

Neuere Erkenntnisse zum Globalen und Regionalen Klimawandel

H. KROMP-KOLB

1. Grundlagen

Das Klima der Erde wird von der Sonneneinstrahlung in Wechselwirkung mit der Erdoberflächenbeschaffenheit und den meteorologischen Vorgängen in der Lufthülle der Erde bestimmt. Die Erdoberfläche und die Atmosphäre werden durch kurzwellige Sonnenstrahlung erwärmt und strahlen Energie in Form von langwelliger Strahlung in den Weltraum ab. Im globalen Jahresmittel sind diese beiden Energieströme etwa gleich groß, so dass sich eine konstante Oberflächentemperatur der Erde einstellt.

Wie viel Sonnenenergie dem System Erde-Atmosphäre zur Verfügung steht hängt von der Strahlungsintensität der Sonne und von Bahncharakteristika der Erde (Entfernung von der Sonne, Achsenneigung, Drehgeschwindigkeit der Erde, etc.) ab. Die Zusammensetzung der Atmosphäre (Konzentration der Treibhausgase), die Wolkenbedeckung und die Oberflächenbeschaffenheit der Erde (z.B. Wälder, Felder, Gletscher, Wasser) beeinflussen das Ausmaß der an der Erdoberfläche verfügbaren und der ins Weltall zurückgestrahlten Energie.

Alle diese Einflüsse unterliegen zeitlichen Schwankungen, die zu Klimaänderungen in jeweils typischen, aber sehr verschiedenen Zeiträumen führen – Eiszeiten entstehen und vergehen z.B. in Zeiträumen von etwa 100.000 Jahren und können weitgehend durch systematische Schwankungen der Bahncharakteristika erklärt werden. Die Intensität der Sonne unterliegt einerseits einem 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus und nimmt andererseits kontinuierlich extrem langsam zu. Die Zusammensetzung der Atmosphäre kann zu Klimaänderungen im Zeitrahmen mehrerer Jahrzehnte führen. Veränderungen im Reflexionsvermögen von Atmosphäre oder Erdoberfläche, wie sie etwa durch Vulkanausbrüche verursacht werden, können Auswirkungen

innerhalb weniger Monate und bis zu einigen Jahren haben.

Dreiatomige Gase, wie Wasserdampf, Kohlendioxid, Methan, Lachgas, Ozon oder die synthetischen Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe – sogenannte Treibhausgase – haben die Eigenschaft, die kurzwellige Strahlung der Sonne weitgehend ungehindert durchzulassen, die langwellige Ausstrahlung der Erde aber zu absorbieren. Die ungleiche Durchlässigkeit für Strahlung unterschiedlicher Wellenlänge führt zum sogenannten Treibhauseffekt.

In Zusammenhang mit der Nutzung fossiler Energieträger (Kohle, Erdöl und Erdgas), infolge von landwirtschaftlichen Aktivitäten (z.B. Mineraldüngung, Reisanbau, brachliegende Böden), Tierhaltung (vor allem Wiederkäuer) und durch Landnutzungsänderungen (z.B. das Roden von Urwäldern) steigt die

Konzentration von klimawirksamen Spurengasen in der Atmosphäre stark an. Aus Messdaten der Hintergrundstation Mauna Loa, auf Hawaii, geht z.B. deutlich ein Anstieg der CO_2 -Konzentration in der Atmosphäre um etwa 0.5 % pro Jahr seit etwa 1958 hervor (Abbildung 1). Auch die Konzentrationen anderer Treibhausgase sind über die letzten Jahrzehnte angestiegen, z.B. Methan um etwa 1 % pro Jahr und Distickstoffoxid (N_2O) um etwa 0.5 % pro Jahr. Der Konzentrationsanstieg von chlorierten Fluorkohlenwasserstoffe ist nach wirksam werden der Maßnahmen zum Schutz der Ozonschicht merklich zurückgegangen.

Derzeit ist CO_2 für etwa 55% des verstärkten Treibhauseffektes verantwortlich, 17% gehen auf Methan, 14% auf bodennahes Ozon und 9% auf die chlorierten Fluorkohlenwasserstoffe zurück, der Rest auf N_2O .

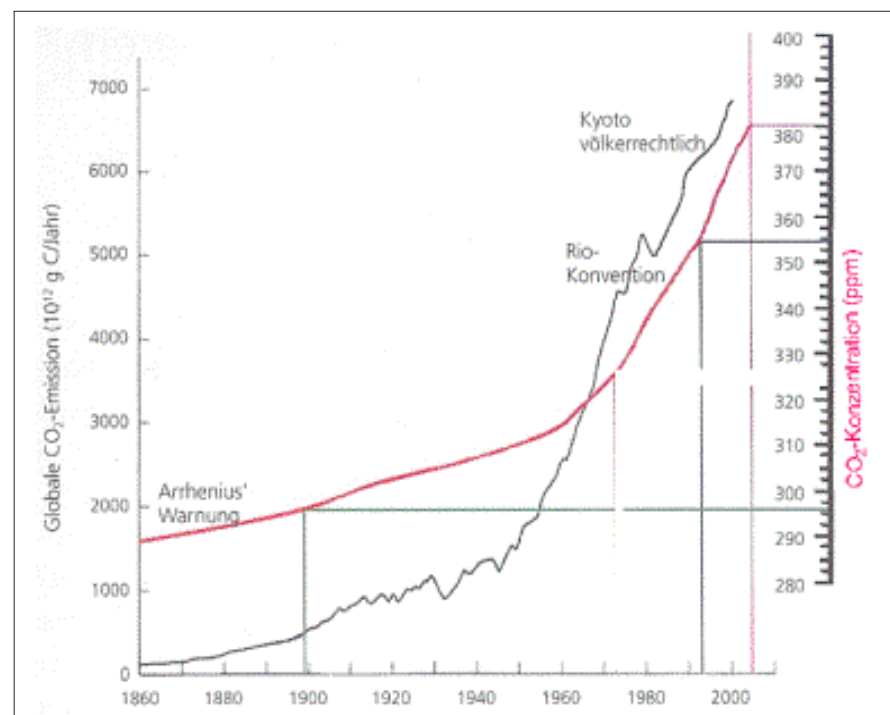


Abbildung 1: Zeitliche Entwicklung von Kohlendioxidemissionen und -konzentrationen in der Atmosphäre (Kromp-Kolb und Formayer 2005)

Autor: Univ.Prof. Dr. Helga KROMP-KOLB, Institut für Meteorologie, Department Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Universität für Bodenkultur, Peter-Jordan-Straße 82, A-1190 WIEN

2. Beobachteter Klimawandel

Die Analyse langer meteorologischer Reihen zeigt neben stets auftretenden kurzfristigen Schwankungen deutliche Änderungen in den letzten Jahrzehnten (IPCC¹ 2001):

- Die Temperaturzunahme im letzten Jahrhundert ist die stärkste in 1000 Jahren, die letzte Dekade ist die Wärmste des Jahrhunderts (*Abbildung 2*).
- In mittleren und hohen Breiten der Nordhemisphäre nimmt der Niederschlag - vor allem durch Starkniederschläge - zu, in tropischen Gebieten ab.
- Mit wenigen Ausnahmen gehen Gletscher und Vereisung zurück.
- Der Meeresspiegel ist im letzten Jahrhundert um 10 bis 20 cm gestiegen und der Anstieg scheint sich zu beschleunigen.
- El Nino-Ereignisse treten länger und anhaltender auf.

Auch hinsichtlich des „Zerstörungspotential“ von tropischen Wirbelstürmen (Hurrikans) scheint ein klarer Zusammenhang gegeben, da diese ihre Energie im Wesentlichen aus den warmen Oberflächenwässern der Meere beziehen.

Die im Alpenraum bisher gemessenen Änderungen ergeben ein Bild, das mit dem globalen Klimawandel konsistent ist. In mancher Hinsicht sind die Aus-

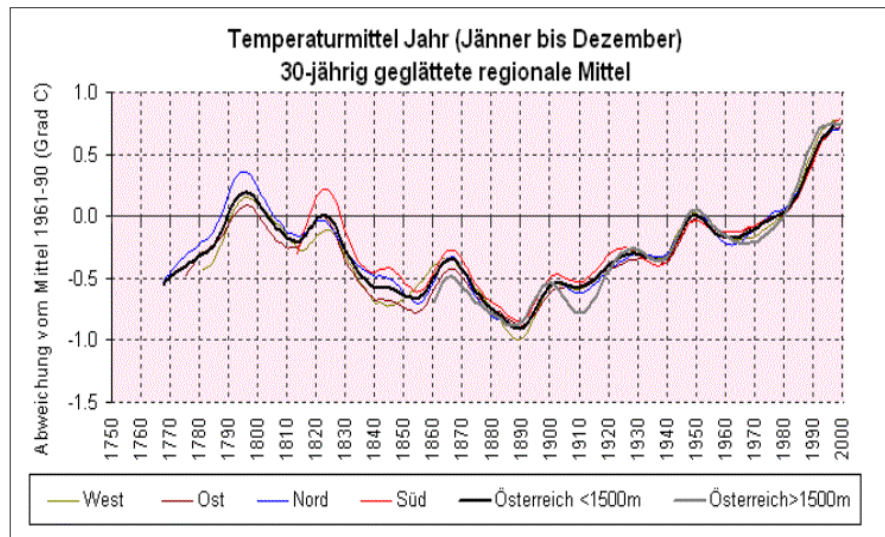


Abbildung 3: Temperaturmittel für verschiedene Regionen Österreichs 1770 – 2000 (Auer et al. 2001)

wirkungen im Alpenen Raum stärker ausgeprägt als im globalen oder europäischen Maßstab. In Österreich war z.B. der Temperaturanstieg im 20. Jahrhundert mit $+1.1^{\circ}\text{C}$ (Sommerhalbjahr $+1.2^{\circ}\text{C}$, Winterhalbjahr $+1.0^{\circ}\text{C}$) höher als im globalen oder hemisphärischen Mittel (*Abbildung 3*). Die Veränderungen im Niederschlagsverhalten sind weniger homogen: In der West- und Nordschweiz wurden bis zu 40% Niederschlagszunahme im Winter analysiert (Widmann und Schär 1997), im südalpinen Raum und im Osten Österreichs ist hingegen eher ein Rückgang der Niederschlagsmengen festzustellen (Auer et

al. 2001). Signifikante Trends weisen die Neuschneemengen in Österreich auf, wobei besonders starke Zunahmen in den höher gelegenen Stationen in Westösterreich und den Zentralalpen festgestellt wurden (Mohnl 1996).

Die Veränderungen der klimatischen Bedingungen beeinflussen unbelebte und belebte Natur: Die winterliche Packeisgrenze und die Eisdicke im nördlichen Polarmeer geht zurück, alle jene Gletscher, deren Bilanz im Wesentlichen von den Temperaturverhältnissen während des Sommerhalbjahres abhängt (das sind in Europa praktisch alle, außer jenen an der skandinavischen Westküste) weisen starke Rückgänge auf. In Österreich werden seit Anfang des 20. Jahrhunderts, an rund 100 Gletschern kontinuierliche Längenänderungsbeobachtungen und an einigen Gletschern seit 1952 Massenbilanzbestimmungen durchgeführt. Die Zeitreihen belegen spätestens seit Beginn der 80er Jahre deutlich den Rückgang der Gletscher.

Permafrostböden sind in den Alpen ab etwa 2400 m Höhe möglich und über 3000 m ziemlich sicher vorhanden. Die Untergrenze dieses Permafrostbereiches ist in den letzten 100 Jahren in der Schweiz um ca. 150 bis 250 m gestiegen (NFP31 1998). Skilifte oder Lawinenverbauungen, die in diesen Böden verankert sind, verlieren an Stabilität. Schweizer Forscher haben aufgezeigt, dass katastrophale Murenabgänge oft mit dem Rückzug der Gletscher und dem Auftauen von Permafrost zusammenhängen.

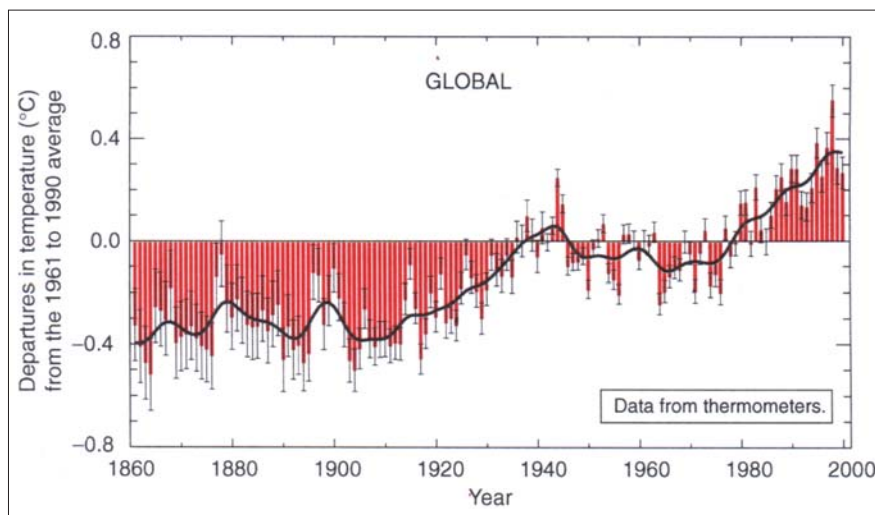


Abbildung 2: Rekonstruierter globaler Temperaturverlauf der letzten 150 Jahre (IPCC 2001)

¹ Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ist ein offenes Gremium von Experten, das im Auftrag der beteiligten Regierungen etwa alle 5 Jahre eine bewertende Übersicht über die wissenschaftlichen Ergebnisse der Klimaänderungsforschung publiziert.

An der Vegetation erkennt man eine früheres Einsetzen der phänologischen Phasen, vor allem des Frühlings und des Sommers um etwa eine Woche gegenüber dem langjährigen Mittel. Der Vergleich der derzeitigen Artenzusammensetzung der hochalpinen Vegetation auf Alpengipfeln mit historischen Aufzeichnungen zeigt sowohl eine Zunahme der Artenvielfalt als auch die Wanderung von Arten in höhere Regionen. Einige Arten weisen Migrationsraten bis zu 4 m pro Dekade auf (Grabherr et al., 1995).

In der Forstwirtschaft führte die Erwärmung der letzten Jahrzehnte in Österreich zu einer Verlängerung der Vegetationsperiode um rund 11 Tage zwischen 1961 und 1990 (Hasenauer 1999). Im gleichen Zeitraum wurde auch ein Volumenzuwachs von rund 24 Prozent beobachtet (Schadauer 1996). Dieser Anstieg ist jedoch nicht nur auf die verlängerte Wachstumsphase, sondern auch auf die Altersentwicklung der Bestände und die Wiederaufforstung hochproduktiver Grünlandflächen zurückzuführen. Dass eine Erwärmung jedoch nicht automatisch zu mehr Ertrag in den Wäldern führt zeigt die Forstinventurperiode 1992-1996 in der die Produktivität von 9,4 auf 8,2 m³/ha und Jahr zurückgegangen ist (Büchsenmeister et. al. 1997).

In den Medien werden vor allem extreme Wetterereignisse mit dem Klimawandel in Zusammenhang gebracht. Für extreme Temperaturen ist dies auch gut belegbar (Auer et. al. 2005). Die Anzahl der Hitzetage hat sich in Österreich seit Mitte des vorigen Jahrhunderts in allen Seehöhen etwa verdoppelt. Das bedeutet, dass sie in den niedrigeren Regionen, etwa dem Seewinkel, von 18 auf rund 36 angestiegen ist, und dass Seehöhen um 600 m etwa ein bis zwei Hitzetage mehr verzeichnen. Orte in 400 m Seehöhe weisen daher jetzt etwa so viele Hitzetage auf, wie früher jene in 250 m Höhe. Die Detailbetrachtung der Hitzetage in Wien zeigt, dass innerhalb dieser Zeit sowohl die Zahl der Tage als auch die Dauer der Hitzeperioden deutlich zugenommen hat. Wie *Abbildung 4* veranschaulicht, kamen Hitzeperioden länger als neun Tage vor 1984 in Wien nicht vor, jetzt hält jede vierte Hitzeperiode schon neun und mehr Tage an, und eine von sieben Episoden mehr als zwölf Tage.

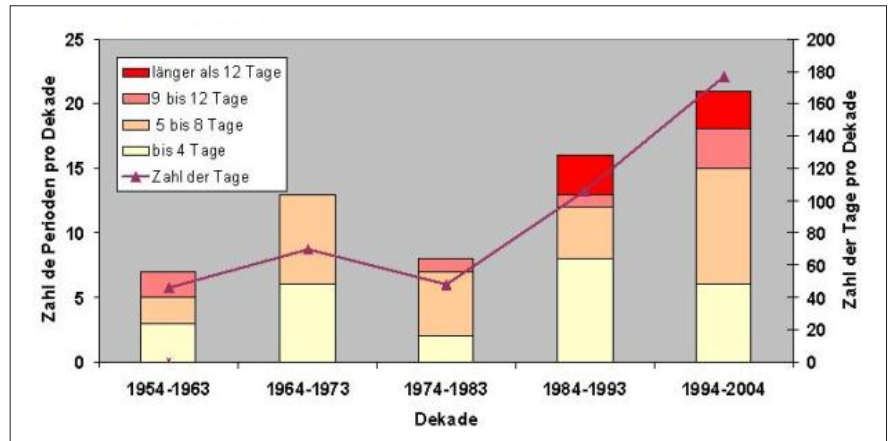


Abbildung 4: Häufigkeit des Auftretens von Hitzetagen und Hitzeperioden unterschiedlicher Länge in Österreich seit 1954 (Säulen: Zahl der Perioden pro Dekade, Linie: Zahl der Tage pro Dekade) (Graphik auf Basis von Analysen von Auer et al. 2005)

Der landwirtschaftlich intensiv genutzte Osten und Südosten Österreichs sind trockengefährdet. In dem am stärksten gefährdeten Gebiet, dem Marchfeld, kommen Trockenperioden rund alle zwei Jahre vor (Formayer et al. 2003). Trockenheit in Österreich ist nicht eine Frage der Jahresniederschlagssummen, sondern von Zahl und Dauer der Trockenperioden, d.h. von aufeinander folgenden Tagen mit weniger als 1 mm Niederschlag. Anders als bei der Temperatur ist in Österreich die Entwicklung der Zahl der Trockenperioden von Ort zu Ort und auch für unterschiedliche Dauern der Perioden sehr verschieden. Die Veränderungen hängen zudem von der Jahreszeit ab. An etwa einem Drittel der Messstellen hat die Häufigkeit von Trockenperioden zu, an einem Drittel abgenommen. Regionen mit einheitlichem Trend lassen sich jedoch nicht abgrenzen. Ein bundesweit einheitliches Bild liefert lediglich der Herbst, mit Abnahmen der Häufigkeiten von Trockenperioden der Mindestdauer von 10 bis 30 Tagen. Wie aus *Abbildung 5* zu entnehmen ist, hat sich an den 30 untersuchten österreichischen Stationen die Zahl der Trockenperioden mit Mindestdauern von 20 Tagen von etwa 15 in den 50er Jahren auf etwa sieben, also rund die Hälfte, in den letzten Jahren reduziert. Die Abnahme ist bei den Stationen in den westlichen Bundesländern am stärksten ausgeprägt (Auer et al. 2005).

Der bekannte „Altweibersommer“, die trockene und eher warme Witterungsperiode im Herbst, tritt in Österreich daher

jetzt nicht mehr mit der Verlässlichkeit auf wie in den 1950er und 1980er Jahren. Davon ist die Tourismuswirtschaft, insbesondere im Gebirge, betroffen: Die Berge verstecken sich öfter hinter Wolken und Niederschlag, Herbstwanderungen sind dadurch beeinträchtigt. Die Landwirtschaft findet die in der Schönwetterphase verlässlich guten Feldarbeitsbedingungen seltener vor und dem Wein fehlen möglicherweise die letzten, für Spitzenqualität wünschenswerten Sonnentage.

Bei anderen extremen Wetterereignisse ist der Zusammenhang nicht so eindeutig erkennbar. Betrachtet man global die Naturkatastrophen, so zeigt sich ein eindeutiger Trend. So war die Anzahl an großen Naturkatastrophen in den 90er Jahren rund dreimal so hoch wie in den 60er Jahren. Der dabei verursachte wirtschaftliche Schaden ist um das 9-fache und der Versicherungsschaden sogar um das 16-fache gestiegen (Münchener Rückversicherung, 2000). Dadurch kann jedoch nicht direkt auf eine Zunahme der meteorologischen Extremereignisse geschlossen werden, da sich aufgrund wirtschaftlicher und soziologischer Veränderungen in dieser Zeit die Klimasensibilität (Verletzlichkeit gegenüber Naturereignissen) verändert hat.

Die Tatsache, dass sich das Klima im letzten Jahrhundert in Richtung Erwärmung geändert hat, ist auch über diese Beispiele hinaus weltweit hinreichend belegt und unumstritten. Der 2001 vorgestellte Bericht des IPCC fasst zusammen: *An increasing body of observati-*

ons gives a collective picture of a warming world and other changes in the climate system (IPCC 2001).

3. Szenarien für die Zukunft

3.1 Globale Entwicklungen

Vom IPCC wurden Szenarienberechnungen für 7 verschiedene globale Emissionsannahmen bis zum Jahr 2100 durchgeführt (Abbildung 5): alle gehen zunächst von Emissionszunahmen aus, in etwa 50 Jahren setzt jedoch bei den optimistischen Szenarien eine Trendumkehr ein, um schließlich niedrigere Werte als heute zu erreichen (z.B. 35 % Reduktion bei CO₂). Im ungünstigen Fall steigen die Emissionen aller Treibhausgase – Kohlendioxid z.B. auf das Dreieinhalbfache. Daraus ergeben sich Kohlendioxidkonzentrationen im Jahr 2100 zwischen 550 und 950 ppm (vorindustriell: 280 ppm, derzeit 378 ppm)! Das bedeutet, dass auch bei starker Reduktion der Emissionen in den nächsten 100 Jahren noch von einer beträchtlichen Konzentrationszunahme der Treibhausgase in der Atmosphäre auszugehen ist. Das System ist träge und reagiert nicht sofort auf unsere Maßnahmen – es hat sozusagen einen beträchtlichen Bremsweg.

Für die sieben Treibhausgas-Szenarien ergeben sich globale Temperaturzunahmen zwischen 1,4 und 5,8°C (Abbildung 6), ein Anstieg des Meeresspiegels um bis zu 88 cm, und räumlich sehr differenzierte Niederschlagsveränderungen. Die große Bandbreite dieser Abschätzungen erklärt sich überwiegend aus den Unsicherheiten der Zukunftsszenarien

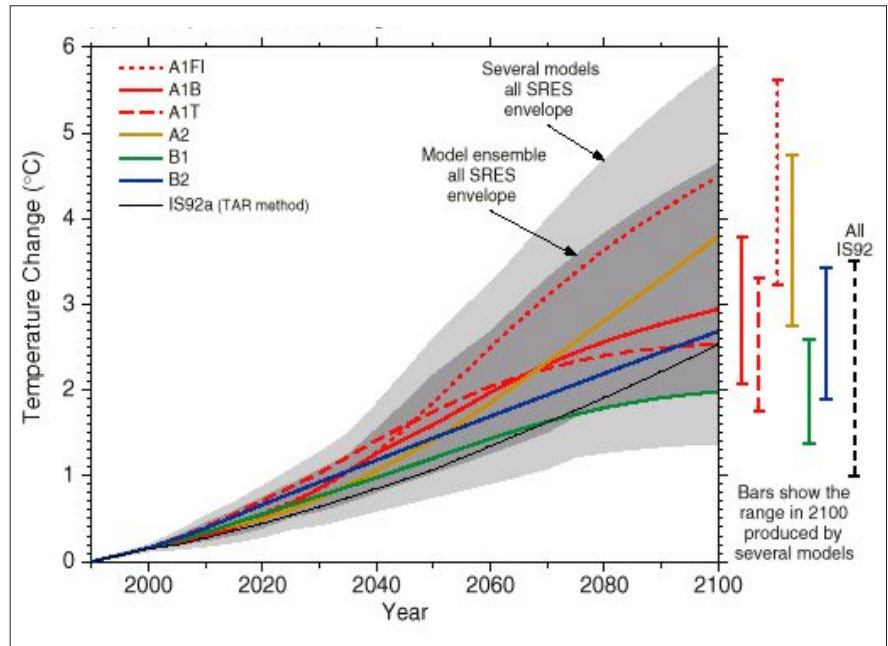


Abbildung 6: Temperaturentwicklung bei Zugrundelegung der IPCC-Emissionsszenarien (IPCC 2001)

menschlicher Aktivitäten, aber auch aus den noch immer bestehenden Schwächen der Klimamodellierung. Unter anderem müssen die Effekte von Wolken und atmosphärischen Partikeln in der Atmosphäre, das ozeanische Strömungssystem sowie die Rolle der Ökosysteme im Klimageschehen noch wesentlich besser verstanden werden. Weiterhin muss es gelingen, zu verlässlicheren Aussagen hoher regionaler Auflösung zu kommen und das zeitliche Schwankungsverhalten, einschließlich des Auftretens von Extremereignissen, realistischer wiederzugeben.

Für Mitteleuropa kann man z.B. ableiten: Die Temperaturen werden weiter

steigen, Hitzeperioden, wie sie derzeit etwa einmal in 10 Jahren vorkommen, könnten in 80 Jahren in Europa die Regel sein – nur in einem von 10 Jahren dürften sie ausbleiben; die Schneedecke wird sich später bilden und früher schmelzen, die Böden daher im Laufe des Sommers stärker austrocknen. Niederschlag wird im Winterhalbjahr im Norden zunehmen, im Sommer im Süden abnehmen. Die Feuchte wird in allen Bereichen außer im Norden abnehmen, die Variabilität extremer Ereignisse könnte sich deutlich ändern (IPCC 2001).

Es gibt Befürchtungen, dass sogenannte „abrupte Klimaänderungen“, d.h. dramatische Änderungen in kurzen Zeiträumen, eintreten könnten – etwa durch das Erliegen des Golfstromes. Man geht derzeit davon aus, dass die Auslösebedingungen für derartige Prozesse frühestens um die Jahrhundertwende erreicht werden.

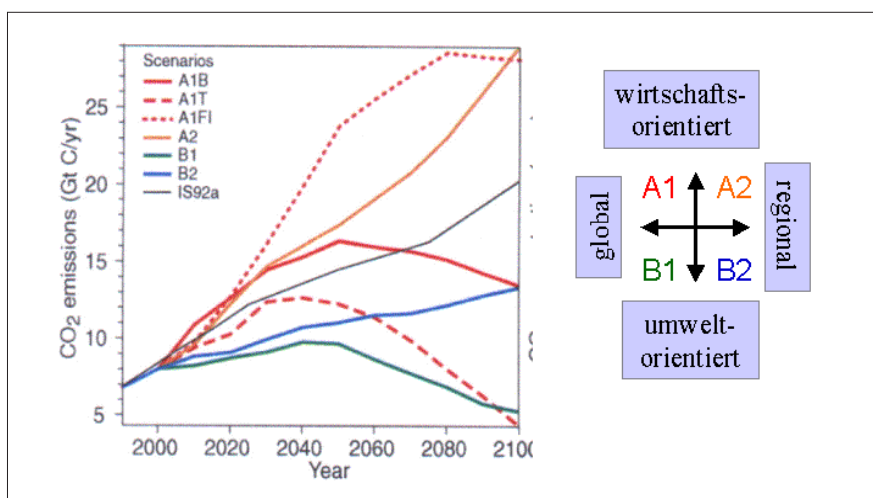


Abbildung 5: Emissionsszenarien des IPCC bis 2100 (IPCC 2001)

3.2 Der Alpine Raum und Österreich

Der alpine Raum könnte durch globale Klimaänderungen besonders stark unter Druck geraten, einerseits weil Gebirgsregionen besonders empfindlich gegenüber Klima-variationen sind, wie z.B. die Schwankungen der Schnee- und der Baumgrenze im Maßstab von Jahrhunderten und Jahrzehnten zeigen, ander-

ereits weil die Alpen im Einflussbereich von vier Klimaten - mediterran, atlantisch, kontinental und polar - liegt und eine globale Klimaänderung - z.B. eine Verlagerung des Westwindbandes - sich u.a. in der Verschiebung der relativen Bedeutung dieser vier Klimate äußern würde. Dies bedeutet, dass Änderungen im alpinen Raum überproportional ausfallen könnten. Es sind auch nicht nur quantitative Änderungen zu betrachten - z.B. der Niederschlagsmenge - sondern auch qualitative, etwa ob der Niederschlag als Regen oder Schnee fällt. Dies ist z.B. sowohl für den Tourismus als auch für Frostschutz, die Bodenfeuchte und die Hochwassergefahr wichtig.

Da essentielle Interessen bis hin zur Wohnbarkeit des alpinen Raumes von den klimatischen Verhältnissen abhängen, ist es wichtig, Szenarien für die zukünftige regionale Entwicklung zu erarbeiten.

Aufgrund der groben räumlichen Auflösung (Gitterpunktsweiten von einigen 100 km) sind die derzeitigen GCMs in der Lage, Phänomene mit einer räumlichen Ausdehnung von größer als 5000 km und einer zeitlichen Periode von mindestens 30 Jahren sowohl in ihrem mittleren Zustand als auch in ihrer Variabilität zu reproduzieren (Stott et al. 1999). Diese Größenordnung wird auch als „skillful scale“ eines GCM's bezeichnet. In dem topographisch sehr stark gegliederten Gelände der Alpen ist diese räumliche Auflösung unzureichend, da alle orographisch verursachten oder verstärkten Wettererscheinungen (z. B. Lee-Zyklogese, konvektiver Niederschlag), nur grob parametrisiert oder gar nicht berücksichtigt werden können (Giorgi et al., 1991). Um dennoch zu regionalen Aussagen aus den GCM - Szenarios zu gelangen, wurden und werden seit Beginn der 90er Jahre verschiedene Regionalisierungs- (Downscaling-) Verfahren entwickelt.

Mittels derartiger Verfahren lässt sich z.B. die globale Temperaturzunahme von 1,4 bis 5,8°C bis zum Jahr 2100 - nach Berechnungen, die im Rahmen des EU-Projektes PRUDENCE durchgeführt wurden - in Mitteleuropa auf Temperaturanstiege zwischen 3°C und 5°C übersetzen (Christensen et. al, 2002). Dabei zeigt sich die stärkste Erwärmung wäh-

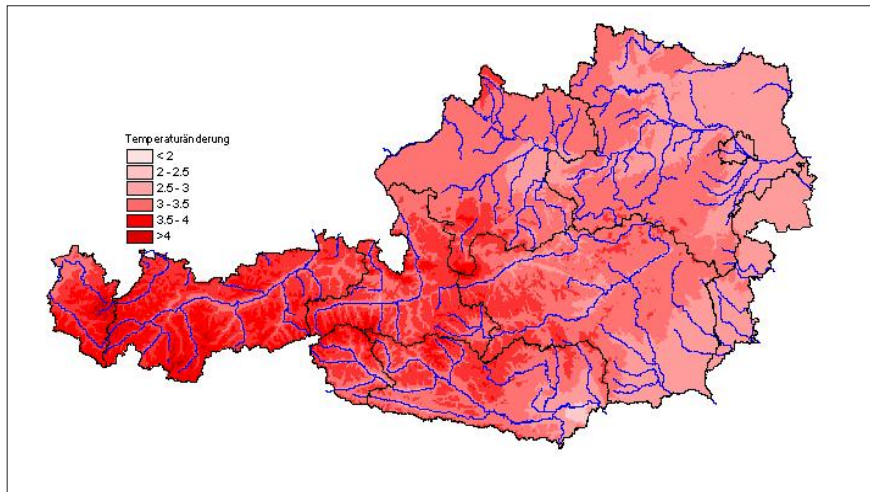


Abbildung 7: Temperaturszenario für Österreich mit statistischen Downscaling auseinem ungünstigen globalen Szenarium abgeleitet (Matulla et al. 2003)

rend der Sommermonate. Für Österreich ergeben statistische Regionalisierungsmodelle geringfügig stärkere Erwärmungen in höheren Lagen, davon unabhängig aber einen West-Ost Gradienten. Bei Schon in den nächsten 50 Jahren ist mit Temperaturzunahmen von 2° bis 4°C (Abbildung 7) zu rechnen (Formayer et al. 2005).

Hinsichtlich des Niederschlages ergibt sich ein differenzierteres Bild, das nördlich der Alpen Niederschlagszunahmen, südlich aber Abnahmen erwarten lässt (Matulla et al. 2003). Da bekannt ist, dass die regionalen Szenarien derzeit noch stark abhängig sind von der angewandten Methodik, können diese Ergebnisse mit Fortschritten in der Methodik noch stärkern Veränderungen unterliegen. Ihre Bedeutung ist im Lichte dieses Wissens zu bewerten.

Szenarienberechnungen mittels verschiedener Methoden ergeben ein konsistentes Bild hinsichtlich des verstärkten Auftretens von Hitzeepisoden (Temperaturen über 30°C): Innerhalb von 30 Jahren zeigen die Szenarien einen Anstieg von derzeit unter zehn Tagen pro Jahr (Mittel über den Nordosten Österreichs) auf rund 30 Tage (Abbildung 8). Für den Zeitraum 2070-2100 ergeben sich über 40 Hitzetage. Aufgrund der erwarteten Zunahme der Schwankungsbreite könnten in der Periode 2070 bis 2100 Sommer mit bis zu 80 Hitzetagen auftreten. Selbst die kühlestn Sommer werden mit etwa zehn Hitzetagen dann noch über dem derzeitigen Mittelwert liegen (Formayer et al. 2005).

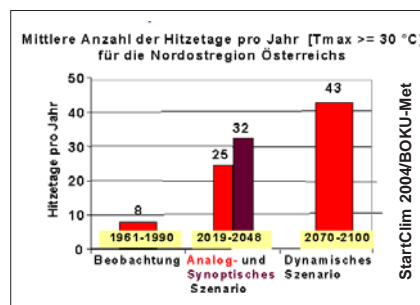


Abbildung 8: Errechnete Häufigkeit von Tagen mit Temperaturen über 30°C im Nordosten Österreichs (Formayer et al. 2005)

Diese starke Zunahme an sehr heißen Tagen könnte Auswirkungen in vielen Bereichen haben: Die überdurchschnittliche Zahl an Toten im Hitzesommer 2003 lässt eine Analyse der Folgen von Hitze auf Krankheits- und Todesfälle geraten erscheinen. Dass die Landwirtschaft auch von Hitze stark betroffen sein kann, zeigen die unten beschriebenen Ergebnisse des Projektes StartClim2004. Darüber hinaus ist offenkundig, dass Wälder, Gletscher, Seen und eine Vielzahl von Wirtschaftssektoren betroffen sein werden.

Das Extremjahr 2003 bot Gelegenheit die Auswirkungen zukünftiger Klimaszenarien genauer abzuschätzen. Aus den Daten konnte abgeleitet werden, dass eine während der gesamten Vegetationsperiode um 10 mm verringerte Niederschlagssumme die Produktivität im Grünland um 24±4 kg/ha verringern, hohe Temperaturen im August (+1 °C mittlere Maximaltemperatur) aber sogar um bis zu 445±36 kg/ha (Soya et al.

2005). Der Vergleich der Bedeutung von Hitze-, Kälte- und Trockenheitseinflüssen zeigte für die Untersuchungsperiode 1997-2003 die vorrangige Rolle der Maximaltemperaturen bei der Reduktion von Erträgen. Die negativen Auswirkungen einer Trockenperiode entstehen somit nicht nur durch den Wassermangel, sondern unter den gegebenen klimatischen Bedingungen in noch stärkerem Ausmaß durch den Hitzestress und eine beschleunigte Entwicklung bzw. eine verkürzte Zeitperiode für die Biomassebildung.

Auf dem Forstsektor sind in Österreich vor allem in Tieflagen (Seehöhen unter 900 m) unmittelbare Auswirkungen einer Klimaänderung in Form von erhöhter Baummortalität infolge von Reduktion der Niederschläge und steigende Temperaturen zu erwarten (vor allem Fichtenmonokulturen). Bei +1-2 °C verändert sich langfristig auch die Zusammensetzung der Wälder in höheren Lagen (Seehöhen über 1200 m) (Lexner et al. 2000, Matulla et al. 2002).

Im Fall einer Erwärmung ist auch mit einer rascheren Entwicklung von Schädlingen zu rechnen, Krankheitserreger oder der Vektoren könnten in Gebiete vordringen, in welchen sie derzeit unbekannt sind. Andererseits verändern sich die Bedingungen auch für die Nützlinge. Die Folgen der Verschiebungen in ökologischen Systemen können sowohl für die Forstwirtschaft als auch für die Landwirtschaft von Relevanz sein.

Wirtschaftlich von besonderer Bedeutung für Österreich ist der Rückgang der Andauer der Schneedecke: bis in etwa 1500 m Höhe muss man bei Temperaturzunahmen um 1-2°C mit einem Rückgang um 20 – 40 Tage rechnen (Hantel et al. 1998). Dies könnte viele Gemeinden, die derzeit auf den Wintertourismus angewiesen sind, in Schwierigkeiten bringen (Kromp-Kolb et al. 2001), wenn sie nicht rechtzeitig ihre Wirtschaft diversifizieren.

Für das Corvatsch-Furtschellas Gebiet in der Schweiz wurde berechnet, dass in etwa 100 Jahren bei 3°C Erwärmung 70% des Parmafrostgebietes aufgetaut sein, und die Gletscher völlig verschwunden sein werden. Die Gleichgewichtslinie der Gletscher wird um 150 bis 350 m ansteigen und die Permafrostgrenze um

200 bis 750 m (NFP31 1998). Der Vernagt Gletscher wird bis 2005 in mehrere unzusammenhängende Gletscher und Toteisflecken zerfallen und bis 2100 möglicherweise vollständig verschwinden (<http://files.alpenverein.at/>).

Nicht alle Auswirkungen des Klimawandels müssen negativ sein. Bei rechtzeitiger Auseinandersetzung mit den Änderungen und Bereitschaft zur Anpassung, können Änderungen oft auch Chancen bergen. Diese gilt es zu nutzen – ohne die Notwendigkeit wirksamer Klimaschutzmaßnahmen aus den Augen zu verlieren.

4. Ausblick

Die 1992 in Rio de Janeiro von 154 Staaten unterzeichnete Klimakonvention, formuliert als Ziel „...eine Stabilisierung der Treibhausgase in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, das gefährliche anthropogene Einmischung in das Klimasystem verhindert. Dieses Niveau soll in einem Zeitraum erreicht werden, der es den Ökosystemen erlaubt sich auf natürliche Weise an die Klimaänderung zu adaptieren, der sicherstellt, dass die Nahrungsmittelproduktion nicht gefährdet wird und der ökonomische Entwicklung in einer nachhaltigen Art ermöglicht.“ (<http://unfccc.int/>). Eine der aktuellen Frage ist welche konkreten Treibhausgaskonzentrationen diesem Niveau entsprechen.

Es gibt, vor allem in Europa, einen gewissen Konsens, dass eine globale Erwärmung um mehr als 2°C gegenüber der vorindustriellen Zeit mit so zahlreichen und so einschneidenden Nachteilen in verschiedenen Teilen der Erde verbunden wäre, dass dies auf jeden Fall verhindert werden muss. Voraussetzung für eine Temperaturstabilisierung bei +2°C ist, dass die Kohlendioxidkonzentration nicht über 400 bis 450 ppm steigt. Die konkrete Zahl hängt davon ab, wie viel und wie schnell Vegetation und Ozeane Kohlendioxid bei ständig steigenden Konzentrationen und Temperaturen in Zukunft aufnehmen können. Derzeit stellen sie Senken dar und nehmen etwa 40% der menschengemachten Emissionen auf, die restlichen 60 % verbleiben in der Atmosphäre. Sowohl Vegetation als auch Ozeane werden aber allmählich zu Quellen werden – die konkreten Bedingun-

gen dafür sind aber noch mit großer Unsicherheit behaftet.

Da die Zunahme der Kohlendioxidkonzentration in den letzten Jahren etwa 2 ppm pro Jahr betrug, wird die untere Grenze (400 ppm) in etwa 10 Jahren erreicht. Im Falle der Obergrenze von 450 ppm bliebe etwas mehr Zeit. Bei der Suche nach Wegen zur Einhaltung dieser Grenzen werden in letzter Zeit zunehmend Möglichkeiten diskutiert und auch schon erprobt, die Kohlendioxidkonzentration durch Extraktion aus der Atmosphäre oder den Abgasen zu reduzieren, und den Kohlenstoff in sicheren Lagern zu verschließen (Sequestrierung). Als Lager kommen im Wesentlichen ehemalige Erdgaslagerstätten in Frage und der tiefe Ozean, bzw. Ozeansedimente. Im Falle der Erdgaslager ist darauf hinzuweisen, dass einerseits ihre Kapazität, gemessen an den produzierten Kohlendioxidmengen, sehr begrenzt ist, und dass andererseits Kohlendioxid ein Giftgas ist, d.h. die Lager müssen über- und bewacht werden. Da das Verständnis der Ökosysteme der Meere noch sehr dürftig ist besteht bei Sequestrierung im Ozean die Gefahr, dass in dem Versuch den Klimawandel durch Lagerung von CO₂ in Ozean einzudämmen, ein anderes Übel ausgelöst wird, dessen Ausmaße und Folgen derzeit nicht abschätzbar sind. Sequestrierung ist daher ein sehr umstrittener Weg zur Lösung des Klimaproblems.

Zur Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre sind daher drastische Emissionsreduktionen in kurzer Zeit unumgänglich, und selbst dann muss man davon ausgehen dass die Temperatur noch über dieses Jahrhundert hinaus weiter ansteigen wird.

5. Literatur

- Auer I., Böhm R., Schöner W. (2001): Austrian Long-Term Climate - Multiple Instrumental Climate Series from Central Europe. Österr. Beitr. zu Meteorologie und Geophysik, Heft 25.
- Auer, I., E. Korus, R. Böhm, W. Schöner (2005): Analyse von Hitze- und Dürreperioden in Österreich; Ausweitung des täglichen StartClim Datensatzes auf das Element Dampfdruck); Untersuchungen regionaler Klimaänderungsszenarien hinsichtlich Hitze- und Trockenperioden in Österreich. Endbericht von StartClim2004.B; in StartClim2004: Analysen von Hitze und Trockenheit und deren Auswirkungen in Österreich. Endbericht, Auftragge-

- ber: BMLFUW, BMBWK, BMWA, Österreichische Hagelversicherung, Österreichische Nationalbank, Umweltbundesamt, Verbund AHP.
- Büchsenmeister R., K. Schieler und K. Schadauer (1997): Der Wald und seine nachhaltige Produktion. Beilage zur Österr. Forstzeitung. 107 (12): 7-10.
- Christensen, J.H., T.R. Carter, and F. Giorgi (2002): PRUDENCE Employs New Methods to Assess European Climate Change, EOS, AGU, 83, 147.
- Formayer, H., H. Nefzger und H. Kromp-Kolb (1998): Auswirkungen möglicher Klimaänderungen im Alpen-raum. Eine Bestandsaufnahme im Auftrag von Greenpeace Österreich. September 1998
- Formayer, H., S. Eckhardt, P. Haas, M. Lexer (2003): Frequency of dry spells, defined by thresholds of accumulated potential evapotranspiration sums (PETs), in Austria. Poster presentation at ICAM/MAP Brig 2003.
- Formayer, H., Haas, P., Matulla, C., Frank, A., Seibert, P. (2005): Untersuchungen regionaler Klimaänderungsszenarien hinsichtlich Hitze- und Trockenperioden in Österreich. Endbericht von StartClim2004.B; in StartClim2004: Analysen von Hitze und Trockenheit und deren Auswirkungen in Österreich. Endbericht, Auftraggeber: BMLFUW, BMBWK, BMWA, Österreichische Hagelversicherung, Österreichische Nationalbank, Umweltbundesamt, Verbund AHP.
- Giorgi, F. and L.O. Mearns (1991): Approaches to the simulation of regional climate change: A review. Rev. Geophys., 29, 191-216.
- Glogger B. (1998): Heisszeit - Klimaänderungen und Naturgefahren in der Schweiz. Grabherr G., Gottfried M., Grubner M., Pauli H., 1995: Patterns and current changes in alpine plant diversity. In Chapin III, F.S. & Körner, D. (editors), Arctic and Alpine Biodiversity: Patterns, Causes and Ecosystem Consequences, Ecological Studies, Vol. 113, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 167-181.
- Hantel M., Ehrendorfer M., Haslinger A. (1998): Climate sensitivity of snow cover duration in Austria. Int. Journal of Climatology.
- Hasenauer, H., R. R. Nemani, K. Schadauer und S. W. Running (1999): Forest growth response to changing climate between 1961 and 1990 in Austria. Forest Ecol. And Manage 122: 209-219.
- IPCC, 2001: Climate Change: the IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press, Cambridge UK.
- Kromp-Kolb H, F. Formayer (2001): Klimaänderung und mögliche Auswirkungen auf den Wintertourismus in Salzburg. Studie im Auftrag des Amtes der Salzburger Landesregierung.
- Kromp-Kolb, H. und H. Formayer (2005): Schwarzbuch Klimawandel. Ecowin Verlag Salzburg
- Kromp-Kolb, H., J. Eitzinger, G. Kubu, H. Formayer, P. Haas, T. Gerersdorfer (2005): Auswirkungen einer Klimaänderung auf den Wasserhaushalt des Neusiedler Sees. Forschungsprojekt im Auftrag der burgenländischen Landesregierung. Endbericht.
- Lexer, M. J., K. Höninger, H. Scheifinger, C. Matulla, N. Groll und H. Kromp-Kolb (2000): The sensitivity of central european mountain forests to scenarios of climate change: methodological frame for a large-scale risk assessment. Siva Fennica, 34, p. 113-129.
- Matulla, C., N. Groll, H. Kromp-Kolb, H. Scheifinger, M. J. Lexer und M. Widmann (2002): Climate change scenarios at Austrian National Forest Inventory sites. Climate Research, 22, 2, p. 161-173.
- Matulla, C., H. Formayer, P. Haas, H. Kromp-Kolb (2003): Mögliche Klimatrends in Österreich in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts. Wasser- und Abfallwirtschaft.
- Mohl H. (1996): Die Schwankungen Wintersportrelevanter Schneehöhen im Laufe der vergangenen fünfzig Jahre in den österreichischen Alpen. Sonderdruck aus Wetter und Leben. 48. Jahrgang. Heft 1-2/96. S. 103-113
- Münchner Rückversicherung (2000): Topics 2000. Naturkatastrophen – Stand der Dinge.
- NFP 31: Bader S. und Kunz P. (1998): Klimarisiken - Herausforderung für die Schweiz, Schlussbericht des Nationalen Forschungsprojektes 31, v/dj Hochschulverlag AG.
- ÖAW-Kommission für die Reinhaltung der Luft (1991): Bestandsaufnahme. Anthropogene Klima-änderungen Mögliche Auswirkungen auf Österreich - Mögliche Maßnahmen in Österreich. Österreichische Akademie der Wissenschaften im Auftrag des Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung und des Bundesministeriums für Umwelt, Jugend und Familie. Wien.
- ÖAW-Kommission für die Reinhaltung der Luft (1993): Bestandsaufnahme. Anthropogene Klima-änderungen Mögliche Auswirkungen auf Österreich - Mögliche Maßnahmen in Österreich. Dokumentation. Österreichische Akademie der Wissenschaften im Auftrag des Bundesministeriums für Wissenschaft und Forschung und des Bundesministeriums für Umwelt, Jugend und Familie. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien.
- Schadauer, K. (1996): Growth trends in Austria. In: Growth Trends in European Forests [Spiecker, H., K. Mielikäinen, M. Köhl and J. P. Skovsgaard (eds.)], European Forest Institute Research Report No. 5, Springer-Verlag, Berlin, 275-289.
- Schär, Ch., P. L. Vidale, D. Lüthi, Ch. Frei, Ch. Häberli, M.A. Liniger und Ch. Appenzeller (2004) : The role of increasing temperature variability in European summer heat waves. Nature, Vol. 427, 22. Jan 2004
- Soja, G., Soja, A., Eitzinger, J., Gruszczynski, G., Trnka, M., Kubu, G., Formayer, H., Schneider, W., Suppan, F., Koukal, T. (2005): Analyse der Auswirkungen der Trockenheit 2003 in der Landwirtschaft Österreichs - Vergleich verschiedener Methoden. Endbericht von StartClim2004.C; in StartClim2004: Analysen von Hitze und Trockenheit und deren Auswirkungen in Österreich. Endbericht, Auftraggeber: BMLFUW, BMBWK, BMWA, Österreichische Hagelversicherung, Österreichische Nationalbank, Umweltbundesamt, Verbund AHP.
- Stott, P. A., S. F. B. Tett, G. S. Jones, W. Ingram, J. F. B. Mitchell and M. R. Allen (1999): Natural and anthropogenic causes of twentieth century temperature change. Oral presentation at: Conference on „Detection and Modeling of Regional Climate Change“, 9 – 12 June 1999. ICTP, Trieste.
- WBGU (2003): Über Kioto hinaus denken. Klimastrategien für das 21. Jahrhundert. Sondergutachten. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung: Globale Umweltveränderungen. Berlin 2003
- Widmann, M. und C. Schär (1997): A principal component and long-term trend analysis of daily precipitation in Switzerland. Int. J. of Climatology, Vol. 17, p. 1333-1356.

6. Interessante Internet-Adressen

<http://www.boku.ac.at/oegm> Homepage der Österreichischen Gesellschaft für Meteorologie; Links zu allen wichtigen nationalen und vielen internationalen meteorologischen Einrichtungen; Aktuelles; Diskussionsforum.

<http://www.boku.ac.at> Homepage des Institutes für Meteorologie, Department Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Universität für Bodenkultur, Forschungsaktivitäten und Publikationen zur Umweltmeteorologie; Links

<http://www.lebensministerium.at> Homepage des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft; Gesetze, Aktuelles; Links

<http://www.zamg.at> Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Aktuelle Wetter- und Klimadaten; Links

<http://www.ubavie.gv.at> Umweltbundesamt; aktuelle Immissionsmesswerte; Zusammenstellung von offiziellen Informationen und Dokumenten; Forschungsberichte; Links

<http://www.accc.at> Homepage des ehemaligen Österreichischen Klimabeirats. Aktuelle Informationen und wichtige Links

<http://www.proclim.unibe.ch> Homepage des Schweizer Klimaforschungskordinationszentrums ProClim

<http://www.unfccc.de> Sekretariat der UN-Klimakonvention. Offizielle Texte.

<http://www.ipcc.ch> Intergovernmental Panel on Climate Change: Zusammenfassungen der IPCC Berichte

<http://www.pewclimate.org> Multinationale Firmen, die sich dem Klimaschutz verpflichtet fühlen

<http://www.klimabuendnis.at> Klimabündnis Österreich. Mitglieder, aktuelle Aktivitäten, Informationen