

Kapitel 9 | Die Berechnung von Trends in den Temperaturreihen von Obergurgl und anderen Stationen der Ostalpen

Ekkehard Dreiseitl, Martin Stocker-Waldhuber, Martin Tiefengraber, Matteo Ciampa

Zusammenfassung

Im Band 3 der AFO-Serie „Lebensräume des inneren Ötztals (Koch & Erschbamer 2013) wurde auf die besondere Bedeutung der meteorologischen Messstelle Obergurgl hingewiesen und die Möglichkeit erwähnt, durch Ausweitung der Ergebnisse dieser hochalpinen Station auf Nachbarstationen im Ostalpenraum die Bedeutung der Aussagen zu erhöhen.

In dieser Abhandlung werden, unter Miteinbeziehung von weiteren neun Stationen der Ostalpen, Trendanalysen vorgestellt. Sowohl Jahreswerte als auch Abweichungen von langjährigen Temperaturmittelwerten werden in verschiedenen Zeitabschnitten mit unterschiedlichen statistischen Methoden graphisch aufbereitet und bilden die Grundlage eines Vergleiches zwischen hochgelegenen Bergstationen und sogenannten Flachlandstationen. Der Vergleich sollte zeigen, ob sich der Temperaturanstieg der letzten Jahrzehnte in den beiden Regionen unterscheidet.

Abstract

Following the suggestion made in Volume 3 of the AFO publication series (Koch & Erschbamer 2013), which emphasises the great importance of the high Alpine Obergurgl Meteorological Station, an analysis incorporating nine additional stations in the eastern Alps has been made. The calculations include several different trend analyses using annual mean values and long term average anomalies over various timescales. The results, which are based on a larger and therefore more robust dataset, are used to compare high altitude stations with low altitude stations, with special emphasis on how inclusion of the former affects the estimate of the temperature increase over the last decades.

1. Einleitung

Der Lebensraum Ostalpen wird seit jeher von mächtigen Gletschern und einem kühlen, eher kontinentalen Klima bestimmt. Durch den Klimawandel sind jedoch Temperaturentwicklungen vonstattengegangen, deren Auswirkungen KlimaforscherInnen wohl erst in Jahren vollständig verstehen werden. Was jedoch bereits jetzt möglich ist, ist die Temperaturentwicklungs der vergangenen Jahre zu berechnen und zu untersuchen. Diese Methode erlaubt es, sich ein Bild von der Temperaturentwicklung zu machen und dem Temperaturanstieg eine mathematische und grafische Basis zu verleihen. Gerade für die Forschungsgebiete der Meteorologie, der Glaziologie und der Biologie sowie für den Tourismus soll dieser Artikel eine Basis für Rückschlüsse sein und den LeserInnen einen Einblick in die Temperaturentwicklung der Ostalpen verschaffen, mit speziellem Beispiel Obergurgl, das durch seine hohe Lage und seine touristische Bedeutung sowohl als Sommer- als auch als Wintersportgebiet eine wichtige Stellung einnimmt. In diesem Artikel sind nur einige der zahlreichen Grafiken für Obergurgl enthalten, eine vollständige Sammlung finden die interessierten LeserInnen in der PANGAEA Datenbank (siehe Link im Literaturverzeichnis: Institute of Meteorology and Geophysik 2013).

2. Aussagekraft von Trends

Aufbauend auf den Darstellungen der Temperaturreihe von Obergurgl, welche in Band 3 der AFO-Publikationen (Kuhn et al. 2013) erschienen sind, wird im Folgenden die variable Aussagekraft von verschiedenen Trendparametern untersucht. Zur Verfügung standen die Jahreswerte und ihre Abweichungen von langjährigen Mittelwerten, wie sie an der Station Obergurgl in 1.938 m Höhe seit 1953 gemessen werden, sowie die von der ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) im internationalen Programm HISTALP (Historical Instrumental Climatological Surface Time Serie of the Greater Alpine Region, <http://www.zamg.ac.at/histalp/>) zusammengestellten Daten. In diesem Programm wurden seit den frühen 90er Jahren mehr als 500 Klimareihen von über 200 Stationen bis zurück in die Mitte des 18. Jahrhunderts rekonstruiert. Der Ausdruck „Rekonstruktion“ wird ganz bewusst verwendet und deutet auf die Arbeit hin, die notwendig ist, um solch lange Klimareihen vergleichbar zu machen (Auer et al. 2007, Böhm 2009). Der Datensatz Temperatur besteht aus den Monatswerten von mehr als 200 Standorten in der sogenannten GAR (Greater Alpine Region). Dieses Gebiet reicht von Karlsruhe im Norden bis Florenz im Süden und von Lyon im Westen bis Budapest im Osten, deckt also weit mehr als nur den Alpenbogen ab und wird deshalb in zwei Regionen unterteilt, in die weitaus größte Gruppe „Low-elevation“, d.h. Flachlandstationen, die unterhalb von

1.500 m Meereshöhe liegen und in die zweite Gruppe „High-elevation“, d.h. Bergstationen mit einem Höhenbereich von 1.500 m bis 3.600 m Meereshöhe (Feuerkogel, 1.610 m bis Jungfrauojoch, 3.580 m).

Abb. 1 soll einen Eindruck davon geben, in welchem Ausmaß durch Rekonstruktion bzw. Homogenisierung die ursprünglichen Daten „korrigiert“ werden mussten, um eine nachvollziehbare Zusammenschau zu gewährleisten. Es werden die Schritte dargestellt, die in den einzelnen Abschnitten von 1750 bis heute notwendig waren, um diese Vergleichbarkeit zu ermöglichen. In einem ersten Schritt wurden die historischen Messungen an die modernen Standards angepasst. Dabei wurde versucht, die echte Temperaturinformation, also das eigentliche Signal, vom „Rauschen“

zu trennen, das von Effekten wie Stationsverlegungen, Änderung der Umgebung (zunehmende Verstädterung), Beobachterwechsel, technische Entwicklungen, Änderung der Beobachtungstermine und geänderte statistische Verarbeitungsmethoden stammt. Diese Aktionen verschieben in Abb. 1 die rote Kurve zur orangen Kurve, welche ab ca. 1850 von der grünen Kurve überdeckt wird. Dies ist der Zeitpunkt, seitdem zunehmend die Fensteraufstellungen durch die Jalousiehütten ersetzt wurden. Für die Zeit vor 1850, für die sogenannte EIP (Early Instrumental Period) war eine zusätzliche Korrektur sinnvoll, welche die orange Kurve in die grüne überführt. Der Hauptgrund dafür liegt in der Tatsache, dass in unseren mittleren Breiten die Sonnenbahn im Sommer in den Morgenstunden weit im

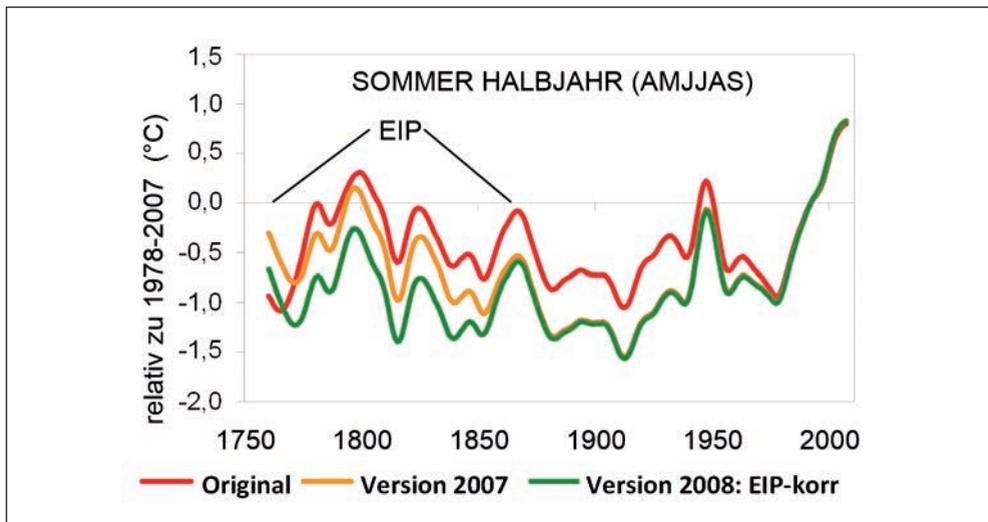


Abb. 1: Der Weg von den nicht homogenisierten Daten (rot) über die homogenisierte Version 2007 (orange) der jahreszeitlichen mittleren Temperaturreihe im Großraum Alpen zur aktuellen, EIP-bias-korrigierten Fassung 2008 (grün). EIP = Early Instrumental Period. Dargestellt sind die Daten für das Sommerhalbjahr (April-Mai-Juni-Juli-August-September). Alle Zeitreihen 1760–2007 (2007/08) sind 21-jährig Tiefpassgefiltert und als Abweichungen vom aktuellen Mittel dargestellt (Quelle: Böhm 2009).

Nordost-Sektor beginnt und in den Abendstunden weit im Nordwest-Sektor endet und damit die damaligen Fensteraufstellungen stark verstrahlt waren. Die Hauptinformation ist die Größenordnung des Rauschens, welche dem eigentlichen Temperatursignal überlagert ist. Wie in der Ordinatenbeschriftung ersichtlich, erfolgt der Vergleich der Daten mit den letzten 30 Jahren 1978 bis 2007. Da diese letzten 30 Jahre extrem zu warm waren, erscheinen die gesamten 250 Jahre als zu kalt. Das Auf und Ab der Kurven deutet auf wärmere und kältere Zeiten hin, wir sehen also hier einen Hinweis auf positive und negative Trends, die in Abb. 2 näher erklärt werden. Unter „Trend“ versteht man eine lineare Verbindung eines Ausgangspunktes A zu einem Endpunkt B einer beliebig gewählten Zeitspanne. Diese Zeitspannen liegen in dieser Arbeit alle in der Vergangenheit, also vor dem Jahre 2014, und sind nicht mit den Trends der „Klimaentwicklung“ in den kommenden Jahren oder Jahrzehnten, wie sie von den Klimamodellierern angeboten werden, zu verwechseln.

3. Trends der Flachland- und Bergstationen

Auf der Suche nach einem Zusammenhang zwischen dem Verhalten der Gletscher und der Temperatur der Umgebung sind in den letzten Jahrzehnten die unterschiedlichsten Zeitspannen untersucht worden. Ausgehend von der Tatsache, dass der dominierende Pa-

rameter die Lufttemperatur ist (Böhm et al. 2007), welche die Abschmelzung von Schnee und Eis auf den Gletschern steuert, sind Korrelationen mit unterschiedlichen „Sommer“-Perioden gerechnet worden, zum Beispiel mit drei Monaten (Juni-August), mit 6 Sommermonaten (April-September) oder aber auch, wie im folgenden Beispiel gezeigt wird (Patzelt, mündl. Mitt.), mit 5 Monaten von Mai bis einschließlich September. In Abb. 2 wird der von Patzelt berechnete Temperaturverlauf gezeigt, mit einer etwas ungewöhnlichen Wahl der Stationen: Um eine möglichst weit zurückreichende Darstellung des Temperaturverlaufes zu gewährleisten, nämlich bis in das Jahr 1781, wurde auf die Flachlandstationen Basel, Kremsmünster und Hohenpeißenberg sowie auf die Bergstationen Säntis, Sonnblick und Zugspitze zurückgegriffen.

Den Einzelwerten der Lufttemperatur wurde eine 10-jährige Glättung überlagert, welche in der Reihe „Flachland“ erste Hinweise auf die noch immer nicht zur Genüge erklärte abrupte Beendigung der „Kleinen Eiszeit“ in den 50er Jahren des 19. Jahrhunderts durch den damals beobachteten Temperaturanstieg liefert. Dieser Temperaturanstieg ist in Abb. 2 seit 1843 im geglätteten Temperaturverlauf über die folgenden 23 Jahre auf einen Blick erkennbar und signalisiert den von diesem Zeitpunkt an zu beobachtenden Gletscherrückgang in den Alpen. Ähnlich deutlich ist in Abb. 2 auch der Anstieg der geglätteten Kurve nach einem Absinken von 1950 bis 1980 zu erkennen, der bis heute andauert. Diese optische Interpretation des Kurvenverlaufes liefert also auch eine unkomplizierte

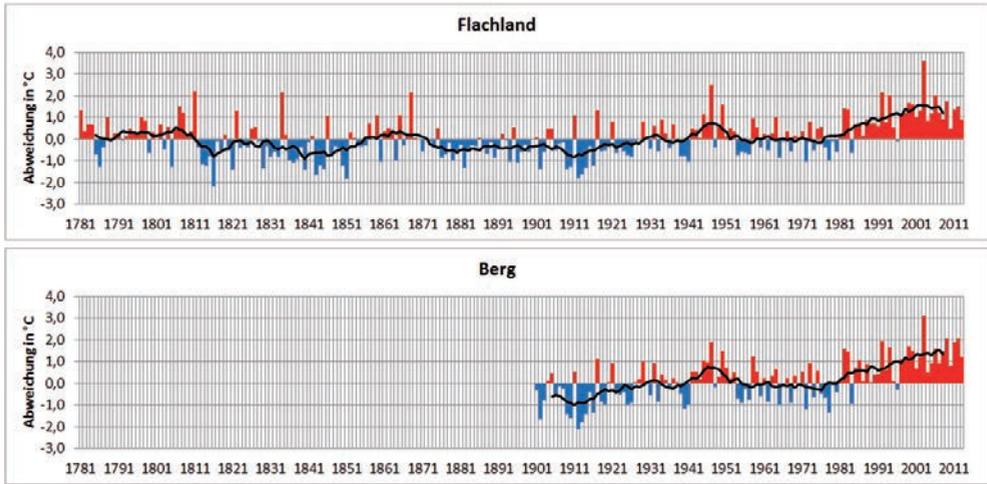


Abb. 2: Temperaturabweichung vom langjährigen Sommermittel (Mai bis September) der drei Flachlandstationen Kremsmünster, Hohenpeißenberg und Basel sowie der Bergstationen Säntis, Zugspitze und Sonnblick mit 10-jährig übergreifender Mittelkurve (schwarze Linie) für das Flachland von 1781 bis 2013 und für die Bergstationen von 1901 bis 2013.

und augenscheinliche Beschreibung der Temperaturverhältnisse dieser beiden „auf einen Blick“ erkennbaren Perioden. In Ziffern ausgedrückt ist der Temperaturanstieg in der Periode 1843–1865 1,3 °C und in der Periode 1980–2013 1,1 °C.

Soll die Frage beantwortet werden, ob Flachland- und Bergstationen unterschiedliche Erwärmungstrends aufweisen, kann zunächst auf die Standardarbeit von Auer et al. (2007) zurückgegriffen werden. Die dort formulierte Kernaussage, getragen von einem internationalen AutorInnenteam aus 13 Ländern, lautet: „*The mountains neither show weaker warming nor show any warming stronger than the low-elevation regions.*“ In Tab. 1 wird versucht, dies auch für einige Stationen im Ostalpenraum zu zeigen. Die Wahl der Stationen und des Zeitabschnittes, welcher auf den ers-

ten Blick etwas willkürlich erscheinen mag, soll den Vergleich mit einer Arbeit von Ohmura (2012) ermöglichen, welcher in globalen Tabellen diese Frage der unterschiedlichen Erwärmung zwischen Berg und Tal so beantwortet hat, dass an 65 % der „*highest locations*“ weltweit der „*largest trend of temperature change*“ festzustellen war. Die Bergstationen Zugspitze und Sonnblick (Tab. 1) zeigen in den Jahren der stärksten Temperaturzunahme 1980–2011 einen deutlich geringeren Trend der Abweichungen vom langjährigen Mittel als Innsbruck, Garmisch, bzw. Rauris (Quellen: ZAMG und DWD). In Tab. 1 fallen am stärksten die Winter an den Bergstationen mit nahezu keiner Temperaturzunahme in der gewählten Periode 1980 bis 2011 auf (0,02 °C/Dekade auf der Zugspitze und 0,08 °C/Dekade auf dem Sonnblick). Maximale Trend-

Tab. 1: Dekadische Trends der Temperaturabweichungen von zwei Bergstationen (Zugspitze und Sonnblick) und vier Flachlandstationen (Innsbruck, Garmisch-Partenkirchen, Bad Gastein und Rauris) für die Jahre 1980–2011

Station	Höhe (m)	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Zugspitze	2.960	0,60	0,47	0,12	0,02	0,33
Innsbruck	579	0,70	0,56	0,24	0,41	0,50
Garmisch	705	0,60	0,48	0,37	0,45	0,47
Sonnblick	3.105	0,65	0,46	0,08	0,08	0,27
Gastein	1.002	0,49	0,37	0,09	0,08	0,27
Rauris	941	0,71	0,56	0,29	0,61	0,56

werte zeigen an allen Orten die Frühlingswerte, wobei die Werte sogar deutlich über den Sommerwerten liegen. Insgesamt betrachtet fallen die Trendwerte eher gemäßigt aus, weil in diesen 32 Jahren zwei Untergruppen zusammengewürfelt sind, nämlich wie später noch herausgearbeitet wird, eine Periode bis einschließlich 1994 und eine zweite anschließend bis 2011.

4. 100-jährige Trends (1914–2013)

Aus Platzgründen werden die graphischen Darstellungen der 100-jährigen Trends auf zwei Stationen beschränkt, nämlich Innsbruck (Abb. 3a) und Obergurgl (Abb. 3b). Während im Sommerhalbjahr beide Stationen in den letzten Dekaden weiterhin einen

kräftigen Anstieg der Temperatur zeigen, sind im Winterhalbjahr die mittleren Abweichungen der letzten Dekade von 2004 bis 2013 sowohl in Innsbruck als auch in Obergurgl zwar weiterhin auf hohem Niveau, jedoch beide abgesunken.

In Tab. 2 sind sowohl Flachland- als auch Bergstationen aufgelistet, mit Angabe der Höhe sowie einer Unterteilung in Dekadenwerte. Die letzten drei Dekaden sind einheitlich mit positiven Trendwerten der jährlichen Temperaturabweichungen anzutreffen, die maximalen Abweichungen (in °C/Dekade) wiesen an den Flachlandstationen Werte knapp über oder knapp unter 1,0 °C/Dekade auf.

In Obergurgl nahm die Jahresabweichung von 0,83 °C in der Dekade 1994–2003 auf 0,78 °C (Tab. 2, Dekade 2004–2013) ab, trotz des extrem warmen letzten Winters (2013/14), welcher im Diagramm (Abb. 3b)

bereits berücksichtigt ist (also einschließlich März 2014). Im Winterhalbjahr sank in Obergurgl die Abweichung in diesem Zeitraum von 0,69 °C auf 0,52 °C (Tab. 2).

Die Trendwerte der 100-jährigen Periode für Innsbruck und Obergurgl sind auch aus Abb. 4 und 5 ersichtlich (dargestellt als absolute Jahreswerte mit der linearen Trendgeraden).

5. Trendmatrix

Den Verlauf einer Zeitreihe manuell zu interpretieren ist stets mit der Tücke der Subjektivität verbunden. Ob eine gewählte Periode tatsächlich einen sogenannten signifikanten Trend aufweist, gilt es erst durch passendes statistisches Werkzeug zu beweisen.

Eine Möglichkeit hierfür bietet die Berechnung der Korrelation der Paare (a_p, t_p) mittels des Rangkorrelationskoeffizienten Kendalls τ_b (Tau-b) (z.B. Wilks 2006) mit einem Signifikanztest über einen Z-Test (z.B. Sprinthal 2011). (a_p, t_p) bezeichnen hierbei alle Beobachtungen, die das Untersuchungsintervall (n) einschließen, wobei a_i für die Temperaturen und t_i für die Jahre steht.

τ_b ist ein Maß für die Stärke einer monotonen Beziehung zwischen (a_p, t_p) . Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass keine Wahrscheinlichkeitsverteilung vorausgesetzt wird, sie robust gegenüber Ausreißern ist und auch bei nichtlinearen Zusammenhängen Anwendung findet. τ_b wird berechnet, indem alle möglichen Konstellationen der Punktepaare

(a_p, t_p) in n gezählt werden, welche zueinander konkordant ($a_k > a_l$ und $t_k > t_l$, N_k) bzw. diskordant ($a_k < a_l$ und $t_k < t_l$, N_d) sind. Die Differenz von N_d zu N_k gewichtet mit der Anzahl aller möglichen Paare im Intervall ergibt schließlich die Korrelation τ_b .

τ_b liefert jedoch keine Aussage über die eigentliche Steigung des Trends. Diese kann über eine lineare Regression berechnet werden oder über Alternativen wie der Ansatz nach Sen gezeigt (Sen 1968). Hierbei wird für alle Paare in n die lineare Steigung berechnet, wobei der Medianwert daraus für die finale Trendsteigung steht. Dieser Ansatz findet hier Verwendung.

Der Ansatz einer Trendmatrix ergibt sich daraus, dass oben beschriebene Methode für eine Vielzahl an Trendfenstern (entspricht den Untersuchungsintervallen n) durchgeführt wird. So werden alle möglichen Trends der Fensterbreite 10 Jahre für die gesamte Temperaturreihe auf Signifikanz analysiert. Darauf folgend wird die Fensterbreite um 1 Jahr erhöht und wieder für alle möglichen Intervalle der Temperaturreihe auf signifikante Trends analysiert. Für immer größer werdende Fensterbreiten sind folglich immer weniger Trends berechenbar. Dies setzt sich fort, bis schließlich die Fensterbreite die gesamte Temperaturreihe einschließt und somit nur mehr ein Trend berechenbar ist (vergleichbar auch mit Abb. 4 und 5).

Das kleinste Trendfenster wurde aus zwei Gründen auf 10 Jahre beschränkt: 1. Für $n > 10$ ist der Z-Test zuverlässig (Helsel & Hirsch 2002). 2. Im Kontext einer klimatologischen Trendanalyse sind kleine Trendfenster schwer zu interpretieren.

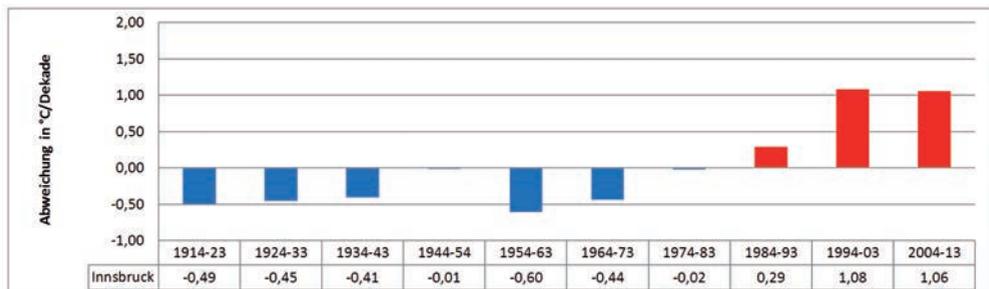
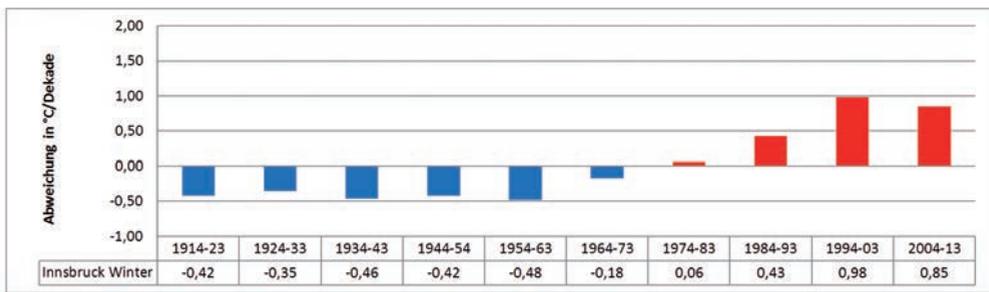
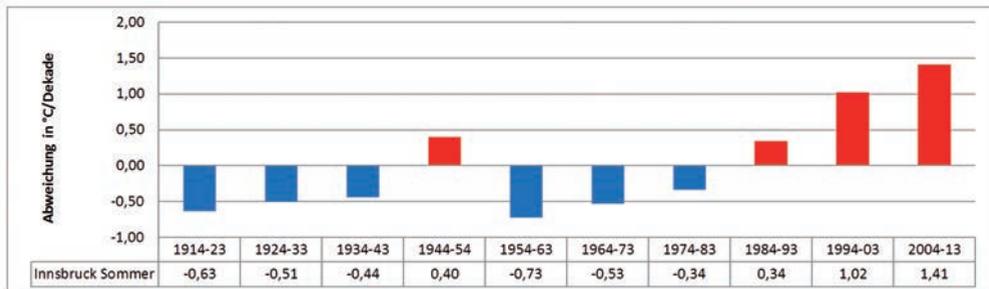


Abb. 3a: Mittlere Abweichungen pro Dekade vom 100-jährigen Temperaturmittel (1914–2013) in °C/Dekade für die Station Innsbruck. Oben: Sommerhalbjahr, Mitte: Winterhalbjahr, unten: Gesamtjahr

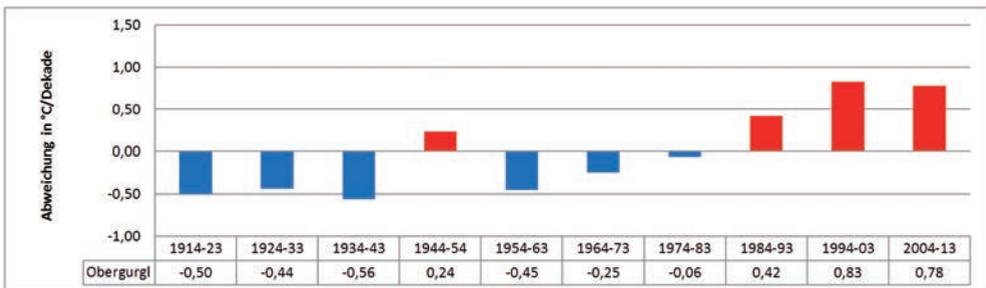
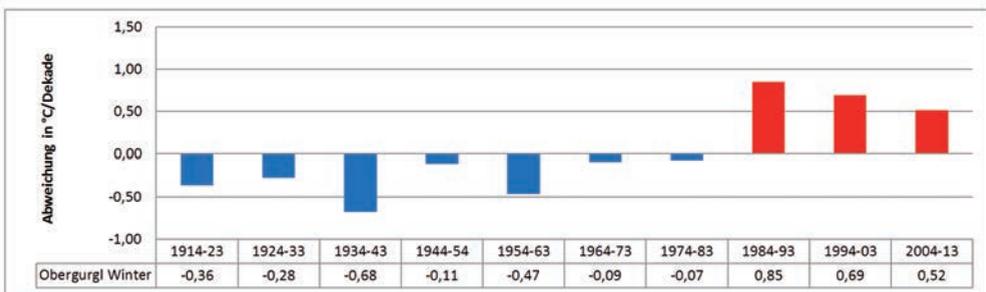
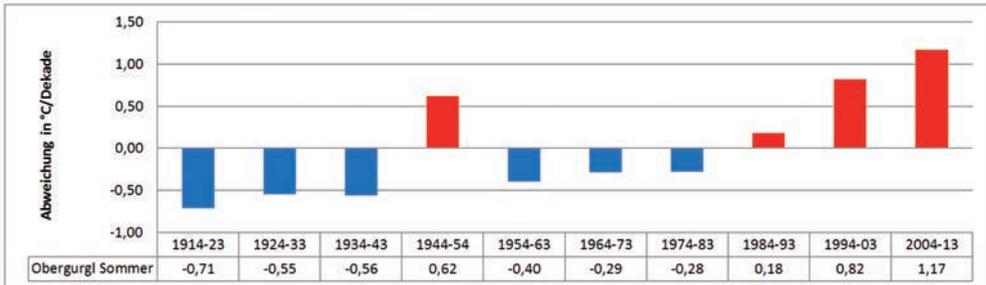


Abb. 3b: Mittlere Abweichungen pro Dekade vom 100-jährigen Temperaturmittel (1914–2013) in °C/Dekade für die Station Obergurgl. Oben: Sommerhalbjahr, Mitte: Winterhalbjahr, unten: Gesamtjahr

Tab. 2: Temperaturabweichungen vom Mittel 1914–2013 in °C/Dekade für Flachland- und Bergstationen der Ostalpen

Sommer	Höhe (m)	1914-1923	1924-1933	1934-1943	1944-1953
Sonnblick	3.105	-0,77	-0,49	-0,43	0,47
Zugspitze	2.960	-0,60	-0,47	-0,39	0,50
Säntis	2.490	-0,67	-0,44	-0,34	0,77
Obergurgl	1.938	-0,71	-0,55	-0,56	0,62
Bad Gastein	1.002	-0,75	-0,39	-0,51	0,46
H.peißenberg	986	-0,69	-0,56	-0,43	0,52
Rauris	941	-0,72	-0,47	-0,76	0,49
Innsbruck	579	-0,55	-0,42	-0,43	0,52
K.münster	382	-0,75	-0,57	-0,34	0,46
Basel	350	-0,70	-0,53	-0,40	0,50
Winter	Höhe (m)	1914-1923	1924-1933	1934-1943	1944-1953
Sonnblick	3.105	-0,66	-0,13	-0,61	-0,29
Zugspitze	2.960	-0,49	-0,30	-0,74	-0,36
Säntis	2.490	-0,74	-0,28	-0,76	-0,28
Obergurgl	1.938	-0,36	-0,28	-0,68	-0,11
Bad Gastein	1.002	-0,42	-0,37	-0,54	-0,33
H.peißenberg	986	-0,49	-0,43	-0,50	-0,6
Rauris	941	-0,51	-0,51	-0,65	-0,22
Innsbruck	579	-0,66	-0,63	-0,77	-0,54
K.münster	382	-0,14	-0,50	-0,54	-0,20
Basel	350	-0,59	-0,55	-0,50	-0,22
Jahr	Höhe (m)	1914-1923	1924-1933	1934-1943	1944-1953
Sonnblick	3.105	-0,42	-0,36	-0,30	-0,24
Zugspitze	2.960	-0,47	-0,42	-0,49	0,04
Säntis	2.490	-0,65	-0,39	-0,43	0,22
Obergurgl	1.938	-0,50	-0,44	-0,56	0,24
Bad Gastein	1.002	-0,55	-0,41	-0,49	0,09
H.peißenberg	986	-0,53	-0,54	0,41	0,19
Rauris	941	-0,58	-0,51	-0,66	0,15
Innsbruck	579	-0,57	-0,44	-0,70	-0,01
K.münster	382	-0,39	-0,59	-0,42	0,20
Basel	350	-0,64	-0,58	-0,47	0,15

Kapitel 9 | Die Berechnung von Trends in den Temperaturreihen von Oberurgl

1954-1963	1964-1973	1974-1983	1984-1993	1994-2003	2004-2013
-0,46	-0,34	-0,15	0,20	0,72	1,24
-0,54	-0,21	-0,30	0,16	0,71	1,13
-0,41	-0,60	-0,70	0,20	0,93	1,25
-0,40	-0,29	-0,28	0,18	0,82	1,17
-0,1	-0,42	-0,16	0,15	0,65	1,06
-0,40	-0,31	-0,37	0,20	0,84	1,20
-0,12	-0,49	-0,32	0,20	0,82	1,37
-0,45	-0,36	-0,45	0,17	0,79	1,18
-0,49	-0,34	-0,28	0,26	0,90	1,16
-0,50	-0,36	-0,32	0,35	0,99	1,39
1954-1963	1964-1973	1974-1983	1984-1993	1994-2003	2004-2013
-0,17	-0,20	-0,16	0,73	0,61	0,88
-0,09	-0,63	0,09	0,93	0,81	0,78
-0,12	-0,24	-0,15	0,88	0,90	0,68
-0,47	-0,09	-0,07	0,85	0,69	0,52
-0,27	-0,09	0,30	0,46	0,68	0,49
-0,29	-0,21	0,07	0,57	0,70	0,73
-0,41	-0,34	-0,10	0,42	1,11	1,20
-0,47	-0,12	0,26	0,69	1,24	1,00
-0,61	-0,01	0,16	0,33	0,62	0,90
-0,38	-0,16	0,20	0,46	1,09	0,88
1954-1963	1964-1973	1974-1983	1984-1993	1994-2003	2004-2013
-0,18	-0,04	0,13	0,32	0,44	0,65
-0,36	-0,43	-0,01	0,46	0,81	0,87
-0,32	-0,42	-0,32	0,45	0,95	0,90
-0,45	-0,25	-0,0	0,42	0,83	0,78
-0,18	-0,30	0,19	0,22	0,75	0,68
-0,36	-0,35	-0,28	0,30	0,83	0,98
-0,27	-0,48	-0,10	0,21	1,04	1,20
-0,38	-0,27	-0,05	0,49	0,96	1,06
0,53	-0,30	0,04	0,22	0,83	0,94
-0,47	-0,37	0,00	0,30	1,07	1,05

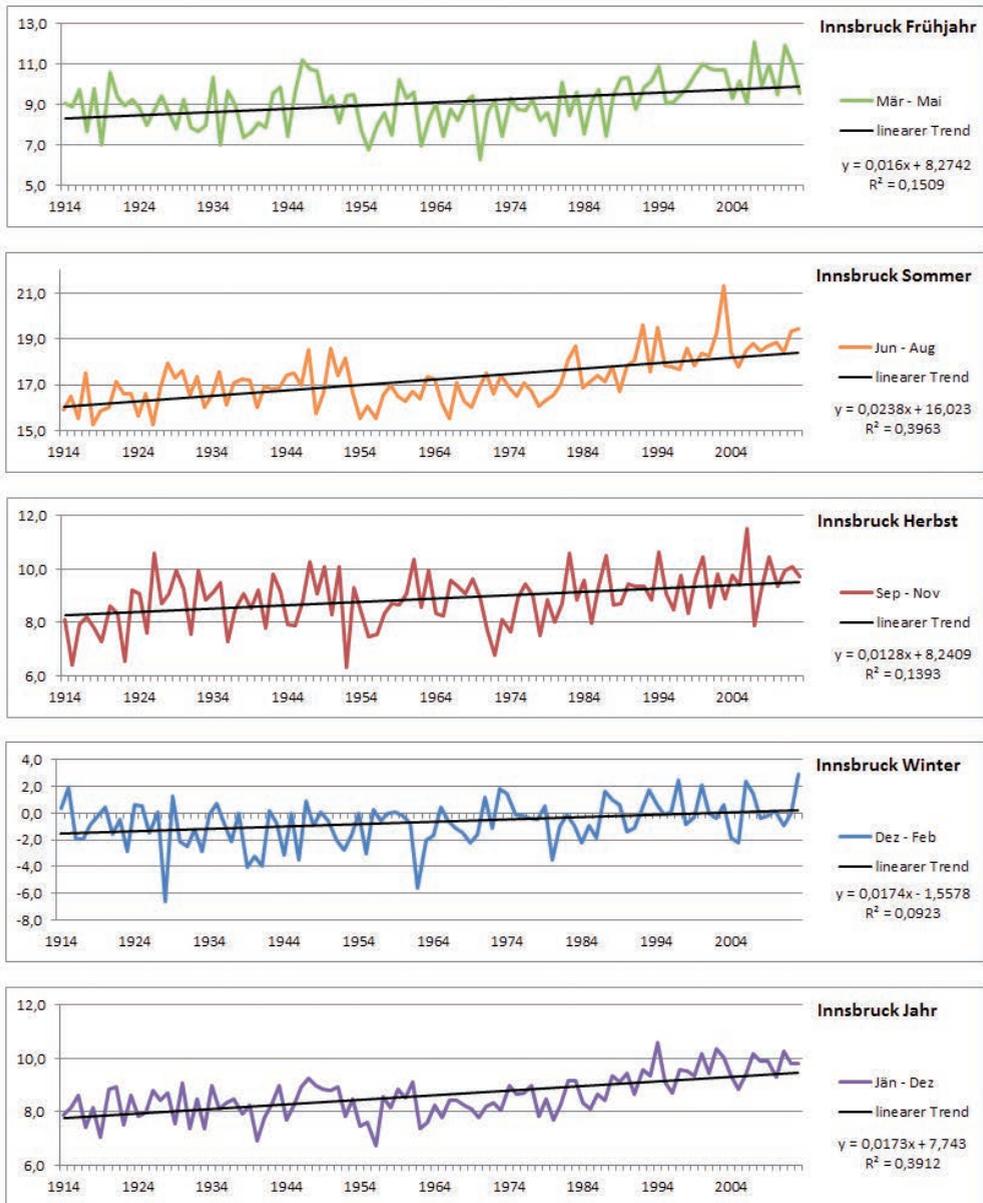


Abb. 4: Temperaturverlauf 1914–2013 für Innsbruck und Trends für alle Jahreszeiten und für das Gesamtjahr in °C/Jahr.

Kapitel 9 | Die Berechnung von Trends in den Temperaturreihen von Obergurgl

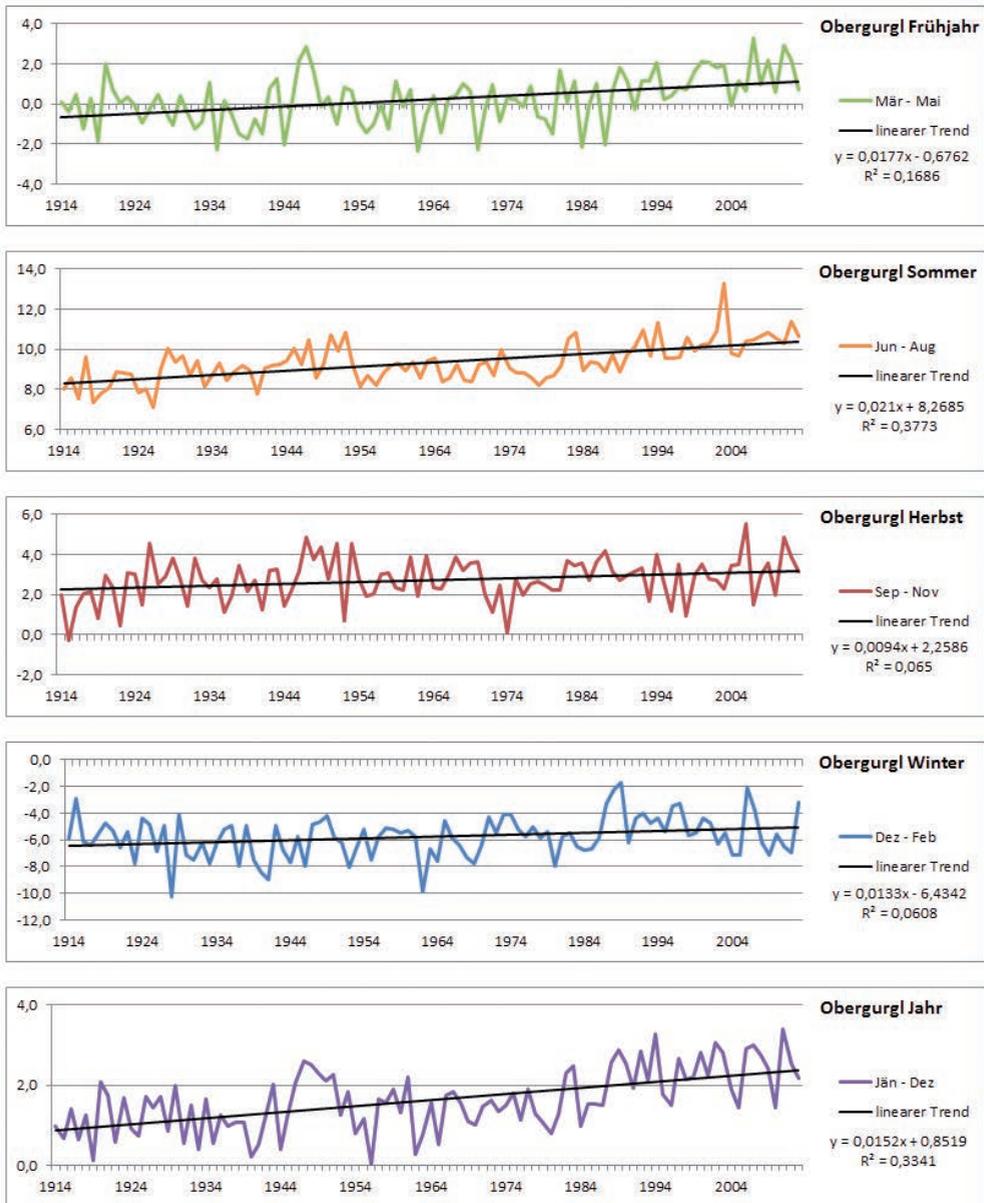


Abb. 5: Temperaturverlauf 1914–2013 für Obergurgl und Trends für alle Jahreszeiten und für das Gesamtjahr in °C/Jahr.

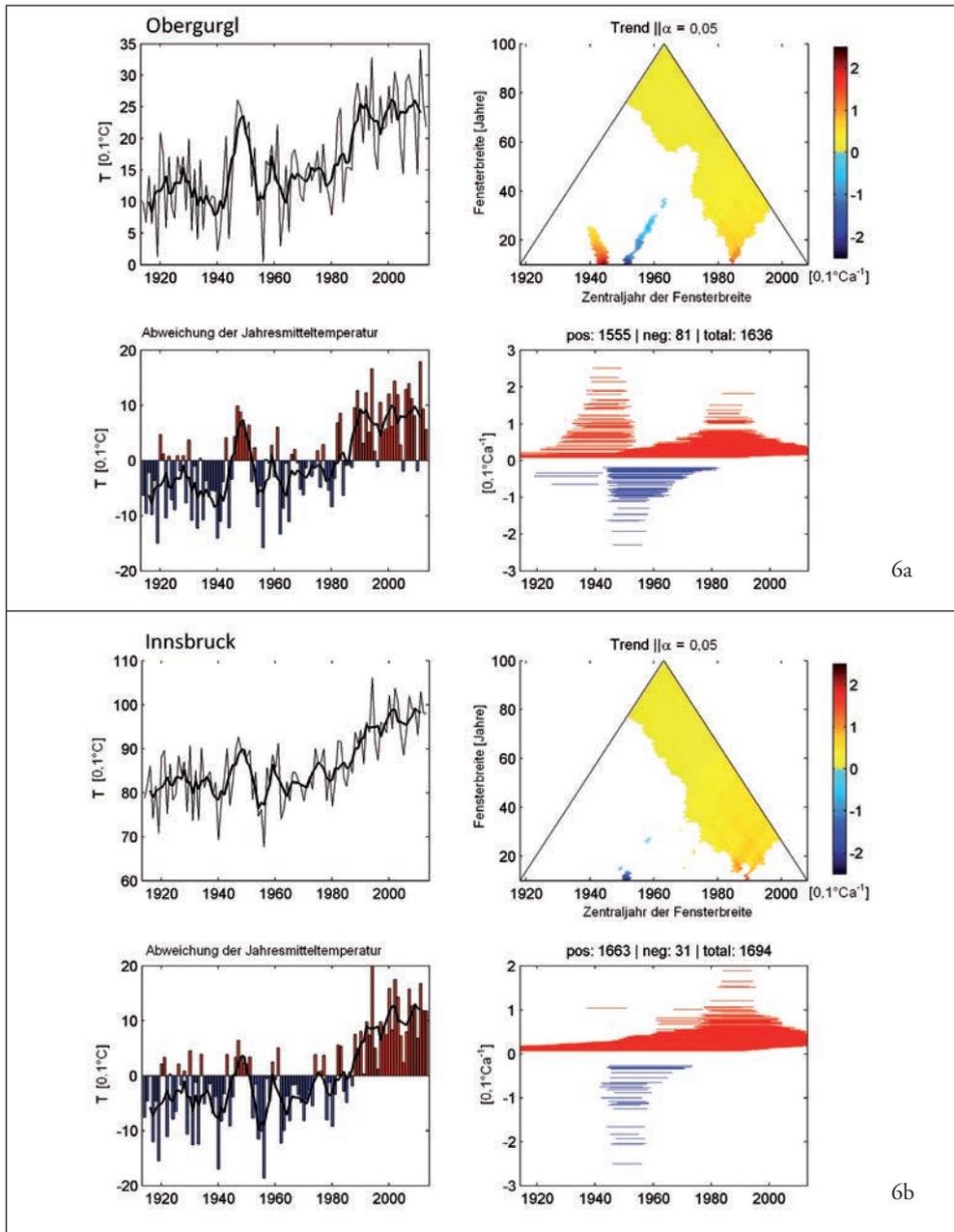
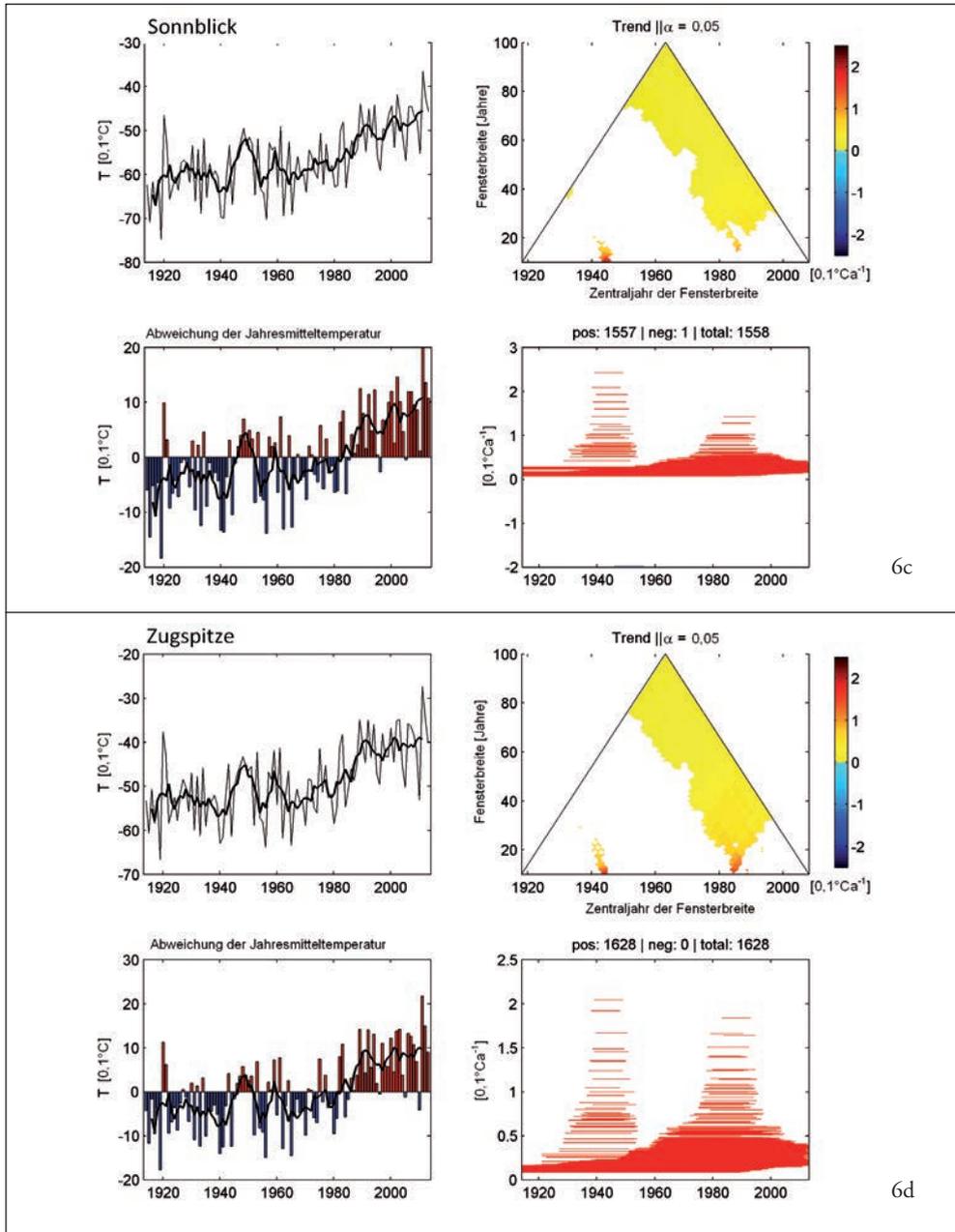


Abb. 6 a–d: Umfassende Trendanalysen für Obergurgl, Innsbruck, Sonnblick und Zugspitze. Im Uhrzeigersinn: Jahresmittel der Lufttemperatur in 0,1 °C und 10-jährig übergreifendes Mittel; Trendmatrixdarstellung mit Fensterbreiten in Jahren und Trendsteigung in 0,1 °C pro Jahr; Trendsteigungen in



0,1 °C pro Jahr, blau=negativ; rot=positiv; Abweichung der Jahresmitteltemperatur vom 100-jährigen Mittel 1914–2013 in 0,1 °C und 10-jährig übergreifendes Mittel (schwarze Kurve)

In den Abb. 6a–d sind zu den Zeitreihen der Jahresmittel (links oben) und deren Anomalien (links unten), je mit gleitendem Mittel, auch die Trendmatrizen (rechts oben) für die Stationen unter einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha=0,05$ dargestellt. Als Zusatz sind alle signifikanten Trends gemäß ihrer Steigung und Länge dargestellt (rechts unten). Diese ergänzende Darstellung ist vor allem auch deshalb wichtig, da aus technischen Gründen einzeln vorkommende Trends nicht dargestellt werden können (siehe z.B. für Obergurgl die negativen Trends um 1930). Nicht signifikante Trends sind in der Trendmatrixdarstellung weiß gehalten. Die restlichen Daten zeichnen sich nun durch die vier Parameter aus: (1) Vorzeichen des Trendkoeffizienten; (2) Intensität des Trendkoeffizienten in $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro Jahr; (3) Zentraljahr des Fensters und (4) Fensterbreite (Beginn bis Ende).

Der empfohlene Weg, sich der Trendmatrixdarstellung zu nähern, ist folgender: Nach Festlegung des Zentraljahres des gesuchten Trends auf der Abszisse und Wahl einer Fensterbreite auf der Ordinate kann die Farbkodierung abgelesen werden und mit der Farbskala (rechts) verglichen werden. Der entsprechende Wert ist die Trendsteigung in $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro Jahr. Durch Multiplikation mit der Fensterbreite ergibt sich die Trendsteigung für die gesamte Trendperiode. Dabei kann grundsätzlich bei kleiner werdenden Fensterbreiten mit größeren Trendsteigungen gerechnet werden. Etwaige Spitzen wirken sich bei kurzen Zeiträumen stärker aus als dies bei größeren Zeiträumen der Fall wäre. Strukturen ähnlich jener, welche z.B. für Obergurgl die negativen

Trends ausmachen und parallelverschoben zur linken Seite des Dreiecks wirken, weisen alle dasselbe Startjahr für die Trends auf. Dies ist auch in der ergänzenden Darstellung der Trendsteigungen ersichtlich.

Generell zeigt sich, dass an allen betrachteten Stationen signifikante Temperaturzunahmen für kurze und lange Perioden zu nahezu den gleichen Zeiten vorkommen (Abb. 6a–d). Anders ist dies jedoch für die signifikanten Temperaturabnahmen. Die hochalpinen Stationen des Sonnblick (Abb. 6c) und der Zugspitze (Abb. 6d) spiegeln die Temperaturentwicklung der Talstationen nicht wider.

6. Diskussion

Es wurde bereits mehrfach darauf hingewiesen, dass sich durch Wahl der Periodenlänge die Aussage eines Trends „manipulieren“ lässt. Durch Aufsplitterung in Jahreszeiten und durch die Verwendung von Stationen in unterschiedlichen Höhenlagen wurde versucht, eventuelle Unterschiede der Trends herauszuarbeiten.

Vergleiche mit verschiedenen anderen Autoren liefern kein einheitliches Bild. An der Tatsache einer säkularen Temperaturerhöhung mit besonders starker Intensität in den letzten drei Dekaden wird nicht gerüttelt. Nicht unerwähnt soll in diesem Zusammenhang ein Blick auf die Temperaturentwicklung der gesamten Nordhalbkugel mit ihren ca. 2.000 Reihen bleiben. Seit dem 19. Jahrhundert

hat sich gegenüber der nordhemisphärischen Reihe im GAR-Raum mit seinen 135 Einzelreihen eine doppelt so starke Erwärmung gezeigt. Böhm & Auer (2007) betonen: „Innerhalb des GAR-Raumes zeigen sich in allen Teilregionen hochgradig ähnliche Trends. Die Temperaturentwicklung von Marseille, Karlsruhe oder Budapest bis zur Zugspitze und zum Sonnblick in der 3000er-Region der Alpen verlief praktisch gleich. Anders lautende frühere Behauptungen, dass sich die Hochalpen stärker erwärmt hatten als die Umgebung, hatten sich als haltlos herausgestellt.“

Dennoch bedürfen die Besonderheiten der beiden Bergstationen Zugspitze und Sonnblick – nämlich nur signifikante Trends mit positivem Vorzeichen aufzuweisen – einer weiteren Untersuchung. Eine Auflösung in Jahreszeiten zeigt, dass die Winterwerte in diesen Höhenlagen durchaus das Jahresbild dominieren können.

Literatur

- Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Matulla, C., Briffa, K., Jones, P.D., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.-M., Begert, M., Müller-Westermeier, G., Kveton, V., Bochnicek, O., Stastny, P., Lapin, M., Szalai, S., Szentimrey, T., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Majstorovic, Z. & Nieplova, E. (2007) HISTALP – Historical instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760-2003. *International Journal of Climatology* 27: 17-46.
- Böhm, R. (2009) Klimarekonstruktion der instrumentellen Periode – Probleme und Lösungen für den Großraum Alpen. *alpine space – man & environment* 6: 145-164.
- Böhm, R., Schöner, W., Auer, I., Hynek, B., Kroisleitner, C. & Weyss, G. (2007) Gletscher im Klimawandel. ZAMG Wien.
- Böhm, R. & Auer, I. (2007) 250 Jahre Klimavariabilität in den Alpen. *Wiener Mitteilungen*, Band 206: 17-28.
- DWD Klimadaten-Monatswerte, (1. Juli 2014), http://www.dwd.de/klima_umwelt.
- Institute of Meteorology and Geophysics (2013) Climate Data Obergurgl, 1953-2011, <http://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.806635>.
- Helsel, D.R. & Hirsch, R.M. (2002) *Statistical Methods in Water Resources*. Book 4, <http://pubs.usgs.gov/twri/twri4a3/>
- Koch, E.M. & Erschbamer, B. (eds) (2013) *Klima, Wetter, Gletscher im Wandel*. Alpine Forschungsstelle Obergurgl 3, Innsbruck university press, Innsbruck.
- Kuhn, M., Dreiseitl, E. & Emprechtinger, M. (2013) *Temperatur und Niederschlag an der Wetterstation Obergurgl, 1953–2011*. In: Koch, E.M. & Erschbamer, B. (eds), *Klima, Wetter, Glet-*

- scher im Wandel. Alpine Forschungsstelle Obergurgl 3, innsbruck university press, Innsbruck: 11-30.
- Ohmura, A. (2012) Enhanced temperature variability in high altitude climate change. *Theoretical and Applied Climatology* 110: 499-508.
- Sen, P.K. (1968) Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association* 63: 1379-1389.
- Sprinthall, R.C. (2011) *Basic Statistical Analysis*, 9th ed., Pearson, Cloth.
- Wilks, D.S. (2006) *Statistical Methods in the Atmospheric Science*. 2nd ed., vol. 91, Academic Press, Oxford.
- ZAMG (2014) HISTALP CSV export (1. Juli 2014), <http://www.zamg.ac.at/histalp/>

Österreichische Akademie der Wissenschaften
Institut für Interdisziplinäre Gebirgsforschung
Technikerstraße 21a/ICT, 6020 Innsbruck, Österreich
Martin.Stocker-Waldhuber@uibk.ac.at

Martin Tiefengraber
Universität Innsbruck
Institut für Meteorologie und Geophysik,
Innrain 52, 6020 Innsbruck, Österreich
Martin.Tiefengraber@uibk.ac.at

Matteo Ciampa
Österreichische Akademie der Wissenschaften
Institut für Interdisziplinäre Gebirgsforschung
Technikerstraße 21a/ICT, 6020 Innsbruck, Österreich
Matteo.Ciampa@gmail.com

Verzeichnis der Autoren:

Ekkehard Dreiseitl
Universität Innsbruck
Institut für Meteorologie und Geophysik
Innrain 52, 6020 Innsbruck, Österreich
Ekkehard.Dreiseitl@uibk.ac.at

Martin Stocker-Waldhuber
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Institut für Geowissenschaften und Geographie, Physische Geographie
Von-Seckendorff-Platz 4, 06120 Halle, Deutschland