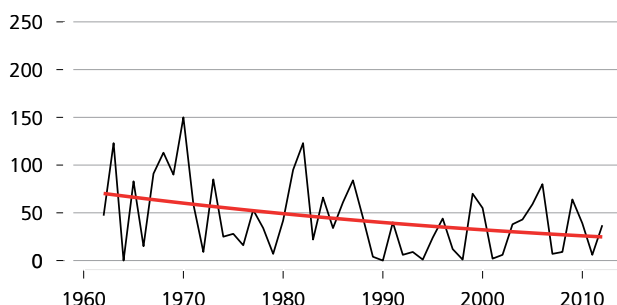
ist aus diesem Grund nicht interpretierbar. Auch die Trends von anderen Stationen sind grundsätzlich mit einer gewissen Vorsicht zu interpretieren. Die Gesamtschneehöhe hängt stark von der genauen Lage in einem Gebiet ab. So können zum Beispiel sonnenexponierte Südhänge bereits ausgeapert sein, während an schattigen Nordlagen noch bedeutende Schneemengen liegen. Da nun einzelne Stationen über den gesamten Zeitraum betrachtet nicht immer am gleichen Standort den Schnee erfasst haben, können Änderungen unter Umständen auch auf „nicht klimatologische Ursachen“ (z.B. Stationsverschiebungen) zurückzuführen sein.

Vor allem die Stationen in mittleren Höhenlagen, wie z.B. Einsiedeln, zeigen über den ganzen Zeitraum betrachtet eine signifikante Abnahme in der Anzahl Tage mit Gesamtschneehöhe ≥ 30 cm. Bei anderen Stationen wie z.B. Andermatt, ist die Abnahme ebenfalls ersichtlich, jedoch ohne signifikanten Trend. Überregionale Untersuchungen bestätigen jedoch die Abnahme an Tagen an denen Schnee liegt speziell in den 1980er und 1990er Jahren (Marty 2008,; Beniston 2012; Scherrer et. al. 2013).

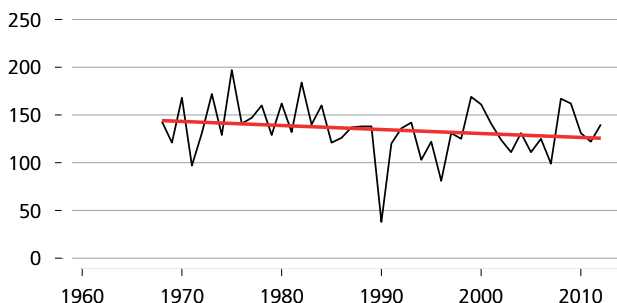
Altdorf



Einsiedeln



Andermatt



Engelberg

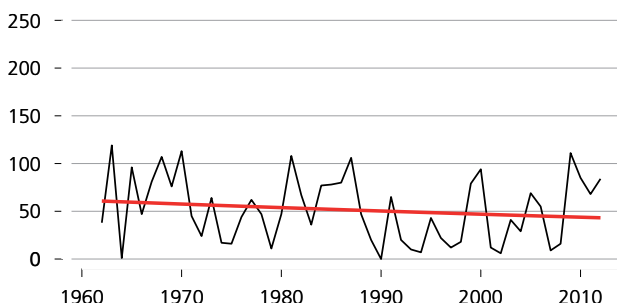


Abbildung 4.9:

Zeitlicher Verlauf der Tage mit Gesamtschnee ≥ 30 cm (Tage des hydrologischen Jahres Okt.-Sept. mit Gesamtschnee ≥ 30 cm) sowie die entsprechenden Trends. Eine Abnahme der Tage mit Gesamtschnee ≥ 30 cm zeigt sich vor allem in mittleren Lagen (Einsiedeln -9.3 Tage pro 10 Jahre, Andermatt -4.1 Tage pro 10 Jahre, Engelberg -3.5 Tage pro 10 Jahre). Sie ist aber nur in der Reihe von Einsiedeln statistisch signifikant und somit entsprechend Vorsichtig zu interpretieren. Engelberg weist in der Periode 1998-2008 keine Messungen im Sommerhalbjahr auf. Dies kann den Trend in Richtung Abnahme verstärken.

4.5 Gletscher der Urschweiz als Klimaindikator

4.5.1 Allgemein

Gletscher sind charakteristische Elemente unserer Gebirgslandschaft, die aus Schnee, Firn und Eis bestehen. Angetrieben durch die Schwerkraft fliesst die Eismasse langsam talwärts. Gletscher ernähren sich durch den abgelagerten Schnee hauptsächlich über den Winter und verlieren an Eismasse durch Schmelze vorwiegend im Sommer. Gletschereis bildet sich durch die Umwandlung von Schnee, der den Sommer überdauert, zuerst zu porösem körnigem Firn und weiter zu kristallinem dichtem Gletschereis. Die Fliessbewegung entsteht sowohl durch Eisdeformation als auch durch Gleiten über den Untergrund.

Gletscher reagieren sensibel auf klimatische Schwankungen mit einer Massenänderung. Während Perioden mit kühler und niederschlagsreicher Witterung bildet sich ein Massenüberschuss, und der Gletscher dehnt sich aus. Umgekehrt kommt es zu einem Rückzug als Folge von einem Defizit im Nachschub in Warmperioden. Dabei haben die alpinen Eisströme einen grossen Teil der Landschaft geformt. So zeugen Moränen von vergangenen Hochständen der Gletscher. Sie finden sich nicht nur in den Alpen nahe der heutigen Gletscher, sondern auch im Mittelland. Sie entstanden während den Eiszeiten. Das milde Klima im Mittelalter führte zu einem markanten Tiefstand der Alpengletscher. In der Neuzeit kam es während deutlich kälterer Perioden in der sogenannten kleinen Eiszeit zu beachtlichen Eisvorstössen wie etwa um die Jahre 1600 und 1850. Mit dem Temperaturanstieg seit dem Beginn der Industrialisierung ist die Gleichgewichtslinie um 100 Meter angestiegen und die Alpengletscher haben beinahe 40% ihrer Fläche und einen grossen Teil ihres Volumens eingebüsst, was an den mächtigen Moränen im Gelände gut zu erkennen ist. Viele Alpengletscher verzeichneten in den 1920er und 1980er Jahren einen zwischenzeitlichen Vorstoss als Reaktion auf eine kurzfristige Periode mit günstiger Witterung. Seither führten die anhaltend überdurchschnittlich warmen Sommer zu einem massiven Eisverlust bei den Gletschern. Sie ziehen sich in immer höhere Lagen zurück. Die Veränderungen der Gletscher werden seit über 100 Jahren festgehalten.

Erhebungen an den Gletschern

Die Veränderungen der Schweizer Gletscher sind ab Mitte des 19. Jahrhunderts - dem letzten allgemeinen Hochstand am Ende der kleinen Eiszeit - gut dokumentiert. Seit 1880 werden sie systematisch erfasst. In einem Netzwerk von kantonalen Forstdiensten und Angehörigen der Hochschulen wird in jährlichen Erhebungen die Längenänderung von rund 120 Gletscherzungen aufgenommen (Gletscherberichte 2011). Davon liegen elf Gletscher in der Urschweiz, deren zwei im Kanton Obwalden und neun im Kanton Uri. Erhebungen der Massenbilanz mit detaillierten Messungen der Schneeakkumulation über den Winter und der Schmelze im Sommer werden an einer Auswahl von Gletschern ausgeführt. Es existieren fünf sehr lange Messreihen von mehr als 50 Jahre Dauer. Für eine Auswahl von rund 50 Gletschern ist die Eisvolumenänderung über die vergangenen rund 100 Jahre bekannt (Bauder et al. 2007). Daraus lässt sich die Massenbilanz ableiten. Diese Daten werden von der Abteilung Glaziologie der VAW (Versuchsanstalt für Wasserbau) an der ETH Zürich gesammelt, ausgewertet und in regelmässigen Veröffentlichungen der breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Schliesslich existieren Erhebungen zur gesamten Vergletscherung in den Schweizer Alpen für die drei Zeitpunkte 1850, 1973 und 2000 (Müller et al. 1976; Maisch et al. 2000; Paul 2003).



Rotfirn
© Archiv VAW / ETH Zürich

4.5.2 Gletscherveränderungen

Gletscher der Urschweiz

In den Kantonen Uri Nidwalden und Obwalden liegen etwa 200 Gletscher (elf davon werden systematisch erfasst siehe unten), die aktuell eine Fläche von rund 70 km² bedecken. Alleine im Kanton Uri beträgt die vergletscherte Fläche über 66 km² was rund 6% der gesamten Kantonsfläche entspricht. Das gespeicherte Eisvolumen wird auf etwa 2 bis 3 km³ geschätzt (Farinotti et al. 2009). Der grösste Gletscher ist der Hüfifirn im Maderanertal mit einer Länge von 6.7 km und einer Fläche von 13.32 km². Er gehört somit zu den 20 grössten Gletschern in den Schweizer Alpen. Aus dem Gebiet der Urschweiz gehören elf Gletscher zum Schweizer Gletschermessnetz mit Erhebungen zur Längenveränderung (siehe Tabelle 4.2).

Tabelle 4.2:

Gletscher im Schweizer Gletschermessnetz mit aktueller Länge (2012), den Flächen aus den Inventar-Erhebungen und dem geschätzten Eisvolumen. Volumenabschätzung aus der Periode 2000-2010.

Name	Kanton	Länge km	Fläche km ²			Volumen km ³
			1850	1973	2000	
Tiefengletscher	UR	2.58	4.5	3.16	2.42	0.093
Sankt Annafirn	UR	0.58	1.1	0.46	0.24	0.005
Chelengletscher	UR	2.21	3.99	3.15	2.01	0.086
Rotfirn (Nord)	UR	1.90	1.61	1.26	0.96	0.028
Dammagletscher	UR	2.38	6.62	5.09	4.75	0.186
Wallenburfirn	UR	1.85	2.54	1.69	1.51	0.058
Brunnifirn	UR	2.90	4.41	2.94	2.52	0.126
Hüfifirn	UR	6.74	15.1	13.64	13.32	1.073
Griessfirn	UR	1.36	1.73	0.90	0.75	0.010
Firnalpeligletscher (Ost)	OW	0.76	1.18	0.86	0.69	0.019
Griessenfirn	OW	1.05	2.79	1.29	0.97	0.030

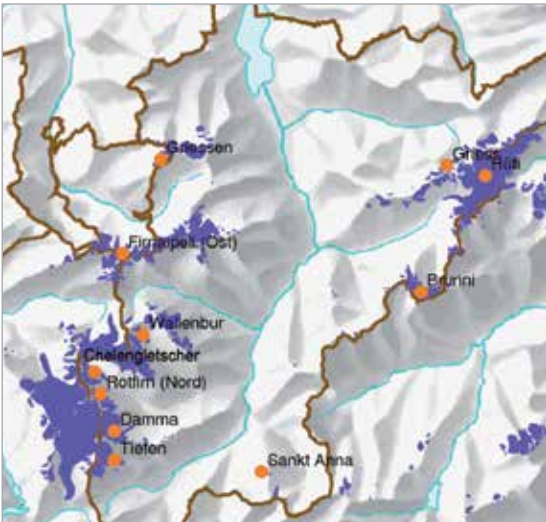


Abbildung 4.10:
Vergletschertes Gebiet der Urschweiz mit Gletschern aus dem Schweizer Gletschermessnetz (weitere Kennzahlen sind der Tabelle 4.2 zu entnehmen).

Wie in den übrigen Schweizer Alpen haben auch die Gletscher in der Urschweiz über die vergangenen rund 150 Jahre massiv an Volumen und Fläche eingebüsst. So hat die vergletscherte Fläche der rund 200 Gletschern im Gebiet der Urschweiz von rund 140 km² um 1850 auf etwa 94 km² im Jahr 1973 abgenommen und sich bis heute nahezu halbiert. Diese Tendenz widerspiegelt sich auch deutlich in den vorhandenen Messreihen der Längenänderung der einzelnen Gletscher (Abbildung 4.11).

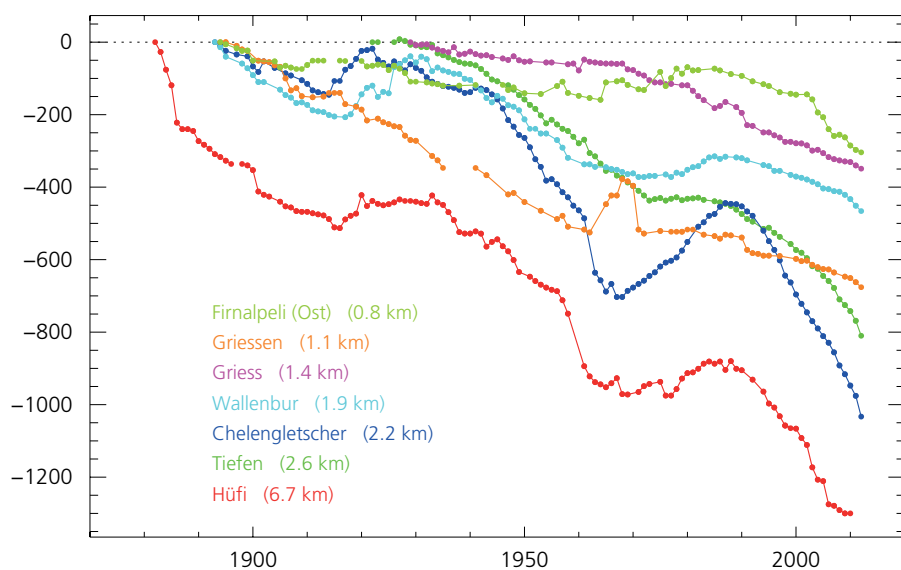


Abbildung 4.11:

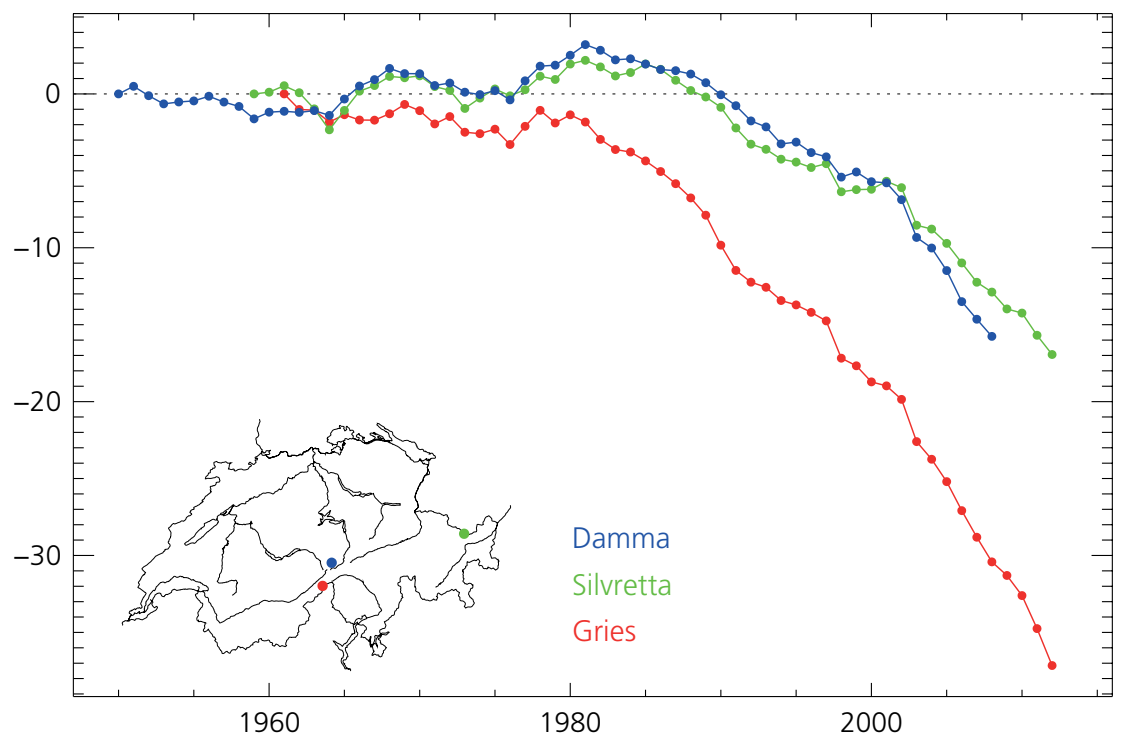
**Aufsummierte Längen-
änderung (m) für ausge-
wählte Gletscher aus der
Urschweiz. In der Klammer
sind die aktuellen Längen
angeben.**

Die Messungen zeigen überdies, dass die Veränderungen nicht gleichmässig verlaufen sind. Sehr deutlich sichtbar sind die beiden Perioden 1910 bis 1930 und 1970 bis 1990 in denen einige Gletscher vorgestossen sind, andere wiederum in ihrem allgemeinen Rückzug stagnierten. Wie der einzelne Gletscher auf die Klimaeinflüsse zu reagieren vermag, zeigt sich im unterschiedlichen Anpassungsverhalten der Gletscherzunge. Dieses hängt von seiner Grösse aber auch weiteren Faktoren wie der Neigung ab. Sehr grosse und flache Gletscher wie der Grosse Aletschgletscher verhalten sich träge und reagieren nur mit grosser Verzögerung, während kleinere und steilere Gletscher ihre Ausdehnung bereits an kurzfristige Schwankungen im Klima anpassen. Bei ganz kleinen Gletschern wiederum ist die Fließbewegung vernachlässigbar, und sie zeigen keine Anpassungsdynamik.

Ein sehr viel direkteres Abbild der herrschenden Witterung im Beobachtungszeitraum vermitteln die Messungen der Massenbilanz. Sie dokumentieren die Schneeakkumulation und die Schmelze. Wie die Witterung fluktuieren diese stark von Jahr zu Jahr. Trotzdem sind klare Trends über die letzten Jahrzehnten auszumachen mit Perioden von ausgeglichener oder teilweise auch positiver Bilanz und Perioden von ver-

stärkter Schmelze. Für den Dammagletscher (UR) ist die Volumenänderung seit 1939 detailliert bekannt. Der Gletscher hat zwischen 1939 und 2007 rund 136 Mio m³ Eis verloren, was etwa 40% des anfänglichen Volumens entspricht. Aus der Volumenänderung lässt sich die Massenbilanz rekonstruieren. In Abbildung 4.12 ist ein Vergleich der rekonstruierten Massenbilanz-Zeitreihe mit den langjährigen Messreihen vom Griesgletscher im Nufenengebiet (VS) und dem Silvrettagletscher im Prättigau (GR) dargestellt. Die Resultate dokumentieren deutlich die Trendwende um 1980. Seither haben die Gletscher viel an Eismasse eingebüsst. Dies ist die Folge verstärkter Schmelze wegen den fast ausnahmslos vorherrschenden Sommern mit im Vergleich zur Normperiode 1961-1990 überdurchschnittlichen Temperaturen.

Abbildung 4.12:
**Aufsummierte
Massenbilanz (in Meter
Wasseräquivalent) der
Gletscher Gries, Silvretta
und Damma.**



4.5.3 Bedeutung und Konsequenzen

Die vorhandene Datengrundlage der Gletscher in der Urschweiz zeigt die Auswirkungen von Schwankungen und Veränderungen im Klima auf die Umwelt auf. Nicht ohne Grund gehört die gut dokumentierte Schmelze der Alpengletscher zu den deutlichsten Anzeichen dafür, dass sich die Energiebilanz an der Erdoberfläche in letzter Zeit signifikant verändert hat. Die langjährigen Messreihen aus den Kantonen Uri und Obwalden sind ein wichtiger Bestandteil innerhalb des Schweizer Messnetzes und gehören auch weltweit zu den umfassendsten.

Neben dem Zusammenhang mit dem Klima sowie der Rolle bei der Prägung unserer Landschaft sind die Gletscher auch als Wasserspeicher von grosser Bedeutung für die Wirtschaft und den Schutz von Naturgefahren. Die Gletscher sind Teil des Wasserkreislaufs. Die Niederschläge über den Winter werden kurzfristig in der Schneedecke und längerfristig als Eis gespeichert. Gletscher steuern den Abfluss indem die Niederschläge sowohl saisonal als auch längerfristig verzögert als Schmelze an warmen Sommertagen abgegeben werden. Zudem können die Gletscher auch die Wirkung von Starkniederschlägen vermindern in dem sie einen gewissen Teil des Niederschlages zurückhalten. Die Abflüsse aus Glet-

schergebieten erlangen deshalb auch wasserwirtschaftliche Bedeutung. So werden viele Speicherseen - wie der Göscheneralpsee - zur Energiegewinnung mit dem Schmelzwasser von Gletschern gespeist. Teilweise gelangen die Gletscher auch im Zusammenhang mit Naturgefahren wie Gletscherhochwasser und Eislawinen (Raymond et al. 2003) in den Fokus. Schliesslich haben die Gletscher eine wichtige touristische Anziehungskraft, wie auch das Beispiel des Titlis im Untersuchungsgebiet zeigt. Die Auswirkungen des voranschreitenden Klimawandels in der Zukunft auf die Gletscher lassen sich an Hand der neusten regionalen Klimaszenarien (ch2011 2011) aufzeigen. Am Beispiel des Dammagletschers ist in Abbildung 4.13 die zukünftige Entwicklung dargestellt. Sie zeigt die Verteilung der Eisdicke im momentanen Zustand (2010) und zu drei späteren Zeitpunkten. Gletscher wie jene in der Urschweiz, deren Einzugsgebiete sich nicht grossflächig oberhalb von 3500 m ü.M. befinden, werden bis zum Ende des 21. Jahrhunderts auf marginale Eisreste zusammenschmelzen – die Gletscher in der Urschweiz werden allesamt verschwinden. Dies geschieht nicht ohne Konsequenzen auf die Abflüsse, die sich zunehmend nur noch auf die Schneeschmelze und auf Niederschlagsperioden beschränken werden.

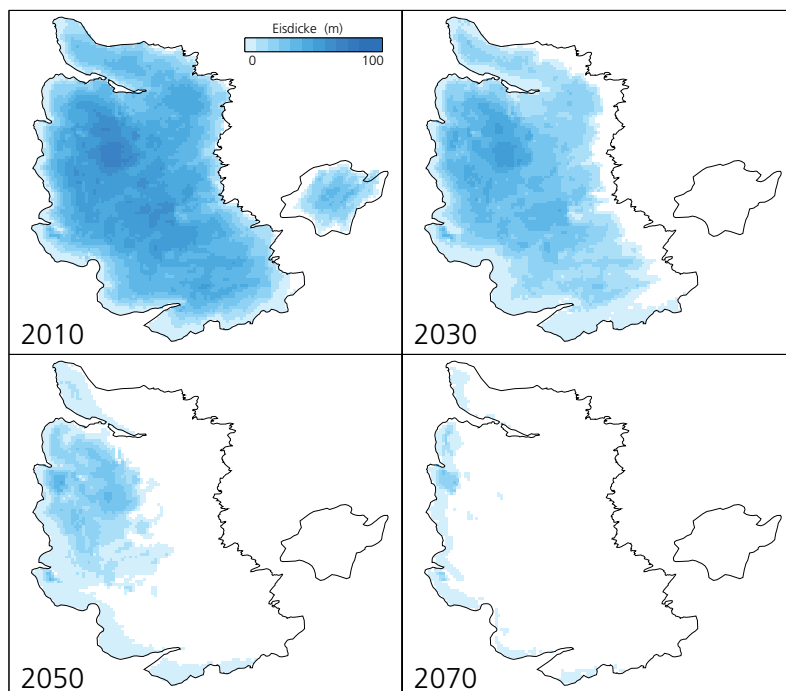


Abbildung 4.13:

Entwicklung des Dammagletschers für ausgewählte Zeitpunkte in diesem Jahrhundert. Die Farbtonung entspricht der Eisdicke und des Gletscherumrisses der aktuellen Ausdehnung 2010.

4.6
Vegetation der Urschweiz
als Klimaindikator

Die Phänologie

Die Phänologie beschäftigt sich mit den im Jahresablauf wiederkehrenden Wachstums- und Entwicklungserscheinungen der Lebewesen. In der Pflanzenphänologie werden die Eintrittstermine von Blattentfaltung, Blüte, Fruchtreife, Blattverfärbung und -fall beobachtet, die sogenannten Phänophasen. Schon in früheren Zeiten haben die Menschen markante Erscheinungen der Vegetationsentwicklung festgehalten. Die längsten kontinuierlichen Beobachtungsreihen in der Schweiz sind der Blattaussbruch der Rosskastanie in Genf seit 1804 und die Blüte der Kirschbäume in Liestal seit 1894. Seit 1951 existiert in der Schweiz ein gesamtschweizerisches Netz mit heute rund 160 Beobachtungsstationen, das von MeteoSchweiz betreut wird. Bei diesen Stationen werden 26 Pflanzenarten und entsprechend 69 Phänophasen beobachtet. In der Phänologie wird immer derselbe Baum oder Baumbestand und dasselbe Wiesenstück beobachtet. Dabei darf aber nicht vergessen werden, dass die phänologischen Beobachtungen keine exakt gemessenen Grösse sind, sondern dass immer auch eine gewisse subjektive Einschätzung des Phaseneintritts durch den Beobachter mitspielt.

Verschiedene wissenschaftliche Arbeiten der letzten Jahre zeigten, dass in unseren Klimazonen die phänologischen Eintrittstermine im Frühling fast ausschliesslich von der Lufttemperatur bestimmt werden und die Niederschlagsverhältnisse nur eine zweitrangige Rolle spielen (Studer et al. 2005). Dadurch werden die phänologischen Daten sehr wichtige Indikatoren der Klimaänderung, denn die Zunahme der Temperaturen wirkt sich direkt auf die Vegetationsentwicklung aus. In zahlreichen Publikationen konnte nachgewiesen werden, dass als Folge der Erwärmung die phänologischen Phasen im Frühling und Sommer früher eintreten als vor einigen Jahrzehnten (Defila und Clot 2001; 2005). Bei einigen Bäumen, beispielsweise bei der Buche und der Fichte, spielt für den Termin der Blattentfaltung neben der Temperatur auch die Tageslänge eine Rolle (Vitasse und Basler 2012; Basler und Körner 2012). Auch bei den Herbstphasen sind neben der Temperatur noch weitere Einflussgrössen massgebend.

Die Phänologischen Messstationen in der Urschweiz

Im Phänologischen Beobachtungsnetz der Schweiz liegen fünf Stationen in der Urschweiz (Tabelle 4.3). Sie liegen in Höhenlagen von 470 bis 1500 m ü.M. was einen Höhenstufenvergleich zulässt.

Tabelle 4.3:
Phänologische Beobachtungsstationen von MeteoSchweiz in der Urschweiz.

Name	Höhe m ü.M.	Beobach- tungsdauer	Beobachter- wechsel
Altdorf	470	1975-1995, 1999-heute	1976, 1982, 1983, 1999
Sarnen	500	1954-heute	1987, 2008
Silenen	510	1992-heute	-
Einsiedeln	910	1958-1959, 1968, 1975-2011	1968, 1975, 1976, 1984
Hoch Ybrig	1500	1992, 1994-heute	-

Die längsten Reihen liegen aus Sarnen und Einsiedeln vor. Auch die Reihe von Altdorf begann 1975. In Altdorf fanden jedoch viele Beobachterwechsel statt und zudem wurde die Station von 1983 bis 1995 nach Attinghausen verlegt. Diese Beobachterwechsel und die Standortveränderung sind deutlich sichtbar mit Sprüngen in der Datenreihe.

Eine einzelne phänologische Datenreihe kann stark von lokalen Standortfaktoren, wie z.B. Exposition, Konkurrenz, Schädlinge, Bodeneigenschaften oder genetische Veranlagung der beobachteten Pflanze beeinflusst sein. Zudem ist die Beobachtung einer phänologischen Phase immer auch etwas subjektiv. Robuste Aussagen über die Reaktion der Vegetation auf das Klima lassen sich deshalb erst machen, wenn verschiedenen Stationen einer klimatischen Region zusammengefasst werden.

Diesem Kapitel über Phänologie liegen nicht korrigierte, beobachtete Rohdaten zu Grunde. Lange Datenreihen von möglichst nur einem Beobachter erlauben jedoch trotzdem eine klimatologische Interpretation.

4.6.1 Der Frühlingsindex

Der Frühlingsindex ist eine statistische Masszahl für den Zeitpunkt der Vegetationsentwicklung im Frühling im Vergleich zum langjährigen Mittel 1981-2010. Um den phänologischen Frühling als Gesamtheit zu charakterisieren, werden für den Frühlingsindex die ersten 10 Phänophasen im Jahr verwendet, die vom Januar bis Ende Mai auftreten. Bei den 10 Phasen handelt es sich um die Blüte des Haselstrauchs, Blüte des Huflattichs, Blüte des Buschwindröschens, Blattentfaltung der Rosskastanie, Blüte des Kirschbaumes, Blattentfaltung des Haselstrauchs, Nadelaustrieb der Lärche, Blüte des Wiesenschaumkrautes, Blattentfaltung der Buche und die Blüte des Löwenzahns. Die Abweichung vom mittleren Eintrittstermin (1981-2010) wird mit Hilfe einer Hauptkomponentenanalyse bestimmt. Ein Resultat dieser Analyse, die 1. Hauptkomponente, eignet sich, um die Variabilität von Jahr zu Jahr anschaulich darzustellen (Studer et al. 2005). Positive Werte zeigen einen späten Frühlingsbeginn an, negative Werte einen frühen. Je grösser/kleiner der Index, umso später/früher fand der Frühling im entsprechenden Jahr statt.

Da es nicht möglich ist, einen Frühlingsindex nur für die fünf Urschweizer Phänologiestationen zu rechnen, wurden weitere Stationen aus angrenzenden Kantonen miteinbezogen, um den Frühlingsindex für die Urschweiz zu berechnen (Stationen: Altdorf, Einsiedeln, Hoch-Ybrig, Sarnen, Silenen, Edlibach, Escholzmatt, Entlebuch, Wolhusen, Hochdorf, Luzern, Näfels, Elm, Gadmen, Disentis).

Der Frühlingsindex (Abbildung 4.14) zeigt, dass zwischen 1961 und 1988 ein später Frühlingsbeginn dominierte und zwischen 1989 und 2012 der Frühling meistens früher als im Mittel eintrat. Dieser Verlauf des Frühlingsindex der Urschweiz ist sehr ähnlich wie jener für die ganze Schweiz. Einen sehr späten Frühling gab es in den Jahren 1970, 1973, 1963, 1986, 1962 und 1984, einen frühen Frühling zeigten die Jahre 2011, 2007, 1961, 1994 und 2002. Der Frühlingsbeginn ist sehr eng mit den Temperaturen von Januar bis Mai und besonders stark mit jenen von März bis Mai korreliert (vgl. Abbildung 3.1), da die meisten Frühlingsphasen während dieser Zeit auftreten. Allgemein gilt, dass je höher die Temperatur vor dem Eintreffen der phänologischen Phase ist, umso schneller entwickeln sich die Pflanzen und umso früher tritt die Phase ein. Kalte Frühlingstemperaturen wie beispielsweise 1970 resultieren in einem sehr späten Frühling oder sehr warme Frühlingstemperaturen wie 2007 und 2011 in einem frühen Frühling.

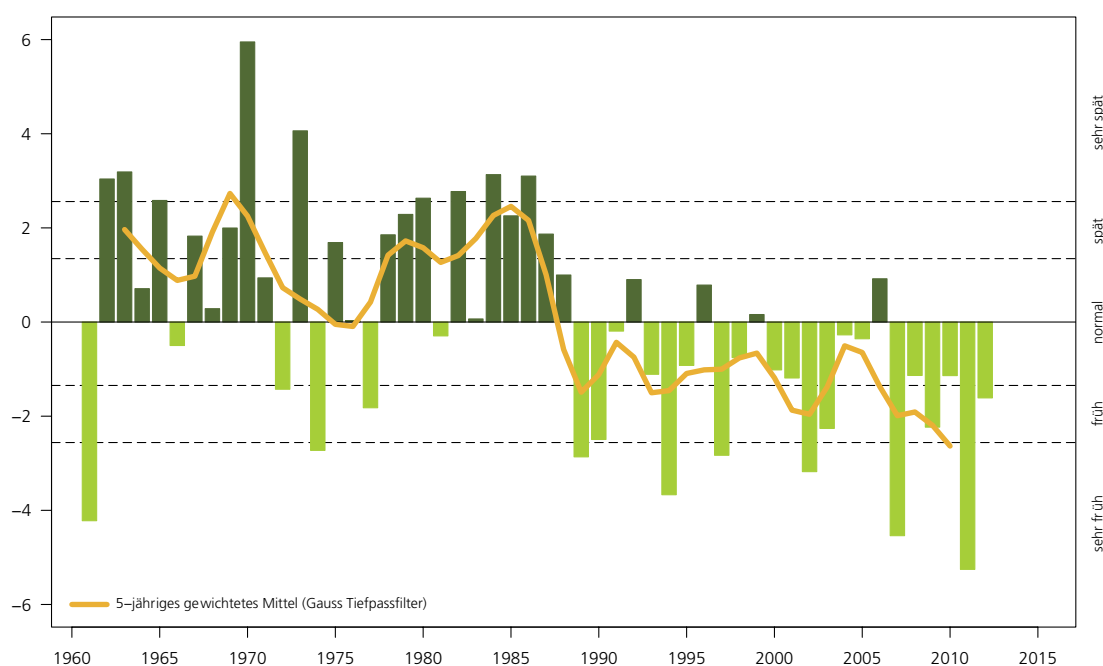


Abbildung 4.14:

Frühlingsindex der Urschweiz. Positive Werte zeigen einen späten Frühlingsbeginn an, negative Werte einen frühen. Je grösser bzw. kleiner der Index ist, umso später bzw. früher fand der Frühling im entsprechenden Jahr statt.

4.6.2 Ausgewählte phänologische Reihen der Urschweiz

Die Vollblüte des Löwenzahns

Der Löwenzahn blühte in Sarnen von 1954 bis 1988 meist erst ab dem 10. April. Seit 1989 kommen immer häufiger auch Blüten im März und Anfang April vor. Diese Verfrühung der Vollblüte des Löwenzahns sind in den langen Reihen von Sarnen und Einsiedeln deutlich sichtbar und der lineare Trend ist jeweils stark signifikant ($p < 0.001$). Heute blüht der Löwenzahn in Sarnen rund 30 Tage früher als in den 1950er und 60er Jahren, in Einsiedeln blüht er 16 Tage früher als in den 1970er Jahren. Sehr schön lassen sich die unterschiedlichen Blütezeiten in verschiedenen Höhenlagen sehen. In Einsiedeln blüht der Löwenzahn im Mittel 33 Tage später als in Sarnen. Eine Verspätung von acht Tagen pro 100 Höhenmeter ist im Vergleich zu anderen phänologischen Phasen,

die im allgemeinen mit rund fünf Tagen pro 100 m angegeben wird, relativ gross (Abbildung 4.15, Abbildung 4.16). Sie liegt jedoch in Variationsbereich der Schweizer Resultate (Defila 1991).

Die Beobachtungsreihe in Altdorf weist zwei längere Unterbrüche auf und auch die Standortverschiebung von 1983 bis 1995 ist an den deutlich späteren Daten sichtbar. Aus diesen Gründen lässt sich für Altdorf keine Aussage über Veränderungen im Blühbeginn machen. Auch bei den beiden kürzeren Reihen von Silenen und Hoch-Ybrig lassen sich keine Veränderungen nachweisen.

Abbildung 4.15:
**Termin der Vollblüte
des Löwenzahns.**

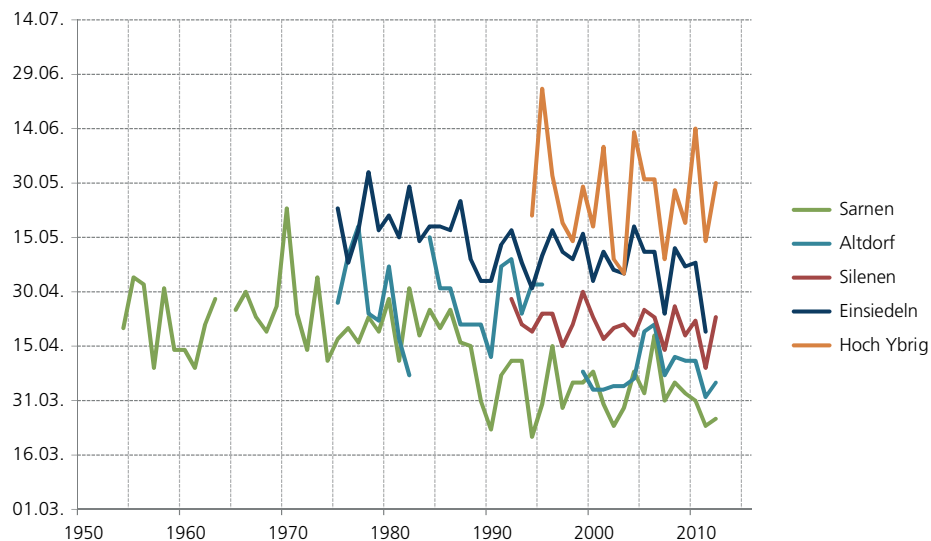
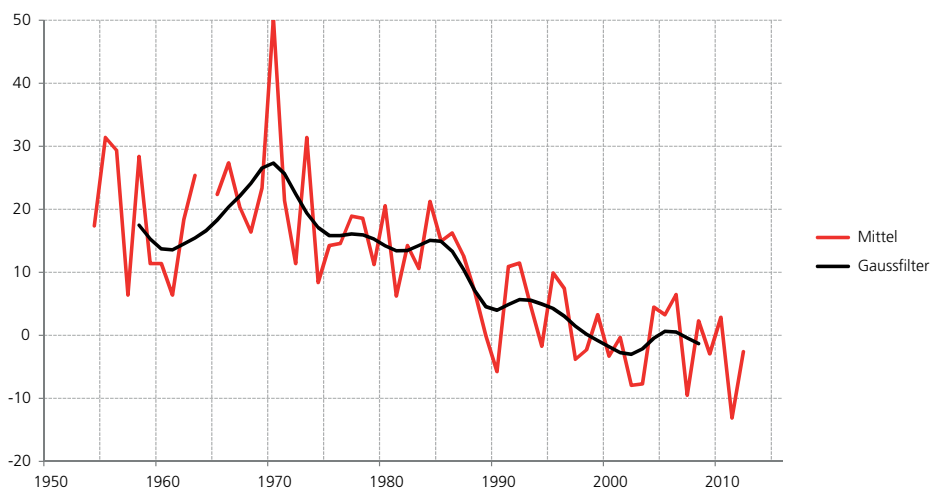


Abbildung 4.16:
**Vollblüte des Löwenzahns:
Abweichung vom Mittel
1992-2012 in Tagen als
Mittelwert der Stationen
Sarnen, Altdorf, Silenen,
Einsiedeln und Hoch Ybrig.
Der Trend der Mittelkurve
wird mit einem 10-jährigen
Gaussfilter dargestellt.**



Der Nadelaustrieb der Lärche

Beim Nadelaustrieb der Lärche lassen sich ebenfalls signifikante Trends zu einer Verfrühung feststellen. In Sarnen blüht die Lärche heute zwölf Tage früher, d.h. im Mittel am 4. April während sie in den 1950er Jahren im Mittel am 16. April blühte. In Einsiedeln beträgt die Verfrühung 20 Tage. In den 1970er Jahren ergrünten die Lärchen im Mittel am 11. Mai und heute bereits am 21. April. Auch in Altdorf ist eine Verfrühung sichtbar, allerdings lässt sie sich aufgrund der lückenhaften Datenreihe nicht quantifizieren. Die Reihen von Silenen, Sarnen und Altdorf zeigen in vielen Abschnitten der Kurven eine gute Gleichläufigkeit. Allerdings sind die Termine seit dem Beobachterwechsel in Sarnen 2008 deutlich später als an den Nachbarstationen. Dies kann möglicher-

weise mit der Beobachtung eines anderen Baumes an einem anderen Standort zusammenhängen. Ein sehr früher Austrieb der Lärchen wurde in den Jahren 1994, 1997 und 2002 beobachtet. Im Hoch-Ybrig ergrünen die Lärchen rund 43 Tage später als an den tief liegenden Stationen, wobei der Nadelaustrieb sehr grosse jährliche Schwankungen aufweist (Abbildung 4.17, Abbildung 4.18).

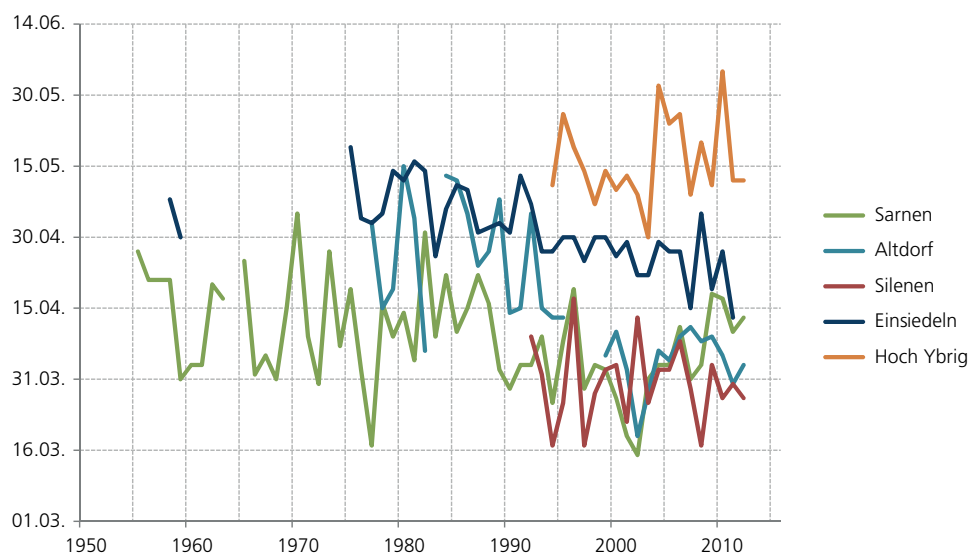


Abbildung 4.17:

Termin des Nadelaustriebes der Lärche.

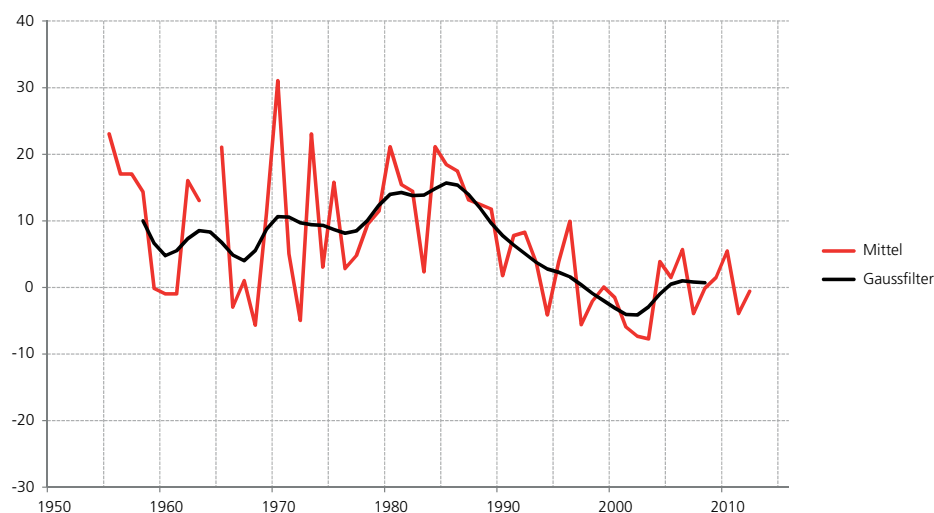


Abbildung 4.18:

Nadelaustrieb der Lärche: Abweichung vom Mittel 1992-2012 in Tagen als Mittelwert der Stationen Sarnen, Altdorf, Silenen, Einsiedeln und Hoch Ybrig. Der Trend der Mittelkurve wird mit einem 10-jährigen Gaussfilter dargestellt.

Die Blattentfaltung der Buche

In den tiefer gelegenen Stationen Sarnen, Altdorf (seit 1999) und Silenen verlaufen die Kurven sehr parallel und die Blattentfaltung der Buchen tritt zu einem sehr ähnlichen Zeitpunkt auf. In Einsiedeln entfalten sich die Blätter der Buchen zehn Tage später als an diesen Stationen. Signifikante Trends zu einer Verfrühung sind in Einsiedeln mit 15 Tagen seit 1975 und in Sarnen mit fünf Tagen seit 1954 vorhanden. Die Reihe von Altdorf weist aufgrund der Beobachterwechsel sehr starke Schwankungen auf (Abbildung 4.19, Abbildung 4.20). Die Blattentfaltung der Buche wird nicht wie bei den frühen Frühlingsphasen allein durch die Temperatur beeinflusst, denn auch die Tageslänge spielt eine wichtige Rolle (Vitasse und Basler 2013).

Abbildung 4.19:

**Termin der Blattentfaltung
der Buche.**

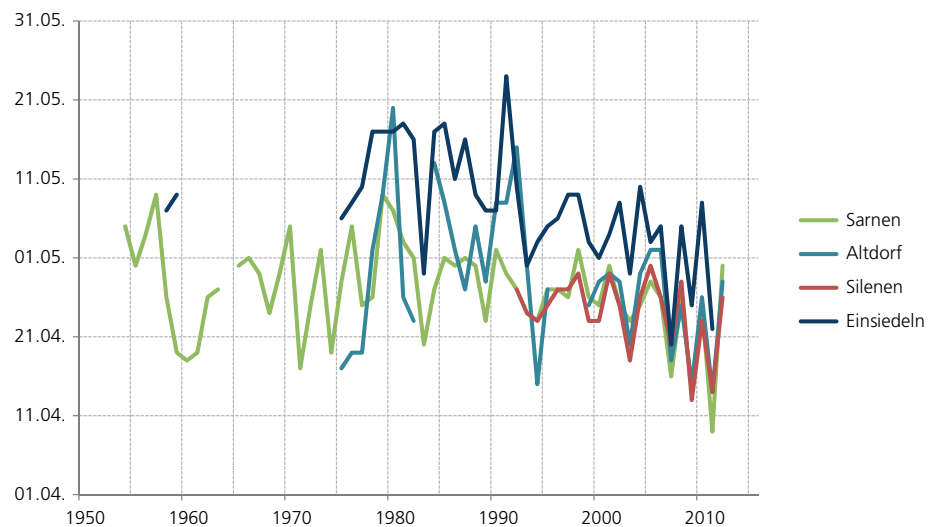
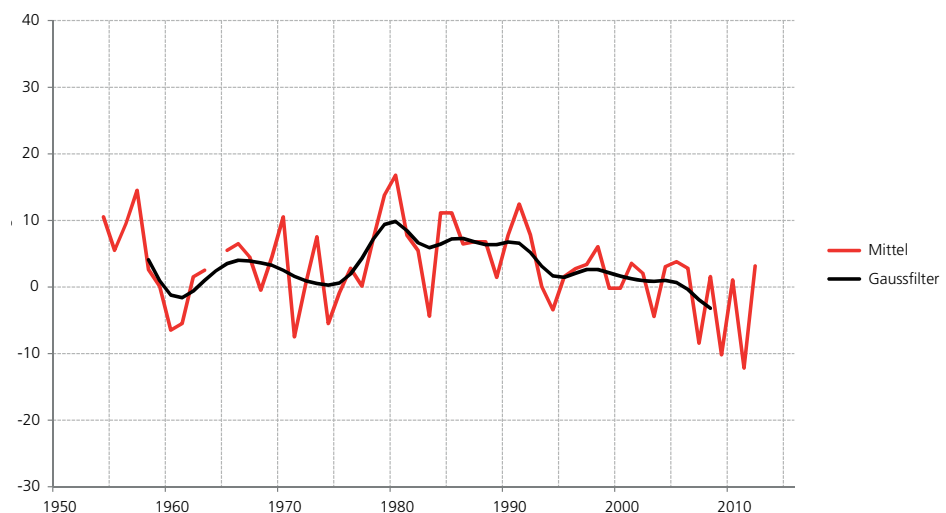


Abbildung 4.20:

**Blattentfaltung der Buche:
Abweichung vom Mittel
1992-2012 in Tagen als
Mittelwert der Stationen
Sarnen, Altdorf, Silenen
und Einsiedeln. Der Trend
der Mittelkurve wird mit
einem 10-jährigen Gauss-
filter dargestellt.**



Die Blattverfärbung der Buche

Die Blattverfärbung der Buche ist eine der wenigen Herbstphasen, die beobachtet wird. Allerdings liegt Hoch-Ybrig zu hoch und es gibt dort keine Buchen. Die Herbstphasen sind nicht wie die Frühlingsphasen allein durch die Temperatur beeinflusst. Verschiedene weitere Faktoren können die Laubverfärbung auslösen: Trockenheit, Schädlinge, Tageslänge, kühle Nächte, wobei die genauen Zusammenhänge noch zu wenig bekannt sind. Bei der Blattverfärbung der Buche fällt die deutliche Verfrühung in Einsiedeln auf, die seit 1975 70 Tage beträgt. Eine solch starke Verfrühung ist aus anderen Stationen derselben Höhenstufe nicht bekannt. Es gibt Stationen im Jura und in den Voralpen, die ebenfalls eine Verfrühung zeigen (z.B. Elm, Wildhaus, La Brévine), aber diese liegen im Bereich von 16-25 Tagen seit 1961 (Abbildung 4.21, Abbildung 4.22). Die Ursachen dieser Verfrühung in Einsiedeln sind nicht bekannt. Es können lokale Ursachen sein oder

es ist auch möglich, dass eher der Beginn der Blattverfärbung und nicht der Zeitpunkt, wenn mindestens 50% der Blätter verfärbt sind, beobachtet wurde. In Sarnen verfärbten sich die Blätter um 21 Tage später als 1954 ($p < 0.001$). Der Trend von Altdorf zeigt eine Verfrühung um 12 Tage ($p = 0.017$), jener von Silenen ist nicht signifikant. Auffällig ist die sehr frühe Blattverfärbung in Silenen und Altdorf im Jahr 2003, dem starken Trocken- und Hitzesommer, der vielenorts zu einer sehr frühen Blattverfärbung führte. Allgemein beobachtet man in der ganzen Schweiz bei den phänologischen Herbstphasen ungefähr gleich viele positive und negative Trends (Defila und Clot 2001). Es scheint auch, dass bei den Herbstphasen die Höhenabhängigkeit kaum vorhanden ist, d.h., dass der zeitliche Unterschied mit zunehmender Höhe nur wenige Tage beträgt (mündl. Mitt. C. Defila).

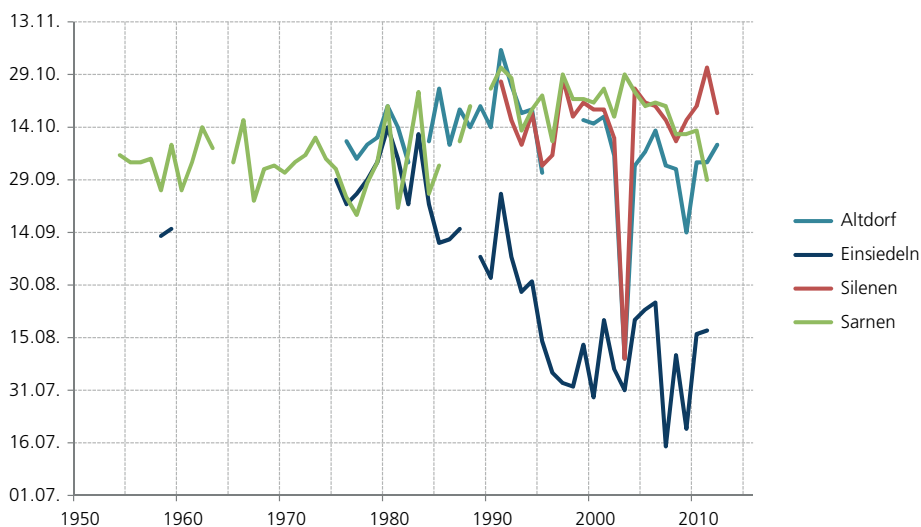


Abbildung 4.21:
**Termin der Blattverfärbung
der Buche.**

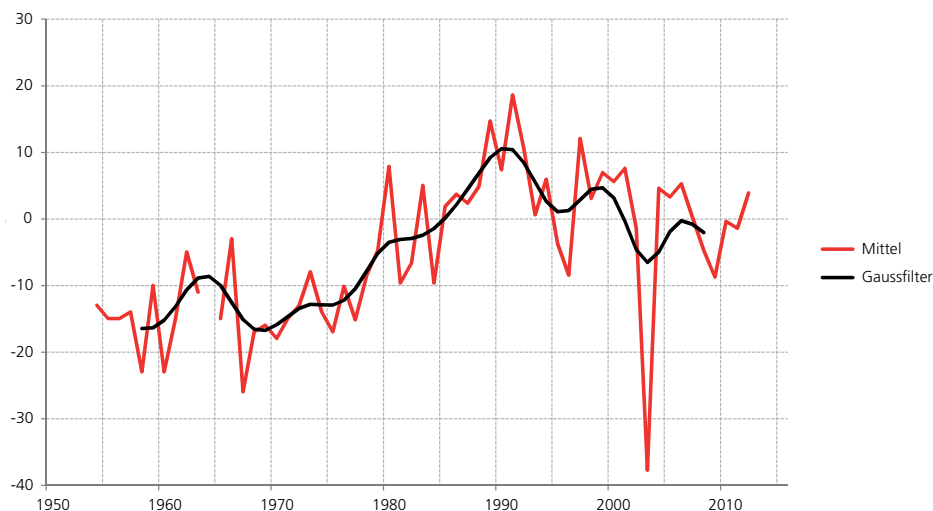
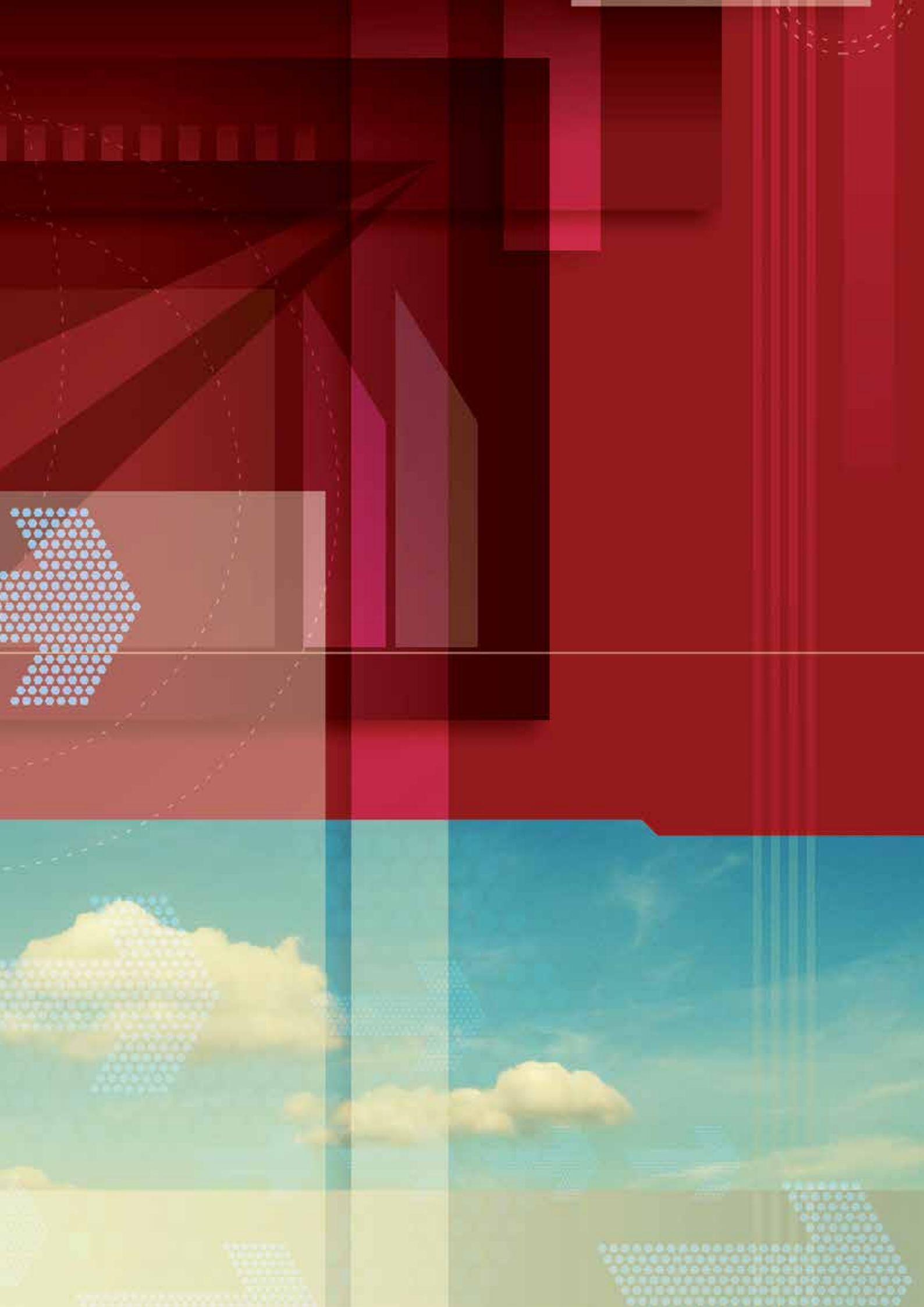


Abbildung 4.22:
**Blattverfärbung der Buche:
Abweichung vom Mittel
1992-2012 in Tagen als
Mittelwert der Stationen
Sarnen, Altdorf und Silenen.
Der Trend der Mittelkurve
wird mit einem 10-jährigen
Gaussfilter dargestellt.**



5| Zukünftige Klimaentwicklung

51

Gemäss heutigen Kenntnissen wird das Klima in der Urschweiz im Laufe des 21. Jahrhunderts signifikant vom heutigen und vergangenen Zustand abweichen. Die Mitteltemperaturen werden sehr wahrscheinlich in allen Jahreszeiten um mehrere Grade ansteigen. Als Folge davon wird sich unter anderem die Anzahl Sommertage deutlich vergrössern und die Vegetationsperiode verlängern. Die Anzahl Frosttage sowie die Tage mit Neuschnee hingegen werden abnehmen. Die Änderungen werden je nach Höhenlage unterschiedlich ausfallen. Bis Ende des Jahrhunderts dürften die mittleren Niederschlagsmengen im Sommer in der ganzen Urschweiz deutlich abnehmen. Im Winter, Frühling und Herbst gibt es kein eindeutiges Signal und die Niederschläge können zu- oder abnehmen.

Es muss auch eine Änderung gewisser Wetterextreme erwartet werden. So ist von häufigeren, intensiveren und länger anhaltenden Wärmeperioden im Winter 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 Klima der Urschweiz massgeblich durch den Verlauf des globalen Ausstosses von Treibhausgasen beeinflusst. Klimamodelle zeigen, dass mit Reduktionsmassnahmen von Treibhausgasen, die auf ein globales 2 Grad C-Ziel ausgerichtet sind, die Erwärmung in der Urschweiz mit rund 1.4 Grad C als wahrscheinlichster Wert zwei bis drei Mal tiefer ausfallen würde, als wenn keine Reduktionsmassnahmen ergriffen werden. Eine zusätzliche Erwärmung von 1.4 Grad C entspricht etwa der schon beobachteten Erwärmung zwischen 1864 und 2010.



5.1 Einleitung

Laut dem 4. Bericht des IPCC kann davon ausgegangen werden, dass die mittlere globale Temperatur bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (2090 bis 2099) gegenüber der Periode 1980 bis 1999 zwischen etwa 1.1 Grad C und 6.4 Grad 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 in der Urschweiz?

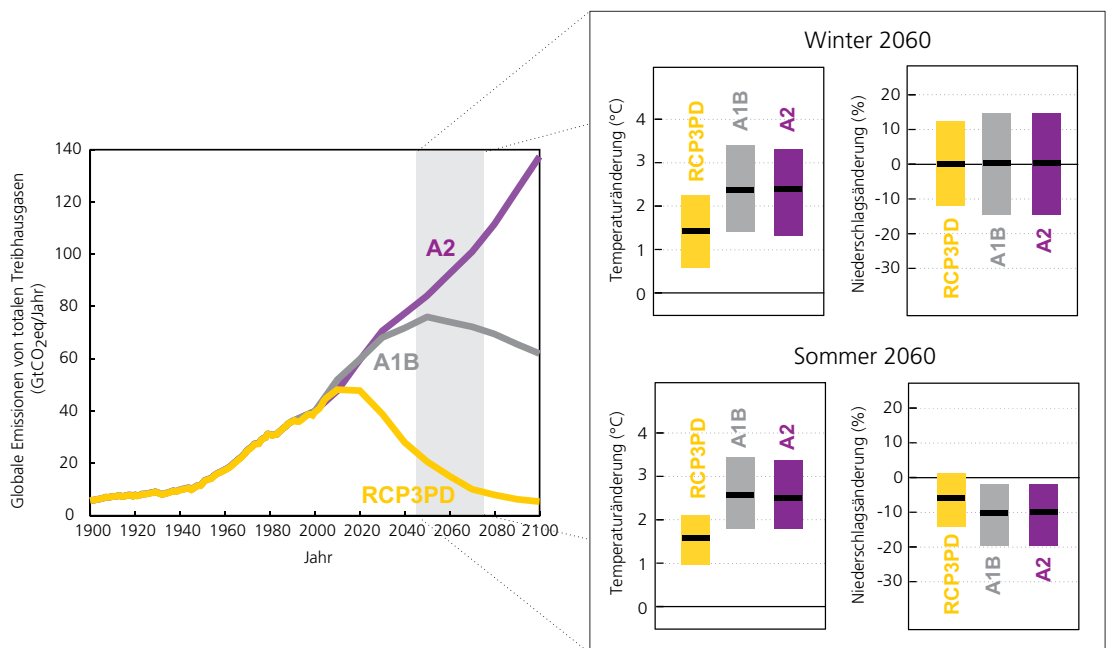
Genauso wie sich die Klimaentwicklung der Urschweiz in der Vergangenheit von der globalen Klimaentwicklung unterscheidet, sind in Zukunft Unterschiede zwischen der globalen und der lokalen Klimaentwicklung in der Urschweiz zu erwarten. Um ein konkretes Bild über die zukünftige Klimaentwicklung der Schweiz 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 (Abbildung 5.1).

Klimamodelle erlauben keine Aussagen zu Temperatur oder Niederschlag für ein konkretes Jahr und einen spezifischen Ort (Bsp. 10 Grad C am 21. September 2071 in Altdorf). 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 bis 2099) und eine bestimmte Region vorstellen (Bsp. Alpennordseite). „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 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 schon voll im Gange ist und die Temperaturen heute (1980 bis 2009) diejenigen der vorindustriellen Verhältnisse des 19. Jahrhunderts schon um rund 1 Grad C übertreffen (vgl. Kapitel 3.2.2).

Abbildung 5.1:
Totale globale anthropogene Treibhausgasemissionen der drei in diesem Bericht berücksichtigten IPCC Emissionsszenarien RCP3PD (gelb), A1B (grau) und A2 (lila) für die Jahre 1900-2100 und projizierte Urschweizer Temperatur- (°C) und Niederschlagsänderungen (%) für „2060“ (das Mittel der Periode 2045-2074) gegenüber 1980-2009 im Winter (oben) und Sommer (unten).



5.2 Emissionsszenarien

Das Ausmass der Klimaänderung in der Urschweiz 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 und Swart 2000; Moss et al. 2010). Eine Auswahl davon ist in Abbildung 5.2 dargestellt. In diesem Bericht verwenden wir drei verschiedene Emissionsszenarien (Abbildung 5.2):

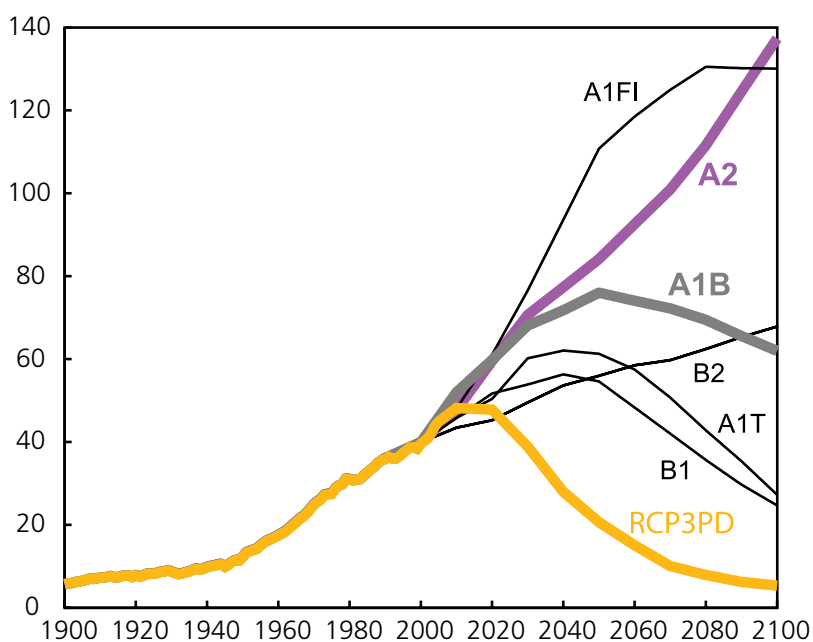


Abbildung 5.2:

Totale globale anthropogene Treibhausgasemissionen für ausgewählte IPCC Emissionsszenarien. Kohlendioxidäquivalent (CO_2eq) ist eine Referenzeinheit, mit der alle anderen Treibhausgase ausser CO_2 in CO_2 Einheiten ausgedrückt werden können. Die drei Emissionsszenarien dieses Berichts sind in fett dargestellt.

A2: keine Interventionsmassnahmen. Stetige Zunahme der Treibhausgasemissionen bis 2100.

A1B: keine Interventionsmassnahmen. Zunahme der Treibhausgasemissionen bis ca. 2060, dann leichte Abnahme aufgrund angenommenen technologischen Fortschritts.

RCP3PD: mit Interventionsmassnahmen. Emissionen werden bis 2050 um etwa 50% gesenkt im Vergleich zu 1990.

5.3 Szenarien für Temperatur und Niederschlag

Temperatur

Tabelle 5.1 zeigt, dass gemäss aktuellen Klimamodellen die Urschweiz während des 21. Jahrhunderts in allen Jahreszeiten deutlich wärmer wird. 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 mittlere Erwärmungen im Vergleich zu heute (Periode 1980-2009) von 0.9-1.3 Grad C um 2035, 2.0-2.6 Grad C um 2060 und 2.7-3.7 Grad C um 2085. Wegen Unsicherheiten durch klimatische Fluktuationen

und Modellungenauigkeiten müssen aber auch höhere oder tiefere Werte als möglich angesehen werden. So sind z.B. für das Jahr 2060 sowohl moderate Erwärmungen von 1.2-1.8 Grad C (tiefe Abschätzung) als auch relativ starke Erwärmungen von 2.8-3.4 Grad C (hohe Abschätzung) konsistent mit den vorliegenden Modellsimulationen.

Tabelle 5.1:

Projizierte Temperaturänderungen (in °C) für die Urschweiz 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 >1.5 und <3°C sind orange, solche ≥3°C rot dargestellt.

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

Bis 2035 hat die Wahl des Emissionsszenarios wenig Einfluss auf die Resultate, da klimatische Variabilitäten und Modellunsicherheiten 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 im A2-Szenario zwischen 3.2 und 4.4 Grad C, diejenige im RCP3PD-Szenario jedoch nur 1.2 bis 1.6 Grad C. Die saisonalen Unterschiede der Erwärmung 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 im A1B-Szenario im Sommer 3.7 Grad C, im Winter hingegen 3.1 Grad C. Die Herbstwerte sind ähnlich wie die Winterwerte. Am geringsten ist die Erwärmung im Frühling mit 2.7 Grad C.

Niederschlag

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, besonders ausgeprägt im Sommer. Im Frühling und Herbst befindet sich die Schweiz in der Zone dazwischen, wo sowohl eine leichte Zu- als auch eine leichte Abnahme gleichermassen wahrscheinlich ist. Im Sommer befindet sich diese Zone weiter nördlich, weshalb in der Schweiz mit einer beträchtlichen Niederschlagsreduktion zu rechnen ist.

Die Werte der projizierten Änderungen für die Urschweiz sind in Tabelle 5.2 gegeben. Die Projektionsunsicherheiten sind mit 10 bis 20% über/unter der mittleren Abschätzung relativ gross. Diese grossen Unsicherheiten sind zum Teil bedingt durch die grosse klimatologische Variabilität, welche die Unsicherheiten in den nächsten 10 bis 30 Jahren dominiert. Das erklärt auch, weshalb für 2035 noch keine klaren Trends in den Niederschlagsprojektionen auszumachen sind.

Für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts können klare Aussagen für den Sommer gemacht werden. Die mittleren Schätzungen der drei Szenarien projizieren Abnahmen von 6 bis 10% bis 2060 und 8 bis 21% bis 2085. Entsprechend könnte damit auch eine Abnahme der nassen Tage verbunden sein (vgl. Kap. 5.5 Extremwerte). In den anderen Jahreszeiten sind die Unsicherheiten jedoch auch gegen Ende Jahrhundert so gross, dass sowohl Zunahmen wie Abnahmen nicht ausgeschlossen werden können. Die mittleren Änderungsabschätzungen sind kleiner als $\pm 10\%$. 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 2085 projiziert das RCP3PD-Szenario eine mittlere Abnahme von 8% (Bereich 1 bis 15%), das A2-Szenario hingegen eine von 21% (Bereich 10 bis 33%).

Tabelle 5.2:

Projizierte Niederschlagsänderungen für die Urschweiz 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 >20% sind braun, Zunahmen >20% grün dargestellt.

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

Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse um 2060
an ausgewählten Stationen

Zur besseren Einordnung auf lokaler Stufe gibt Tabelle 5.3 zusätzlich einen Überblick über absolute Winter- und Sommerwerte der Temperaturen und des Niederschlags an Ur-schweizer Stationen. Gezeigt werden projizierte Mittelwerte des A1B-Szenarios.

So zeigt sich zum Beispiel für das Winterhalbjahr, dass 2060:

in Einsiedeln (910 m ü.M.) mittlere Temperaturen zu erwar-ten sind wie heute in den tiefsten Lagen der Urschweiz (400 bis 500 m ü.M.).

in Andermatt (1442 m ü.M.) ähnliche mittlere Temperaturen zu erwarten sind wie heute in Engelberg (1036 m ü.M.) oder Einsiedeln (910 m ü.M.).

die mittleren Winterniederschläge etwa ähnlich gross sein dürften wie heute.

Für das Sommerhalbjahr findet man zum Beispiel, dass 2060:

in tiefen Lagen Temperaturen vorherrschen dürften, wie heute in den tieferen Regionen des Tessins.

in Engelberg (1036 m ü.M.) mittlere Temperaturen zu erwar-ten sind, wie heute in den tiefsten Lagen der Urschweiz (400 bis 500 m ü.M.).

die mittleren Sommerniederschläge an fast allen Stationen kleiner ausfallen dürften als heute.

Tabelle 5.3:
**Temperaturen (°C) und
Niederschlagssummen
(mm) für ausgewählte Ur-
schweizer Stationen für
den Zeitraum 1961-1990,
1981-2010 und die Schät-
zungen des A1B Szenarios
für die Jahre 2045-2074
(„um 2060“). Winter: Mittel
für Dezember-Januar-
Februar; Sommer: Mittel
für Juni-Juli-August.
Temperaturen unter 0°C
sind blau geschrieben,
solche über 20°C rot.
Niederschlagsmengen
kleiner als in der Periode
1981-2010 sind braun
eingefärbt.**

Jahreszeit	Szenario	2035			2060		
		1961-1990	1981-2010	um 2060	1961-1990	1981-2010	um 2060
Winter	Altdorf (438)	1.3	1.7	3.0 - 5.0	206	212	171-238
	Stans (438)	-	-	-	200	205	168-229
	Sarnen (475)	-	-	-	203	193	158-217
	Einsiedeln (910)	-2.1	-1.5	0.0 - 2.0	342	347	285-380
	Engelberg (1036)	-2.1	-1.6	-0.3 - 1.7	278	280	225-310
	Göschenen (1099)	-	-	-	290	305	252-343
	Urnerboden (1395)	-	-	-	349	318	259-353
	Andermatt (1442)	-4.5	-4.1	-2.7 - -0.9	355	353	297-393
	Gütsch (2287)	-6.3	-5.8	-4.3 - -2.6	394	374	312-410
Sommer	Altdorf (438)	16.7	17.7	19.4 - 21.0	391	426	327-416
	Stans (438)	-	-	-	469	507	396-492
	Sarnen (475)	-	-	-	456	458	349-441
	Einsiedeln (910)	13.8	14.9	16.7 - 18.3	610	606	495-601
	Engelberg (1036)	13.2	14.2	16.0 - 17.6	549	564	434-551
	Göschenen (1099)	-	-	-	325	327	260-321
	Urnerboden (1395)	-	-	-	670	696	558-692
	Andermatt (1442)	11.2	12.2	14.5 - 16.2	384	390	326-388
	Gütsch (2287)	6.2	7.6	10.1 - 11.8	345	372	325-375

5.4 Klimaindikatoren

Frosttage

Die zukünftige Klimaänderung und deren Auswirkungen im Gebiet der Urschweiz lassen sich durch sogenannte Klimaindikatoren noch deutlicher zeigen. In der Folge werden die Auswirkungen der Klimaänderung auf einige beispielhafte Klimaindikatoren für den Zeitraum 2045-2074 dargestellt. Die nachfolgenden Auswertungen basieren auf regionalen Gitterdaten. Kleinräumig können sich aufgrund der lokalen klimatologischen Gegebenheiten gewisse Abweichungen ergeben.

Die Anzahl der Frosttage pro Jahr gibt die Tage im Jahr an, an welchen die Temperatur unter 0 Grad C fällt. In den tiefsten Lagen der Urschweiz werden heute im Durchschnitt rund 80 Frosttage gezählt. In mittleren Höhen sind es 115 bis 220 Frosttage und in Gipfellagen über 2500 m ü.M. sogar rund 270 Frosttage (Abbildung 5.3).

Für 2060 (Mittel der Jahre 2045-2074) ist mit einer deutlichen Abnahme der Frosttage zu rechnen. Das A2- und A1B-Szenario zeigen mit Abnahmen von im Mittel rund 40 bis 50 Tagen in grossen Höhen in tiefen Lagen sehr ähnliche Werte. Geringer sind die Abnahmen des RCP3PD Szenarien mit rund 25 bis knapp 30 Tagen, was etwa 10% der heutigen Frosttage in grossen Höhen und knapp 30% der heutigen Frosttage in tiefen Lagen entspricht. Tendenziell sind die Abnahmen in grosser Höhe 3 bis 10 Tage grösser als in tiefen Lagen. So reduziert sich die Anzahl Frosttage unter dem A1B und A2 Szenario um 2060 für Höhen unter 600 m ü.M. von heute knapp 85 auf gut die Hälfte (etwa 45 Tage).

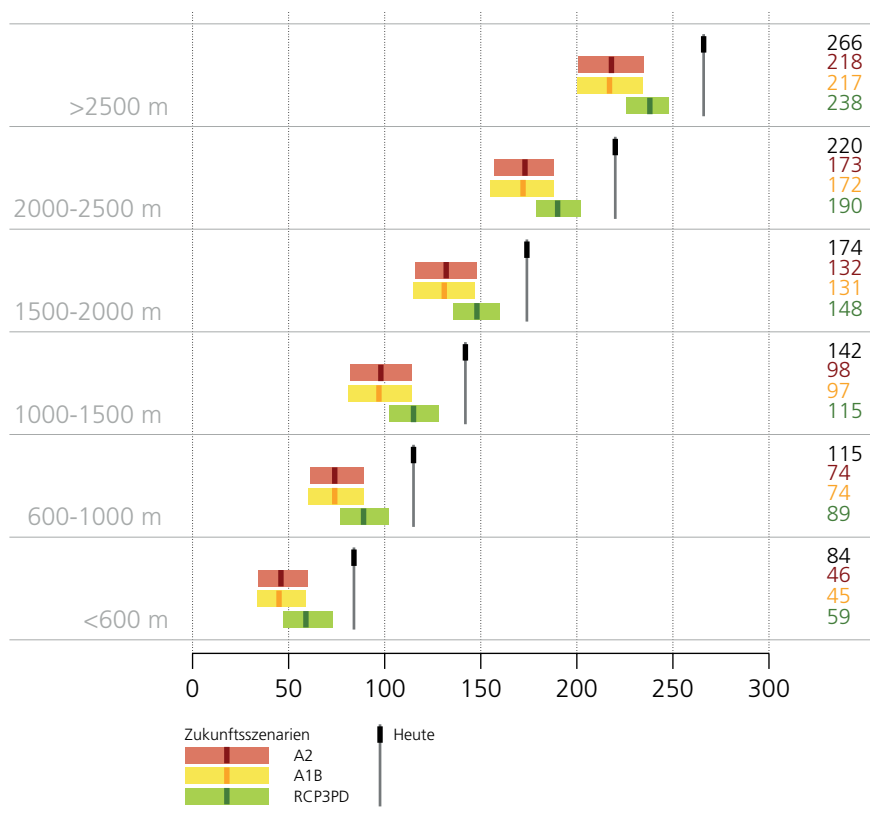


Abbildung 5.3:

Die Anzahl Frosttage pro Kalenderjahr heute (Mittel 1980-2009) und 2060 (Mittel 2045-2074) für die drei Szenarien A2, A1B und RCP3PD und 6 Höhenstufen (<600, 600-1000, 1000-1500, 1500-2000, 2000-2500 und >2500 m ü.M.). Die Abschätzung basiert auf der projizierten Temperaturänderung im Alpenraum (Zubler et al. 2013). Die Zahlen und Balken geben die mittlere Schätzung und den Unsicherheitsbereich der Modellschätzungen wieder.

Sommertage

Sommertage sind Tage, an welchen die Lufttemperatur auf mindestens 25 Grad C steigt. In den tiefsten Lagen der Urschweiz werden heute im Mittel rund 40 Sommertage gezählt. In mittleren Höhen sind es 6 bis 20, und in Lagen über 1500 m ü.M. registriert man heute keine Sommertage (Abbildung 5.4).

Zunahmen des RCP3PD-Szenarios mit 1 bis knapp 16 Tagen. Tendenziell sind die Zunahmen in absoluten Zahlen in tiefen Lagen deutlich grösser als in hohen Lagen, die relative Zunahme in grossen Höhen aber umso stärker. So ist 2060 bis in Höhen von 2000 m ü.M. mit einigen Sommertagen zu rechnen.

Für den Zeitraum um 2060 ist mit einer sehr deutlichen Zunahme der Sommertage zu rechnen. Das A2- und A1B-Szenario zeigen mit Zunahmen von im Mittel rund 12 bis 26 Tagen oder einer Vervielfachung in grossen Höhen und rund 65% in tiefen Lagen sehr ähnliche Werte. Geringer sind die

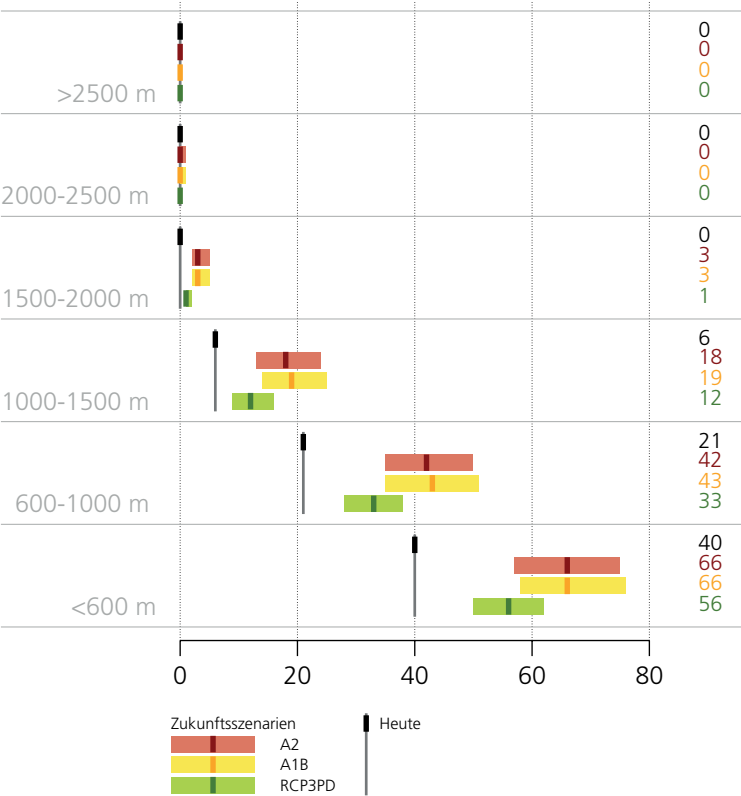


Abbildung 5.4: Die Anzahl Sommertrage pro Kalenderjahr heute (Mittel 1980-2009) und 2060 (Mittel 2045-2074) für die drei Szenarien A2, A1B und RCP3PD und 6 Höhenstufen (<600, 600-1000, 1000-1500, 1500-2000, 2000-2500 und >2500 m ü.M.). Die Abschätzung basiert auf der projizierten Temperaturänderung im Alpenraum (Zubler et al. 2013). Die Zahlen und Balken geben die mittlere Schätzung und den Unsicherheitsbereich der Modellschätzungen wieder.

Vegetationsperiode

Durch die steigenden Temperaturen wird sich auch die Vegetationsperiode verlängern. Dies hat unter anderem eine hohe Relevanz für die Zusammensetzung der Pflanzen in der Urschweiz. Die Länge der Vegetationsperiode, ist definiert als „Tage pro Jahr zwischen dem ersten Auftreten einer mindestens 6 Tage langen Periode mit Tagesmitteltemperaturen über 5 Grad C und dem ersten Auftreten einer mindestens 6 Tage langen Periode mit Tagesmitteltemperaturen unter 5 Grad C“. Sie dauert heute in den tiefsten Lagen der Urschweiz gut 250 Tage, in mittleren Höhen rund 94 bis 225 und in Gipfellagen über 2500 m ü.M. nur rund 45 Tage (Abbildung 5.5).

Für den Zeitraum um 2060 ist mit einer sehr deutlichen Verlängerung der Vegetationsperiode zu rechnen. Das A2- und A1B-Szenario zeigen mit Zunahmen von im Mittel rund 40 bis knapp 60 Tagen oder mehr als einer Verdoppelung in grossen Höhen und knapp 20% in tiefen Lagen sehr ähnliche Werte. Geringer sind die Zunahmen des RCP3PD-Szenarios mit gut 20 bis knapp 35 Tagen. Tendenziell sind die Zunahmen in grosser Höhe deutlich grösser als in tiefen Lagen. So verlängert sich die Vegetationsperiode 2060 unter dem A1B- oder A2-Szenario in Höhen über 2500 m ü.M. um mehr als das Doppelte von heute rund 45 auf über 100 Tage.

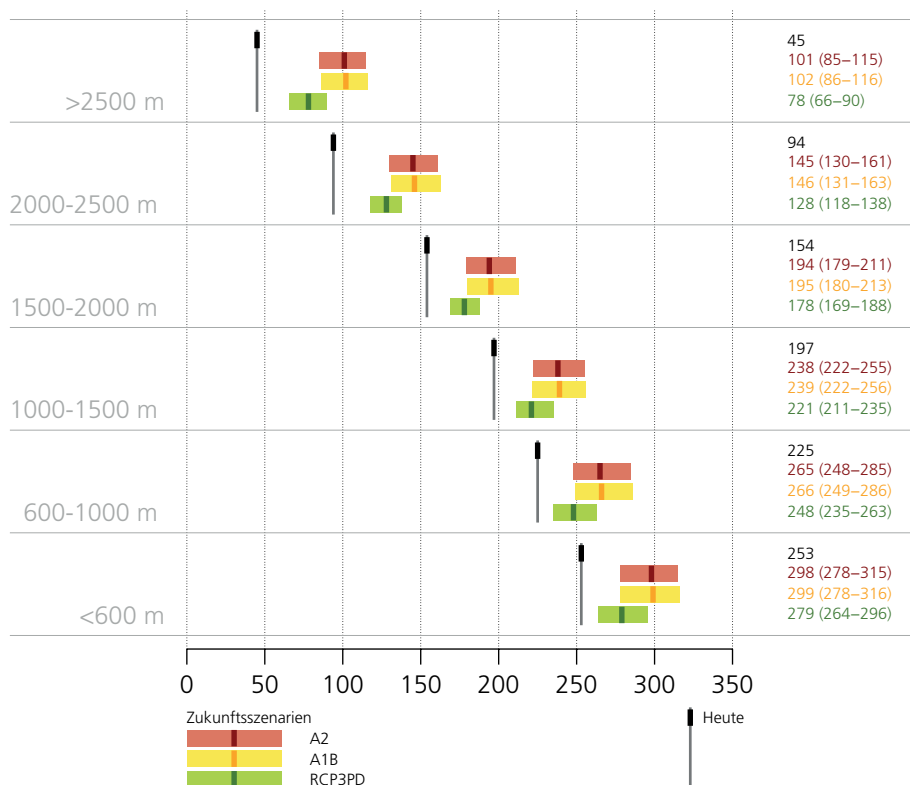


Abbildung 5.5:

Die Länge der Vegetationsperiode pro Kalenderjahr heute (Mittel 1980-2009) und 2060 (Mittel 2045-2074) für die drei Szenarien A2, A1B und RCP3PD und 6 Höhenstufen (<600, 600-1000, 1000-1500, 1500-2000, 2000-2500 und >2500 m ü.M.). Die Abschätzung basiert auf der projizierten Temperaturänderung im Alpenraum (Zubler et al. 2013). Die Zahlen und Balken geben die mittlere Schätzung und den Unsicherheitsbereich der Modellschätzungen wieder.

Tage mit Neuschnee

In den tiefsten Lagen der Urschweiz werden heute im Mittel knapp 20 Tage mit Neuschneehöhe ≥ 1 cm gezählt. In mittleren Höhen sind es rund 35 bis 100 und in den Gipfellagen über 2500 m ü.M. sogar gut 120 Neuschneetage (Abbildung 5.6).

Für 2060 (Mittel der Jahre 2045-2074) ist mit einer deutlichen Abnahme der Tage mit Neuschnee zu rechnen. Das A2- und A1B-Szenario zeigen mit Abnahmen von im Mittel gut 10 bis 20 Tagen oder knapp 20% in grossen Höhen bis über 50% in tiefen Lagen sehr ähnliche Werte. Geringer sind die Abnahmen des RCP3PD-Szenarios mit rund 8 bis 12

Tagen. Tendenziell sind die Abnahmen in grosser Höhe um einige Tage grösser als in tiefen Lagen. Dafür ist die relative Abnahme in tiefen Lagen stärker. So reduziert sich die Anzahl Tage mit Neuschnee unter dem A1B und A2 Szenario um 2060 für Höhen unter 600 m ü.M. von heute knapp 20 auf weniger als die Hälfte (etwa 7 bis 8 Tage).

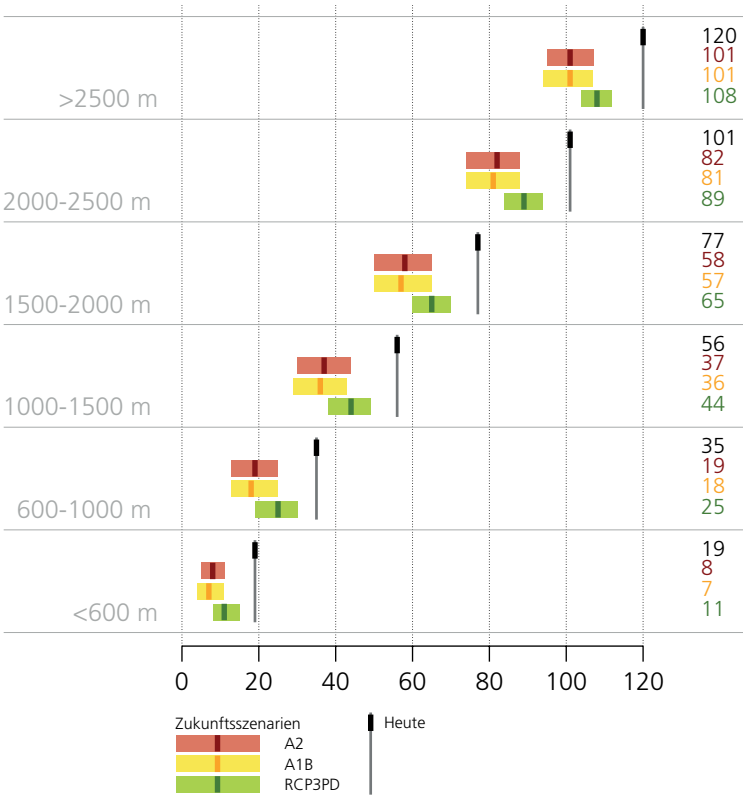


Abbildung 5.6:
Die Anzahl Tage mit Neuschnee pro Kalenderjahr heute (Mittel 1980-2009) und 2060 (Mittel 2045-2074) für die drei Szenarien A2, A1B und RCP3PD und 6 Höhenstufen (<600, 600-1000, 1000-1500, 1500-2000, 2000-2500 und >2500 m ü.M.). Die Abschätzung basiert auf der projizierten Temperaturänderung im Alpenraum (Zubler et al. 2013). Die Zahlen und Balken geben die mittlere Schätzung und den Unsicherheitsbereich der Modellschätzungen wieder.



Tiefenbach
© Archiv VAW / ETH Zürich



Reussdelta Badespass auf den Lorelei-Inseln
© Angel Sanchez



Traditionelles Haus
© Andermatt-Uriertal Tourismus

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 erwartenden 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 beteiligt sind. Weiter werden die prozessbasierte Erwartung und die beobachtete Änderung der letzten Jahrzehnte aufgelistet.

Gut 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, welche ein wichtiges Gesundheitsrisiko darstellen können (z.B. Fischer und 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 und 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 die Region Urschweiz dürfte sich das Auftreten von heutigen kalten Winternächten bis 2050 um 40 bis 80% und bis gegen Ende des Jahrhunderts sogar um 70 bis 90% reduzieren (CH2011, Fig. A7).

Die Häufigkeit, Intensität und Dauer von Niederschlags-extremen 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 bis 5 Tagessummen). Allerdings führen die steigenden Temperaturen zu einem Anstieg der Schneelinie 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 und 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.

Tabelle 5.4:

**Zusammenfassende
Tabelle der Änderungen
von Wetterextremen in
der Urschweiz.**

Extremtyp	Prozessbasierte Erwartung	Beobachtete Änderung der letzten Jahrzehnte	zukünftige Änderungen	Verständnis
Hitzewellen / 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 intensivieren 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	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	in Beobachtungen keine Hinweise auf Veränderungen	in Modellen keine Hinweise auf Veränderungen (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	in Modellen keine Hinweise auf Veränderungen (räumliche Skala zu klein)	sehr tief
starke Schneefälle (Tieflagen)	Vorzeichen unklar, winterliche Erwärmung und Niederschlagszunahme laufen einander entgegen (v.a. in tiefen Lagen)	in Beobachtungen keine Hinweise auf Veränderungen	in Modellen keine Hinweise auf Veränderungen	tief

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 landwirtschaftsrelevante 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. 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. 2004; 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 Metriken abhängen (Raible et al. 2008).

Sehr unklar sind die Änderung von hochkomplexen 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.



Niederbauen mit Vierwaldstättersee



Rigi
© D. Gerstgrasser



Niedrigwasser Sihlsee
© D. Gerstgrasser



Gefrorener Sihlsee
© D. Gerstgrasser

Referenzen

64

- Abegg B.**, 1996: Klimaänderung und Tourismus. Klimafolgenforschung am Beispiel des Wintertourismus in den Schweizer Alpen. Zürich.
- 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 Bantle H., 2004: Das Schweizer Klima im Trend. Temperatur- und Niederschlagsentwicklung 1864-2001. Veröffentlichung der MeteoSchweiz Nr. 68, Zürich.
- Basler D.** and Körner C., 2012: Photoperiod sensitivity of bud burst in 14 temperate forest tree species. *Agricultural and Forest Meteorology*, 165, 73-81.
- Bauder A.**, Funk M. and Huss M., 2007: Ice volume changes of selected glaciers in the Swiss Alps since the end of the 19th century. *Annals of Glaciology*, 46:145-149.
- 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.**, Seiz G., Schlegel T., Musa M., Baudraz G., Moesch M., 2003: Homogenisierung von Klimamessreihen der Schweiz und Bestimmung der Normwerte 1961-1990. Schlussbericht des Projekts NORM90. MeteoSchweiz, Zürich.
- 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.
- Begert M.**, Frei C., Abbt M., 2013: Einführung der Normperiode 1981-2010. Fachbericht der MeteoSchweiz 245, 50 pp.
- 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.**, 2012: Is snow in the Alps receding or disappearing? *WIREs Climate Change* (Wiley Interdisciplinary Reviews / Climate Change), doi: 10.1002/wcc.179.
- 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 Christensen O. B., 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.
- Defila C.**, 1991: Pflanzenphänologie der Schweiz. Inaugural-Dissertation der Philosophischen Fakultät II der Universität Zürich, 234 S.
- Defila C.** und Clot B., 2001: Phytophenological trends in Switzerland. *Int J Biometeorol*, 45, 203-207.
- Defila C.** und Clot B., 2005: Phytophenological trends in the Swiss Alps, 1951-2002. *Meteorologische Zeitschrift*, 14/2, 191-196.
- Dobson A.J.**, 1990: Introduction to Generalized Linear Models. Chapman and Hall, 174 pp.
- Donat M. G.**, Leckebusch G. C., Pinto J. G. and Ulbrich U., 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.
- Farinotti D.**, Huss, M., Bauder, A. and Funk, M., 2009: An estimate of the glacier ice volume in the Swiss Alps. *Global and Planetary Change*, 68(3):225-231.
- Fischer E. M.** and Schär C., 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 Schär C., 2010: Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. *Nature Geoscience*, 3, 398-403, doi: 10.1038/ngeo866.
- Frei C.** and Schär C., 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.**, Bi X. and Pal J., 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.
- Gletscherberichte** (1881-2011). Die Gletscher der Schweizer Alpen, 1880-2006/07. Jahrbuch 1-128, Expertenkommission für Kryosphärenmessnetze der Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT). Vollständige bibliographische Angaben in «Jahrbuch der Expertenkommission für Kryosphärenmessnetze (SCNAT)», herausgegeben seit 1964 durch die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich.
- Gutermann Th.**, Dürr B., Richner H., Bader S., 2012: Föhnklimatologie Altdorf: die lange Reihe (1864-2008) und ihre Weiterführung, Vergleich mit anderen Stationen. Fachbericht MeteoSchweiz Nr. 241, Zürich.
- 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 scnate, ProClim-, Umweltbundesamt (D) und die deutsche IPCC Koordinationsstelle. Bern, Wien, Berlin.
- IPCC**, 2013: The Physical Basis – Summary for Policy Makers.
- Laternser 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 Ulbrich U., 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.
- Maisch** M., Wipf, A. Denzler, B. Battaglia, J. and Benz C., 2000: Die Gletscher der Schweizer Alpen. vdf, Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Zürich, 2. edition. Schlussbericht NFP31, 373 pp., ISBN 3 7281 2733 7.
- 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., Tebaldi C. and Nychka D., 2004: Changes in frost days in simulations of twentyfirst century climate. *Climate Dynamics*, 23, 495-511, doi: 10.1007/s00382-004-0442-9.
- MeteoSchweiz** 2013: Klimaszenarien Schweiz – eine regionale Übersicht, Fachbericht MeteoSchweiz, 2453, 36 pp.
- 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** F., Caffisch T. and Müller G., 1976: Firn und Eis der Schweizer Alpen: Gletscherinventar. Publ. Nr. 57, Geographisches Institut der ETH Zürich, Zürich.
- 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.
- Paul** F., 2003: The New Swiss Glacier Inventory 2000. Application of Remote Sensing and GIS. PhD thesis, University of Zürich. 192 pp.
- ProClim-Forum** for Climate and Global Change, 2005: Hitzesommer 2004, Synthesebericht, Bern.
- Raible** C.C., Della-Marta P.M., Schwierz C., Wernli H. and Blender R., 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.
- Raymond** M., Wegmann, M. and Funk, M., 2003: Inventar gefährlicher Gletscher in der Schweiz. Mitteilungen 182, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Gloriastrasse 37-39, CH-8092 Zürich. pp. 368. 6.
- Rebetez** M., Reinhard M., 2008: Monthly air temperature trends in Switzerland 1901-2000 and 1975-2004, *Theor. Appl. Climatol.*, 91, 27-34.
- Schär** C., Vidale P.L., Lüthi D., Frei C., Häberli C., Liniger M.A. and Appenzeller C., 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.
- Scherrer** S.C., Wüthrich C., Croci-Maspoli M., Weingartner R., Appenzeller C., 2013: Snow variability in the Swiss Alps 1864-2009, *Int. J. Clim.*, DOI:10.1002/joc.3653.
- 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., Köllner-Heck P., Zenklusen Mutter E., Bresch D. N., Vidale P. L., Wild M. and Schär C., 2010: Modelling European winter wind storm losses in current and future climate. *Climatic Change*, 101, 485-514, doi: 10.1007/s10584-009-9712-1.
- Seneviratne** S.I., Lüthi D., Litschi M. and Schär C., 2006: Land-atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature*, 443, 205-209, doi: 10.1038/nature05095.
- Studer** S., Appenzeller C., Defila C., 2005: Inter-annual variability and decadal trends in alpine spring phenology: a multivariate analysis approach. *Climatic Change*, 73, 295-414.
- 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.
- Vitasse** Y., Basler D., 2012: What role for photoperiod in the bud burst phenology of European Beech. *Eur J Forest Res.*, DOI 10.1007/s10342-012-0661-2.
- Wanner** H., Gyalistras D., Luterbacher J., Rickli R., Salvisberg E., Schmutz C., 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.
- Zubler** E. M., Fischer A. M., Liniger M. A., Croci-Maspoli M., Scherrer S. C. & Appenzeller, C., 2013: Localized climate change scenarios of mean temperature and precipitation over Switzerland.

Adressen

MeteoSchweiz
Krähbühlstrasse 58
CH-8044 Zürich
T +41 44 256 91 11

MeteoSchweiz
Flugwetterzentrale
CH-8050 Zürich-Flughafen
T +41 43 816 20 10

MeteoSvizzera
Via ai Monti 146
CH-6605 Locarno 5 Monti
T +41 91 756 23 11

MétéoSuisse
7bis, av. de la Paix
CH-1211 Genève 2
T +41 22 716 28 28

MétéoSuisse
Chemin de l'Aérologie
CH-1530 Payerne
T +41 26 662 62 11

**Website**

www.meteoschweiz.ch

**Download**

www.meteoschweiz.ch

**Kontakt**

klimainformation@meteoschweiz.ch