

StartClim2004.B

Untersuchung regionaler Klimaänderungsszenarien hinsichtlich Hitze- und Trockenperioden in Österreich

Institut für Meteorologie
Universität für Bodenkultur



Herbert Formayer

Patrick Haas

Christoph Matulla

Andreas Frank

Petra Seibert

Wien, im Jänner 2005

StartClim2004.B

Teilprojekt von StartClim2004

„Analysen von Hitze und Trockenheit und deren Auswirkungen in Österreich“

Projektleitung StartClim2004:

Institut für Meteorologie,

Department Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Universität für Bodenkultur

Peter Jordan Straße 82, 1190 Wien

URL: <http://www.austroclim.at/startclim/>

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	-----	4
Abstract	-----	4
B-1	Einleitung -----	5
B-2	Statistisches Downscaling mittels Analogansatz -----	6
B-2.1	Verwendete Daten -----	6
B-2.2	Methode -----	7
B-2.3	Ergebnisse -----	8
	<i>B-2.3.1 Auswertung in den Regionen</i> -----	<i>9</i>
B-3	Auswertung eines PRUDENCE – Szenarios in Österreich. -----	12
B-3.1	Methode -----	12
B-3.2	Auswertung in den Regionen -----	13
B-4	Synoptisches Downscaling -----	17
B-4.1	Modelldaten und Methodik -----	17
B-4.2	Stationsdaten -----	18
	<i>B-4.2.1 Korrektur bei Kaltfrontdurchgang</i> -----	<i>18</i>
	<i>B-4.2.2 Regionenbildung</i> -----	<i>19</i>
B-4.3	Episodendefinition -----	20
	<i>B-4.3.1 Hitzetage pro Jahr</i> -----	<i>20</i>
	<i>B-4.3.2 Definition nach Kysely</i> -----	<i>20</i>
	<i>B-4.3.3 Zählen von aufeinanderfolgenden Hitzetagen</i> -----	<i>20</i>
B-4.4	Zusammenhang ERA40 - Beobachtungen -----	21
	<i>B-4.4.1 Zeitreihen</i> -----	<i>21</i>
	<i>B-4.4.2 Regressionsanalysen</i> -----	<i>21</i>
B-4.5	Auswertung der Hitzeepisoden -----	23
	<i>B-4.5.1 Hitzetage pro Jahr</i> -----	<i>23</i>
	<i>B-4.5.2 Auswertung nach Kysely</i> -----	<i>24</i>
	<i>B-4.5.3 Definition aufeinanderfolgender Hitzetage</i> -----	<i>25</i>
B-5	Vergleich der Ergebnisse -----	27
B-6	Schlussfolgerungen und Forschungsbedarf -----	30
B-7	Literatur -----	32

Kurzfassung

Ziel dieses Projektes war es, mittels dreier verschiedener Ansätze abzuschätzen, welche Informationen derzeit aus Globalen Zirkulationsmodellen (GCM) bezüglich sommerlicher Trockenperioden und Hitzewellen für Österreich im 21. Jahrhundert abgeleitet werden können: Hierzu wurde ein statistischer und ein synoptischer Ansatz auf Tagesbasis anhand von ERA40 Reanalysedaten entwickelt und auf ECHAM4 GCM-Szenarien angewandt. Zusätzlich wurde ein regionales Klimamodellergebnis des Eu-Projektes PRUDENCE für Österreich analysiert.

Bei der Temperatur zeigen alle drei Ansätze vergleichbare Ergebnisse. Innerhalb von 30 Jahren zeigen die Szenarien einen Anstieg von derzeit unter 10 Hitzetagen pro Jahr im Nordosten Österreichs auf rund 30. Für den Zeitraum 2070-2100 ergeben sich über 40 solcher Hitzetage.

Für den Niederschlag sind die Szenarienergebnisse wesentlich unsicherer. Dies gilt sowohl für den statistischen Ansatz, als auch für das RCM. Beim statistischen Ansatz zeigte sich eine starke Abhängigkeit des verwendeten Prädiktorfeldes. Das RCM wiederum hat Schwierigkeiten den Niederschlag im Südosten Österreichs richtig zu reproduzieren. In der Nordostregion werden zwar die Mittelwerte einigermaßen richtig wiedergegeben, jedoch ist auch beim Niederschlag die interannuale Variabilität zu groß. Weiters zeigen sich Unterschiede in der Persistenz von Trockenperioden.

Generell kann gesagt werden, dass alle drei Verfahren für die Temperatur bzw. Temperaturextreme vergleichbare Ergebnisse liefern. Dies spricht für die Robustheit der regionalen Temperaturszenarien und steigert ihre Glaubwürdigkeit. Dies bedeutet aber auch, dass für die Ableitung von Temperaturextrema wie Hitzetage bereits der einfache hier vorgestellte synoptische Ansatz verwendet werden kann. Die Niederschlagsszenarien hingegen müssen als äußerst unsicher eingestuft werden und eine direkte Anwendung dieser in Impaktstudien sollte nur mit vorgeschalteter Analyse und Korrektur erfolgen.

Abstract

The aim of this project was to investigate the usefulness of three different approaches of downscaling methods with special emphasis on summer droughts and heat waves in Austria in the 21st century. Therefore a statistic and a synoptic method using daily data from the ERA40 reanalysis project and ECHAM4 GCM-Scenarios were used. Further, data from the regional climate model (RCM) derived within the EU-project PRUDENCE were analysed for Austria.

The analysis of temperature showed similar results for all three approaches. In the analysed periods the scenarios show an increase of heat days from less than 10 per year up to about 30 in northeast of Austria within a period of 30 years. Also, in the period 2070-2100 we can expect up to 40 heat days per year.

The results of the precipitation scenarios are much more uncertain. This concerns the statistic approach as well as the RCM. The statistic approach shows a strong dependence of the predictor used. The RCM is not capable to generate the precipitation in the southeast of Austria correctly. In the northeast the mean precipitation is almost correct, but the interannual variance is too large and we also see great differences of the persistence of droughts.

Summarising, we see that all three methods show similar results for temperature and temperature extremes. This proves the robustness of the regional temperature scenarios and increases their credibility. But it also means that the cheapest method i.e. the presented synoptic method is sufficient. The precipitation however has to be regarded as rather uncertain and a direct application of this impact studies should only be performed in combination with an analysis and a correction.

B-1 Einleitung

Das Jahr 2003 hat gezeigt, dass selbst in Mitteleuropa sommerliche Hitzewellen gravierende Auswirkungen auf das öffentliche Leben haben können. Glücklicherweise wurde Österreich von extrem heißen Temperaturen wie in Teilen Frankreichs und Deutschlands verschont, dennoch kam es in den Ballungszentren zu starker thermischer Belastung der Bevölkerung. Zusätzlich zur direkten Hitzebelastung der Menschen kam es bedingt durch unterdurchschnittliche Niederschläge verbreitet zu Trockenschäden in der Landwirtschaft und vereinzelt sogar zu Problemen mit der Wasserversorgung. Diesmal nicht nur in den südöstlichen Regionen Österreichs, wo dieses Problem bereits in den letzten Jahren aufgetreten ist, sondern auch nördlich des Alpenhauptkammes.

Die vom „Intergovernmental Panel of Climate Change“ (IPCC, 2001) veröffentlichten Angaben von einer Temperaturzunahme im globalen Mittel von 1,4 bis 5,8 °C bis zum Ende dieses Jahrhunderts (IPCC 2001), zeigen nach den Erfahrungen von 2003 verstärkt die Notwendigkeit auf, regionale Klimaänderungsszenarien zu entwickeln und hinsichtlich der Veränderung der Temperatur- und Niederschlagsverteilung im Sommer zu analysieren.

Die derzeitigen gekoppelten globalen Zirkulationsmodelle (GCM) sind recht gut in der Lage, das Klima in globaler bis kontinentaler Größenordnung zu reproduzieren. Aufgrund ihrer groben räumlichen Auflösung (Gitterpunktweiten von einigen 100 km) sind sie nicht geeignet, regionale Informationen speziell für den Niederschlag im Alpenraum direkt zu liefern. Es können jedoch direkte Analysen der GCMs bezüglich Schönwetterperioden durchgeführt werden, da diese in Mitteleuropa mit großräumigen Hochdrucklagen verbunden sind und von den GCMs bereits aufgelöst werden.

Um zu regionalen Aussagen aus den GCM - Szenarios zu gelangen, müssen Regionalisierungsverfahren (Downscaling) nachgeschaltet werden. Statistische downscaling Verfahren sind in der Klimafolgenforschung weit verbreitet, da sie weit geringere Ansprüche an die Infrastruktur stellen als dynamische Verfahren und relativ einfach an die jeweiligen Ansprüche der Forscher angepasst werden können (Hewitson et al., 1996). Bei diesen Verfahren wird ein statistischer Zusammenhang zwischen beobachteten meteorologischen Stationsdaten und großräumigen Verhältnissen (einige GCM Gitterpunktwerte bis hin zu großräumigen Strukturen) abgeleitet. Speziell für die Untersuchung von Trockenheit müssen regionale Szenarien auf Tagesbasis verwendet werden, da der Niederschlag eine zeitliche Skala von Stunden (Gewitter) bis zu ein paar Tagen (Landregen) hat, und daher auf Monatsbasis nur mehr unzureichend aufgelöst werden kann.

Ziel dieses Projektes war es, mittels dreier verschiedener Ansätze abzuschätzen, welche Informationen derzeit aus globalen Zirkulationsmodellen (GCM) bezüglich sommerlicher Trockenperioden und Hitzewellen für Österreich im 21. Jahrhundert abgeleitet werden können. Hierzu wurde ein statistischer und ein synoptischer Ansatz auf Tagesbasis anhand von ERA40 Reanalysedaten entwickelt und auf ECHAM4 GCM-Szenarien angewandt. Zusätzlich wurde ein regionales Klimamodellergebnis des EU-Projektes PRUDENCE (Prudence 2005) für Österreich analysiert.

B-2 Statistisches Downscaling mittels Analogansatz

Als Downscalingverfahren wurde die Analog-Methode von Zorita und von Storch (1999) in die Klimaforschung eingeführt und mit anderen empirischen Downscaling-Verfahren verglichen. Sie ist ein einfaches Verfahren, das aus dem großskaligen Zustand der Atmosphäre auf das lokale Wettergeschehen schließt. Dabei wird die großskalige Zirkulation, wie sie von einem Klimamodell simuliert wird, Termin für Termin mit der historisch beobachteten Zirkulation (Reanalyse) verglichen. Das ähnlichste, beobachtete Zirkulationsmuster wird als Analogon gewählt und dessen lokale Wettersituation wird dem simulierten Muster zugeordnet. Dabei ist noch zu definieren wie 'Ähnlichkeit' quantifiziert wird. Eine sinnvolle Möglichkeit ist die Verwendung einer euklidischen Distanz.

Eine Schwachstelle des Verfahrens ist ihr Bedarf an ausreichend langen Beobachtungen um sicherzustellen, dass stets eine vernünftige, analoge Zirkulationssituation detektiert werden kann. Van den Dool (1994) hat gezeigt, dass auf globaler Basis für den Zweck einer sinnvollen Wettervorhersage viele tausend Jahre an Beobachtungen nötig sind. Tatsächlich liegen globale Beobachtungen nur für einige Jahrzehnte vor. Um die Analog-Methode dennoch verwenden zu können, muss die Zahl der Freiheitsgrade drastisch reduziert werden. Zunächst ist für die Belange des Downscalings im allgemeinen nicht die globale Skala notwendig sondern es sind geographische Ausschnitte in der Größenordnung von Kontinenten ausreichend. Weiterhin werden die Daten mittels EOF-Analyse (Empirische Orthogonal Funktionen; von Storch and Zwiers 1999) gefiltert. Darüber hinaus wird die Analog-Methode nicht zur Wettervorhersage genutzt, sondern sie soll über eine Periode von einigen Jahrzehnten lokalskalige Zustände kohärent mit der großräumigen Zirkulation in Verbindung setzen. All das führt auf eine drastische Reduktion der Freiheitsgrade.

Eine umfassende Darstellung der Methode und die Ergebnisse der Validierungsexperimente findet sich in Matulla et al. 2004.

B-2.1 Verwendete Daten

Die Reanalyse, welche die Beobachtungen auf der GCM-Skala repräsentiert, ist der 12-stündige ERA40-Datensatz (Uppala 2003) des ECMWF (European Centre for Medium range Weather Forecasts, Reading/GB). Die horizontale Auflösung beträgt 2.5 x 2.5 Grad. Es wurde die Periode von 1958 bis 2001 betrachtet. Der verwendete Ausschnitt reicht von -10° West bis 27.5° Ost und von 35° bis 65° Nord.

Als lokale Beobachtungen wurde der StartClim Stationsdatensatz (Schöner et al., 2003) verwendet. Dieser umfasst 71 österreichische Stationen und beinhaltet die Elemente Temperatur und Niederschlag und reicht von 1948 bis 2002.

Als globales Klimamodell wurde das ECHAM4/OPYC3 (Röckner et al, 1996) betrieben mit dem Emissionsszenario IS92 A verwendet. Sowohl der Kontrolllauf als auch die beiden Szenarioläufe bis 2048, einmal mit Aerosolen und einmal ohne, wurden untersucht. Umfassend untersucht wurde die Periode 2019 bis 2048.

B-2.2 Methode

Als erster Schritt wurde mittels Split-Sample-Test ausgetestet, welche meteorologischen Felder am Besten als Prädiktoren für die Temperatur und den Niederschlag in Österreich in Frage kommen. Hierzu wurde eine Vielzahl an meteorologischen Parametern in verschiedenen Höhen zugelassen. Für die Temperatur zeigten mehrere Felder befriedigende Ergebnisse, am besten eignete sich jedoch die relative Topographie zwischen 850 und 700 hPa. Im Split-Sample-Test zeigten sich Korrelationen zwischen modellierten Temperaturen und Beobachtungen von rund 0.8.

Für den Niederschlag hingegen zeigten alle meteorologischen Felder wesentlich schlechtere Ergebnisse. Dies gilt speziell für den Sommer, da hier kleinräumige konvektive Prozesse

wesentlich zum Niederschlag beitragen. Als relativ gute Prädiktoren stellte sich der Bodenluftdruck aber auch wieder die relative Topographie 850-700 hPa. heraus. Mit beiden konnten zumindest die klimatologischen Kenngrößen des Niederschlages reproduziert werden und auch die Persistenzen von Niederschlags- und Trockenperioden wurden richtig wiedergegeben.

Als zweiter Schritt wurde der Kontrolllauf des GCMs untersucht, ob hier systematische Unterschiede zu den Beobachtungen auftreten. Hierzu wurden die modellierten Werte GCM-Kontroll plus Analog klimatologisch mit den Beobachtungen verglichen. Es zeigte sich eine gute Übereinstimmung.

Als letzter Schritt wurde das Analogverfahren auf die GCM-Szenarienläufe angewandt. Für die Temperatur wurde hierzu die relative Topographie 850-700 hPa verwendet und für den Niederschlag sowohl der Bodenluftdruck als auch die relative Topographie 850-700 hPa. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte sowohl für die einzelnen Stationen, um die Ergebnisse jedoch mit denen des regionalen Klimamodells vergleichen zu können, wurden Mittelwerte für zwei Regionen in Österreich berechnet. In Abbildung B-1 sind die Lage der Regionen (gelb) und die für die Mittelbildung verwendeten StartClim-Stationen dargestellt.

Ausgewählte österreichische Regionen (gelb) und StartClim-Stationen

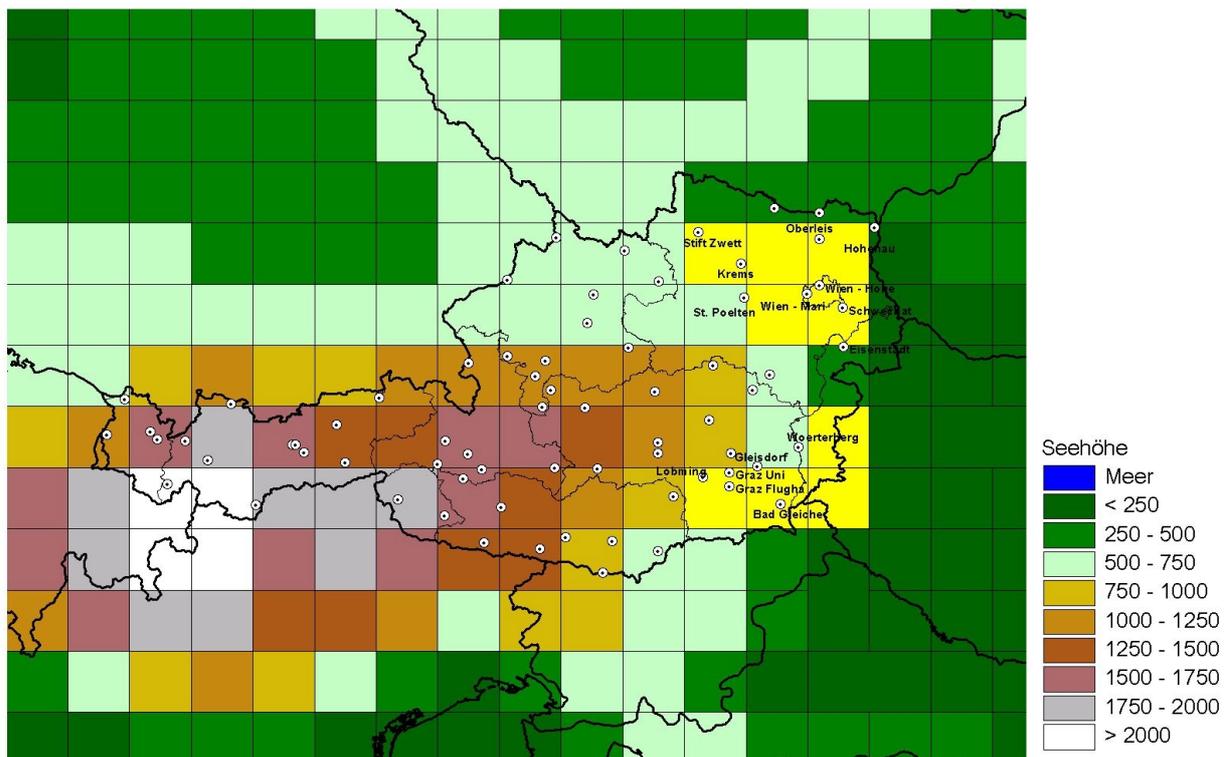


Abb. B-1: Topographie des CHRM-Modells. Die gelb markierten Flächen stellen die beiden Regionen Nordost bzw. Südost dar. Die mit Namen versehenen StartClim-Stationen wurden für die Regionsmittelbildung verwendet.

B-2.3 Ergebnisse

Für die Auswertung wurden nur die Ergebnisse des Szenarios ohne Aerosole verwendet, da dieses bei der Temperatur ein etwas stärkeres Änderungssignal (~ 0.5 K) zeigte. In Abbildung B-2 ist die mittlere Änderung der Jahresmitteltemperatur für ganz Österreich dargestellt. Die Änderungen betragen zwischen 2 und 4 K, wobei die stärkeren Änderungen bei den Bergstationen auftreten. Die Erwärmung ist im Sommer und Winter höher als in den Übergangsjahreszeiten.

Beim Niederschlag lieferten die beiden Prädiktoren unterschiedliche Ergebnisse, obwohl beide Prädiktoren bei der Validierung vergleichbare Ergebnisse brachten. Der Bodenluftdruck zeigt beim Szenariolauf eine Niederschlagszunahme, die relative Topographie hingegen eine Abnahme des Niederschlags. Wir vermuten, dass durch den Temperaturanstieg im Szenariolauf die Analogmethode mit der relativen Topographie als Prädiktor bevorzugt Hochdrucklagen detektiert, da diese in diesem Höhenbereich wärmer sind und dadurch die Niederschlagsreduktion zustande kommt. Für die Auswertung wurde daher nur das Szenario mit dem Bodenluftdruck als Prädiktor verwendet. Dies zeigt aber auf, wie schwierig die Ableitung von regionalen Niederschlagsszenarien sind und dass die Ergebnisse eher qualitativ interpretiert werden sollen.

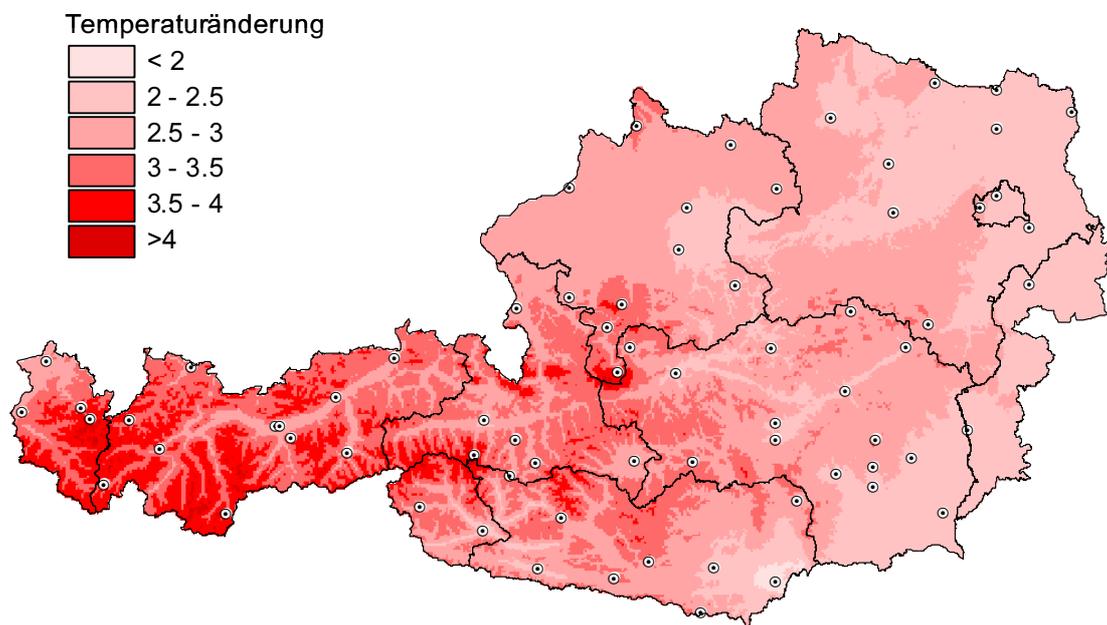


Abb. B-2: Änderung der Jahresmitteltemperatur der Periode 2019-2048 gegenüber 1961-1990, abgeleitet mittels Analogmethode aus den ECHAM4-IS92 A Lauf.

B-2.3.1 Auswertung in den Regionen

Die Auswertung bezüglich Hitze in den Regionen erfolgte für die Monate Mai bis September. Als Temperaturextrem wurde die Anzahl der Hitzetage, also Tage an denen die Tagesmaximaltemperatur mindestens 30 °C erreicht, untersucht. Hierzu wurde auf Tagesbasis das Flächenmittel der Maximaltemperatur berechnet (in der Nordregion aus 9 Stationen und in der Südregion aus 6 Stationen). Der mittlere Anstieg der Tagesmaximumtemperatur für den Zeitraum Mai bis September betrug in beiden Regionen rund 3 K. Dieser Anstieg zeigt massive Auswirkungen auf die Häufigkeit von Hitzetagen. In Abbildung B-3 sind die Ergebnisse beider Regionen zusammengefasst. In dieser Box-Darstellung ist die rote Linie der Median, die Box wird durch die 25 % bzw. 75 % Perzentile gebildet und die schwarzen Linien markieren die Extremwerte. In der Nordregion erhöht sich der Median von 8 Hitzetagen in der Periode

1961-1990 auf 23 und in der Südregion von 2,5 auf 19,5. In beiden Regionen ist der Medianwert des Szenarios höher als der Maximalwert der Periode 1961-1990.

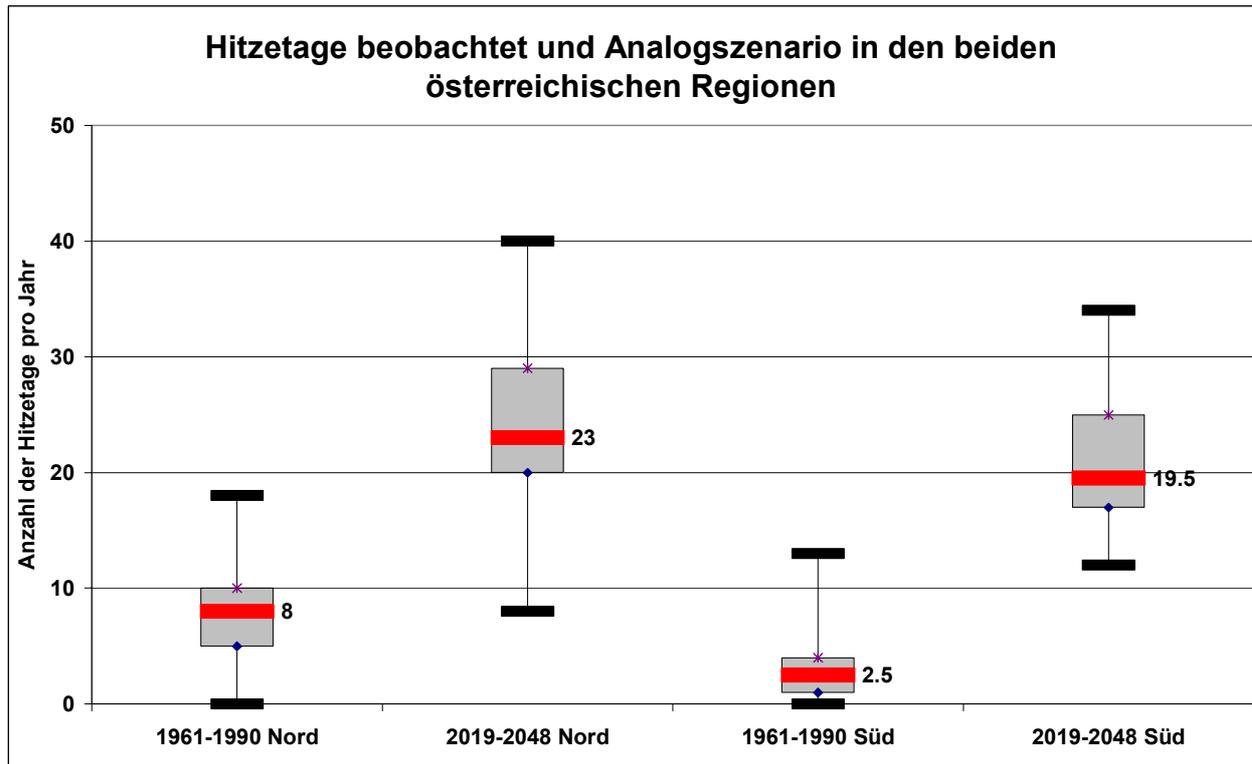


Abb. B-3: Häufigkeit von Hitzetagen [$T_{max} \geq 30 \text{ °C}$] in den beiden österreichischen Regionen beobachtet und AnalogszENARIO.

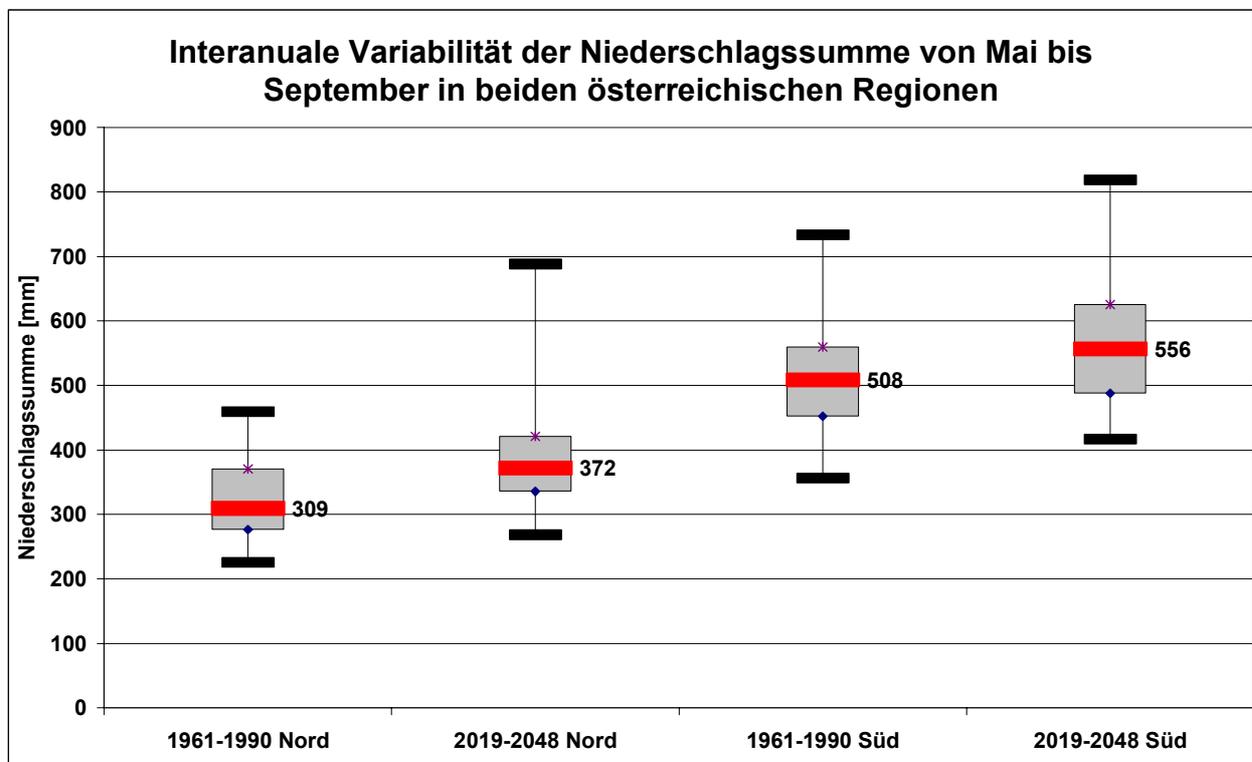


Abb. B-4: Interannuale Variabilität der Niederschlagssumme von Mai bis September in den beiden Regionen beobachtet und AnalogszENARIO.

Häufigkeit von Trockenperioden in den beiden Regionen beobachtet und Analog Szenario

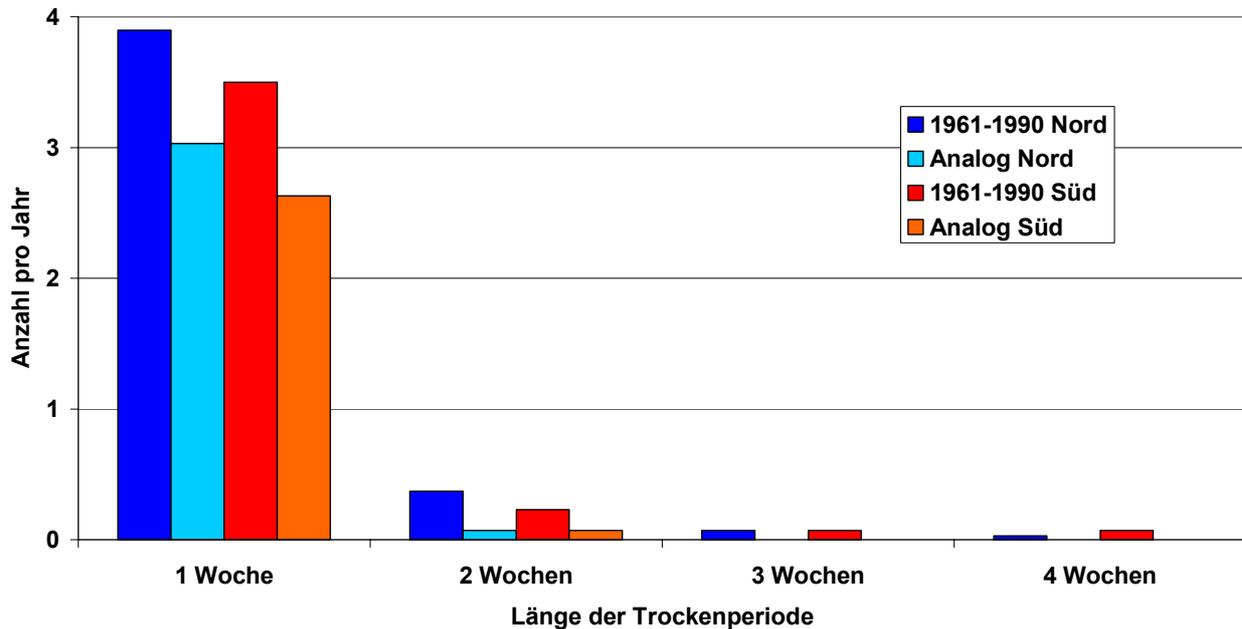


Abb. B-5: Häufigkeit von Trockenperioden [RR<=0,1 mm pro Tag] in den beiden Regionen beobachtet und Analog Szenario.

Für den Niederschlag erfolgte die Auswertung einerseits durch einen Vergleich der interannualen Variabilität die Niederschlagssummen von Mai bis September und eine Auswertung der Trockenperioden von unterschiedlicher Längen. In Abbildung B-4 ist das Ergebnis der Niederschlagssummen zusammengefasst. In der Nordregion zeigt das Szenario einen Anstieg des Sommerniederschlags um rund 20 Prozent im Süden jedoch nur um rund 10 Prozent. Diese Niederschlagszunahme führt dazu, dass die Wahrscheinlichkeit für Trockenperioden abnimmt. Im Szenario kommen in beiden Regionen keine Trockenperioden von 3 Wochen Dauer oder länger vor (siehe Abb. B-5). Wir möchten jedoch nochmals darauf hinweisen, dass die Niederschlagsszenarien nicht sehr robust sind.

B-3 Auswertung eines PRUDENCE – Szenarios in Österreich.

In dem EC-Forschungsprojekt PRUDENCE (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining EuropeAN Climate change risks and Effects) wurden verschiedene Regionale Klimamodelle in Europa angewandt und miteinander verglichen. Eine umfassende Darstellung des Projektes, weiterführende Literatur und Ergebnisse findet man auf der Projekthomepage (Prudence, 2005, Christensen et al., 2002). Dankenswerterweise sind die Ergebnisse der Modellläufe für die Forschungsgemeinde freigegeben. Für die Auswertung in Österreich wählten wir das Modell CHRM der ETH-Zürich (Vidale et al., 2002), da wir davon ausgehen, dass unsere Schweizer Kollegen besonders die Effekte der Alpen mitberücksichtigen.

B-3.1 Methode

Die Prudence – Szenarios wurden mit dem dynamischen Downscaling Ansatz generiert. Hierbei wird in ein globales Klimamodell ein regionales Klimamodell genestet. Das heißt, das regionale Modell rechnet nicht die gesamte Erde, sondern nur einen Ausschnitt (Europa). An den Rändern übernimmt das regionale Modell die Werte des GCMs und in der Zielregion rechnet das regionale Modell mit einer höheren räumlichen Auflösung.

Unser ausgewertetes Szenario wurde global mit dem HadAM3H des Hadley-Centres betrieben mit dem SRES Emissionsszenario A2 gerechnet. Der globale Temperaturanstieg in diesem GCM betrug 3,1 Grad. Für den Zeitraum 2070 bis 2100 wurde das regionale Modell CHRM genestet und mit einer räumlichen Auflösung von 0,5 Grad für ganz Europa gerechnet. Für die Auswertung haben wir die täglichen Felder für das Temperaturmaximum und den Niederschlag für den Szenariolauf und den Kontrolllauf verwendet.

Geländemodell des regionalen Klimamodells CHRM der ETH-Zürich

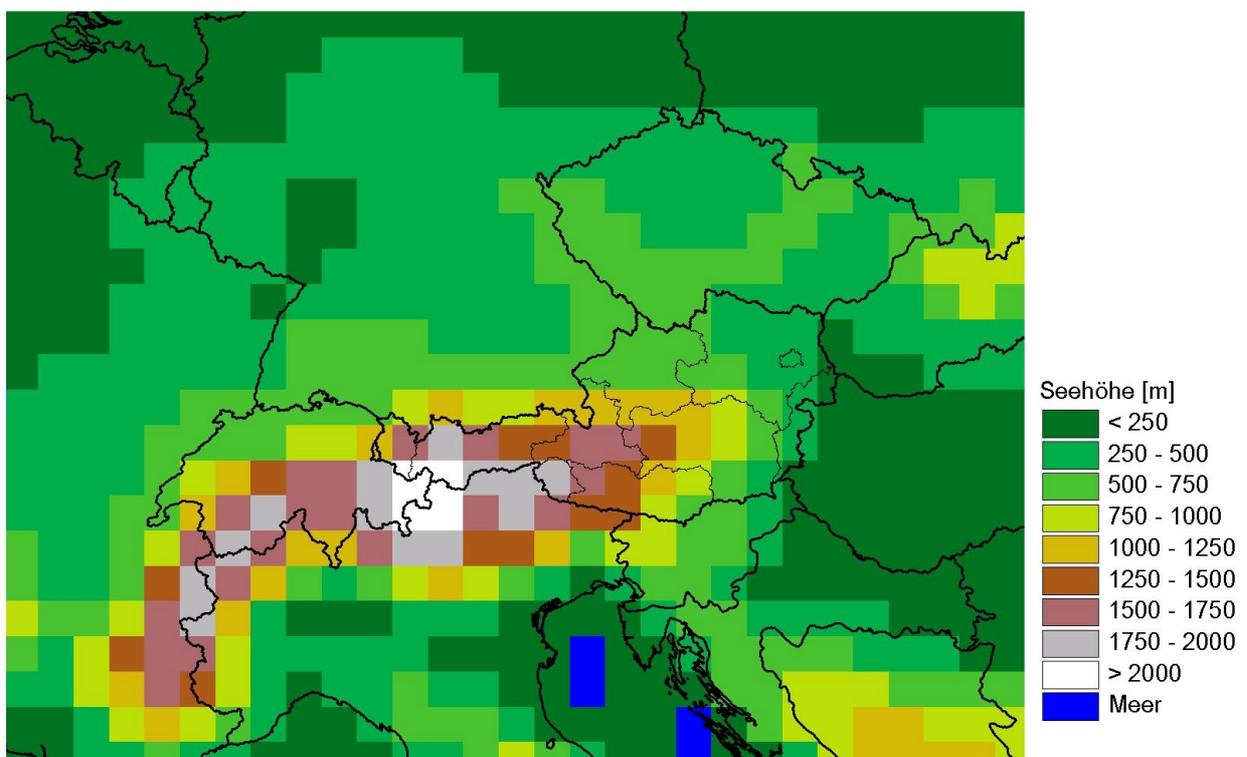


Abb. B-6: Topographiefeld des regionalen Klimamodells CHRM. Die Form der Alpen wird zwar einigermaßen gut abgebildet, einzelne Alpentäler werden jedoch noch nicht aufgelöst.

Das regionale Klimamodell hat zwar eine wesentlich bessere räumliche Auflösung, trotzdem kann man die Modellergebnisse nicht direkt mit Beobachtungen vergleichen. In Abbildung B-6 ist das Topographiefeld der CHRM dargestellt. Die Form der Alpen wird in dieser Auflösung einigermaßen richtig wiedergegeben, aber einzelne Alpentäler werden noch nicht aufgelöst. Für den Vergleich mit Beobachtungsdaten haben wir uns daher auf den Flachlandbereich Österreichs beschränkt. In Abbildung B-1 sind die Regionen gelb eingezeichnet. Die Nordregion besteht aus 5 Gitterzellen des regionalen Modells und die Südregion aus 4. Die mittlere Seehöhe der Nordregion liegt im Modell bei 403 m, die gemittelte Seehöhe der 9 Vergleichsstationen beträgt 281 m. In der Südregion betragen die Werte 401 m Modell und 357 m die Stationen. Eine Höhenkorrektur für die Temperaturwerte wurde nicht durchgeführt, daher sollte das regionale Modell in der Nordregion um rund 0,5 °C zu kühl sein, in der Südregion nur 0,1 bis 0,2 °C.

Im ersten Schritt wurden die Ergebnisse des Kontrolllaufes des CHRM mit den Beobachtungen in den beiden Regionen verglichen und danach die Ergebnisse des Szenarienlaufes untersucht.

B-3.2 Auswertung in den Regionen

Als erster Schritt wurde untersucht, ob die Tagesmaxima des CHRM-Kontrolllaufes mit den Beobachtungen übereinstimmen und ob die Variabilität von Jahr zu Jahr vergleichbar ist. Hierzu wurde der Mittelwert des Tagesmaximum für die Periode Mai bis September pro Jahr berechnet. In Abbildung B-7 sind die Ergebnisse für beide Regionen zusammengefasst. In der Nordregion stimmt der Median sehr gut zwischen Modell und Beobachtung überein, jedoch überschätzt das Modell die interannuale Variabilität. In den Beobachtungen schwankt diese Mitteltemperatur in einem Wertebereich von rund 3 K, das Modell hingegen schwankt um 5 K. In der Südregion ist das Modell um rund 2,5 K zu warm. Verursacht wird diese Überschätzung der Temperaturmaxima aus unserer Sicht durch die drastische Unterschätzung des Niederschlags in der Südregion. In Abbildung B-8 ist die interannuale Variabilität der Niederschlagssumme von Mai bis September dargestellt. Wird in der Nordregion der beobachtete Wertebereich vom Modell noch einigermaßen reproduziert, so wird er in der Südregion hingegen um rund 50 % unterschätzt. Auch die Wahrscheinlichkeit von Niederschlagsfreien Tagen wird im Modell um 15 % überschätzt. Anscheinend wird vom CHRM die Tiefdruckentwicklung über der Adria nicht richtig wiedergegeben und/oder der konvektive Niederschlag, der in dieser Region besonders relevant ist, nicht richtig reproduziert. Dieser zu geringe Niederschlag wirkt sich durch zwei Faktoren auf die Tagesmaximumtemperatur aus. Einerseits gibt es mehr Schönwettertage mit hohen Tagesmaxima und andererseits reduziert der geringere Niederschlag die Transpirationskühlung.

Für die weitere Auswertung wurde daher nicht die direkten CHRM-Ergebnisse verwendet, sondern es wurden nur die Veränderung von Kontroll- zu Szenarienlauf genommen und auf die Beobachtungen aufgesetzt.

Der mittlere Anstieg der Tagesmaxima von Kontroll zu Szenarienlauf beträgt in beiden Regionen rund 4 K. Dies wirkt sich massiv auf die Anzahl der Hitzetage pro Jahr aus. In Abbildung B-9 sind die Ergebnisse zusammengefasst. In der Nordregion ergibt sich ein Anstieg von 8 auf 39,5 Tage pro Jahr und in der Südregion von 2,5 auf 42,5, in Extremjahren liefert das Szenario mehr als 60 Hitzetage. Dies bedeutet das praktisch jeder zweite Tag im Sommer ein Hitzetag wäre.

Beim Niederschlag ergibt sich für beide Regionen eine Niederschlagsabnahme von rund 20 Prozent für die Periode Mai bis September. Dies wirkt sich stark auf die Häufigkeit von Trockenperioden aus. In Abbildung B-10 sind die Ergebnisse dargestellt. Für die Berechnung wurde nur die Veränderung Kontroll- zu Szenariolauf verwendet. Besonders in der Südregion ist ein starker Anstieg an Trockenperioden von 2 bis 3 Wochen Länge festzustellen.

Die Kombination Temperaturanstieg und Niederschlagsreduktion in den Sommermonaten, wie es die CHRM-Szenarien zeigen, hätte für Österreich massive Auswirkungen speziell für die Vegetation aber auch für die Wasserverfügbarkeit.

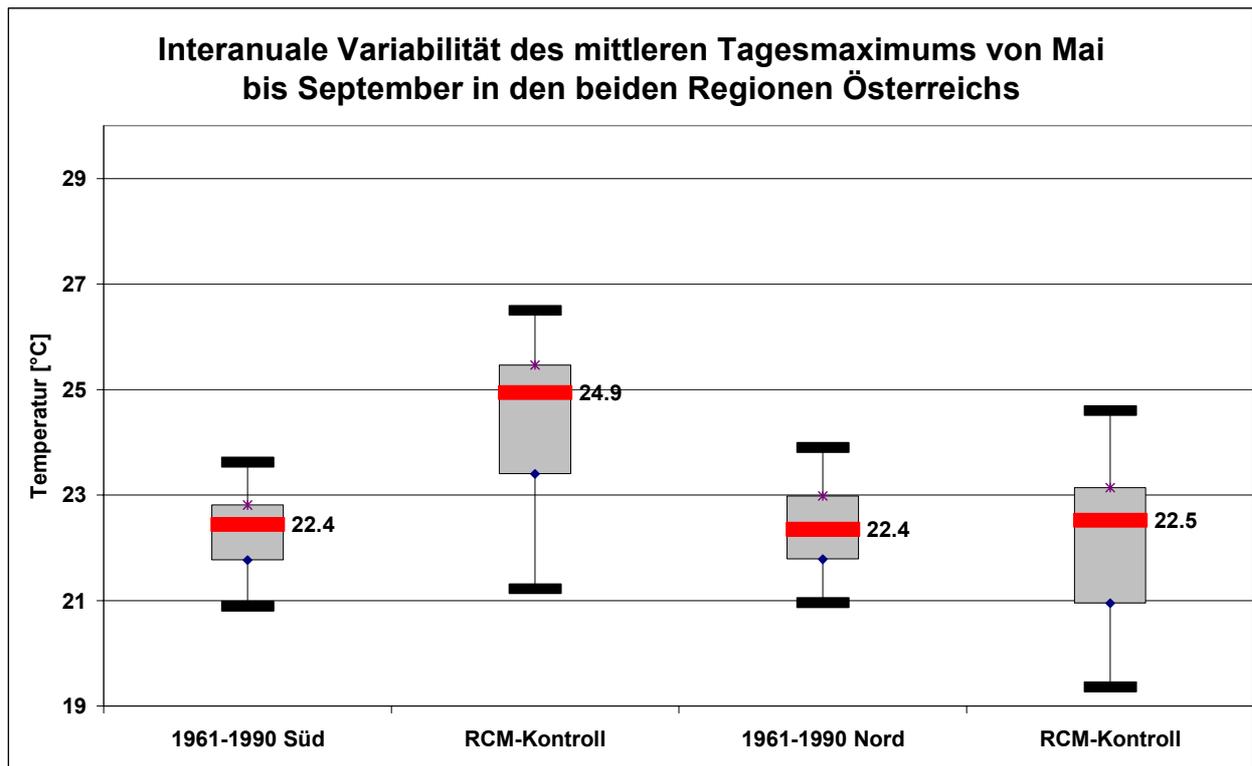


Abb. B-7: Interannuale Variabilität des mittleren Tagesmaximums von Mai bis September beobachtet und CHRM-Kontrolllauf für beide österreichischen Regionen.

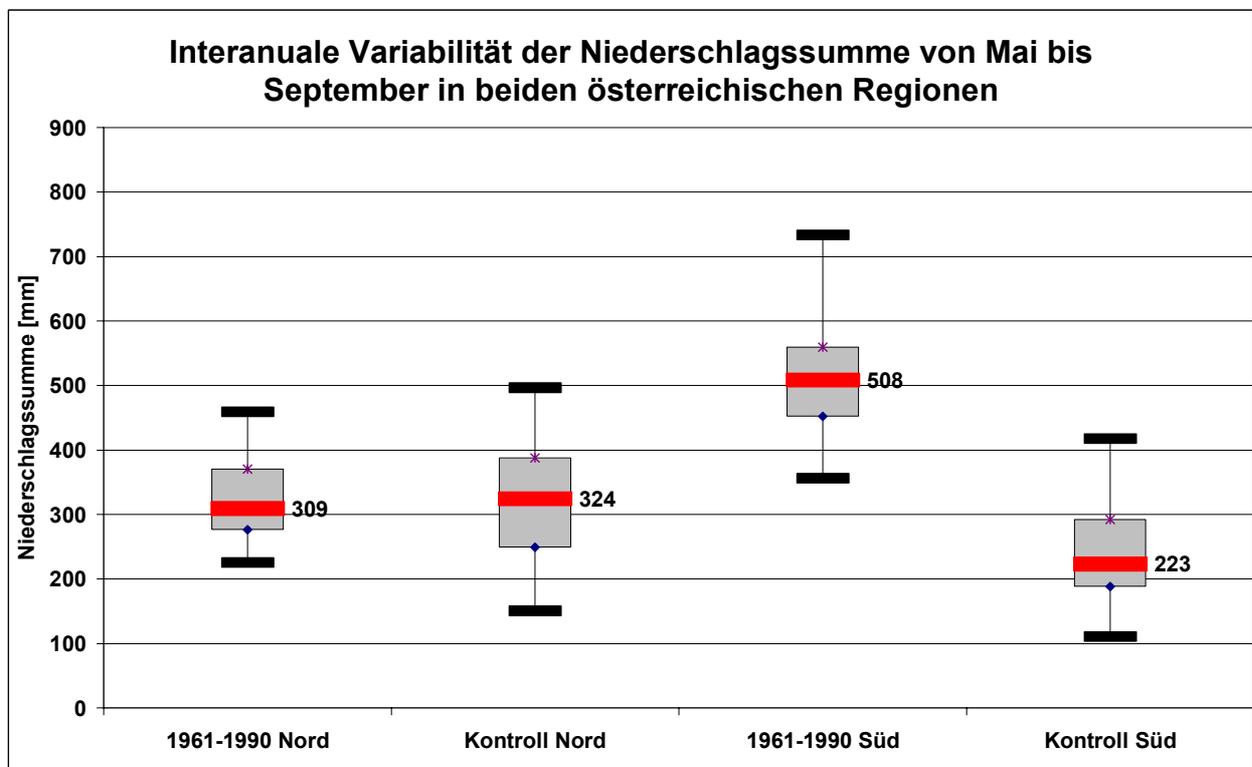


Abb. B-8: Interannuale Variabilität der Niederschlagssumme von Mai bis September beobachtet und CHRM-Kontrolllauf für beide Regionen.

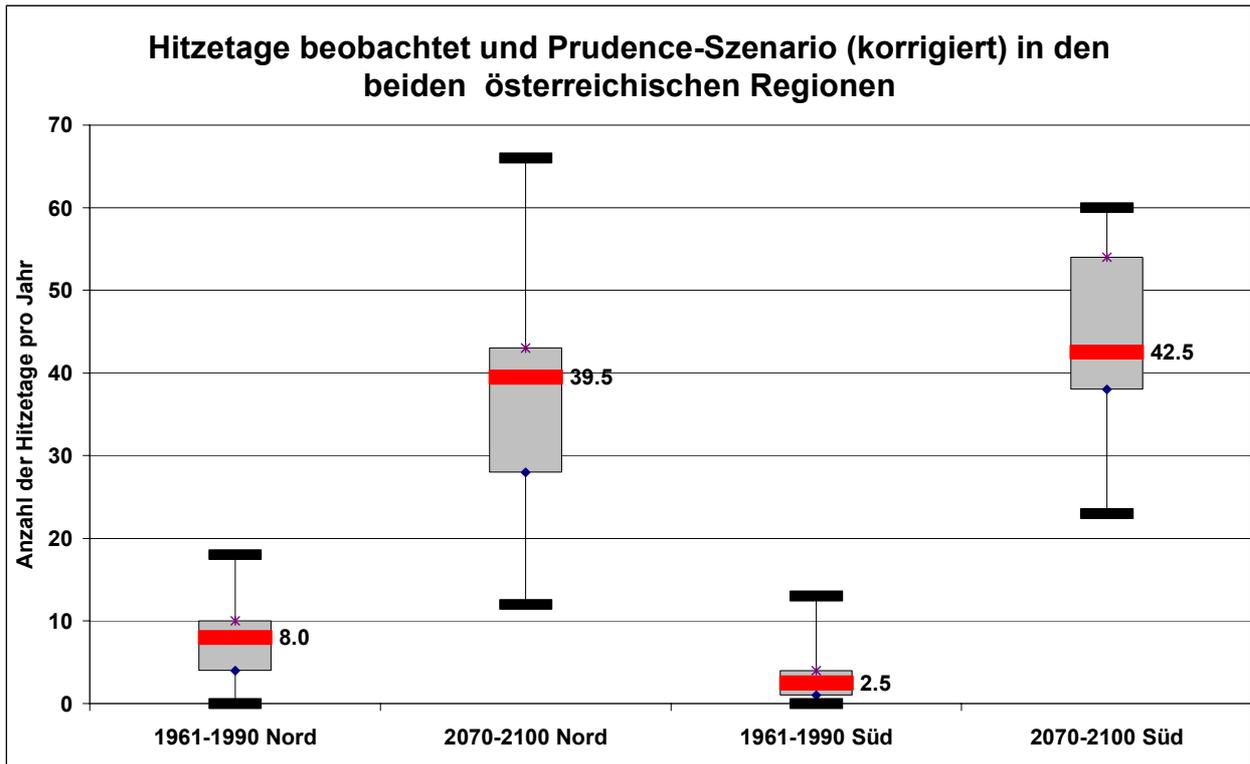


Abb. B-9: Anzahl der Hitzetage beobachtet und CHRM-Szenario (Korrigiert) für beide österreichischen Regionen.

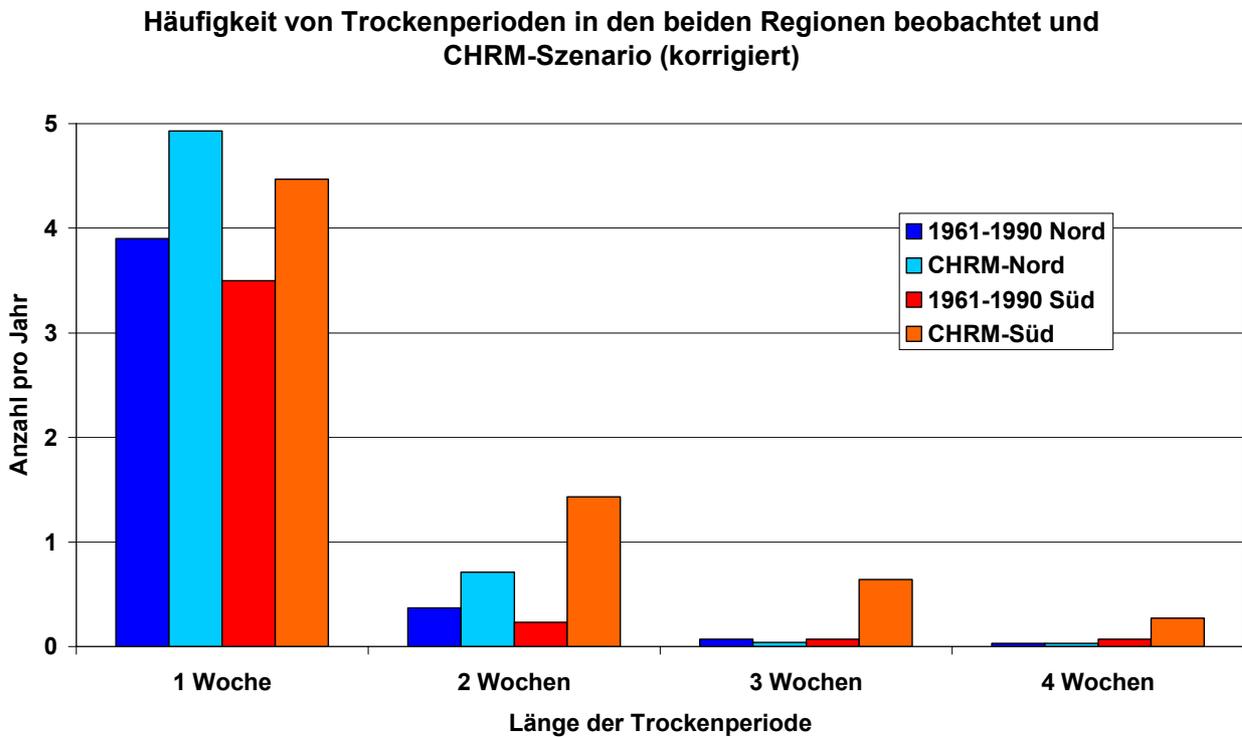


Abb. B-10: Häufigkeit von Trockenperioden beobachtet und CHRM-Szenarien (korrigiert) für die beiden österreichischen Regionen.

B-4 Synoptisches Downscaling

B-4.1 Modelldaten und Methodik

Zur Ableitung eines funktionalen Zusammenhangs zwischen großräumigen meteorologischen Feldern und Hitze- bzw. Dürreperioden am Boden wurden Reanalysedaten des ECMW verwendet. Diese sog. ERA40-Daten (Källberg 2004) liegen in einer Auflösung von $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ in der horizontalen und auf den Hauptdruckflächen (1000 hPa, 850 hPa, 700 hPa, 500 hPa, 200 hPa) vor. Diese recht grobe Auflösung wurde in Hinblick auf die grob aufgelösten globalen Zirkulationsmodelle (GCM) für diesen Zweck als nützlich empfunden. In und um Österreich herum wurden 15 Gitterpunkte ausgewählt, deren Lage in Abbildung B-11 erkennbar ist, und die vertikalen Säulen dieser für die weitere Auswertung herangezogen. Mit Hilfe eines multiplen Regressionsmodells wurde ein funktionaler Zusammenhang zwischen den mittleren beobachteten Maximaltemperaturen im Sommerhalbjahr (April bis September) in der Region und den großräumigen meteorologischen Feldern aus Reanalysen (ERA40) hergestellt.

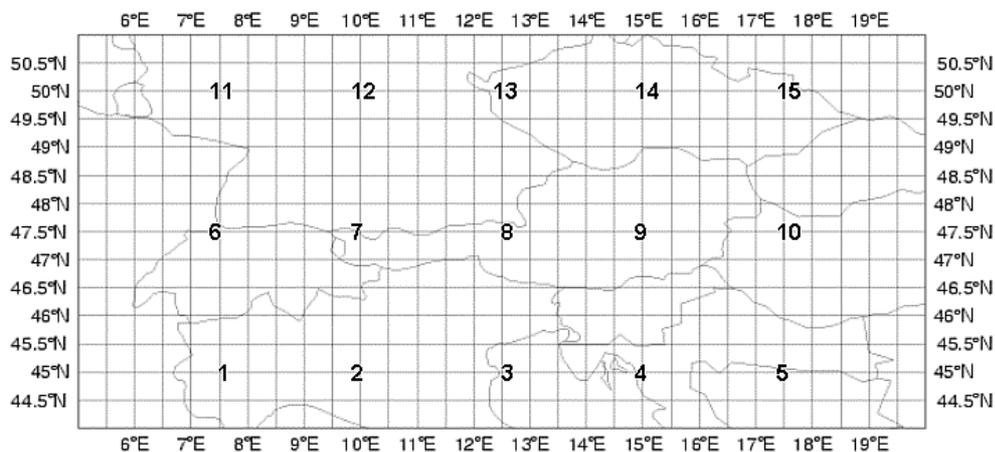


Abb. B-11: Anordnung und Bezeichnung der ausgewählten ERA40-Gitterpunkte.

Im zweiten Schritt wurden die Daten des Kontroll- und Szenariolaufs von globalen Klimamodellen in annähernd gleicher Auflösung verwendet. Es wurde das ECHAM4/OPYC3 mit dem IS92 A Szenario verwendet. Vorab wurde überprüft, ob die Daten des GCM - Kontrolllaufs mit den Reanalysen übereinstimmen, da man bei direkter Verwendung von Gitterpunktwerten aus GCM Modellen wegen möglicher Phasenverschiebungen und dergleichen vorsichtig sein muss.

Zu diesem Zweck wurden die GCM Daten auf die Gitterpunkte der Reanalysedaten interpoliert und dann für jeden Monat die kumulativen Häufigkeitsverteilungen verglichen. In Abbildung B-12 sind diese für den Gitterpunkt 09 und die Monate April und Juli dargestellt. Im April verlaufen die Kurven der ERA40-Daten und jene des GCM-Kontrolllaufs ziemlich parallel einzig bei den hohen Perzentilwerten treten im Kontrolllauf höhere Temperaturen auf. Für den Juli sieht die Verteilung ein wenig anders aus. Hier sind bei den niedrigen Perzentilen die Temperaturen im Kontrolllauf höher, bei den höheren Werten ist dies umgekehrt. Beide Kurven decken aber in allen Monaten in etwa den selben Wertebereich ab. Um nun den für die Reanalysedaten abgeleiteten funktionalen Zusammenhang zwischen der mittleren Maximaltemperatur einer Region und den großräumigen meteorologischen Feldern auch auf die GCM Daten anwenden zu können, werden diese entsprechend den kumulativen Häufigkeitsverteilungen angepasst. Dies wird für jeden meteorologischen Parameter getrennt durchgeführt und soll nun anhand der Temperatur näher erläutert werden. Als ersten Schritt berechnet man für jeden Monat für alle Perzentilwerte die Differenz zwischen Reanalyse und GCM-Kontrolllauf. Anschließend wird für alle Temperaturwerte des GCMs die kumulative Häufigkeitsverteilung des entsprechenden Monats herangezogen und jenes Perzentilintervall ge-

sucht, dessen Werte die aktuelle Temperatur einschließen. Die zuvor berechneten Perzentildifferenzen des gefundenen Intervalls werden nun zur Temperatur des GCMs hininterpoliert und damit die GCM-Temperatur dieses Tages „korrigiert“. Dies wird für jeden Termin des untersuchten Datensatzes durchgeführt. Zusammenfassend kann man also sagen, die Differenz zwischen Kontroll- und Szenariolauf beim jeweiligen Perzentil in den Häufigkeitsverteilungen wird den Beobachtungen (Reanalysen) aufgesetzt.

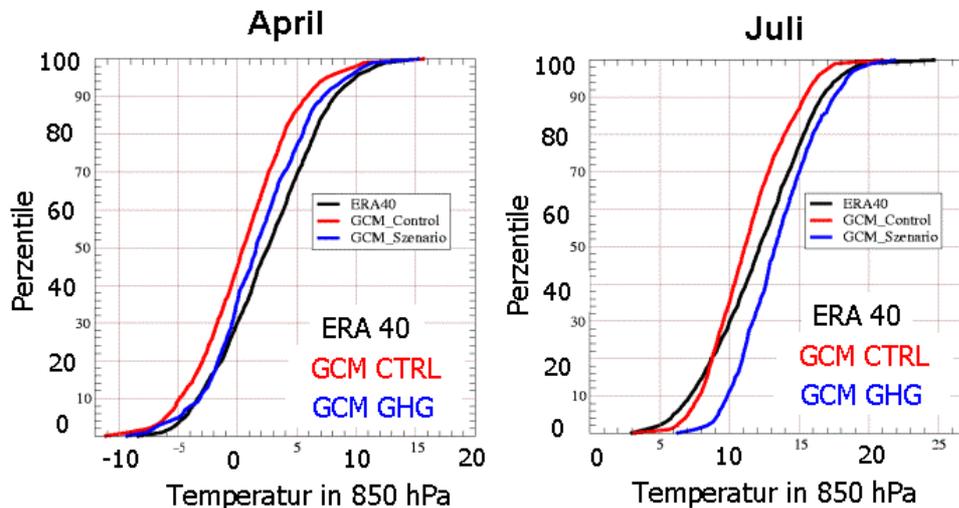


Abb. B-12: Kumulative Häufigkeitsverteilung der Temperatur in 850hPa für den Gitterpunkt 09. Links sind die Kurven für den Monat April dargestellt und rechts jene des Juli. Die schwarze Kurve entspricht den ERA40-Daten, die rote dem Kontrolllauf des GCMs und die blaue dem zukünftigen Szenario des GCMs.

B-4.2 Stationsdaten

Zur Ableiten des funktionalen Zusammenhangs zwischen großräumigen Feldern und Beobachtungen wurden die in Startclim1 als qualitätsgeprüft herausgegebenen Klimadaten der ZAMG verwendet (Schöner et al., 2003). Somit waren T_{max} , T_{min} und T_{mean} an 71 Stationen in Österreich verfügbar und auch der Niederschlag an denselben Stationen. Die Niederschlagsdaten des Sonnblicks wurden aufgrund der Messschwierigkeiten in dieser exponierten Lage nicht verwendet.

B-4.2.1 Korrektur bei Kaltfrontdurchgang

Die Maximumtemperatur des jeweiligen Tages wird definitionsgemäß jeden Tag um 19 Uhr abgelesen und in den 24 h davor ermittelt. Die Darstellung der Beobachtungen und der T_{850} aus den ERA40-Daten um 12 UTC in einem Streudiagramm zeigte einige Ausreißer, die es näher zu untersuchen galt. Es zeigte sich, dass an diesen Tagen ein Kaltfrontdurchgang an der jeweiligen Station am späten Vorabend stattfand und daher die gemessene T_{max} eigentlich der Temperatur des Vortags am späten Abend entspricht. In Abbildung B-13 ist dieses Phänomen für den 2.4.1994 dargestellt. Am Verlauf der stündlich gemessenen Temperatur erkennt man sehr schön den drastischen Temperatursturz am Abend des 1.4. infolge eines Kaltfrontdurchgangs.

Zum Vergleich mit den ERA40-Daten um 12UTC, ist es erforderlich solche Werte zu korrigieren und ein adaptiertes Tagesmaximum, welches sich ausschließlich auf den aktuellen Tag bezieht einzuführen. Es wurden in der Folge alle Stationen untersucht und die T_{max} Werte mit den 14 und 19 Uhr Temperaturen des aktuellen Tages und den 19 Uhr Werten des Vortags verglichen. Für all jene Tage an denen die Differenz der Maximumtemperatur zum Abendwert des Vortags kleiner war als zu einem der beiden Tageswerte wurde dann korrigiert, wenn der Temperaturunterschied zum Vortag kleiner als 1° war. In so einem Fall wurde der

Höhere der beiden Tageswerte zugewiesen und als neues „KF-korrigiertes“ Maximum abgespeichert.

Korrekturbedingungen:

- I. $T_{Maximum} > T_{Vortag_19h} > T_{14h, 19h}$
- II. $|T_{Maximum} - T_{Vortag}| < 1^{\circ}C$

Maximumzuweisung:

$$T_{14h} > T_{19h} \Rightarrow T_x = T_{14h}$$

$$T_{19h} > T_{14h} \Rightarrow T_x = T_{19h}$$

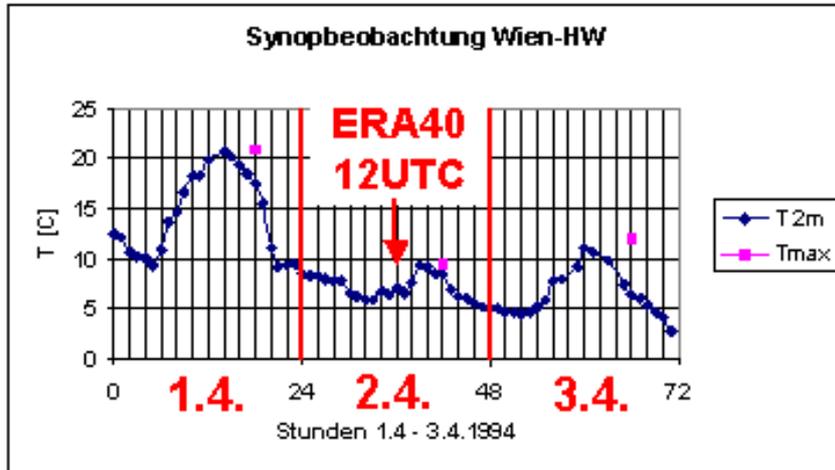


Abb. B-13: Temperaturverlauf an der Station Wien-Hohe Warte vom 1.4.1994 00 UTC bis zum 3.4.1994 24 UTC. Zusätzlich eingetragen sind die Messzeitpunkte der Ablesung des Klimamaxima der jeweiligen Tage.

B-4.2.2 Regionenbildung

Da sowohl Hitze- als auch Dürreperioden selten an einzelnen Stationen auftreten wurde der in Startclim1-4 entwickelten Clusteralgorithmus verwendet, um ähnlich trockene Regionen Österreichs zu identifizieren. Zu diesem Zweck wurden die Niederschlagsmesswerte an den 60 verwendeten Stationen derart transformiert, dass niedrige Werte ein deutlich höheres Gewicht bekommen als hohe Werte, diese also gedämpft werden. In Abbildung B-14 sind die drei vom Algorithmus identifizierten Regionen farblich dargestellt. In weiterer Folge werden sie als Nordostregion (blau), Südregion (rot) und Westregion (grün) bezeichnet werden. Da Hitzeperioden in der Regel dann auftreten, wenn es großräumige stabile Hochdruckwetterlagen gibt, sollten sie recht gut mit den Dürreperioden übereinstimmen, weshalb auch für die Temperaturuntersuchungen die oben definierten Regionen verwendet werden. In weiterer Folge wird die in Abb. B-3 blau eingefärbt Nordostregion näher betrachtet. Sie beinhaltet die Stationen: Müzzuschlag, Reichenau, Freistadt, Stift_Zwettl, Laa/Thaya, Oberleis, Hohenau, Pabneukirchen, Krems, St.Pölten, Wien_Mariabrunn, Wien-Hohe_Warte, Schwechat, Großraming, Mariazell, Eisenstadt und Retz. Die höchstgelegene Station ist Müzzuschlag mit 700m Seehöhe. Da keine Bergstation verwendet wurde und es um sommerliche Hitzewellen geht, wurde vorerst keine Höhenkorrektur der Temperatur berücksichtigt. Für jeden Tag der Jahre 1958 bis 2001 wurde aus diesen Stationen die flächengemittelte Maximaltemperatur der Nordostregion bestimmt.

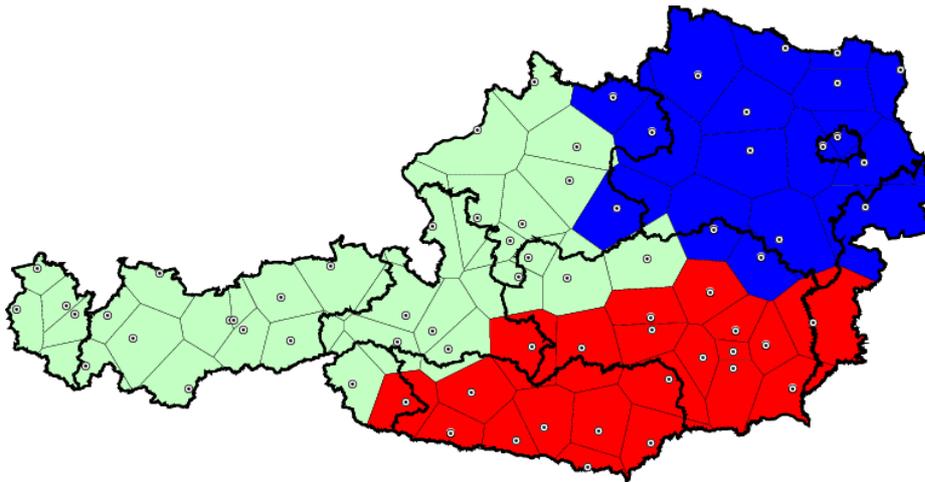


Abb. B-14: Farblich dargestellt sind die drei identifizierten Regionen gleichzeitiger Trockenheit in Österreich. Blau die Nordostregion, rot die Südregion und grün die Westregion. Die zugrundeliegenden Stationen sind als Punkte eingezeichnet, die Bundesländer durch fette Linien gekennzeichnet.

B-4.3 Episodendefinition

B-4.3.1 Hitzetage pro Jahr

Um einen erste Überblick zu erhalten, wie sich das Klima mit den Jahren verändert ist es sinnvoll, die mittlere Zahl der Hitzetage pro Jahr auszuwerten. Zu diesem Zweck zählt man alle im betrachteten Zeitraum vorkommenden Hitzetage und teilt anschliessend durch die Anzahl der Jahre. Da alle GCMs mit 360 Tagen im Jahr rechnen, die Beobachtungen und die ERA40-Daten aber an 365 Tagen im Jahr vorliegen, wurde auch eine diesbezügliche Korrektur durchgeführt und immer die Zahl der Tage pro Jahr (mit 365 Tagen) eruiert.

B-4.3.2 Definition nach Kysely

In Übereinstimmung mit dem Startclim-Projekt-A wählten wir als eine der Methoden zur Festlegung von Hitzeepisoden, die Definition nach Kysely (2000). Dieser Definition zufolge tritt eine Hitzeperiode unter den folgenden Bedingungen auf:

- *Mindestens drei aufeinanderfolgende Tage mit $T_{max} \geq 30^{\circ}\text{C}$*
- *Darauffolgende Tage mit $T_{max} \geq 25^{\circ}\text{C}$, solange die mittlere Maximaltemperatur der gesamten Episode über 30°C bleibt.*

Wie bereits an der Definition erkennbar ist, werden 1 oder 2 Tage über 30°C noch nicht als Episode berücksichtigt und kürzere Einbrüche unter 30°C nach dem dritten Tag werden toleriert, solange die mittlere Maximaltemperatur über 30°C bleibt. Auf diese Weise ist gewährleistet, dass Tage mit Maxima knapp unter 30°C nicht aus einer langen Episode mehrere kurze machen, da ja die Länge der Hitzeperiode, auch wenn die 30°C nicht ganz erreicht werden, für das Wohlbefinden des Menschen von großer Bedeutung ist. Je länger es heiß ist, desto mehr überheizen sich Gebäude, so dass es kaum noch zu einer für den Menschen erholbaren nächtlichen Abkühlung kommt.

B-4.3.3 Zählen von aufeinanderfolgenden Hitzetagen

Bei der Auswertung der Episoden hat man auch die Möglichkeit, die aufeinanderfolgende Anzahl der Tage mit über 30°C zu zählen, was ein sehr strenges Kriterium darstellt, da kleine Einbrüche sofort eine Episode beenden. Bei dieser Methode wird es kaum möglich sein, längere Perioden zu finden, da kurze Einbrüche unter 30°C durch Abschattung, in Folge von

Konvektion, vorkommen können. Mit dieser Definition wird es also eher möglich sein, großräumige stabile Hochdrucklagen zu finden.

B-4.4 Zusammenhang ERA40 - Beobachtungen

B-4.4.1 Zeitreihen

Für einen ersten Überblick, welche der diversen Parameter der ERA40-Daten zur Bestimmung von Hitzeperioden sinnvoll sind, wurde das Jahr 1994 als ein besonders Heißes ausgewählt und die diversen Parameter anhand von Zeitreihendarstellungen verglichen. In Abb. B-15 sind einige dieser Parameter dargestellt. Sehr schön erkennt man den Zusammenhang zwischen der Temperatur in 850 hPa (T_{850}) und der beobachteten Maximumtemperatur. Auch der Zusammenhang mit der relativen Feuchte (RH_{850}) ist in der Abbildung deutlich sichtbar und aus meteorologischer Sicht leicht verständlich. Bei der Windrichtung- und Geschwindigkeit ist das Signal während der Hitzeperiode zwar auch recht deutlich, doch die Spitzenwerte abseits der heißen Wetterphase machen diesen Parameter unsicherer.

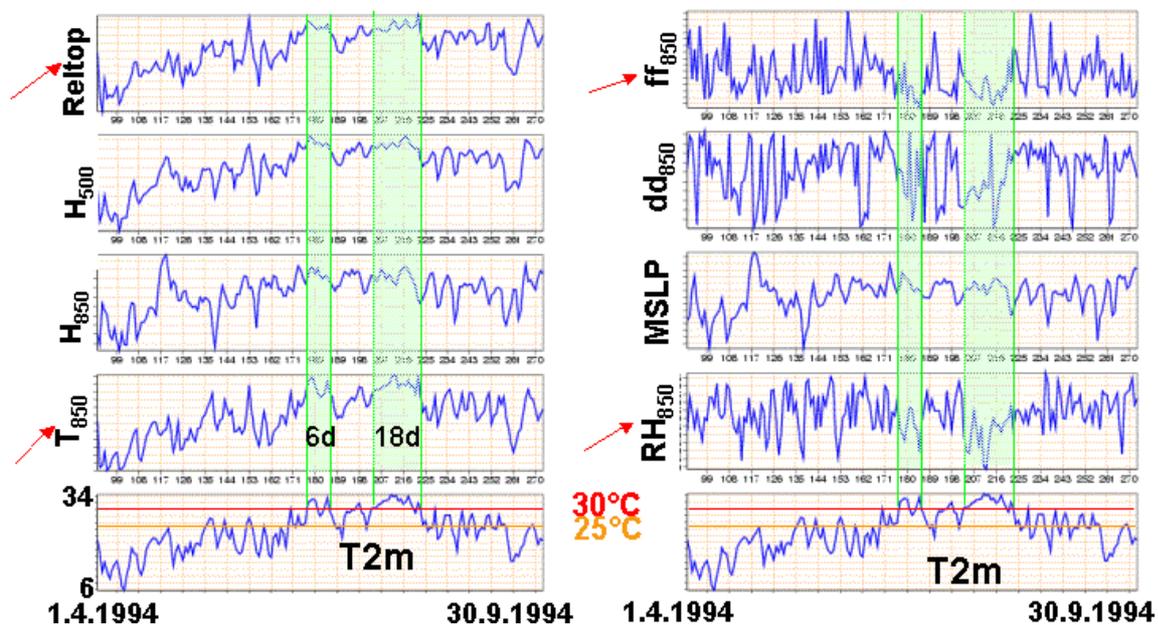


Abb. B-15: Zeitreihenanalyse der Maximumtemperatur der Station Wien Hohe Warte (T2m) und der diversen Parameter des ERA40-Gitterpunkts 09 (siehe Abb.B-11). Die grünen Flächen markieren zwei Hitzeperioden im Sommer 1994.

Die Zeitreihenuntersuchung der diversen Parameter lässt einen Zusammenhang zur beobachteten Maximaltemperatur erkennen. Aus diesem Grund wurden die Werte der Parameter in das Statistikpaket SPSS eingelesen und dort eine schrittweise multiple lineare Regression durchgeführt. Für die Regression wurden nur die Werte des Sommerhalbjahres (1.4. – 30.9.) verwendet und bei den ERA40-Werten nur die 12Uhr Werte.

B-4.4.2 Regressionsanalysen

Zur Bestimmung des Zusammenhangs zwischen großräumigen meteorologischen Parametern und den beobachteten Maximaltemperaturen wurde eine schrittweise multiple lineare Regression durchgeführt in die alle verfügbaren Parameter der großräumigen meteorologischen Felder eingehen. Zusätzlich zu den meteorologischen Parametern wurde die astronomisch mögliche solare Energie berücksichtigt. In Abb.B-16 ist der Verlauf von R^2 bei wachsender Parameteranzahl der Regression dargestellt. In schwarz für eine Regression nur mit der Station Wien-Hohe Warte und in rot für die Regression mit der mittleren Maximaltemperatur der Nordostregion Österreichs. Es zeigt sich recht schön, wie durch die Regions-

bildung die Restvarianz gesenkt werden kann. Der 1. Parameter der Regression ist die Temperatur in 850 hPa, die bereits 90% der Varianz erklärt. Die folgenden drei Parameter sind die relative Luftfeuchte in 700 hPa, die relative Topographie (H700-H850), ein indirektes Temperaturmaß, und der vierte Parameter ist die astronomisch mögliche solare Energie.

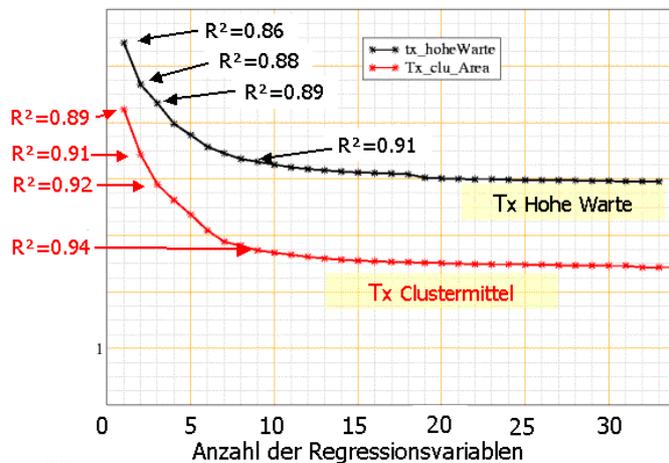


Abb. B-16: Abnahme des Standardfehlers (Zunahme der Korrelation) der multiplen Regression, bei wachsender Parameteranzahl. Die ersten vier Regressionsvariablen sind: T850, RH700, Rel-Top (700-850), solare Energie.

3.3.3.1 Lineare Regression zwischen T850 und Beobachtung

Berechnet man die lineare Regression aus allen Sommerwerten der Jahre 1958-2001 zwischen der Temperatur in 850 hPa am Gitterpunkt 09 und der flächengemittelten Maximaltemperatur der Nordostregion Österreichs, so liefert dies bereits einen Regressionskoeffizienten von 0.95 und ein R^2 von 0.9.

Es ergibt sich folgende Regressionsgleichung: $T_{reg} = 10.655 + 1.061 * T_{850}$ (in °C)

3.3.3.2 Schrittweise multiple Regression mehrerer Parameter

Berücksichtigt man bei der schrittweisen multiplen Regression alle zur Verfügung stehenden Parameter auf den vier für die Ostregion repräsentativen Gitterpunkten des großräumigen Modells und zusätzlich die astronomisch mögliche solare Energie, so zeigt sich, dass nach 8-10 Parametern keine weitere Reduktion der Restvarianz erfolgt (Abbildung B-16). Um kleinräumige Phänomene (Konvektion), die möglicherweise die Restvarianz erklären könnten, zu erfassen, wurde auch der Showalter Index, ein Maß für die Stabilität der Atmosphäre, in der Regression berücksichtigt. Wie sich zeigte wird er jedoch bei der schrittweisen multiplen Regression nicht berücksichtigt, da die ihm zugrunde liegende Information bereits in anderen Parametern enthalten ist. Aufgrund der Sättigung in Abb.B-16 ist es sinnvoll, 8 Variablen in der multiplen Regression zu berücksichtigen. In Tabelle B-1 sind diese acht Variablen, alle auf dem 95% Niveau signifikant, zusammen mit dem jeweiligen Koeffizienten der Regressionsgleichung dargestellt. Der zu addierende konstante Faktor in der Gleichung beträgt 121.995. Wie schon an den Zeitreihenanalysen erkennbar war, sind die Temperatur (T), die relative Feuchte (RH), das Geopotential (RelTop, H) und der Wind (U,V) die relevanten Parameter, um aus den großräumigen Feldern die Maximaltemperaturen der Nordostregion Österreichs möglichst genau abzubilden. Diese Regressionsgleichung wird nun einerseits dazu verwendet, um Hitzeepisoden der Vergangenheit zu reproduzieren und andererseits, um die Häufigkeit und Dauer zukünftiger aus den GCM Szenarien abzuleiten.

Tab. B-1: Regressionsparameter an den entsprechenden Gitterpunkten (GP, siehe Abb.-B1) und ihre Koeffizienten in der Regressionsgleichung.

Parameter	Regressionskoeffizient
T 850 hPa GP09	1.131863
RH 700 hPa GP09	-0.029700
RelTop 700-850 hPa GP09	-0.477849
Solare Energie	1.751811
T 850 hPa GP14	0.270294
H 850 hPa GP10	0.001163
V 850 hPa GP14	0.073749
U 700 hPa GP15	0.039577

B-4.5 Auswertung der Hitzeepisoden

Im folgenden werden nun die diversen Datensätze mit den abgeleiteten Zusammenhängen hinsichtlich der verschiedenen Hitzeepisodendefinitionen ausgewertet. Die Auswertung erfolgt bei allen Datensätzen für die Nordostregion Österreichs, da für diese der funktionale Zusammenhang abgeleitet wurde. Außerdem wird nur das Sommerhalbjahr, also April bis September, berücksichtigt.

B-4.5.1 Hitzetage pro Jahr

Das Zählen aller im Datensatz vorkommender Hitzetage und die anschließende Normierung auf ein Jahr ist die einfachste Methode, um Trends klar erkennbar aufzuzeigen. In Abbildung B-17 sind die Ergebnisse der diversen Datensätze und der beiden unterschiedlichen Regressionsgleichungen (T850 und 8 Variablen (full)) dargestellt.

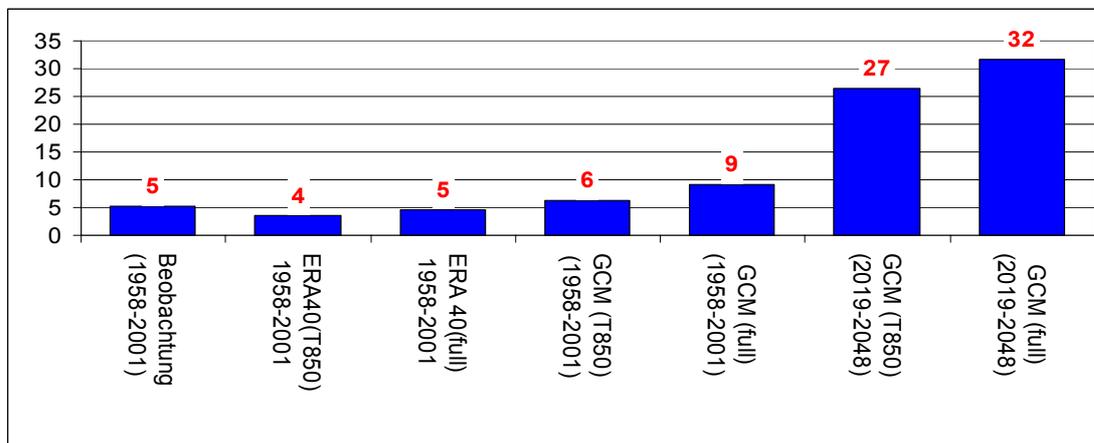


Abb. B-17: Anzahl der Hitzetage pro Jahr in Nordostösterreich. Von links nach rechts folgen: Beobachtung, ERA40-Reanalysedaten (T850 und 8 Variablen (full) als Input der Regression, GCM Kontrolllauf (T850 und full Regression) und GCM Szenariolauf (T850 und full Regression). Die Beobachtungen, ERA40-Daten und der Kontrolllauf beziehen sich auf die Jahre 1958-2001, der Szenariolauf auf die Jahre 2019-2048.

Vergleicht man die ERA40-Daten mit den Beobachtungen, so erkennt man sehr schön die bessere Leistung der komplexeren Regressionsgleichung (full), denn bei Anwendung dieser kann die beobachtete Anzahl der Hitzetage pro Jahr fast exakt aus den großräumigen meteorologischen Feldern reproduziert werden. Wendet man die abgeleiteten Zusammenhänge auf die Daten des Klimamodells an, so zeigt sich, dass mit den adjustierten Daten des Kontrolllaufs geringfügig mehr Hitzetage auftreten als beobachtet wurden, die Größenordnung

jedoch korrekt wiedergegeben wird. Betrachtet man das Ergebnis des zukünftigen Szenarios so kommt es zu einem deutlichen Anstieg der Anzahl von Hitzetagen. Selbst wenn man in Betracht zieht, dass das Klimamodell im Vergleich zu den Reanalysen und Beobachtungen die historische Situation leicht überschätzt, ist der Anstieg so signifikant, dass man bei diesem Szenario von einer deutlichen Änderung der sommerlichen Hitze sprechen muss.

B-4.5.2 Auswertung nach Kysely

In Abbildung B-18 sind die Ergebnisse der Auswertung nach der Kysely-Definition dargestellt. Da diese Hitzeepisodendefinition das Auftreten von längerandauernden Hitzeperioden erfasst, gibt es rückgerechnet auf die Fälle pro Jahr sehr wenige solche Fälle. Aus diesem Grund wurde in Abbildung B-18 statt der Fälle pro Jahr die Wiederkehr in Jahren für vier unterschiedliche Episodenlängen dargestellt.

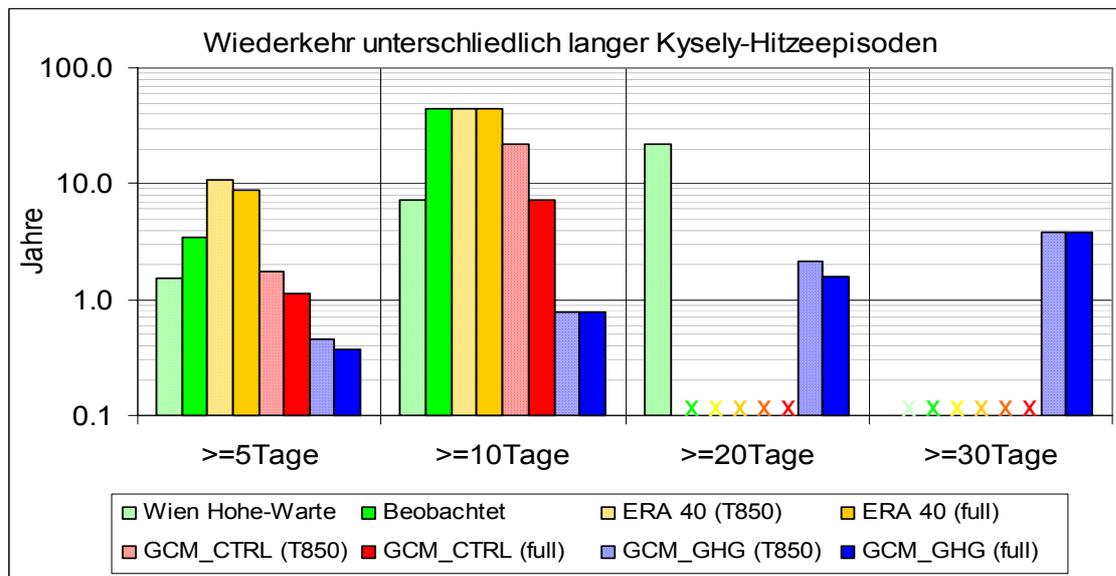


Abb. B-18: Wiederkehr unterschiedlich langer Kysely-Hitzeperioden für den Nordosten Österreichs. Zum Vergleich mit einer einzelnen Station sind die beobachteten Werte von Wien Hohe Warte mit eingetragen (dabei ist auch der Sommer 2003 mit 29 Tagen berücksichtigt). T850 bezieht sich auf die abgespeckte Regression nur mit der Temperatur in 850 hPa und full bezieht sich auf die schrittweise multiple Regression mit 8 Variablen.

Für die Zukunftsszenarien wurden wieder die Jahre 2019-2048 gewählt, weshalb die Wiederkehr hier maximal 30 Jahre betragen kann. Dieser Wert bedeutet, dass so ein Ereignis einmal in der 30 jährigen Datenreihe vorkommt. Bei den historischen Daten wurden, zwecks besserer Stichprobe, 44 Jahre berücksichtigt, was den Maximalwert und damit das einmalige Auftreten erklärt. Bei den Beobachtungen und Reanalysen dauerte die längste Hitzeperiode in der Region Nordostösterreich 19 bzw. 14Tage, zum Vergleich an der Station Wien Hohe-Warte 23 Tage (2003 waren es 29 Tage). Beim zukünftigen Klimaszenario treten deutlich längere Hitzeperioden auf. Zweimal in den untersuchten 30 Jahren gab es Episoden mit 36 Tagen, also mehr als einen Monat, und die längste Periode dauerte 48 Tage, also eineinhalb Monate an. Kyselyepisoden mit Längen ab 30 Tagen kommen im zukünftigen Klima statistisch gesehen, alle vier Jahre vor, im Hitzesommer 2003 betrug die Episode 29 Tage. Betrachtet man die Episoden mit Längen über 20 Tagen, so zeigt sich, dass im zukünftigen Klima statistisch gesehen jedes zweite Jahr solch eine Hitzeperiode vorkommen wird. Bisher trat so etwas zweimal in den 44 Jahren Beobachtungen an der Station Wien Hohe Warte auf, in der gesamten Nordostregion Österreichs, für welche die Werte des Klimamodells gelten, trat solch eine Episodenlänge noch nie auf.

Tab. B-2: Jährlichkeit von Kysely-Episoden unterschiedlicher Länge für die Region Nordostösterreich. Beobachtet in den Jahren 1958-2001 und zukünftig für die Jahre 2019-2048. Episoden über 20 Tagen in der gesamten Nordostregion wurden nie beobachtet.

	Beobachtet	GCM_GHG (full)
≥ 5 Tage	3.38	0.38
≥ 10 Tage	44.00	0.79
≥ 15 Tage	44.00	1.25
≥ 20 Tage	∞	1.58
≥ 25 Tage	∞	2.73
≥ 30 Tage	∞	3.75

In Tabelle B-2 sind die Änderungen im Szenario den tatsächlich beobachteten Werten anhand der Jährlichkeiten nochmals gegenübergestellt. Sehr deutlich wird in dieser Darstellung, dass es derzeit in der Nordostregion noch keine Kysely-Episode über 20 Tagen gab (Jahr 2003 wurde hier nicht berücksichtigt, an der Hohen Warte als Einzelstation traten 1994 und 2003 Episoden mit Längen über 20 Tagen auf) hingegen in Zukunft solch ein Ereignis zweimal in drei Jahren vorkommen wird. Selbst Kyselyepisoden mit über 30 Tagen Länge werden statistisch betrachtet alle vier Jahre vorkommen. Selbst wenn man das Klimaszenario als zu drastisch einstufen mag, so zeigen die deutlichen Änderungen zur Vergangenheit auf, dass sich die Sommer in der Nordostregion Österreichs verändern werden. Da die Methode wenig Rechenaufwand bedarf bietet sie sich an, um ein Ensemble von Klimaszenarien zu betrachten, um ein wenig robustere Ergebnisse zu erlangen.

B-4.5.3 Definition aufeinanderfolgender Hitzetage

Die Definition aufeinanderfolgender Hitzetage ist wohl eines der schärfsten Kriterien, um extreme Hitzeperioden zu finden. In Abbildung B-19 sind die Jährlichkeiten solcher Ereignisse unterschiedlicher Länge sowohl für die historischen Daten, als auch für das untersuchte Klimaszenario eingezeichnet. Man erkennt, dass Einzeltage über 30° Celsius pro Jahr auch in der Vergangenheit nichts ungewöhnliches waren, dass sie aber im Klimaszenario ungefähr dreimal öfter vorkommen werden als bisher beobachtet. Sobald eine Periode solch aufeinanderfolgender Tage aber mindestens fünf Tage anhält, tritt so ein Ereignis in den Beobachtungen schon nur mehr alle zwei Jahre auf, im Klimaszenario aber immer noch sechs bis sieben mal pro Jahr. Im Jahr 1994 trat in der Nordostregion Österreichs eine Hitzeperiode mit 15 aufeinanderfolgenden Hitzetagen auf. Diese Länge der Hitzeperiode stellt sicherlich ein Extrem dar und dürfte auch im künftigen Klimaszenario nur selten erreicht werden (Im Jahr 2003 wurden an der Station Wien-Hohe Warte 13 aufeinanderfolgende Hitzetage gezählt (die Kyselyepisode dauerte aber 29Tage), daran erkennt man bereits, welches harte Kriterium dies ist und das bereits 10 aufeinanderfolgende Tage mit solch hohen Werten Auswirkungen auf das öffentliche Leben haben). Die Anzahl von Hitzeperioden über 10 Tagen wird sich im Klimaszenario drastisch erhöhen. In Abbildung B-19 erkennt man, dass solch lange Episoden derzeit statistisch betrachtet alle 7 bis 8 Jahre in ganz Nordostösterreich vorkommen(absolut wurden zwei lange beobachtet), zukünftig aber fast jährlich auftreten. Bisher waren die Jahre 1994 (15Tage) und 2003 (13Tage) die beiden Einzigen in den Beobachtungen, die mehr als 10 aufeinanderfolgende Hitzetage beinhalteten, in der Zeitspanne von 2019-2048 wird bereits jedes vierte bis fünfte Jahr so ein Ereignis eintreten. Die genaue Anzahl der Fälle unterschiedlicher Länge ist in Tabellenform im Anhang zu finden.

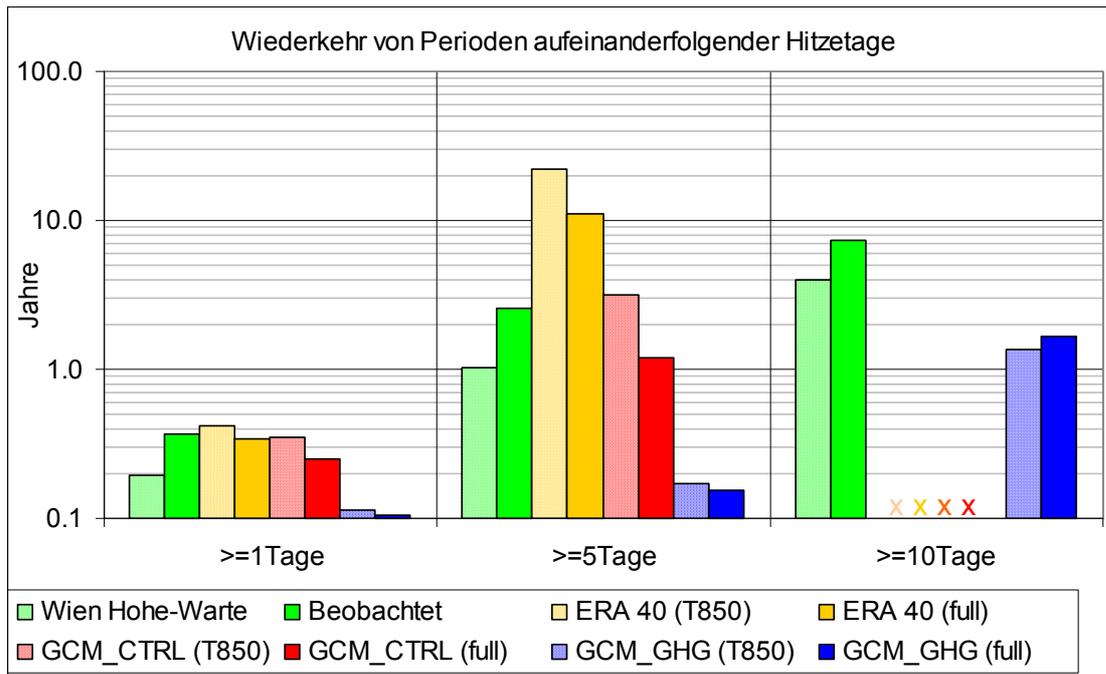


Abb. B-19: Jährlichkeit von Hitzeepisoden aufeinanderfolgender Hitzetage ($T_x \geq 30^\circ\text{C}$) für die Nordostregion Österreichs. Zum Vergleich mit einer Einzelstation sind die Werte von Wien Hohe Warte mit eingetragen (2003 im Plot nicht berücksichtigt). T850 bezieht sich auf die abgespeckte Regression nur mit der Temperatur in 850 hPa und full bezieht sich auf die schrittweise multiple Regression mit 8 Variablen.

B-5 Vergleich der Ergebnisse

Die Verwendung verschiedener Regionalisierungsverfahren erlaubt den Vergleich der regionalen Szenarien. Je nachdem, ob die verschiedenen Methoden ähnliche oder unterschiedliche Ergebnisse bringen, kann man Aussagen über die Robustheit der regionalen Szenarien ableiten. Ein direkter Vergleich der Regionalisierungsmethoden ist in dieser Arbeit nur zwischen den statistischen- und den synoptischen Ansatz möglich, da beide das selbe GCM zugrunde liegt und die gleiche Zeitperiode betrachtet wird. Hierfür wurde die Zeitperiode 2019 bis 2048 gewählt, da diese Szenarien auch für Impaktstudien verwendet werden sollen und die verfügbare Zeitperiode der PRUDENCE-RCM-Szenarien (2070-2100) hierfür zu spät ist. Deshalb kann man beim Vergleich mit RCM-Szenarien nur angeben, ob der Trend von Beobachtung zur ersten Szenarioperiode ähnlich dem von der 1. Periode zur 2. Periode ist.

Bei den Hitzetagen zeigen alle Regionalisierungsverfahren für Nordostösterreich konsistente Ergebnisse (Abbildung B-20). Zwar beträgt der Unterschied zwischen Analog- und synoptisches Szenario 7 Tage. Dies ist aber trotzdem deutlich geringer als das Änderungssignal von 17 bzw. 24 Tagen. Dies zeigt das Potenzial des kostengünstigen synoptischen Ansatzes auf. Zumindest für die Untersuchung von Hitzetagen in Mitteleuropa könnte dieses Verfahren ohne allzu großen Aufwand an mehreren GCMs angewandt werden, um damit Ensembles an regionalen Szenarien zu erzeugen. Das RCM-Szenario zeigt einen deutlich stärkeren Anstieg als die beiden anderen Verfahren und zwar auf 43 Hitzetage. Dies liegt jedoch hauptsächlich an der um rund 50 Jahre späteren Periode und dass die globale Mitteltemperatur des zugrundeliegenden GCMs in dieser Zeit um mehr als 1,5 Grad ansteigt.

Mittlere Anzahl der Hitzetage pro Jahr [$T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$] für die Nordostregion Österreichs

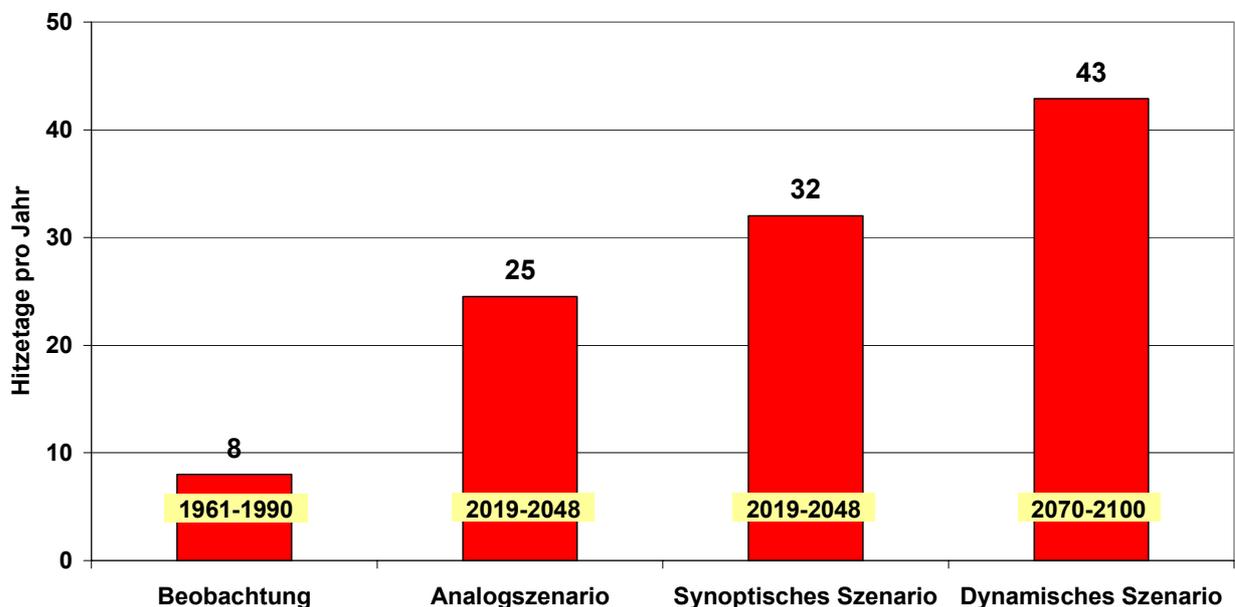


Abb. B-20: Vergleich der verschiedenen Szenarien der Hitzetage (Periodenmittel) in Nordostösterreich mit der Klimanormalperiode.

Für das RCM- und das Analog Szenario wurden die Ergebnisse neben den Extremereignissen auch die Häufigkeitsverteilung aller Werte während der Untersuchungsperiode untersucht. In Abbildung B-21 sind Häufigkeitsverteilungen der Tagesmaximumtemperatur von Mai bis September in Nordostösterreich dargestellt. Der Kontrolllauf des RCMs (blau) stimmt recht gut mit den Beobachtungen (schwarz) zusammen. Beide weisen annähernd eine

Normalverteilung mit gleichem Mittelwert auf, nur überschätzt das RCM die Varianz. Dadurch liefert es sowohl zu viele kalte als auch warme Extreme. Das Analog Szenario (gelb) zeigt eine Verschiebung des Mittelwerts von rund 3 Grad. Da die Analogmethode keine neuen Extremtemperaturen produzieren kann, ist das Ergebnis nicht mehr ganz normalverteilt, sondern rechtsschief und die Varianz nimmt etwas ab. Um bei Analog Szenarien dieses Manko der fehlenden neuen Extremtemperaturen auszugleichen, müsste man statistische Korrekturen nachschalten. Das RCM-Szenario (rot) wiederum behält die Normalverteilung bei, nur wird der Mittelwert um rund 4 Grad wärmer und auch die Varianz nimmt zu. Dies führt zu einer massiven Zunahme der sehr heißen Tage und Werte über 40 Grad kommen praktisch jedes Jahr einmal vor.

Häufigkeitsverteilung der Tagesmaximumtemperaturen von Mai bis September in der Nordostregion von Österreich

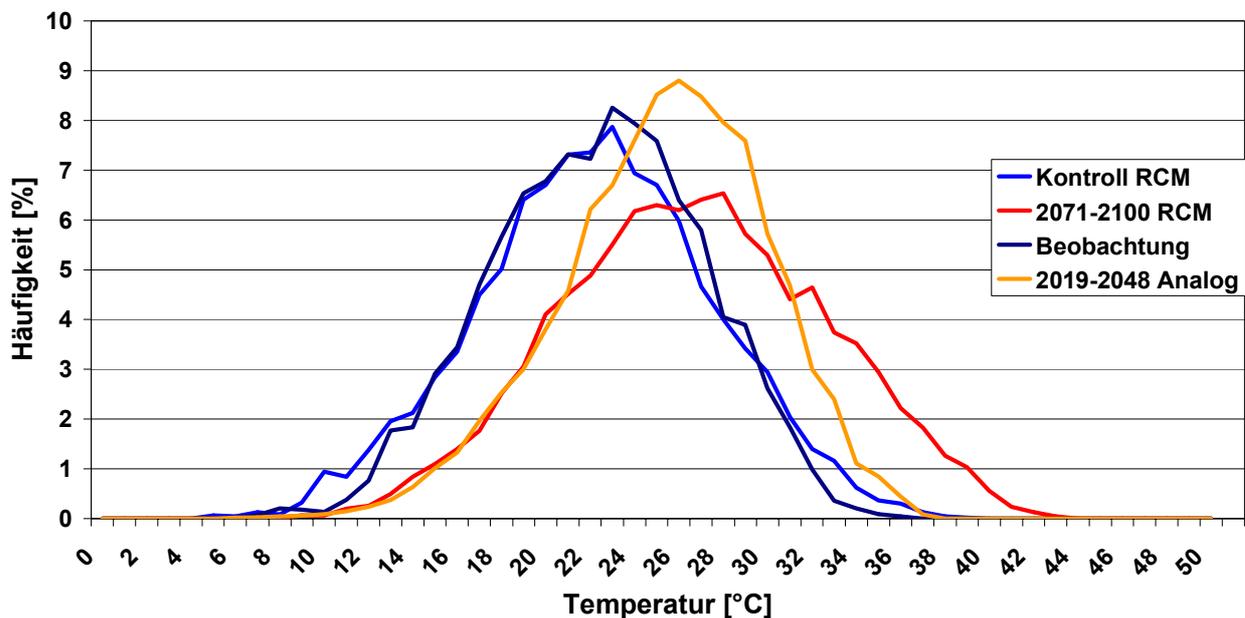


Abb. B-21: Häufigkeitsverteilung der Tagesmaximumtemperaturen von Mai bis September, beobachtet RCM-Kontroll, Analog Szenario und RCM-Szenario für den Nordosten Österreichs. Da das Analogverfahren keine neuen Extremtemperaturen erzeugen kann ist die Verteilung schief. Im RCM-Szenario steigen sogar die Maximaltemperaturen um rund 4 Grad.

Beim Niederschlag zeigen sich doch deutliche Unterschiede zwischen den Methoden. Da jedoch die Analogmethode beim Niederschlag sehr empfindlich gegenüber dem verwendeten Prädiktorfeldes ist, und das RCM zumindest in Südostösterreich den Niederschlag deutlich unterschätzt, kann man nicht sagen, welche Methode nun die realistischen Ergebnisse liefert. Die Abbildung B-22 sollte daher nur qualitativ interpretiert werden, und das Problem des RCM in Südostösterreich verdeutlichen.

Häufigkeitsverteilung der Tagesniederschlagssumme von Mai bis September in der Südostregion von Österreich

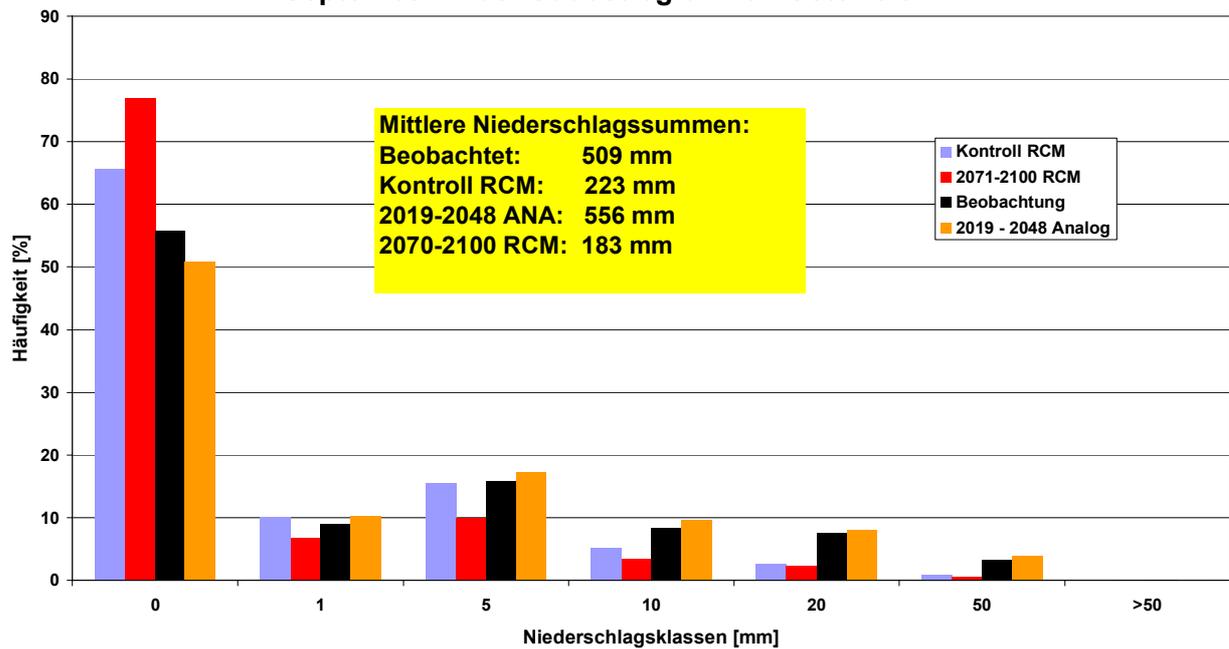


Abb. B-22: Vergleich der Häufigkeit von Niederschlagsklassen von Niederschlagsszenarien mit den Beobachtungen im Südosten Österreichs.

B-6 Schlussfolgerungen und Forschungsbedarf

Die Regionalisierung von Klimaänderungsszenarien im Alpenraum stellt aufgrund der komplexen Topographie, dem Übergang von mediterran zu atlantischer Beeinflussung und zusätzlich durch den immer stärkeren kontinentalen Einfluss je weiter man entlang der Alpen nach Osten geht, sehr hohe Anforderungen sowohl an die GCMs als auch an die nachgeschalteten Regionalisierungsverfahren. Dies gilt insbesondere für Extremereignisse. Deshalb muss vor einer Anwendung derartiger regionaler Szenarien eine sorgfältige Untersuchung des jeweiligen Verfahrens durchgeführt werden. Bei statistischen und auch synoptischen Verfahren geschieht dies durch sorgfältige Analyse der Residuen während der Kalibrierphase mit Beobachtungs- und Reanalysedaten, oder einem Split-Sample-Test. Bei dynamischen Methoden müssen die Ergebnisse des RCM-Kontrolllaufes klimatologisch mit den Beobachtungsdaten verglichen werden. Erst dann ist eine sinnvolle Interpretation der regionalen Szenarioergebnisse möglich.

Das Analogverfahren ist prinzipiell gut geeignet, um Extremwertuntersuchungen in Klimaänderungsszenarien durchzuführen, da diese Methode auf Tageswerten basiert. Durch die Bestimmung eines analogen Tages in der Vergangenheit für einen Tag in der Zukunft, stünde nicht nur ein meteorologisches Feld zur Verfügung, sondern alle an jenem Tag gemessenen Werte. Weiters ist das Szenario räumlich konsistent, da es sich ja um eine echte Realisierung in der Vergangenheit handelt. Dies macht derartige Szenarien besonders attraktiv für Impactstudien die größere Flächen betrachten, wie etwa hydrologische Modellierungen in einem größeren Einzugsgebiet. Leider ist das Analogverfahren jedoch sehr sensibel auf das verwendete meteorologische Prädiktorfeld. Auf die Temperatur angewandt, liefern verschiedene meteorologische Felder, welche Temperaturinformationen der Atmosphäre enthalten, befriedigende Ergebnisse. Beim Niederschlag ist jedoch der Zusammenhang großräumiges meteorologisches Feld zu lokalem Niederschlag auf Tagesbasis eher gering, wenn man Felder von der Größenordnung verwendet, wie sie derzeitige GCMs realistisch auflösen. Die besten Ergebnisse liefern Felder die dynamische- oder Temperaturinformation beinhalten. Felder die Feuchteinformation enthalten haben hingegen im Validierungsexperiment eher schlecht abgeschnitten.

Bei der Anwendung auf Klimaänderungsszenarien zeigen sich weitere Probleme. Verwendet man ein dynamisches Feld wie etwa den Bodenluftdruck, ein guter Prädiktor für den Niederschlag, so beinhaltet dieses Feld keinerlei Temperaturinformation und das Änderungsszenario zeigt nur Temperaturänderungen aufgrund veränderter Anströmrichtung. Dies führt natürlich zu einer großen Unterschätzung des Temperatursignals und ist daher für die Temperatur nicht geeignet. Felder, die wiederum Temperaturinformation beinhalten, tendieren dazu, aufgrund der Temperaturzunahme im GCM-Feld, verstärkt Hochdrucklagen als Analogon zu finden, da diese in der Vergangenheit mit höheren Temperatur besonders in der Atmosphäre verbunden waren. Hochdrucklagen sind im Durchschnitt weniger Niederschlagsintensiv, was zu einer Unterschätzung des Niederschlages führt.

Da die Analogmethode nur Realisierungen aus der Vergangenheit verwendet, ist dieses Verfahren nicht in der Lage, neue Extremereignisse zu generieren. Dies ist jedoch aus unserer Sicht, zumindest bei Anwendung auf Szenarien für die nächsten 50 Jahre, kein wesentliches Manko, da etwa der Extremsommer 2003 zwar mit Abstand der heißeste Sommer war seit es Messungen gibt, dennoch an kaum einer Station in Österreich ein neues absolutes Temperaturmaximum erreicht wurde. Deshalb müsste eigentlich die Analogmethode in der Lage sein, den Sommer 2003 richtig zu modellieren. Neue Extremereignisse könnte man durch statistische Ansätze in die Analogszzenarien einbringen. Ein möglicher Ansatz hierzu wäre, dass die Verteilungsfunktion beim Übergang von Beobachtung zu Szenario seine Form (Schiefe) beibehält.

Weitere Entwicklungsmöglichkeiten bei der Analogmethode ist die Anwendung auf räumlich höher aufgelöste GCMs (Zeitscheiben) oder auch RCM-Ergebnisse. Dadurch könnte ein kleiner Ausschnitt für die Analogsuche verwendet werden, was die Relevanz des Prädiktor-

feldes für das lokale Wettergeschehen sicherlich erhöht. Auch eine Kombination von meteorologischen Feldern oder lokalen meteorologischen Größen wie etwa Tagesmitteltemperatur und Tagesgang der Temperatur, für die Analogsuche könnte entscheidende Verbesserungen bringen.

Das in dieser Arbeit vorgestellte synoptische Regionalisierungsverfahren liefert für die Auswertung von Hitzetagen im Nordosten von Österreich aus 4 GCM-Gitterpunktwerten, trotz seiner Einfachheit durchaus befriedigende Ergebnisse. Das Verfahren beruht im Prinzip auf der Ableitung eines funktionellen Zusammenhangs zwischen großräumigen meteorologischen Feldern und Beobachtungen anhand von historischen Daten und der anschließenden Anwendung dessen auf die GCM-Daten. Dabei werden die Differenzwerte Szenario minus Kontroll des GCM der meteorologischen Prädiktoren verwendet, jedoch mit einer vorgeschalteten Prüfung, ob diese Anwendung gerechtfertigt ist. Seine Einfachheit erlaubt es kostengünstig mehrere GCM – Szenarien hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Hitzetage anzuwenden und damit den Unsicherheitsbereich derzeitiger GCMs bezüglich Hitzetage auszutesten. Außerdem beruht das Verfahren nicht ausschließlich auf historischen Daten, weshalb eine geänderte Häufigkeitsverteilung der Werte, falls diese im GCM vorkommt, im Unterschied zur Analogmethode, problemlos wiedergegeben werden kann. Für die Anwendung auf Niederschlagsextreme ist eine Verfeinerung des Ansatzes nötig. Hier müssen noch weitere Faktoren berücksichtigt werden, wie dies in unserer Arbeit in StartClim 2003 gezeigt wurde. Um die entwickelte Methode auf eine breite Anwendbarkeit auszubauen, müssen einerseits noch weitere Regionen im Alpenraum, unter Berücksichtigung der Temperaturabnahme mit der Höhe, durchgeführt werden, andererseits weitere GCMs als Basis untersucht werden.

Regionale Klimamodelle wären aus meteorologischer Sicht sicherlich das vielversprechendste Regionalisierungsverfahren, da sie physikalisch und räumlich konsistente Szenarien mit einer hohen zeitlichen Auflösung liefern. Gerade im Alpenraum zeigen aber die RCMs die Grenzen ihrer derzeitigen Möglichkeiten auf. Durch ihre physikalische Konsistenz führen auch falsche Ergebnisse eines meteorologischen Elementes zu Folgefehlern in Anderen. Dies konnte durch die Auswirkung des fehlerhaften Niederschlags auf die Maximumtemperatur in Südostösterreich anschaulich gezeigt werden. Deshalb besteht auch ein hoher Forschungsbedarf bei der Weiterentwicklung der RCMs und bei der Austestung spezieller Adaptionen an die Anforderungen im Alpenraum.

Letztendlich ist aber eine Weiterentwicklung der globalen Klimamodelle eine notwendige Voraussetzung zur Ableitung realistischer regionaler Klimaänderungsszenarien. Das Sprichwort „garbage in, garbage out“ stimmt besonders auf die Regionalisierung von Klimaänderungsszenarien, da selbst das beste Regionalisierungsverfahren fehlerhafte Informationen aus GCMs nicht kompensieren kann.

B-7 Literatur

- van den Dool, H., 1994: Searching for analogs, how long must we wait? *Tellus*, 46A, 314–324.
- Hewitson, B., and R. Crane, 1996: Climate downscaling: techniques and application. *Clim. Res.*, 7, 85–95.
- IPCC, 2001: *Climate Change 2001 - The Scientific Basis*. Cambridge University Press, 881 pp.
- Kyselý, J., Kalvová, J. and Kveton, V. (2000): Heat Waves in the South Moravian Region during the Period 1961 – 1995. In: *Studia geoph. Et geod.* 44 (2000), 57-72. StudiaGeo s.r.o., Prague.
- Matulla, C., P. Haas, S. Wagner, E. Zorita, H. Formayer und H. Kromp-Kolb 2004: Anwendung der Analogmethode in komplexem Terrain: Klimaänderungsszenarien auf Tagesbasis für Österreich. GKSS report 2004/11, GKSS research center, Max-Planck-Strasse 1, D-21502 Geesthacht, Germany.
- Prudence, 2005: <http://prudence.dmi.dk/>
- Roeckner, E., J. Oberhuber, A. Bacher, M. Christoph, and I. Kirchner, 1996: ENSO variability and atmospheric response in a global coupled atmosphere-ocean GCM. *Climate Dyn.*, 12, 737–745.
- von Storch, H., and F. Zwiers, 1999: *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge University Press, 528 pp.
- Schöner, W., I. Auer, R. Böhm, and S. Thaler, 2003: Quality control and statistical characteristics of selected climate parameters on the basis of daily values in the face of Extreme Value Analysis (German). In: *StartClim – Start Project: First analysis of extreme weather events and their impacts on Austria*, H. Kromp-Kolb and I. Schwarzl (Eds.), Chapter 1, pp. pp 54. Institute of Meteorology and Physics, BOKU - University of Natural Resources and Applied Life sciences, Türkenschanzstraße 18, A-1180 Vienna, Austria. <http://www.austroclim.at/startclim/>.
- Uppala, S., 2003: ECMWF ReAnalysis 1957–2001, ERA-40. *Proceedings of the Workshop on Reanalysis 5–9 Nov. 2001*, ECMWF. 1–10.
- Vidale, P.L., D. Lüthi, C. Frei, S. Seneviratne, and C. Schär: Physical processes affecting the seasonal and inter-annual variations of the European water cycle, *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, (submitted), 2002.
- Zorita, E., and H. von Storch, 1999: The analog method - a simple statistical downscaling technique: comparison with more complicated methods. *J. Climate*, 12, 2474–2489.