

## 1.4 Der Einfluss des Klimawandels auf Hitzewellen und das Sommerklima Europas

CHRISTOPH SCHÄR & ERICH M. FISCHER

*Climate change and heat waves: The extreme European summer 2003 has demonstrated how dramatically heat waves can affect even today's modern civilization. Temperature observations from the past 100 years demonstrate that the frequency, intensity and duration of summer heat waves have strongly increased. Climate change scenarios using global and regional climate models suggest that this increase will accelerate in the future. Detailed analysis of the scenario simulations also shows that summer heat waves are closely tied to the water cycle. Warm European summers are usually dry and often preceded by spring precipitation deficits. In addition to a mere shift towards warmer temperatures, scenario simulations exhibit a complex behavior that includes pronounced increases in interannual and daily variability, as well as increases in precipitation intensity that occur despite pronounced decreases in summer mean precipitation. It is likely that climate change will most strongly be felt during the summer season, as the projected summer climate is distinct from past experience.*

Extremereignisse und Naturkatastrophen haben die Beziehung unserer Gesellschaft zum Klimageschehen seit jeher geprägt, und selbst die heutige moderne Zivilisation reagiert sehr empfindlich auf Extremereignisse.

Als Beispiel dient der europäische Hitzesommer des Jahres 2003, welcher mit einer unerwarteten Intensität die Öffentlichkeit in ganz Zentral- und Westeuropa überrascht hat. Im Kern der Hitzewelle lagen die mittleren Temperaturen mehr als 5 Standardabweichungen über dem langjährigen Mittel (SCHÄR et al. 2004), und der Sommer war wahrscheinlich der wärmste der letzten 500 Jahre (LUTERBACHER et al. 2004). In Nordeuropa wurde der Sommer als angenehm warm empfunden, aber eine Analyse der Folgen zeigt, dass es sich um eine Tragödie katastrophalen Ausmaßes gehandelt hat. Auf dem Höhepunkt des Hitzesommers, in den ersten zwei Augustwochen, lagen die täglichen Maximaltemperaturen verbreitet über 40 °C. Die Auswirkungen waren gravierend: Der finanzielle (weitgehend nicht versicherte) Schaden wird von den Rückversicherern auf über 10 Milliarden Euro geschätzt, größtenteils als Folge von Ernteeinbußen und Waldbränden (GARCÍA-HERRERA 2008). In vielen Flüssen und Seen fielen die Wasserstände auf bedrohliche Werte, was teilweise zu schwerwiegenden Problemen mit der Frischwasserversorgung, der Energieversorgung und zu verbreitetem Fischsterben führte (PROCLIM 2005). Die alpinen Gletscher verloren – in einem einzigen Jahr – annähernd 10% ihres bereits arg reduzierten Volumens. Am schwerwiegendsten jedoch waren die gesundheitlichen Auswirkungen. Die retrospektive Analyse der Mortalitätszahlen hat ergeben, dass die Hitze in den ersten zwei Wochen des Augusts 2003 europaweit ungefähr 40'000 vorzeitige Todesfälle zur Folge hatte, welche sich nicht durch natürliche Mortalitätsraten erklären lassen (s. auch Kap.3.1.7-9).

Der Hitzesommer 2003 steht in Kontrast zu den Jahrhundertfluten der Sommer 2002 (in Deutschland und Österreich) und 2005 (in der Schweiz). Dies illustriert die große Variabilität des Europäischen Sommerklimas.

Generell wird erwartet, dass die gesellschaftlichen Auswirkungen des Klimawandels maßgeblich durch die Häufigkeit und den Charakter von Extremereignissen bestimmt werden – durch Überschwemmungen, Dürren, Hitzewellen, Windstürme, etc. Der Zusammenhang zwischen Klima und Extremereignissen ist jedoch sehr subtil. Dies deshalb weil sich der Begriff »Klima« auf die statistische Beschreibung des Wettergeschehens über einen längeren Zeitraum bezieht, während Extremereignisse meist durch kurzfristige und in ihrer Intensität seltene Wetterabläufe gekennzeichnet sind. Die wissenschaftliche Diskussion hat sich deshalb mit großer Vorsicht an das Thema »Klimawandel und Extremereignisse« herangetastet. Noch im ersten Bericht des UNO-Klimarates von 1990 waren Extremereignisse ein Randthema und wurden auf lediglich 7 von 364 Seiten abgehandelt. Dank deutlichen Verbesserungen der Klimamodelle und einem vertieften Verständnis der beteiligten Prozesse und Zusammenhänge, konnte im kürzlich veröffentlichten Klimabericht (IPCC 2007) erstmals eine umfassende Beurteilung von Extremereignissen vorgenommen werden. Dieser Artikel gibt einen Überblick über den Stand der Forschung mit besonderer Berücksichtigung europäischer Hitzewellen.

### Grundlagen

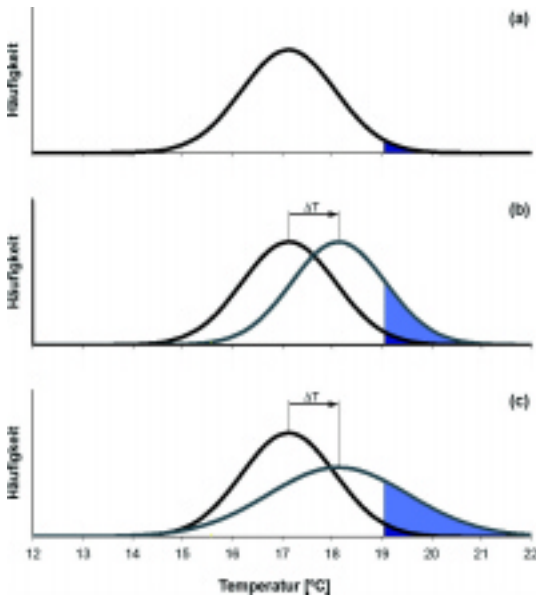
Als erstes benötigen wir eine adäquate Definition der wichtigsten Begriffe. Unter dem Begriff *Klima* versteht man eine statistische Beschreibung des »mittleren« Wetters einer längeren Periode (z.B. 30 Jahre). Die dazugehörige statistische Verteilung des betrachteten Klimaparameters kann mit Hilfe einer Häufigkeitsverteilung dargestellt werden, wie am Beispiel der Sommertemperaturen in *Abb. 1.4-1a* illustriert. Im einfachsten Fall lässt sich diese Verteilung durch den Mittelwert (hier 17,1 °C) und die Breite der Verteilung (Standardabweichung, hier 0,9 °C) beschreiben, wobei letztere die interannuelle (Jahr-zu-Jahr) Variabilität des Klimasystems repräsentiert.

*Extremereignisse* sind definiert als seltene Wetter- oder Naturereignisse, die in ihrem physikalischen Ausmaß markant vom langjährigen Durchschnitt abweichen. Als Beispiel werden in *Abb. 1.4-1a* die Werte oberhalb eines Grenzwerts von 19,1 °C hervorgehoben. Dieser Grenzwert entspricht dem 98%-Perzentil der langjährigen Klimaverteilung, und wird durchschnittlich alle 50 Jahre einmal übertroffen.

Unter *Klimawandel* versteht man eine signifikante Veränderung der Häufigkeitsverteilung wichtiger Klimagrößen. Im Falle der Temperatur ergibt sich im einfachsten Fall eine reine Verschiebung der Häufigkeitsverteilung, um eine Distanz, welche der Erwärmung entspricht (hier  $\Delta T = +1$  °C, siehe *Abb. 1.4-1b*). Diese Erwärmung impliziert eine Häufigkeitszunahme der warmen Extreme, im betrachteten Fall von 2% auf 16% (siehe helle und dunkle blaue Fläche in *Abb. 1.4-1b*). Nebst einer reinen Erwärmung (*Abb. 1.4-1b*) müssen auch weiterreichende Veränderungen der Häufigkeitsverteilung in Betracht gezogen

werden, zum Beispiel eine Verbreiterung, welche einer Variabilitätszunahme entspricht (s. *Abb. 1.4-1c*). Veränderungen dieser Art können starke Auswirkungen auf die Häufigkeit von Extremereignissen haben.

Die schematische Darstellung in *Abb. 1.4-1* belegt einen direkten *Zusammenhang zwischen Klimawandel und Extremereignissen*: Bei substantiellen Änderungen der statistischen Verteilung eines Klimaparameters ändert sich die Häufigkeit der dazugehörigen Extreme. Falls der betrachtete Klimaparameter durch eine Normalverteilung beschrieben werden kann, so wird – sofern man sich auf eine Verschiebung der Verteilung beschränkt – das Verhalten des Systems durch die Erwärmung ( $\Delta T$ ) und die Breite der Verteilung ( $\sigma$ ) vollständig bestimmt. Je größer die Erwärmung im Vergleich zur bestehenden Variabilität ist, desto eher resultieren Änderungen in der Verteilung der Extreme. Die quantitative Analyse der Situation in Europa zeigt, dass bei den monatlichen und saisonalen Temperaturen die kritische Grenze bereits heute erreicht ist: Die in den letzten 100 Jahren beobachtete Erwärmung beträgt im Jahresmittel mehr als 1 °C, und ist quantitativ vergleichbar mit der beobachteten Standardabweichung von circa 1 °C.



**Abb. 1.4-1:** Schematische Darstellung des Zusammenhangs zwischen Klima, Klimawandel und Extremereignissen anhand der Sommertemperaturen in der Schweiz. (a) Definition des Klimas basierend auf der Häufigkeitsverteilung der Sommertemperaturen in einer Referenzperiode (hier 1864–2000). Die obersten 2% der Verteilung (extrem warme Sommer) sind durch die blau hinterlegte Fläche hervorgehoben. (b, c) Darstellung des Klimawandels als eine signifikante Veränderung der Häufigkeitsverteilung. Die graue Kurve beschreibt eine mittlere Erwärmung von 1°C. In (b) wird eine reine Erwärmung um 1°C betrachtet, in (c) zusätzlich eine Verbreiterung der Verteilung (Zunahme der Standardabweichung um 50%). In beiden Fällen ist eine deutliche Zunahme der warmen Extreme (blau hinterlegte Flächen) festzustellen.

## Trends der Vergangenheit

Die vorangehende Diskussion wird bestätigt durch die Analyse von Temperaturreihen. *Abb. 1.4-2* zeigt kürzliche monatliche und saisonale Temperaturrekorde. Die betrachteten Daten stammen aus der Schweiz, aber sie repräsentieren die Situation in ganz Zentraleuropa. Die Abbildung beschränkt sich auf extreme Rekorde, welche die bisherigen Rekordmarken geradezu in den Schatten stellten (Abweichung vom langjährigen Mittel grösser als 3 Standardabweichungen).

Die Häufung von Rekorden in den letzten Jahren ist außergewöhnlich. Einige der neuen Rekorde liegen mehr als 5 Standardabweichungen über dem langjährigen Mittel und können durch die Statistik der Referenzperiode kaum erklärt werden, selbst wenn die bis dahin beobachtete mittlere Erwärmung berücksichtigt wird (SCHÄR et al. 2004). Rein statistisch gesehen wäre ein monatliches oder saisonales Temperaturereignis, welches mehr als 3 Standardabweichungen vom Mittel abweicht, durchschnittlich alle 46 Jahre zu erwarten. In den Temperaturreihen der Schweiz wurden in den letzten 5 Jahren (2003–2007) jedoch 6 solche Ereignisse festgestellt (eines durchschnittlich alle 10 Monate). Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass es sich dabei um eine seltene zufällige Häufung von Extremen handelt, aber es ist viel wahrscheinlicher, dass der Klimawandel seine Spuren bereits in den Extremwerten hinterlässt (s. dazu STOTT et al. 2004).

Das gehäufte Auftreten neuer saisonaler und monatlicher Rekordtemperaturen ist konsistent mit der beobach-

teten Zunahme von kurzzeitigen (täglichen) Temperatur-extremen. DELLA-MARTA et al. (2007) analysierten die Trends von sommerlichen Hitzewellen in Westeuropa unter Verwendung von täglichen Daten der Zeitperiode 1880–2005. Dabei wurden die Anzahl heißer Sommertage (Tage welche wärmer sind als das 95%-Perzentil) und die Länge von Hitzewellen (definiert als eine zusammenhängende Sequenz von heißen Sommertagen) betrachtet. Die Resultate zeigen eine mittlere Erwärmung von 1,6 °C, eine Verdopp-

lung der Länge von Hitzewellen und eine Verdreifachung der Häufigkeit von heißen Sommertagen (s. Abb. 1.4-3). Es ist wahrscheinlich, dass auch die dokumentierte Zunahme der Hitzewellen eine Folge des anthropogenen Klimawandels darstellt.

## Szenarien für die Zukunft

Als nächstes betrachten wir Szenarien zukünftiger europäischer Sommertemperaturen. Dazu wird von einer weiteren Zunahme des atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Gehalts ausgegangen, von heute 380 ppm auf 840 ppm am Ende dieses Jahrhunderts (IPCC SRES A2 Szenario). Dieses Treibhausgasszenario treibt eine Kette von 3 Klimamodellen an: ein globales gekoppeltes Klimamodell, ein globales atmosphärisches Modell, und ein regionales Modell mit einer horizontalen rechnerischen Auflösung von 56 km (s. SCHÄR et al. 2004 für weitere Details). Die Resultate werden für den Zeitraum 2071–2100 relativ zur Kontrollperiode 1961–1990 dargestellt.

Abb. 1.4-4 zeigt die Beobachtungen und Simulationen mittlerer Sommertemperaturen an einem ausgewählten Gitterpunkt in der Nähe von Zürich. Die Klimasimulation der Gegenwart (mittleres Panel) stimmt qualitativ gut mit den Beobachtungen (oberes Panel) überein, wobei ein mittlerer Modellfehler von 0,9 °C entfernt wurde. Im Vergleich dazu ist die zukünftige Verteilung der Sommertemperaturen durch zwei deutliche Veränderungen gekennzeichnet: eine mittlere Erwärmung von 4,6

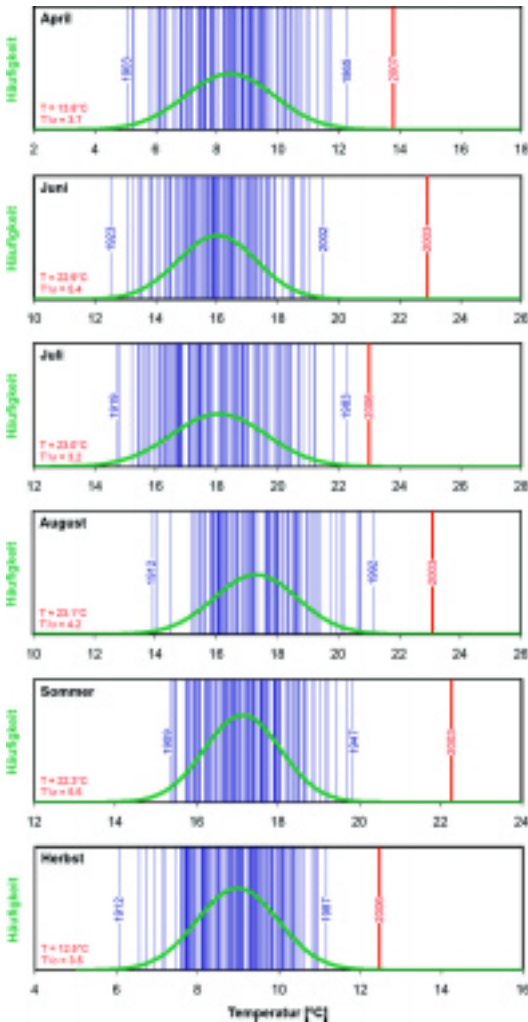


Abb. 1.4-2: Kürzliche Rekordtemperaturen im schweizerischen Mittelland (Mittel der Stationen Basel, Bern, Genf und Zürich). Die monatlichen beziehungsweise saisonalen Temperaturen des Zeitraums 1864–2007 sind durch vertikale blaue Linien dargestellt, die neuen Rekorde durch rote Linien. Die grüne Kurve zeigt die Wahrscheinlichkeitsverteilung basierend auf der Referenzperiode 1864–2000. Die Analyse basiert auf homogenisierten Daten der Meteo-Schweiz (BEGERT et al. 2005), die Diagramme für den Sommer sind aufdatiert aus SCHÄR et al. (2004).

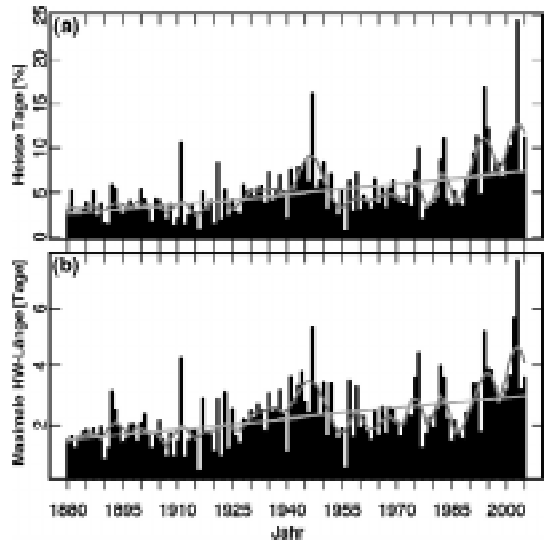


Abb. 1.4-3: Trends von Hitzewellen an 54 homogenisierten Stationen Westeuropas im Zeitraum 1880–2005. (a) Trend heißer Tage und (b) Trend der maximalen Länge von Hitzewellen. Die graue Gerade zeigt den langfristigen Trend, die graue Kurve zeigt die dekadische Variabilität (aus DELLA-MARTA et al. 2007).

°C (Verschiebung der statistischen Verteilung nach rechts) und beinahe eine Verdoppelung der interannuellen Variabilität (Verbreiterung der Verteilung). Als Folge davon ist die Häufigkeit von extrem warmen Sommertemperaturen im Szenario-Zeitraum massiv höher, so dass die extremen Bedingungen des Sommers 2003 etwa jedes zweite Jahr zu erwarten sind. Infolge der Variabilitätszunahme sind selbst extrem hohe mittlere Sommertemperaturen von über 25 °C denkbar.

Da Hitzewellen oft nur eine kurze Dauer von einigen wenigen Tagen aufweisen, ist eine weitergehende Analyse mit täglichen Daten notwendig. Die erwartete Änderung der Maximaltemperaturen (Abb. 1.4-5a) zeigt die größte Amplitude im Mittelmeerraum (mit einer Erwärmung von zum Teil über 6 °C). Die mittlere Länge der Hitzewellen nimmt deutlich zu (Abb. 1.4-5b), zum Teil um bis zu 20 Tage, was einer Vervielfachung ihrer heutigen Länge von 2–4 Tagen entspricht (vgl. mit Abb. 1.4-3b).

### Kopplung mit dem Wasserkreislauf

Es ist von zentraler Bedeutung, dass die Erwärmung mit dem Wasserkreislauf gekoppelt ist. Die Verdunstung (von der Erdoberfläche und durch die Vegetation) hat einen

wichtigen kühlenden Effekt auf das bodennahe Sommerklima. Veränderungen der hydrologischen Wasserspeicherung (in der Form von Boden- und Grundwasser) haben dementsprechend einen wichtigen Einfluss auf die Sommertemperaturen: Trockene Sommer sind meist auch heiße Sommer (SCHÄR et al. 2004). Untersuchungen mit Klimamodellen zeigen, dass der Grundstein zu vergangenen sommerlichen Hitzewellen oft durch ein Niederschlagsdefizit im Frühjahr gelegt wurde (FISCHER et al. 2007), und dass die Wechselwirkungen zwischen Boden und Atmosphäre die Szenarien entscheidend beeinflusst (SENEVIRATNE et al. 2006).

Im Kontext der Klimaänderung spielt die erwartete Intensivierung des globalen Wasserkreislaufes eine wichtige Rolle. Darunter versteht man eine Zunahme des global gemittelten Wasserdampfgehalts (um circa 7% pro °C globale Erwärmung) und eine Zunahme der global gemittelten Verdunstungs- und Niederschlagstätigkeit (um 1–3%/°C, siehe ALLEN & INGRAM 2002). Diese globale Intensivierung wird durch theoretische Untersuchungen, Beobachtungen und Klimamodelle übereinstimmend gestützt. Bei der Beschreibung der regionalen Veränderungen gibt es jedoch noch beträchtliche Unsicherheiten.

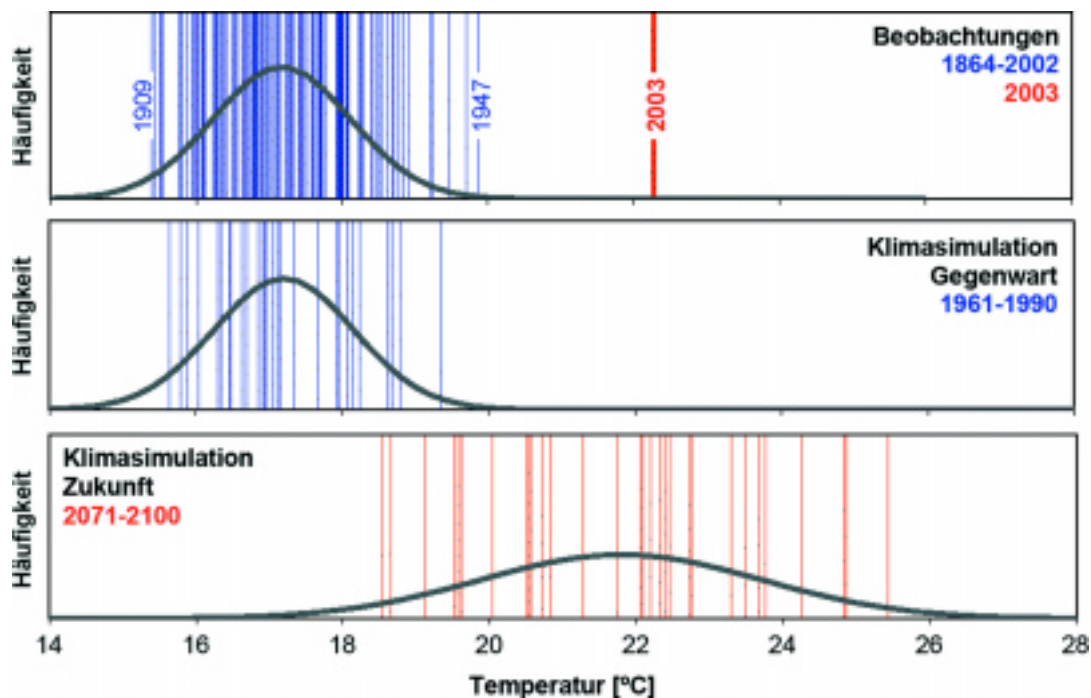
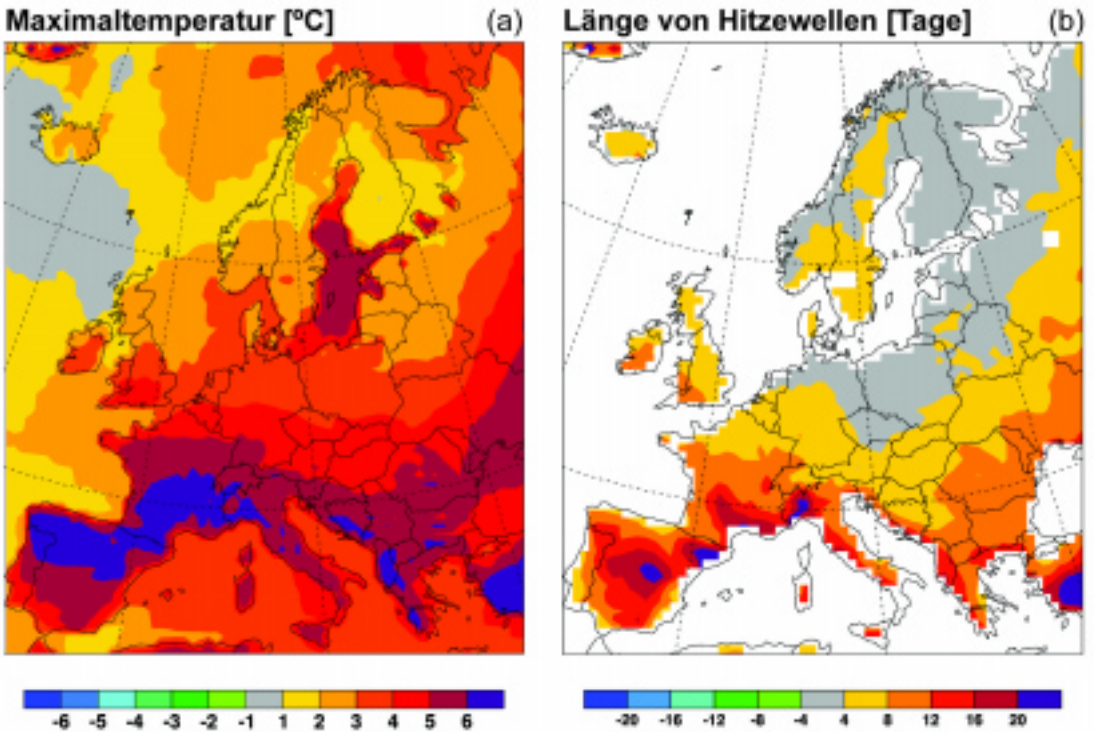


Abb. 1.4-4: Sommertemperaturen (Juni–August) im Schweizer Mittelland gemäss Beobachtungen (oben) und Klimasimulationen für gegenwärtige (1961–1990, Mitte) und zukünftige Klimabedingungen (2071–2100, unten). Die Verbreiterung der statistischen Verteilung im zukünftigen Klima zeigt die starke Zunahme der Jahr-zu-Jahr Variabilität. Die beobachteten Temperaturen des Hitzesommers 2003 sind extrem im Vergleich mit vergangenen Beobachtungen, aber solche Bedingungen werden bis zum Ende des Jahrhunderts etwa jedes zweite Jahr auftreten. Das gezeigte Szenario basiert auf einem SRES A2 Treibhausgasszenario (Ergänzt aus SCHÄR et al. 2004).



**Abb. 1.4-5:** Szenarios für die Periode 2071–2100 relativ zur Kontrollperiode 1961–1990 für Hitzwellen Parameter: (a) erwartete Erwärmung der durchschnittlichen täglichen Maximaltemperaturen (°C), (b) Zunahme der durchschnittlichen Länge der Hitzwellen (Tage). Die Rechnungen basieren auf demselben Szenario wie *Abb. 1.4-4* (aus FISCHER 2007).

Die Intensivierung des Wasserkreislaufes verursacht im Mittel sowohl eine Zunahme von intensiven Niederschlägen, als auch eine Zunahme von Dürren. In vielen Regionen wird erwartet, dass sowohl die trockenen als auch die feuchten Extreme deutlich zunehmen werden (s. *Abb. 1.4-6*). Auch die vorhergesagte Zunahme der sommerlichen Variabilität unterstützt eine solche Hypothese (*Abb. 1.4-4*). Kürzliche Analysen von Temperaturreihen haben bestätigt, dass eine Variabilitätszunahme in den sommerlichen Temperaturen der Vergangenheit nachweisbar ist, mit einem geographischen Muster welches mit den Szenarien konsistent ist (DELLA-MARTA et al. 2007). Klimamodelle prognostizieren im Weiteren, dass das europäische Sommerklima trockener wird, aber die kurzzeitigen Niederschlagsspitzen trotzdem zunehmen könnten (CHRISTENSEN & CHRISTENSEN 2002, FREI et al. 2006).

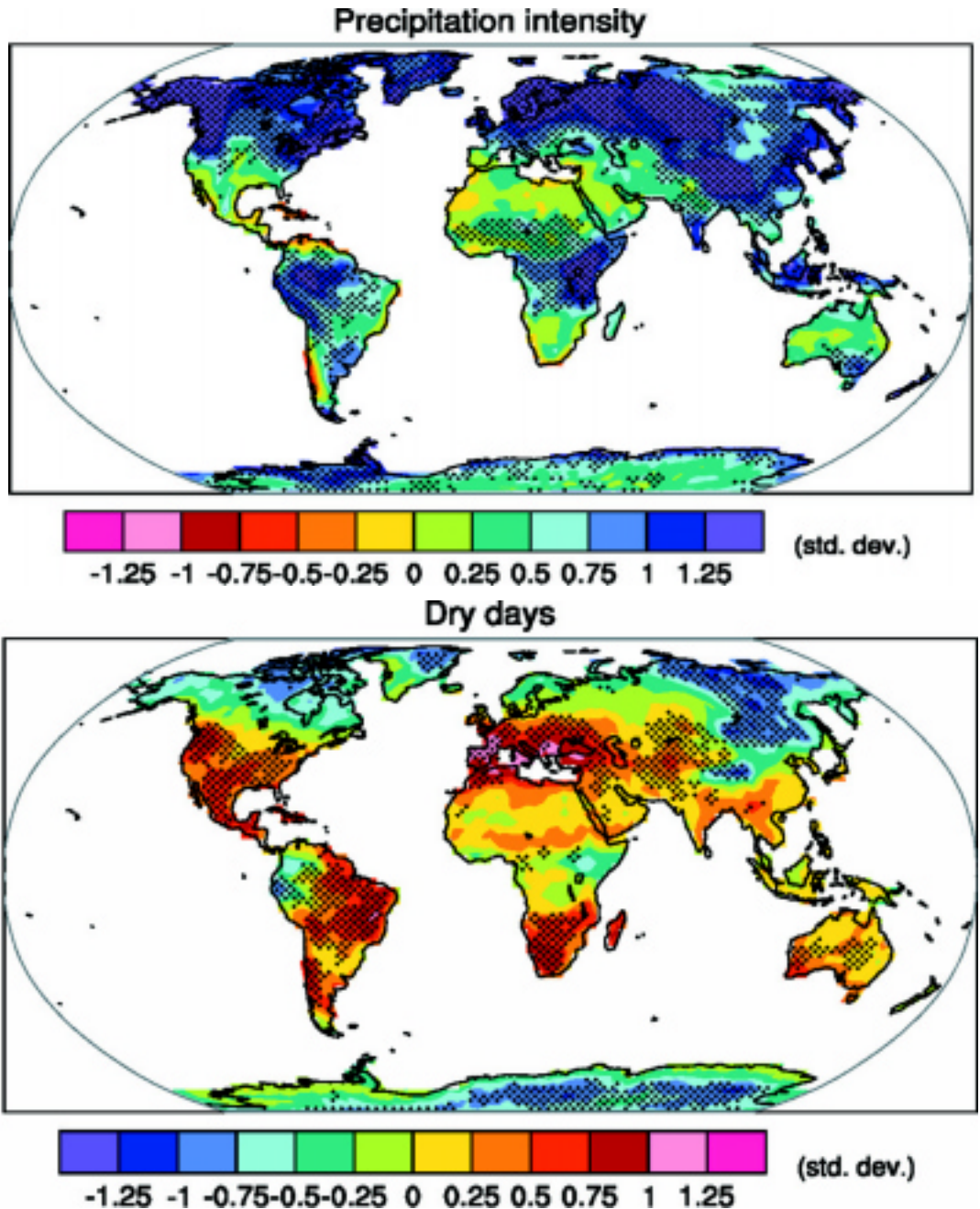
### Ausblick

Der anthropogene Klimawandel wird die Lebensbedingungen in Europa auf vielerlei Art und Weise verändern. Besonders beunruhigend sind die für den Sommer erwarteten Änderungen. Im Gegensatz zu den anderen Jah-

reszeiten werden Temperaturen vorhergesagt, welche ausserhalb unseres gegenwärtigen Erfahrungsbereichs liegen. Insgesamt unterscheidet sich das durch Klimamodelle simulierte Sommerklima Europas fundamental von demjenigen der Gegenwart und Vergangenheit: Mittlere Temperaturen im Bereich des Hitzesommers 2003, eine gegenüber dem jetzigen Klima möglicherweise stark erhöhte Variabilität, eine mittlere Abnahme der Niederschlagsmengen, eine Zunahme der Spitzenniederschläge und eine Zunahme der Dauer, Intensität und Häufigkeit schwerer Hitzewellen.

Der Hitzesommer 2003 hat aufgezeigt, dass solche Klimazustände ernsthafte Konsequenzen haben, selbst wenn sie nur einmalig auftreten. Sollten entsprechende Bedingungen zur Regel werden, wie gemäß der vorliegenden Klimasimulationen zu erwarten ist, so sind die längerfristigen Konsequenzen noch weitgehend unklar. Es ist zum Beispiel sehr schwierig zu beurteilen, wie die Grundwasservorkommen und die Vegetation auf ein solches Klima reagieren werden.

Nebst Maßnahmen im Bereich der Mitigation (Minderung des Klimawandels), sind auch Maßnahmen im Bereich der Adaptation (Anpassung an den Klimawandel)



**Abb. 1.4-6:** Erwartete Veränderung der Häufigkeit von intensiven Niederschlägen (*oben*) und Trockentagen (*unten*) für die Zeitperiode 2080–2099 relativ zu 1980–1999 basierend auf 9 globalen Klimamodellen unter Verwendung eines Treibhausgasszenarios (SRES A1B). Die dargestellten Veränderungen sind normiert mit der Standardabweichung der natürlichen Variabilität innerhalb der Kontroll-Periode. Gepunktete Flächen kennzeichnen Regionen mit statistischer Signifikanz. (Basierend auf [TEBALDI et al. 2006](#), Nachdruck aus [IPCC 2007](#)).

notwendig. Erste Schritte in diese Richtung sind in den letzten Jahren bereits getroffen worden. Als unmittelbare Reaktion auf den Sommer 2003 wurde in vielen Ländern

Europas Hitzewarnsysteme eingeführt, welche die Folgen zukünftiger Hitzewellen durch frühzeitige Maßnahmen mindern soll.