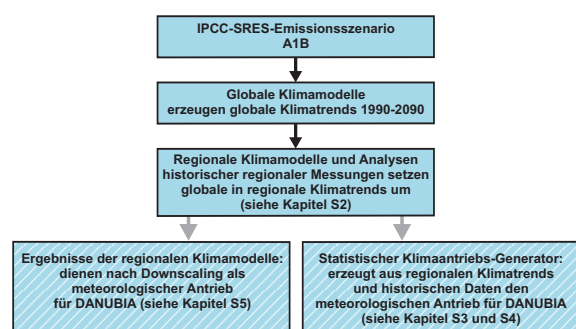


## S2 Die GLOWA-Danube Klimatrends

Die zeitliche Veränderung wichtiger Klimaelemente kann durch Trends beschrieben werden. Dies gilt sowohl für die beobachtete Vergangenheit als auch für mögliche zukünftige Entwicklungen, die mit Hilfe von Klimamodellen simuliert werden. GLOWA-Danube Klimatrends werden definiert als mittlere Entwicklungen des Klimas über einen längeren Zeitraum. Klimavarianten sind hingegen im Rahmen von GLOWA-Danube die meteorologischen Antriebe, die als zeitlich wie räumlich hoch aufgelöste meteorologische Variablen in das Modellsystem DANUBIA eingehen (siehe Kapitel S4).

Globale, zukünftige Klimatrends werden schon seit geraumer Zeit und in großer Fülle sowohl aus den historisch bekannten Klimaänderungen als auch den Ergebnissen der Zukunftssimulationen mit einer Vielzahl von globalen Klimamodellen abgeleitet. Sie sind in den Berichten des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) der Vereinten Nationen zusammengefasst und aufbereitet (IPCC, 2001 und IPCC, 2007). Die Zukunftssimulationen der globalen Klimamodelle erstrecken sich dabei meist auf einen Zeitraum von 1990 bis 2100 und sind ihrerseits in ihren Resultaten bestimmt von globalen Emissionsszenarien, die im Special Report on Emission Scenarios des IPCC (IPCC, 2000, kurz SRES) dokumentiert sind und beschreiben, wie sich die Konzentrationen der klimawirksamen Treibhausgase in der Zukunft weltweit entwickeln könnten. Das IPCC (2007) gibt einen guten Überblick über die den Modellrechnungen zugrunde liegenden Emissionsszenarien und die globalen wie kontinentalen Klimaverläufe, die die globalen Klimamodelle auf der Grundlage dieser Emissionsszenarien simuliert haben. Da die Simulationen der globalen Klimamodelle mit einer groben Auflösung von i.d.R. größer als  $100 \times 100 \text{ km}^2$  durchgeführt werden, können bei den Berechnungen notgedrungen viele regional bedeutende Details nicht berücksichtigt werden. So liegt die topographische Höhe der Rasterzelle südlich von München in den globalen Klimamodellen bei ca. 1200 m ü.NN. Das entspricht in etwa der Höhe eines deutschen Mittelgebirges. Dementsprechend ist nicht zu erwarten, dass vor allem in Regionen mit starkem Reliefeinfluss die regionalen Trends in der Klimaentwicklung von den globalen Klimamodellen detailliert und richtig wiedergegeben werden können. Aus diesem Grund ist es für alle Fragestellungen der regionalen Klimafolgenforschung notwendig, Methoden zu entwickeln, die es erlauben, aus den globalen Klimatrends regionale Klimatrends abzuleiten. Die dazu in GLOWA-Danube entwickelte Methodik ist schematisch in Abbildung S2.1 dargestellt und hat das Ziel, räumlich und zeitlich hoch aufgelöste meteorologische Eingaben für DANUBIA zu erstellen.



**Abbildung S2.1: Schematische Darstellung der in diesem Kapitel beschriebenen Vorgehensweisen zur Ableitung zukünftiger regionaler Klimatrends. Die nachfolgende Umsetzung in meteorologische Antriebe für DANUBIA ist Inhalt der Kapitel S3, S4 und S5 und deshalb schraffiert dargestellt.**

Die Erstellung eines regionalen Klimatrends besteht nach Abbildung S2.1 aus drei Schritten:

1. Wahl eines Emissionsszenarios, das Aussagen über eine mögliche Veränderung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre macht.
2. Umsetzung des Emissionsszenarios in einen globalen Klimatrend mit Hilfe der globalen Klimamodelle.
3. Umsetzung des Ergebnisses des globalen Klimamodells in einen regionalen Klimatrend für das Einzugsgebiet der Oberen Donau.

## 1. Wahl des Emissionsszenarios

Hierfür wurden die insgesamt 12 IPCC-SRES-Emissionsszenarien untersucht. Abbildung S2.2

zeigt den aus den Annahmen der globalen Emissionsszenarien des IPCC erwarteten Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und Temperaturen im Zeitraum von 1990 bis 2100 für die unterschiedlichen Emissionsszenarien.

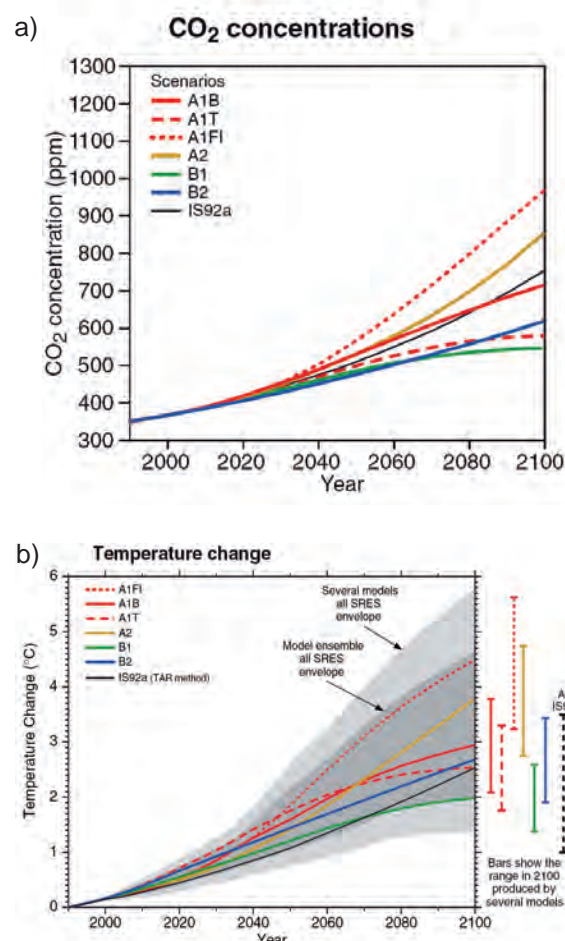


Abbildung S2.2a) Projizierter Anstieg der globalen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentration in sechs verschiedenen SRES-Szenarien; b) daraus resultierender Anstieg der globalen Mitteltemperatur (Auszug aus IPCC, 2001, Summary for Policymakers, p.14, fig.5).

Nach Abbildung S2.2a bewegen sich die  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen in der Zukunft als Resultat unterschiedlicher Annahmen über die zukünftigen  $\text{CO}_2$ -Emissionen ab etwa 2025 auseinander. Sie stabilisieren sich im günstigsten Fall bis zum Jahr 2100 bei ca. 500 ppm (Szenario B 1) oder steigen ohne erkennbare Verlangsamung auf knapp 1000 ppm (Szenario A1FI). Nach eingehender projektinterner Diskussion wurde für die weitere Entwicklung der GLOWA-Danube Szenarien entschieden, das IPCC-SRES-A1B Emissionsszenario zugrunde zu legen. Das für GLOWA-Danube gewählte A1B-Emissionsszenario beschreibt einen Mittelweg, der zu einer Verlangsamung des Anstiegs der  $\text{CO}_2$ -Konzentration und einer  $\text{CO}_2$ -Konzentration von ca. 700 ppm im Jahr 2100 führt. Seine Annahmen sind ausführlich in IPCC (2000) beschrieben.

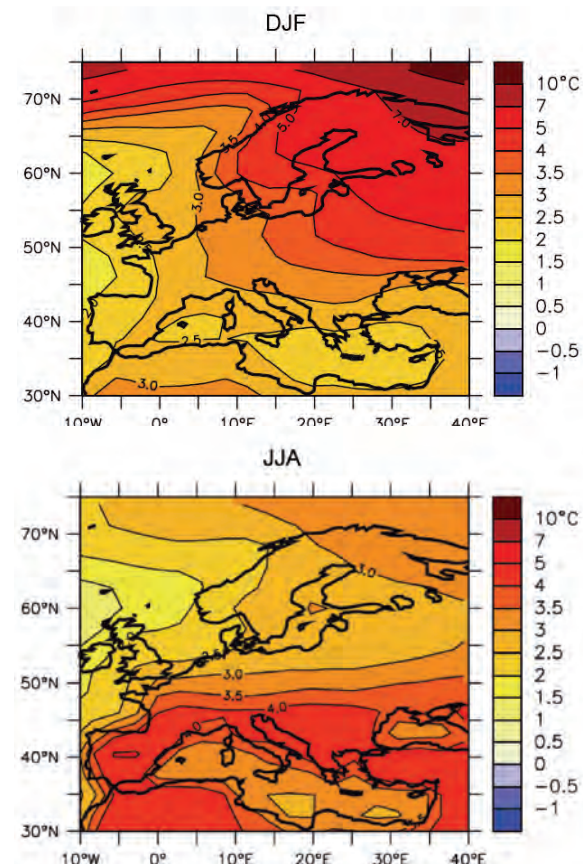
## 2. Umsetzung des globalen Emissionsszenarios in einen globalen Klimatrend

## 2.1 Ergebnisse des Intergovernmental Panels on Climate Change IPCC

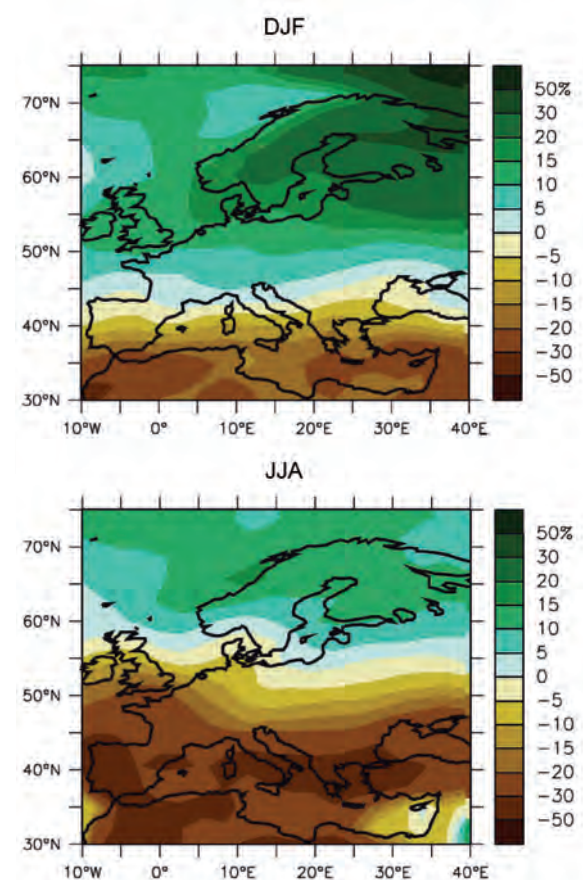
Hierzu wurden die von IPCC 2007 veröffentlichten Ergebnisse eines Vergleichs von 21 unterschiedlichen globalen Klimamodellen, die alle mit dem IPCC-SRES-A1B Emissionsszenario von 1990 bis 2100 betrieben wurden, herangezogen. Sie sind in den Abbildungen S2.3 bis S2.5 dargestellt.

Aus Abbildung S2.3 ist zu entnehmen, dass die globalen Klimamodelle für das Einzugsgebiet der Oberen Donau sowohl für die Winter- als auch für die Sommermonate einen Temperaturanstieg von ca. 3.3°C zwischen den beiden Vergleichszeiträumen 1980 bis 1999 und 2080 bis 2099 prognostizieren.

Abbildung S2.4 zeigt die prozentuale Veränderung des Niederschlags in Europa zwischen den beiden Vergleichszeiträumen 1980 bis 1999 und 2080 bis 2099 aufgrund des im IPCC-SRES-A1B Emissionsszenario vorgegebenen globalen Emissionsszenarios für die Sommer- und Wintermonate als Mittelwert der Simulationsergebnisse von 21 globalen Klimamodellen. Für das Einzugsgebiet der Oberen Donau ergibt sich ein uneinheitliches Bild. Im Sommer ist eine mittlere Abnahme der Niederschläge um ca. 14% zu verzeichnen, wohingegen die Prognosen der Modelle für die Wintermonate im Mittel einen leichten



**Abbildung S2.3: Anstieg der Mitteltemperatur in Europa aufgrund des IPCC-SRES-A1B Szenarios als Mittelwert aus 21 globalen Klimamodellen zwischen den beiden Vergleichszeiträumen 1980 bis 1999 und 2080 bis 2099; oben: Dezember-Januar-Februar, unten: Juni-Juli-August (Auszug aus IPCC, 2007, fig.11.5, p.875).**



**Abbildung S2.4:** Prozentuale Veränderung des Niederschlags in Europa aufgrund des IPCC-SRES-A1B Szenarios als Mittelwert aus 21 globalen Klimamodellen zwischen den beiden Vergleichszeiträumen 1980 bis 1999 und 2080 bis 2099; oben: Dezember-Januar-Februar, unten: Juni-Juli-August (Auszug aus IPCC, 2007, fig.11.5, p.875).

Anstieg des Niederschlags um ca. 7% ergeben. Abbildung S2.5 gibt einen Eindruck über die Unsicherheiten in den Aussagen über das Klimaänderungssignal des Niederschlags. Aufgezeigt ist für jeden Gitterpunkt die Anzahl derjenigen Modelle, die eine Erhöhung des Niederschlags prognostizieren. In Skandinavien stimmen fast alle Modelle darin überein, dass der Niederschlag im Sommer wie im Winter zunehmen sollte. In Nordafrika stimmen fast alle Modelle darin überein, dass er nicht zunimmt. Das Einzugsgebiet der Oberen Donau liegt am Rande eines Gürtels, der sich von West nach Ost zieht, in dem die Aussagen der globalen Klimamodelle sich hinsichtlich des Niederschlags maximal widersprechen. Für das Einzugsgebiet der Oberen Donau stimmt die Mehrheit der beteiligten Klimamodelle darin überein, dass zukünftig die Winter feuchter und die Sommer trockener werden. Es gibt aber für beide Aussagen widersprüchliche Modellresultate, was belegt, dass Aussagen zur Entwicklung der Niederschläge gegenüber dem Mittelmeerraum und



Skandinavien mit leicht erhöhten Unsicherheiten behaftet sind.

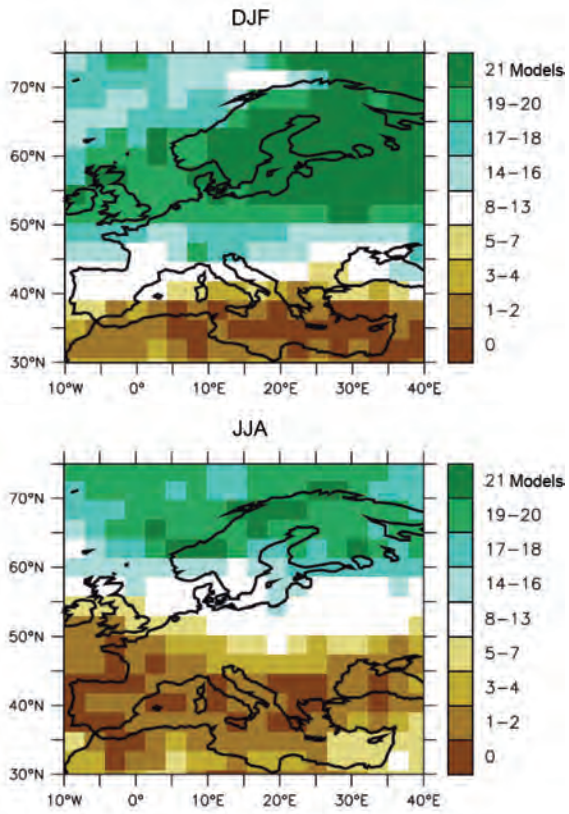


Abbildung S2.5: Unsicherheit der Aussagen von Abbildung S2.4. Angegeben ist die Anzahl der Modelle, die eine Erhöhung des Niederschlags zwischen den beiden Vergleichszeiträumen 1980 bis 1999 und 2080 bis 2099 prognostizieren; oben: Dezember-Januar-Februar, unten: Juni-Juli-August (Auszug aus IPCC, 2007, fig.11.5, p.875).

2.2 Die globalen Grundlagen für die regionalen Klimamodelle REMO und MM5

Beide im GLOWA-Danube Projekt benutzten regionalen Klimamodelle wurden in der ersten Nestungsstufe mit dem gleichen globalen Datensatz angetrieben. Dabei wurde als Antrieb für die Simulation des Jetztzeit- und des möglichen Zukunftsklimas der Regionalmodelle eine vom gekoppelten Atmosphären-Ozean-Zirkulationsmodell ECHAM5-MPIOM berechnete globale Simulation verwendet, die am Max-Planck-Institut für Meteorologie erstellt wurde. Dem globalen Modell liegen für den vergangenen Zeitraum (1950-2000) tatsächliche beobachtete Treibhausgaskonzentrationen vor, für den zukünftigen Zeitraum (2001-2100) wurden aber die Treibhausgasveränderungen verwendet, die vom IPCC als Emissionsszenarien postuliert wurden. Für die IPCC-Szenarien A1B, B1 und A2 wurden mit dem globalen Modell jeweils drei Realisationen gerechnet. Für GLOWA-Danube wurde ausschließlich die erste Realisation des SRES-Szenarios A1B verwendet (Member 1). Das Gitterpunktmodell ECHAM5-MPIOM hat eine Gitterpunktauflösung von ungefähr 180 km – es ist aber hinsichtlich der berechneten Ergebnisse, wie jedes Gitterpunktmodell, nicht gitterpunktgenau. Für regionale Betrachtungen sollte stets ein Mittel über mehrere Gitterboxen gewählt werden. Für die hier gezeigten Auswertungen der ECHAM5-Daten wurde ein Mittel über 5 x 5 Gitterboxen gewählt, wobei das Einzugsgebiet Obere Donau im Zentrum der 25 Gitterboxen liegt.

Abbildung S2.6 zeigt die Abweichung der Jahresmitteltemperatur zum langjährigen Mittel der Periode 1971-2000 bzw. die relative Änderung des jährlichen Niederschlags zum langjährigen Mittel des gleichen Zeitraums für das 900 km x 900 km umfassende Gebiet um das Einzugsgebiet der Oberen Donau nach Berechnungen vom ECHAM5-MPIOM.

3. Umsetzung der Aussagen der globalen Klimamodelle auf das Einzugsgebiet der Oberen Donau

3.1 Die regionalen Klimatrends von IPCC und aus ECHAM5-MPIOM

Aus den Abbildungen S2.4 und S2.5 wurden die unter der Annahme des IPCC-SRES Szenarios A1B zu erwartenden Klimaänderungen für Temperatur und Niederschlag für die Obere Donau herausgelesen. Es ergeben sich für die Winter- und Sommermonate mittlere Temperatur- und Niederschlagsänderungen, die als erste „regionale“ Trends aufgefasst werden und in der Tabelle S2.4 unter dem Klimatrend IPCC regional aufgeführt sind.

Die Werte des GLOWA-Danube Klimatrends IPCC regional bestehen aus der Mittelung der Ergebnisse von 21 globalen Modellen, zu denen auch ECHAM5-MPIOM gehört. Exemplarisch und weil ECHAM5 als Antrieb für die regionalen Modelle verwendet wird, ist der Trend auch direkt aus ECHAM5-Daten ermittelt worden. Der Klimatrend IPCC regional wurde aus der Differenz zweier mittlerer Zustände der Zeiträume 2080-2099 und 1980-1999 berechnet und der Trend als linearer Verlauf vorausgesetzt. Für ECHAM5 hingegen wurde der Trend als mittlerer Anstieg über den Zeitraum 1990-2100 berechnet. Er ist in der Tabelle S2.1 angegeben.

	Temperaturtrend ECHAM5 1990-2100 [°C]	Rel. Niederschlagstrend ECHAM5 1990-2100 [%]
DJF	+6.4	+12.8
MAM	+3.3	+3.5
JJA	+5.5	-34.1
SON	+5.0	-1.1
Jahresmittel	+5.0	-3.6

Tabelle S2.1: regionaler Klimatrend über 25 Gitterboxen um das Einzugsgebiet der Oberen Donau aus Ergebnissen des globalen Klimamodells ECHAM5 für den Zeitraum 1990-2100.

3.2 Temperatur- und Niederschlagstrends im Einzugsgebiet der Oberen Donau ausgewertet aus REMO-Simulationen

Abbildung S2.5 zeigt die Unsicherheiten der projizierten Niederschlagsänderungen, die aus den globalen Modellen ermittelt wurden. Es macht deutlich, dass der für GLOWA-Danube ermittelte Klimatrend IPCC regional nur als erste grobe Abschätzung angesehen werden darf. Insbesondere wird das regionale Klima im Bereich der Oberen Donau von der Nähe zu den Alpen beeinflusst, was in den größer aufgelösten globalen Modellen nicht adäquat berücksichtigt wird. Aus diesem Grund müssen genauere Berechnungen zur regionalen Klimaänderung verwendet werden. Dazu wurde zunächst eine Analyse der Ergebnisse der regionalen Klimasimulationen, die das Umweltbundesamt (UBA) beim Max-Planck-Institut für Meteorologie für Deutschland in Auftrag gab und die 2008 veröffentlicht wurden (Jacob et. al, 2008), durchgeführt. In der Studie wurden unter anderem die Annahmen des IPCC-SRES-A1B Emissionsszenarios und das regionale Klimamodell REMO (Jacob, 2001) genutzt, um die Klimaentwicklung in Mitteleuropa in einer Auflösung von ~10 km zu simulieren. Die sich im Rahmen dieser Studie für das Einzugsgebiet der Oberen Donau ergebenden Trends für Temperatur und Niederschlag sind in Tabelle S2.2 für den Zeitraum 1990 bis 2100 zusammengefasst.

3.3 Regionale Klimatrends berechnet mit dem regionalen Klimamodell MM5

Ähnliche Klimasimulationen wie für das UBA wurden von der Gruppe Meteorologie innerhalb von GLOWA-Danube durchgeführt. Dabei wurde da-

	Temperaturtrend REMO 1990-2100 [°C]	Rel. Niederschlagstrend REMO 1990-2100 [%]
DJF	+6.8	-4.9
MAM	+3.7	+9.1
JJA	+5.3	-31.4
SON	+5.1	-14.5
Jahresmittel	+5.2	-12.6

Tabelle S2.2: regionaler Klimatrend im Einzugsgebiet der Oberen Donau aus Ergebnissen der UBA-Studie mit dem regionalen Klimamodell REMO für den Zeitraum 1990-2100.

rauf geachtet, die der regionalen Klimamodellierung zugrunde liegenden Rahmenbedingungen ähnlich zu gestalten wie in der UBA Studie, und denselben ECHAM5-Antrieb mit demselben IPCC-A1B Emissionsszenario zu verwenden. Im Gegensatz zu den Studien des Max-Planck-Institutes in Hamburg wurde in GLOWA-Danube das regionale Klimamodell MM5 verwendet. Die entsprechenden Ergebnisse der MM5-Simulationen sind für den Zeitraum 1990 bis 2100 in Tabelle S2.3 dargestellt. Es zeigt sich dabei, dass beide Modelle hinsichtlich der Temperaturänderung im Einzugsgebiet zu ähnlichen Ergebnissen kommen, auch wenn das Jahresmittel der Erwärmung berechnet mit dem regionalen Klimamodell MM5 etwa 0.5°C geringer ausfällt. Unterschiede gibt es allerdings in den maximalen saisonalen Trends: ECHAM5 und REMO berechnen die stärkste saisonale Erwärmung für die Wintermonate (DJF), während mit MM5 die stärkste Erwärmung für den Sommer (JJA) projiziert wird.

	Temperaturtrend MM5 1990-2100 [°C]	Rel. Niederschlagstrend MM5 1990-2100 [%]
DJF	+5.2	+7.7
MAM	+3.2	+13.1
JJA	+5.8	-28.7
SON	+4.8	-1.0
Jahresmittel	+4.7	-3.5

Tabelle S2.3: regionaler Klimatrend im Einzugsgebiet der Oberen Donau aus Ergebnissen der regionalen Klimamodellierung mit dem Modell MM5.

Größere Unterschiede zu REMO zeigen sich in der simulierten Niederschlagsänderung. Im Vergleich der Modellergebnisse zeigt das Modell MM5 eine höhere saisonale Niederschlagszunahme im Frühling (MAM) und geringere Niederschlagsabnahmen im Sommer und Herbst (JJA und SON), was zu einer geringeren Niederschlagsabnahme im Jahresmittel führt. Für die Wintermonate (DJF) berechnen die Modelle leicht unterschiedliche Trends. Die geringere Erwärmung im Winter in MM5 ist mit einer leichten Niederschlagszunahme verbunden.

In Abbildung S2.7 ist als Vergleich zwischen den beiden Modellergebnissen die Veränderung der Klimaelemente Temperatur und Niederschlag für den Zeitraum 1971 bis 2100 für das Einzugsgebiet der Oberen Donau dargestellt. Hieraus wurden die Trends für die Zeiträume 1990-2100 berechnet, die in den Tabellen S2.2 und S2.3 gelis-

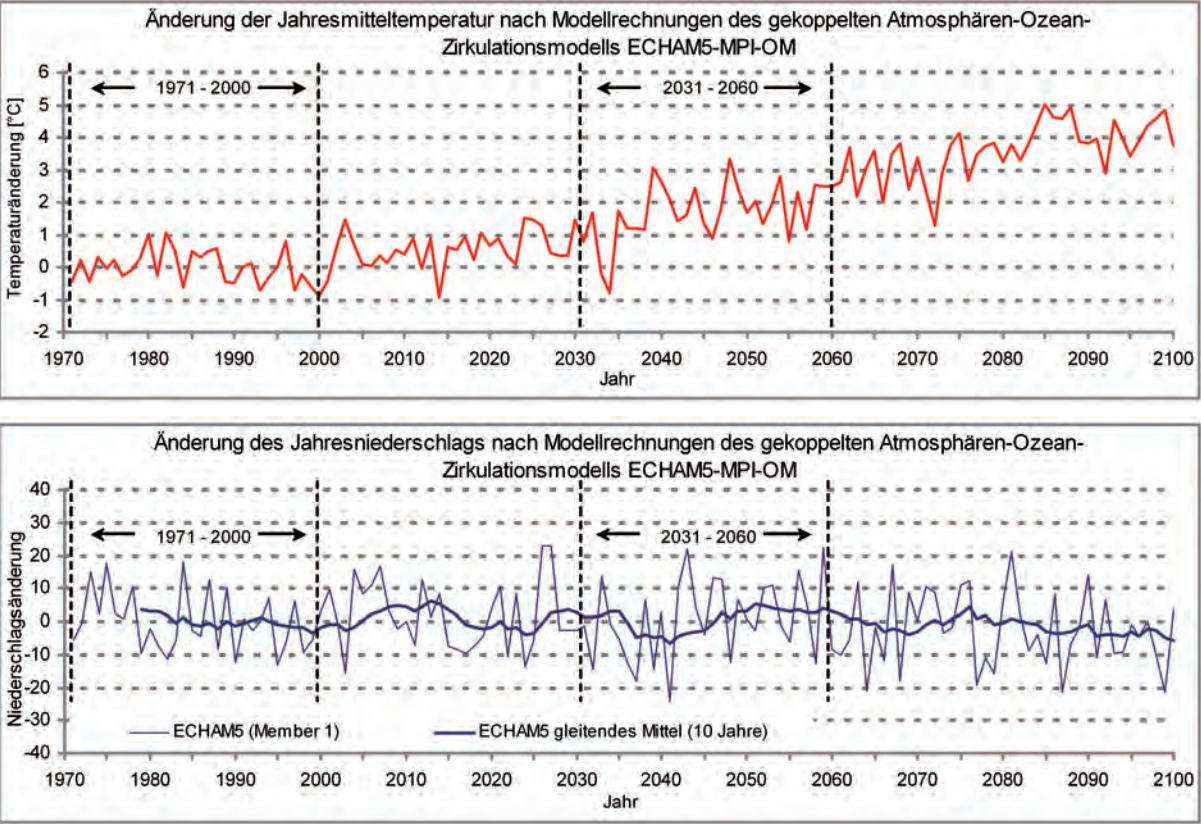
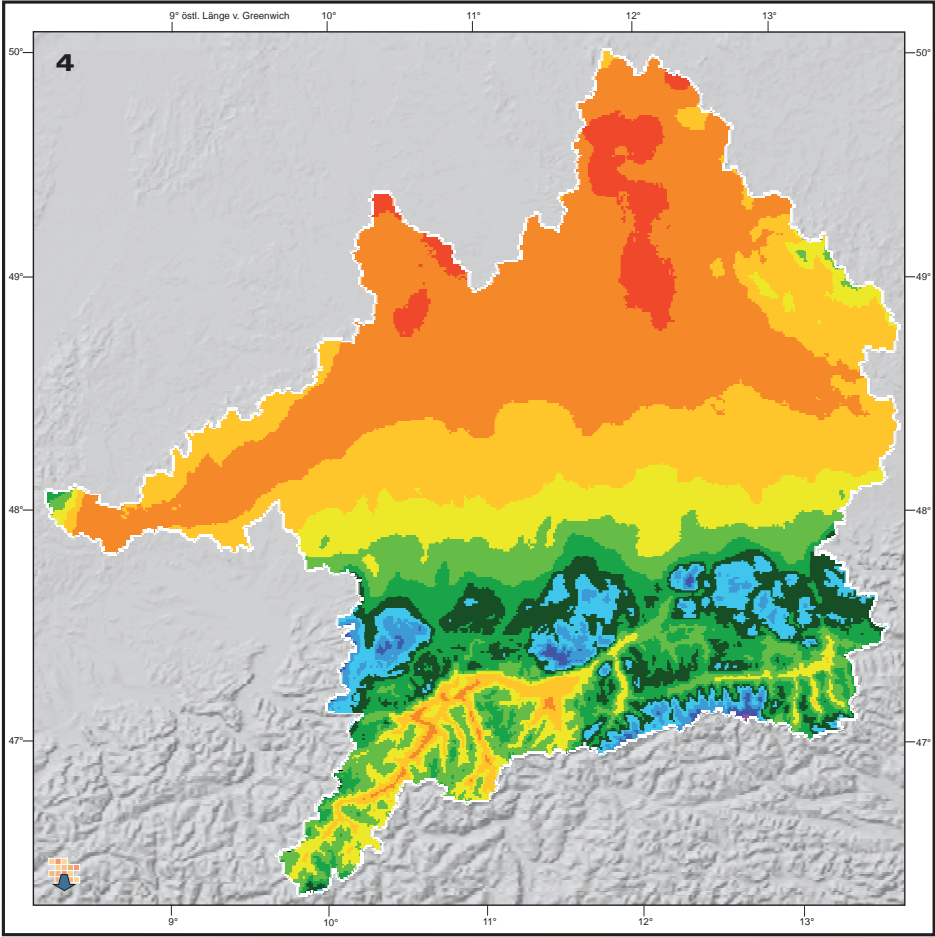
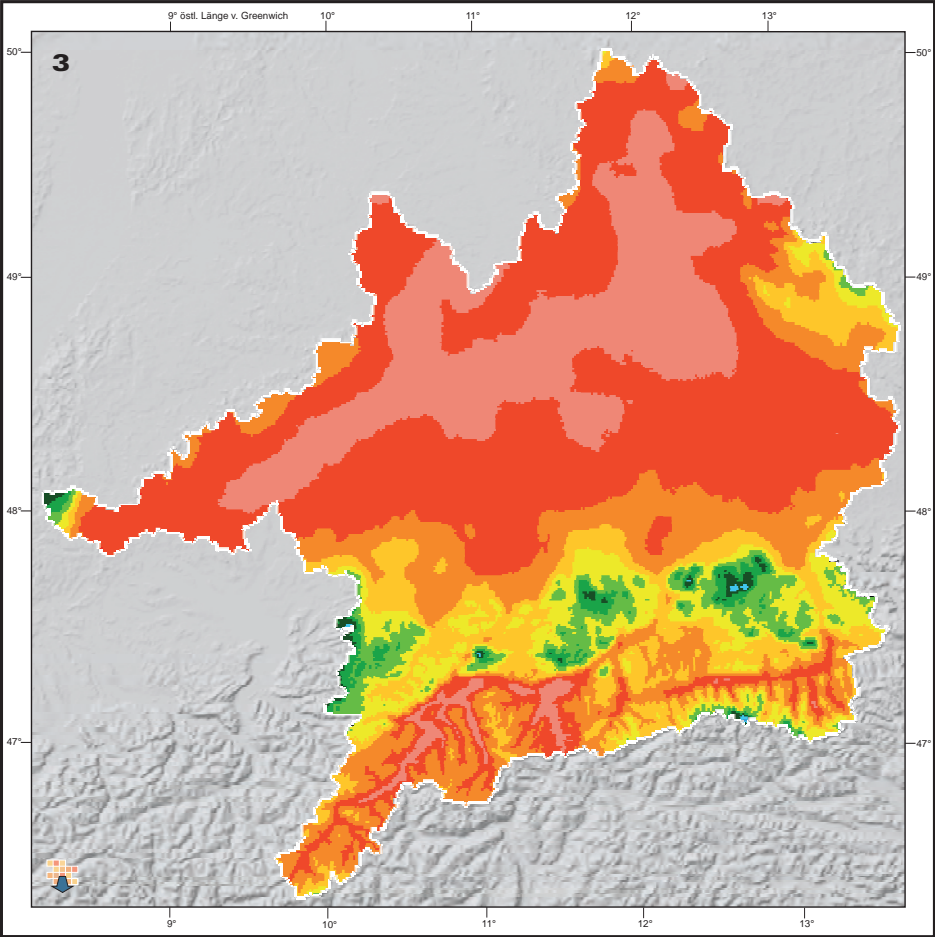
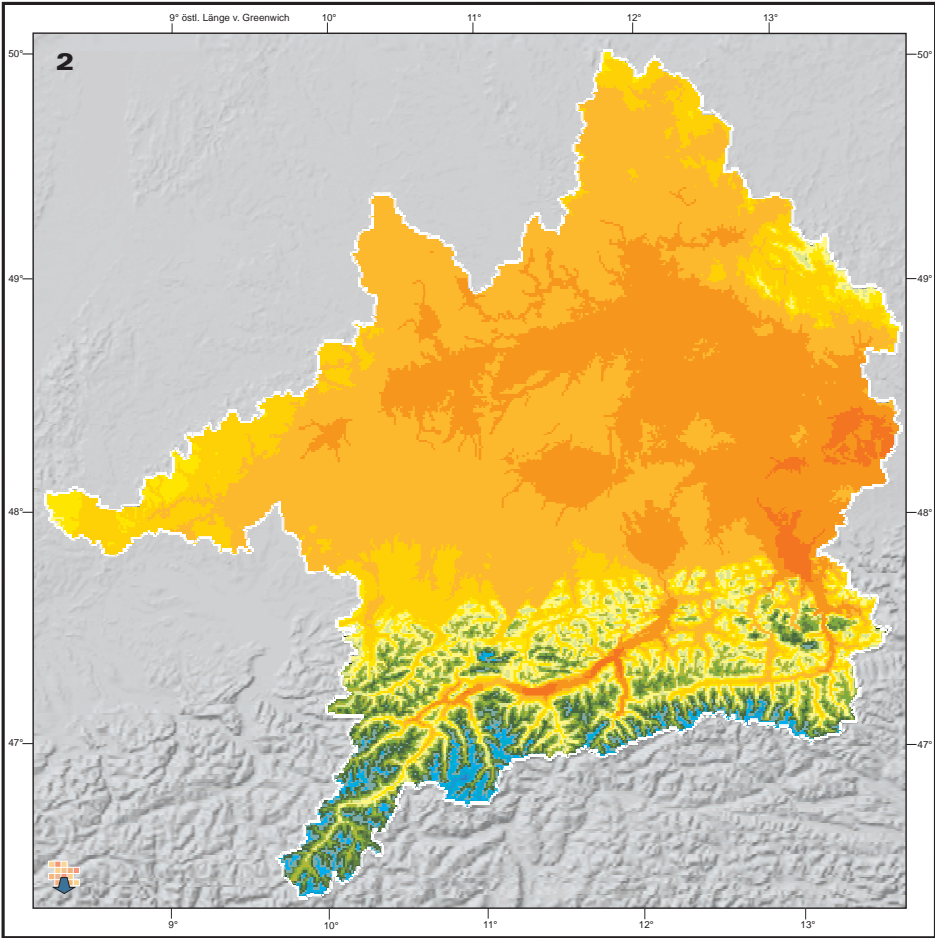
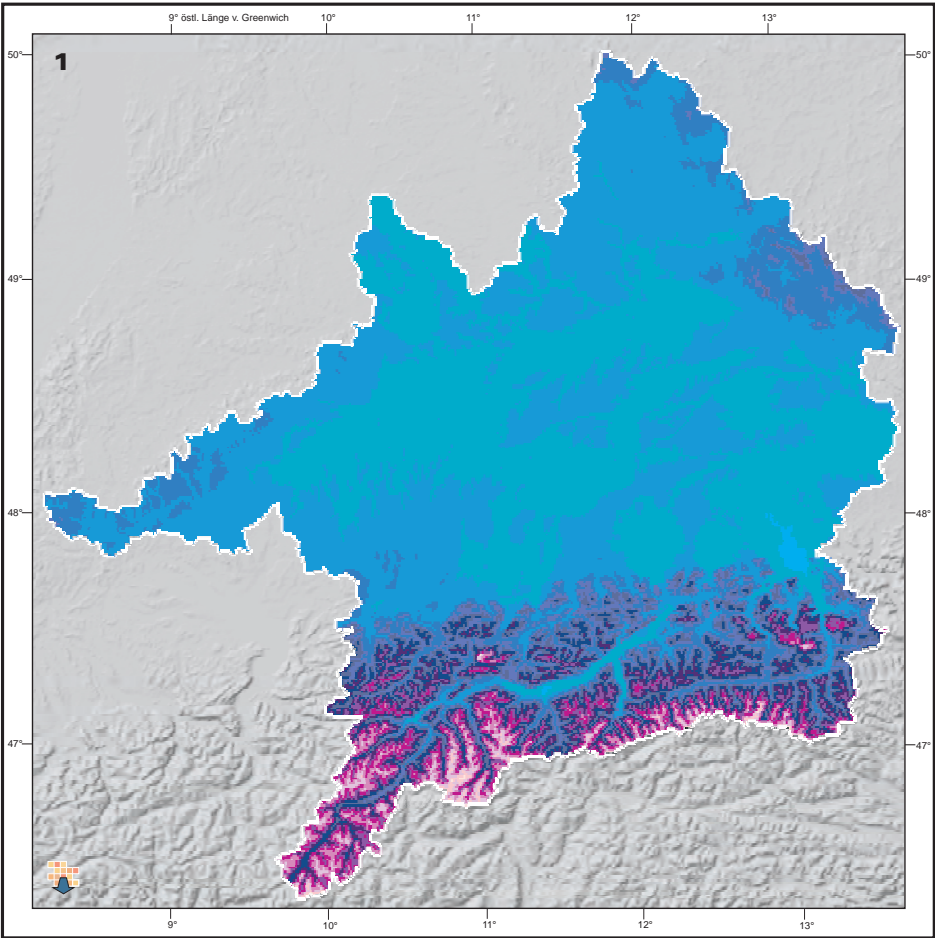


Abbildung S2.6: Entwicklung des Klimaänderungssignals von Temperatur und Niederschlag über die Jahre 1971 bis 2100 nach Berechnungen des gekoppelten Atmosphären-Ozean-Zirkulationsmodells ECHAM5-MPIOM (Member 1, 5 x 5 Pixel mit Zentrum im Einzugsgebiet der Oberen Donau).

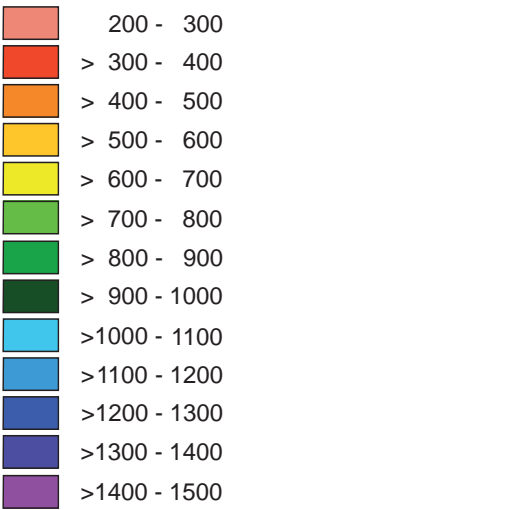




Karte 1: mittlere Wintertemperatur [°C]  
(November-April) 1971-2000  
Karte 2: mittlere Sommertemperatur [°C]  
(Mai-Oktober) 1971-2000



Karte 3: mittlerer Winterniederschlag [mm]  
(November-April) 1971-2000  
Karte 4: mittlerer Sommerniederschlag [mm]  
(Mai-Oktober) 1971-2000



GLOBAL CHANGE ATLAS  
EINZUGSGEBIET OBERE DONAU



Herausgeber:  
GLOWA-Danube-Projekt, Ludwig-Maximilians-Universität München

S2.1 Teilprojekt Koordination  
Mittelwerte von Temperatur und Nieder-  
schlag aus der Vergangenheit

Rastergröße: 1 x 1 km<sup>2</sup>  
Maßstab: 1: 3.800.000

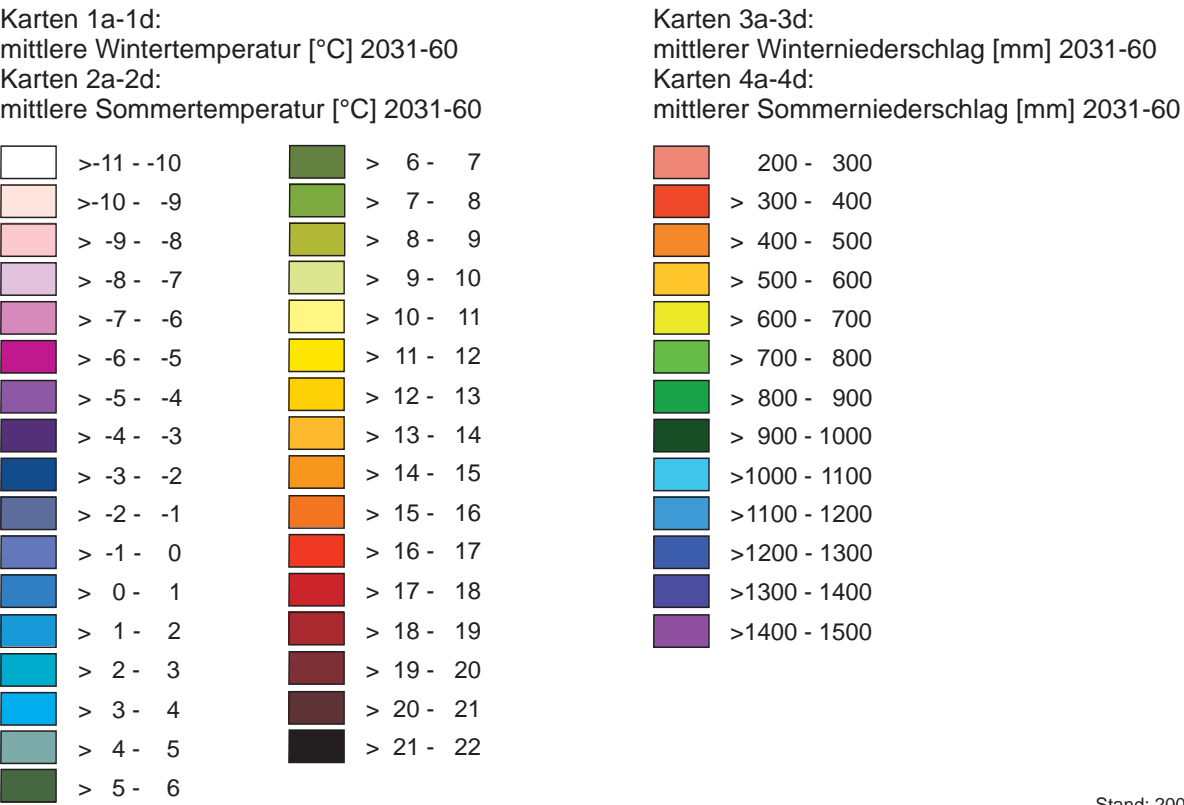
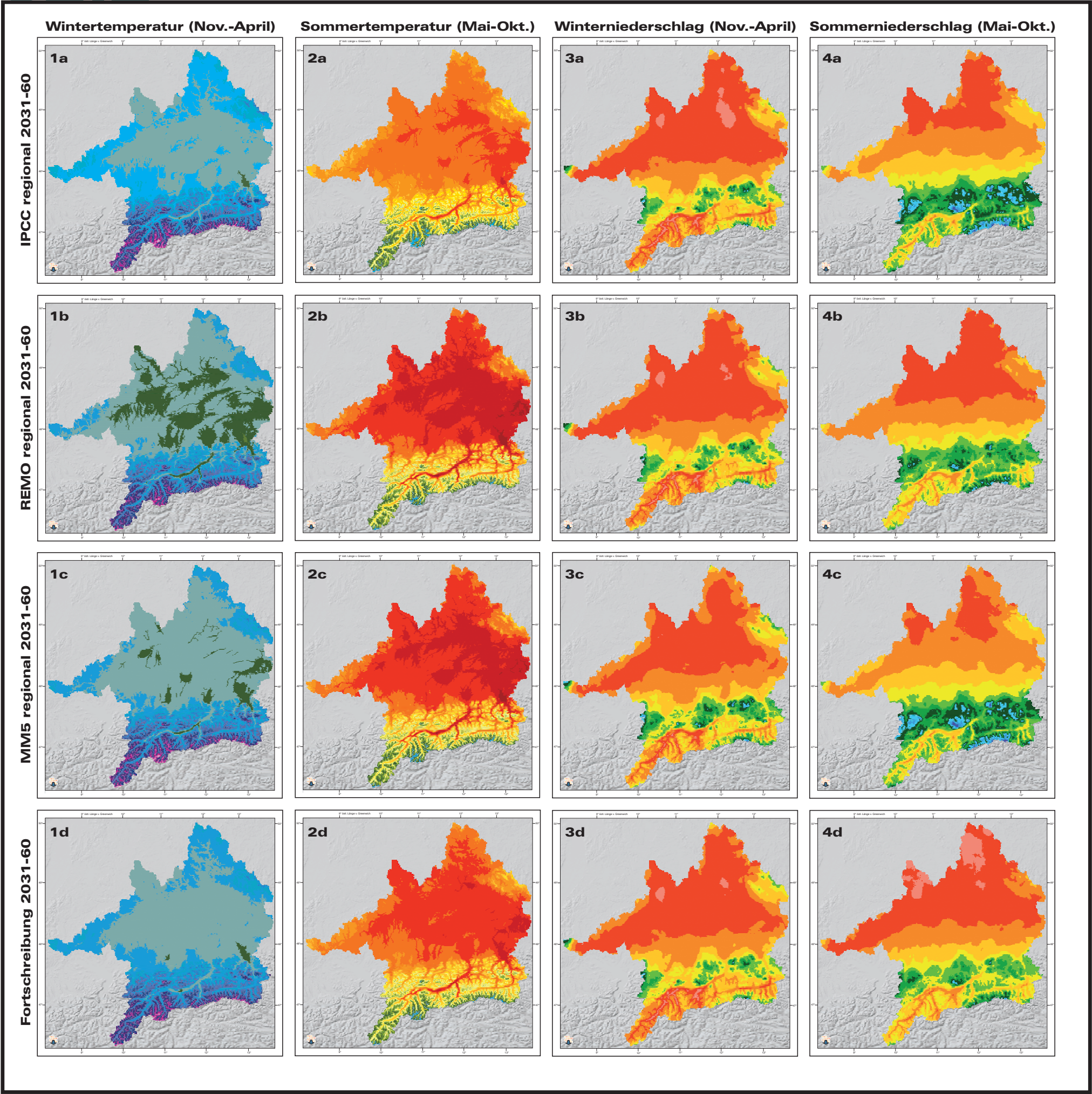


**Datengrundlage:**  
Deutscher Wetterdienst DWD, Offenbach a. Main  
ZAMG, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien  
DANUBIA-Digitales Geländemodell  
DANUBIA-Landbedeckung und Landnutzung

**Autoren:**  
W. Mauser, T. Marke, A. Reiter  
Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung,  
Ludwig-Maximilians-Universität München  
D. Jacob, S. Preuschmann  
Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg

**Grafik:**  
V. Falck  
Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung,  
Ludwig-Maximilians-Universität München





GLOBAL CHANGE ATLAS  
EINZUGSGEBIET OBERE DONAU

Herausgeber:  
GLOWA-Danube-Projekt, Ludwig-Maximilians-Universität München

S2.2 Teilprojekt Koordination  
Mittelwerte von Temperatur und Niederschlag  
in unterschiedlichen Klimatrends und der  
Klimavariante *Baseline*

Rastergröße: 1 x 1 km<sup>2</sup>  
Maßstab: 1: 7.700.000

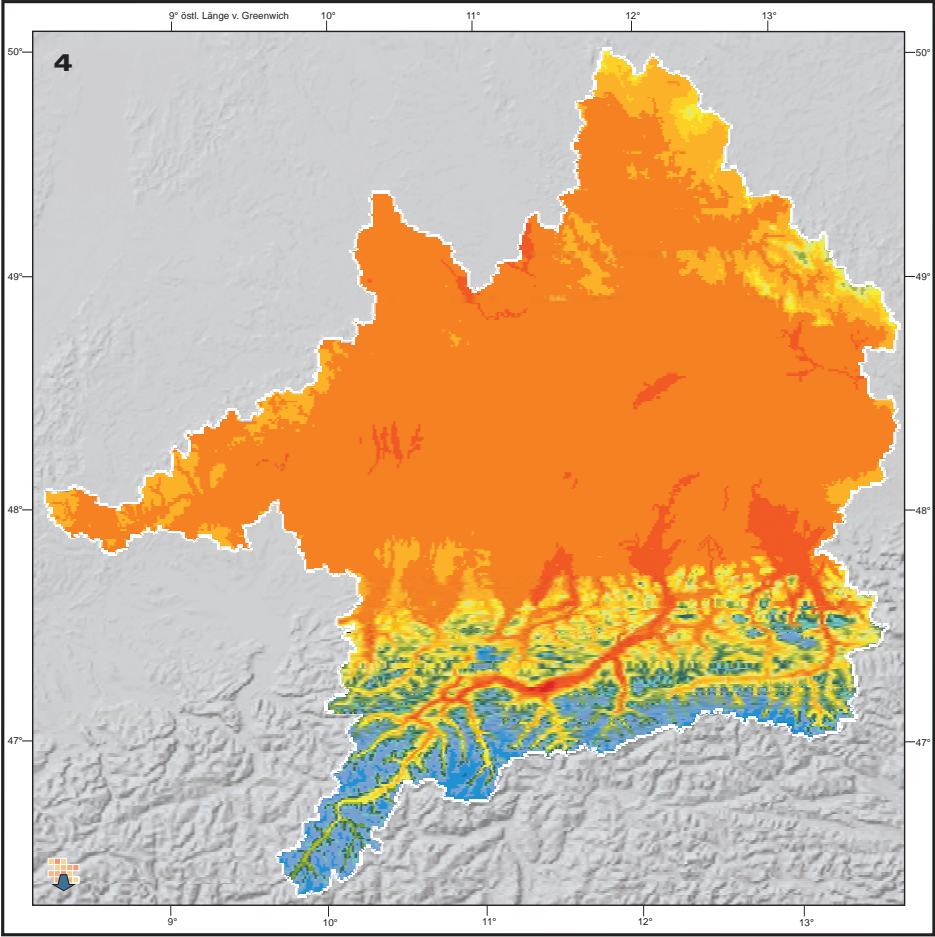
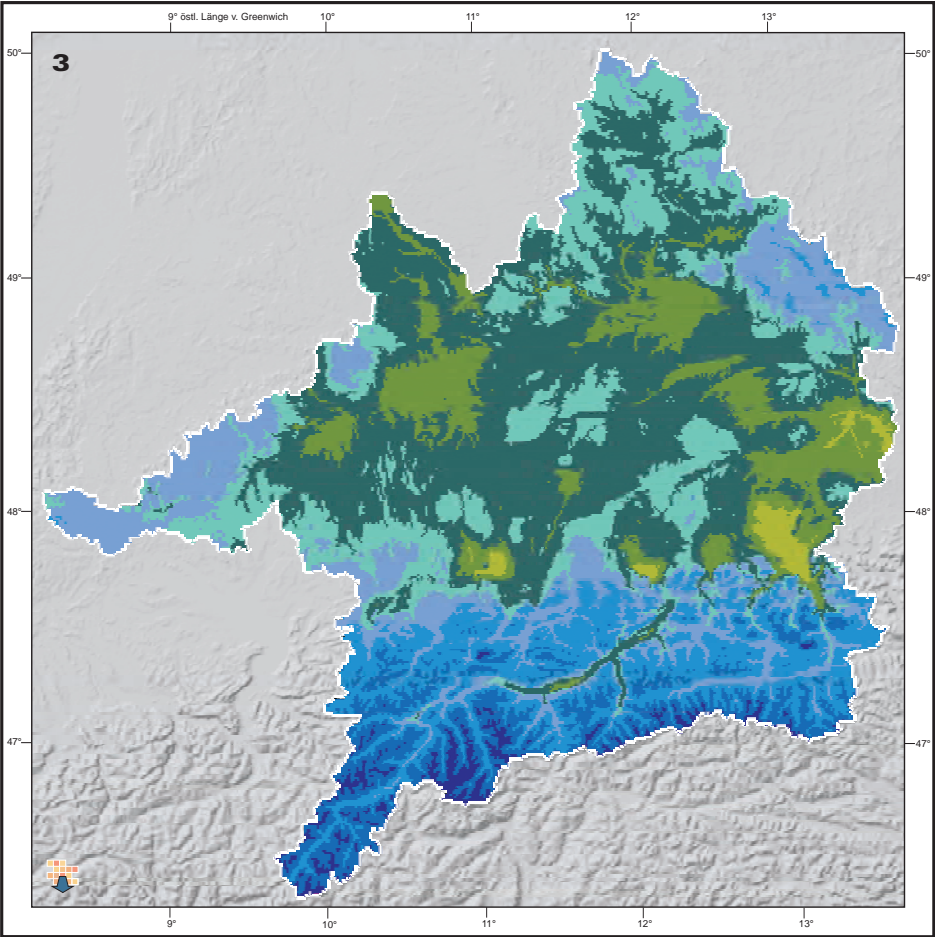
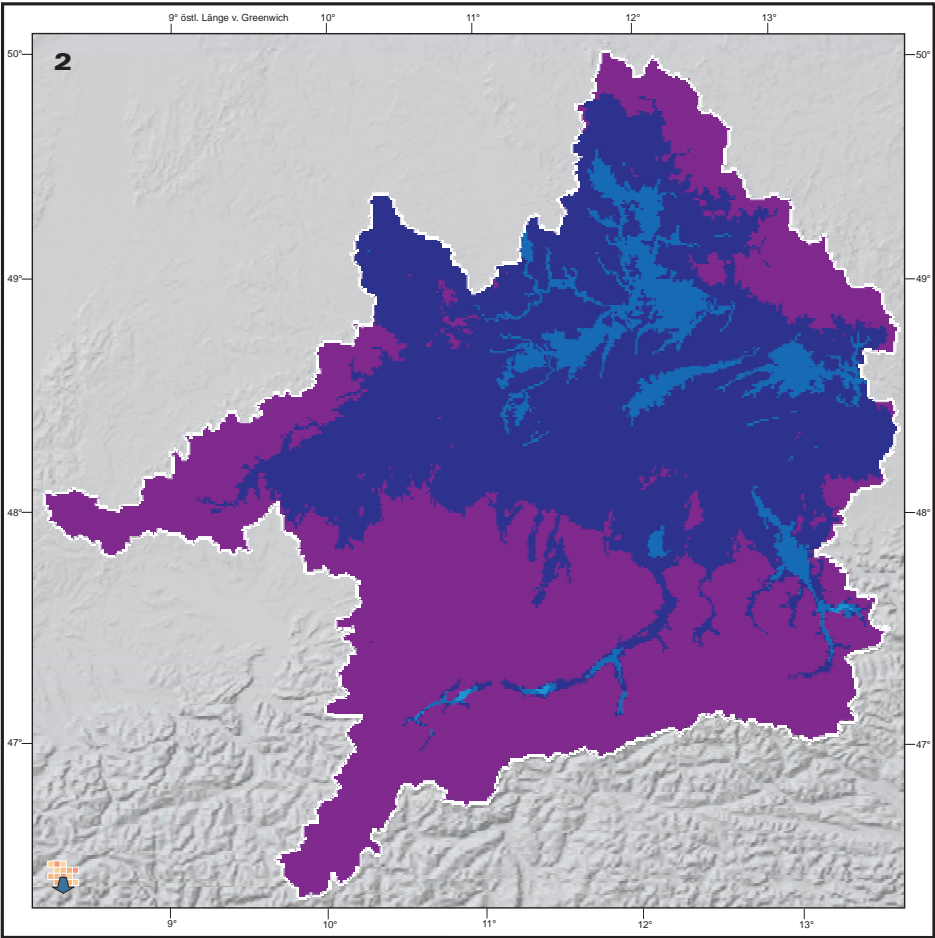
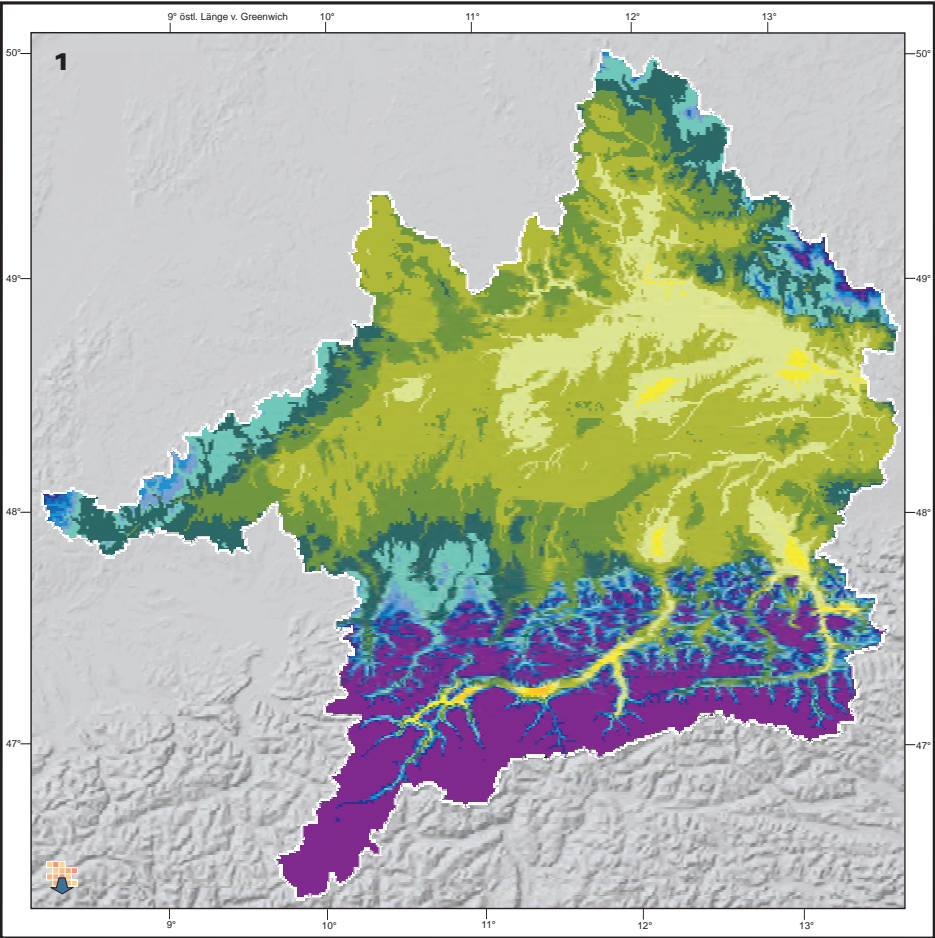


Datengrundlage:  
Ergebnisse des statistischen Klimaantriebs-Generators  
(siehe Kapitel S3)

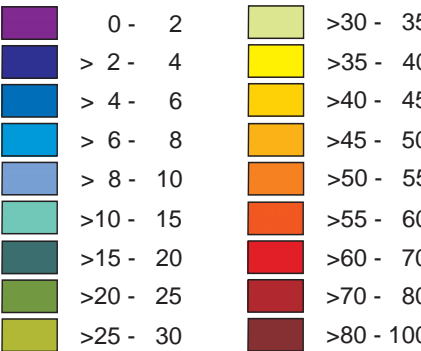
Autoren:  
W. Mauser, T. Marke, A. Reiter  
Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung,  
Ludwig-Maximilians-Universität München  
D. Jacob, S. Preuschmann  
Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg

Grafik:  
V. Falck  
Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung,  
Ludwig-Maximilians-Universität München

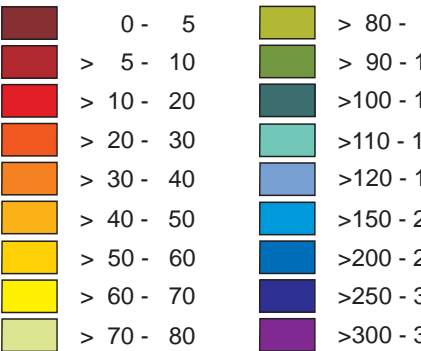




Karte 1: mittlere jährliche Anzahl an Sommertagen 1971-2000  
Karte 2: mittlere jährliche Anzahl an Hitzetagen 1971-2000



Karte 3: mittlere jährliche Anzahl an Frosttagen 1971-2000  
Karte 4: mittlere jährliche Anzahl an Eistagen 1971-2000



GLOBAL CHANGE ATLAS  
EINZUGSGEBIET OBERE DONAU



Herausgeber:  
GLOWA-Danube-Projekt, Ludwig-Maximilians-Universität München

S2.3 Teilprojekt Koordination  
Mittelwerte von Extremtagen  
aus der Vergangenheit

Rastergröße: 1 x 1 km<sup>2</sup>  
Maßstab: 1: 3.800.000

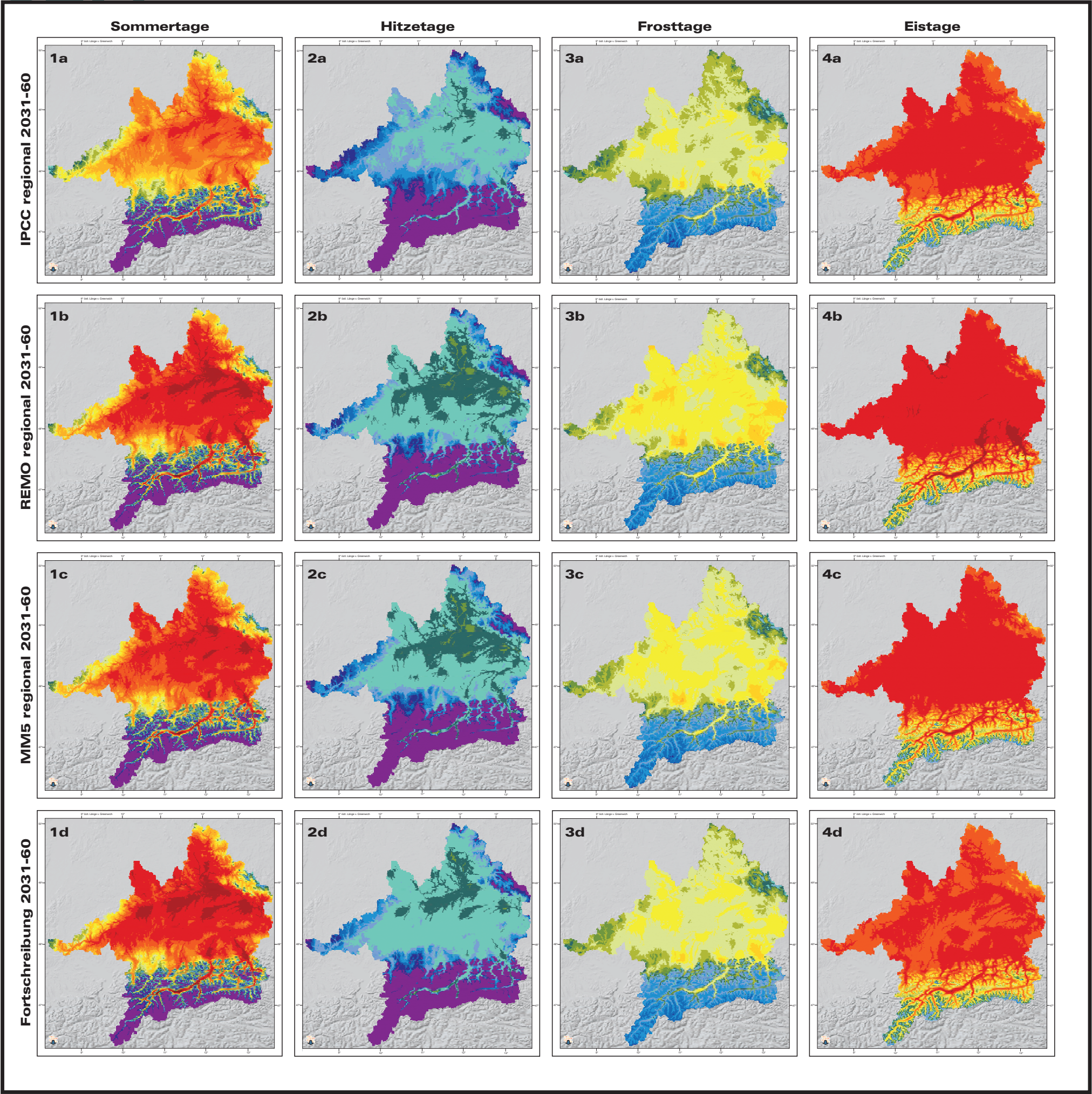


**Datengrundlage:**  
Deutscher Wetterdienst DWD, Offenbach a. Main  
ZAMG, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien  
DANUBIA-Digitales Geländemodell  
DANUBIA-Landbedeckung und Landnutzung

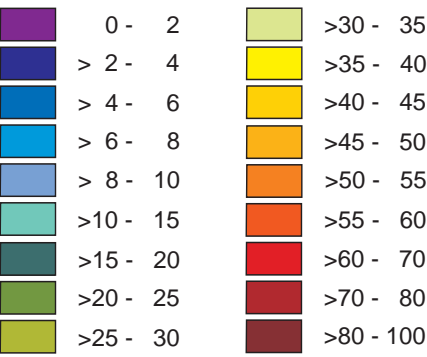
**Autoren:**  
W. Mauser, T. Marke, A. Reiter  
Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung,  
Ludwig-Maximilians-Universität München  
D. Jacob, S. Preuschmann  
Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg

**Grafik:**  
V. Falck  
Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung,  
Ludwig-Maximilians-Universität München

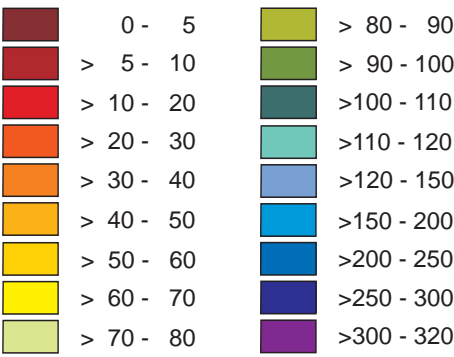




Karten 1a-1d:  
mittlere Anzahl an Sommertagen 2031-60  
Karten 2a-2d:  
mittlere Anzahl an Hitzetagen 2031-60



Karten 3a-3d:  
mittlere Anzahl an Frosttagen 2031-60  
Karten 4a-4d:  
mittlere Anzahl an Eistagen 2031-60



GLOBAL CHANGE ATLAS  
EINZUGSGEBIET OBERE DONAU



Herausgeber:  
GLOWA-Danube-Projekt, Ludwig-Maximilians-Universität München

**S2.4 Teilprojekt Koordination**  
Mittelwerte von Extremtagen in  
unterschiedlichen Klimatrends  
und der Klimavariante *Baseline*

Rastergröße: 1 x 1 km<sup>2</sup>  
Maßstab: 1: 7.700.000



**Datengrundlage:**  
Ergebnisse des statistischen Klimaantriebs-Generators  
(siehe Kapitel S3)

**Autoren:**  
W. Mauser, T. Marke, A. Reiter  
Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung,  
Ludwig-Maximilians-Universität München  
D. Jacob, S. Preuschmann  
Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg

**Grafik:**  
V. Falck  
Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung,  
Ludwig-Maximilians-Universität München



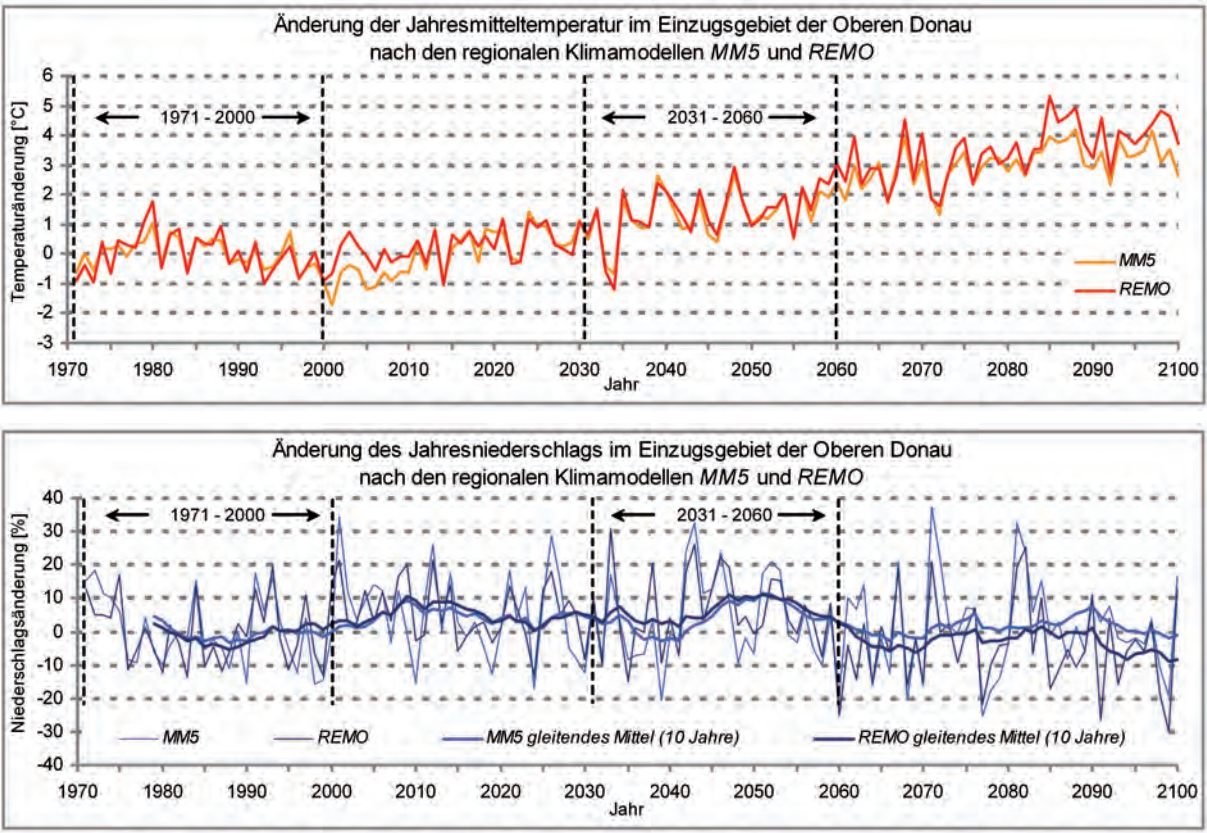


Abbildung S2.7: Abweichungen der jährlichen Mittel von Temperatur und Niederschlag zum langjährigen Mittel der Periode 1971-2000 über die Jahre 1971 bis 2100 nach Berechnungen der regionalen Klimamodelle MM5 und REMO.

tet sind. Beide Modelle zeigen sehr ähnliche Ergebnisse beim Verlauf des Anstiegs der Temperatur. Auch die Entwicklungen des Niederschlags weisen, vor allem in der Form des 10-jährigen gleitenden Mittels für beide Modelle große Ähnlichkeiten auf. Es zeigt sich bis zum Jahr 2050 ein leichter Anstieg des Niederschlags im Untersuchungsgebiet, während ab 2050 der Niederschlag deutlich zurückgeht. Das hohe Maß an Übereinstimmung in den zeitlichen Verläufen der Jahresmittel der beiden Klimaelemente ist auf den gemeinsamen globalen Antrieb zurückzuführen (ECHAM5, Member 1) der als Druck-, Wind-, Temperatur- und Feuchtefeld an den Rändern der Modellgebiete in die Berechnungen der regionalen Klimamodelle eingeht und die regionale Klimaentwicklung somit beeinflusst.

Es ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse der Klimamodelle stets mit Modellungenauigkeiten behaftet sind, die z.B. für die Niederschlagsänderungen durchaus bei +/-5% oder mehr liegen. Bei der Betrachtung des Trends der relativen Änderung des Niederschlags zum langjährigen Mittel der Periode 1971-2000 ist eine Abweichung der Modelle zueinander von ungefähr 10% dadurch begründet, dass die Modelle zwar eine ähnliche Entwicklungstendenz berechnen, sie sich aber in den Ausprägungen der Extrema unterscheiden, was auch der Abbildung S2.7 zu entnehmen ist. Da die Entwicklung für die Wintersaison insgesamt nahe der Nulllinie verläuft und kaum eine Änderung aufweist, passiert es aber, dass die Modelle kleine Tendenzen mit unterschiedlichem Vorzeichen projizieren.

Um die Berechnungen der regionalen Klimamodelle MM5 und REMO im Rahmen des Klima-antriebs-Generators umsetzen zu können, wurde der in den Tabellen S2.2 und S2.3 gezeigte Klimatrend als Eingabe für den statistischen Klima-antriebs-Generator benutzt. Die Klimatrends beschreiben eine lineare Näherung der Entwicklung der Temperatur bzw. der relativen Niederschlagsänderung über die Zeit. Damit wird ein spezifischer Verlauf der Temperatur- bzw. Niederschlagsänderung innerhalb des untersuchten Zeitraums aus der Betrachtung ausgeschlossen. Um den Klima-antriebs-Generator mit den Klimatrends aus Tabelle S2.2 und S2.3 nutzen zu können, wird ein jährlicher Verlauf der Veränderung zwischen 1990 und 2100 benötigt. Für diesen Verlauf des mittleren Temperaturanstiegs und der mittleren Niederschlagsveränderung wurde angenommen, dass er sich entsprechend dem Verlauf des SRES-A1B Szenarios des IPCC (siehe Abbildung S2.2 unten) verhält.

3.4 Der regionale Klimatrend aus historischen Klimamessdaten

Als weitere wichtige Quelle für die Einschätzung der möglichen zukünftigen regionalen Klimaänderung im Einzugsgebiet der Oberen Donau wur-

de die Analyse der Trends der historischen Klimamessdaten von DWD und der ZAMG im Einzugsgebiet der Oberen Donau aus den Jahren 1960-2006 herangezogen. Diese sind in Kapitel 1.9 dargestellt. Sie zeigen eine eindeutige und ausgeprägte Erwärmung. Die Niederschlagstrends, die in den Modellergebnissen des IPCC und REMO berechnet wurden, sind in der Tendenz auch schon in den Beobachtungen aus der Vergangenheit auszumachen. Die Wintermonate wurden im Untersuchungszeitraum feuchter, die Sommermonate zeigten eine Tendenz zu mehr Trockenheit. Allerdings sind die Niederschlagstrends bei den historischen Daten weniger eindeutig als die Temperaturtrends. Die kontinuierliche Erhöhung der mittleren jährlichen bodennahen Lufttemperatur ist in Abbildung S2.8 zu sehen. Sie stieg im Zeitraum 1960-2006 im Durchschnitt um 0.0328°C pro Jahr an und kann durch einen linearen Trend angenähert werden. In dieser Zeit stieg auch der CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Atmosphäre weniger stark an, als für das IPCC-SRES-A1B Szenario für 1990 bis 2100 angenommen wird.

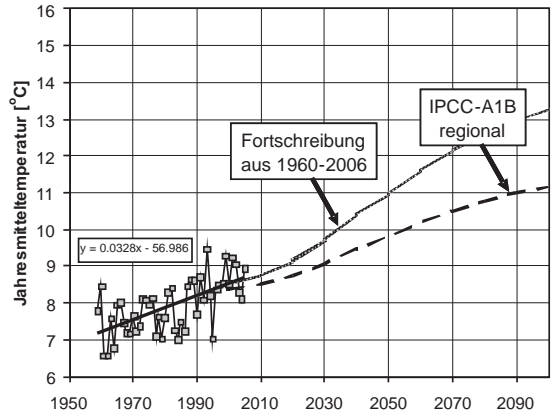


Abbildung S2.8: Verlauf des regionalen Temperaturanstiegs von 1960 bis 2100. Temperaturanstieg 1960 bis 2006 gemessen, IPCC regional für 1990 bis 2100 aus Abbildung S2.3, Fortschreibung für 1990 bis 2100 aus Kapitel 1.9.

A1B-Klimatrend	Temperaturtrend 1990-2100	Rel. Niederschlagstrend 1990-2100	Jährlicher Niederschlagstrend
1. IPCC regional	+3.3°C Winter, +3.3°C Sommer	+7% Winter, -14% Sommer	-4.4%
2. REMO regional	+6.8°C Winter, +3.7°C Frühling, +5.3°C Sommer, +5.1°C Herbst	-4.9% Winter, +9.1% Frühling, -31.4% Sommer, -14.5% Herbst	-12.6%
3. MM5 regional	+5.2°C Winter, +3.2°C Frühling, +5.8°C Sommer, +4.8°C Herbst	+7.7% Winter, +13.1% Frühling, -28.7% Sommer, -1% Herbst	-3.5%
4. Fortschreibung	+5.2°C Winter, +5.2°C Sommer	+47% Winter, -42% Frühling, -69% Sommer, -2% Herbst	-16.4%

Tabelle S2.4: Vergleich der regionalen A1B-Klimatrends und der Veränderungen des Niederschlags sowie der Temperatur für den Zeitraum 1990-2100 aus den Analysen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007), des Umweltbundesamts (Jacob et al., 2008) mit REMO, der Projektgruppe Meteorologie München mit MM5 und der Analyse und Fortschreibung der historischen Klimatrends für das Einzugsgebiet der Oberen Donau.

In Abbildung S2.8 ist neben dem historisch gemessenen mittleren Temperaturanstieg der unter der Bezeichnung IPCC regional angenommene zeitliche Verlauf des Temperaturanstiegs von 1990 bis 2100 dargestellt. Letzterer wurde aus Abbildung S2.3 für das Einzugsgebiet der Oberen Donau ermittelt. Dabei wurde in einer ersten groben Näherung angenommen, dass sich der globale und regionale Temperaturanstieg bis zum Ende des Jahrhunderts in ihrem Betrag zwar unterscheiden, in ihrem zeitlichen Verlauf aber ähnlich sind. Der gezeigte Verlauf ergibt sich, indem zunächst die regionale Temperaturzunahme (3.3°C) zur mittleren globalen Temperaturzunahme des A1B-Szenarios von 2.93°C (siehe Abbildung S2.2 unten) ins Verhältnis gesetzt wird. Mit dem resultierenden Faktor von 1.13 wird der in Abbildung S2.2 unten für das A1B-Szenario gezeigte globale mittlere Verlauf des Temperaturanstiegs multipliziert. Der Wert des ermittelten Faktors (1.13) bringt zum Ausdruck, dass der aus Abbildung S2.3 ermittelte regionale Temperaturanstieg um 13% größer ausfällt, als der mittlere globale Anstieg des IPCC-SRES-A1B Szenarios. Die angenommene Kurve setzt entsprechend den Temperaturverlauf ab der beobachteten Temperatur des Jahres 1990 fort.

Als zweite Kurve ist in Abbildung S2.8 mit der Bezeichnung Fortschreibung der auf der Grundlage des IPCC-SRES-A1B Szenario aus historisch gemessenen Daten extrapolierte Temperaturanstieg von 1990 bis 2100 dargestellt. Die Extrapolation ergibt sich aus dem Vergleich der nach IPCC-A1B Szenario berechneten mittleren jährlichen Temperaturzunahme für den Zeitraum 1990 bis 2020 von 0,018°C pro Jahr mit dem tatsächlich in den letzten 47 Jahren gemessenen Temperaturanstieg von 0.0328°C pro Jahr. Das Zeitintervall von 1990 bis 2020 wurde für den Vergleich deshalb gewählt, weil in diesem Zeitraum die Temperaturanstiege noch ähnlich zu den in der Vergangenheit gemessenen verlaufen. Erst ab 2020 setzt beim gewählten IPCC-A1B-Szenario ein starker Temperaturanstieg ein. Aus dem Verhältnis der beiden Anstiege sowie dem generellen Verlauf des A1B-Temperaturanstiegs aus Abbildung S2.2 unten wurde die gezeigte Fortschreibung des historisch gemessenen Trends wie im oben beschriebenen Fall der Kurve IPCC regional ermittelt. Daraus ergibt sich, wie Abbildung S2.8 zu entnehmen ist, für das Untersuchungsgebiet aus der Fortschreibung eine regionale Erhöhung der jährlichen Mitteltemperatur von 5.2°C im Zeitraum zwischen 1990 und 2100. Diese Fortschreibung des aus den Messungen der Vergangenheit abgeleiteten Erwärmungstrends ist beinahe identisch mit den Ergebnissen der oben angeführten UBA-Studie, die zu einer Erhöhung der mittleren Jahrestemperatur im Untersuchungsgebiet um ca. 5.2°C zwischen 1990 und 2100 kommt. Sie liegt auch sehr nahe am Temperaturtrend der MM5-Ergebnisse, aus denen sich eine Temperaturzunahme von 4.7°C im Untersuchungsgebiet ergibt (siehe Tabellen S2.2 und S2.3).

3.5 Zusammenschau der regionalen Klimatrends

Die Abbildung S2.8 sowie die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle, die auf der gemeinsamen globalen Randbedingung von ECHAM5 (Member 1) beruhen, eröffnen auf der Grundlage des globalen IPCC-SRES-A1B Emissionsszenarios vier regionale Klimatrends für den Tempera-



turanstieg und die Veränderung der Niederschläge an der Oberen Donau. Sie sind in Tabelle S2.4 dargestellt.

Die Zusammenschau der vier ausgearbeiteten GLOWA-Danube Klimatrends stellt sich wie folgt dar:

1. Die regionalen Klimatrends unterscheiden sich beträchtlich von dem vom IPCC angegebenen globalen Mittelwert des Temperaturanstiegs, der vom IPCC für das A1B-Szenario mit 2.93°C für das Jahr 2100 angegeben wird.
2. Aus der Zusammenschau der verfügbaren Erkenntnisse über die zu erwartende regionale Klimaentwicklung im Einzugsgebiet der Oberen Donau von 1990 bis 2100 wird für die weiteren Untersuchungen von der in Tabelle S2.4 zusammengefassten Spannweite regionaler Klimatrends ausgegangen:
  - a. Die Temperaturtrends der regionalen Klimamodelle *REMO* und *MM5* zeigen bis zum Ende des Jahrhunderts eine Erhöhung der Jahresmitteltemperatur zwischen 4.7°C und 5.2°C an (siehe Tabellen S2.2 und S2.3).
  - b. Die Trends der relativen Niederschlagsänderung der regionalen Klimamodelle *REMO* und *MM5* zeigen bis zum Ende des Jahrhunderts eine Reduzierung des Jahresniederschlags von -3.5% bis -12.6% an.
  - c. Die mit *MM5* und *REMO* berechneten Jahrestemperatur- und Niederschlagsänderungen liegen in ähnlicher Größenordnung wie die mit dem globalen Klimamodell *ECHAM5* berechneten Werte (Temperaturänderung +5.0°C, Niederschlagsänderung -3.6%).
  - d. Die aus den Beobachtungen durch *Fortschreibung* ermittelten Veränderungen für die Jahresmitteltemperatur liegen mit +5.2°C und -16.4 % für die Jahresniederschlagsänderung ebenso in den mit den anderen Methoden erzielten Niveaus.
  - e. Alle ermittelten Trends können als ähnlich eingestuft werden. Die Größenordnung ihrer Abweichungen zueinander liegt im Bereich der natürlichen Variabilität, d.h. der natürlichen Schwankungen im nicht-linearen Klimasystem.
  - f. Alle vier Methoden projizieren eine Zunahme der Temperaturen im gesamten Jahr, jedoch berechnet *REMO* die stärkste Temperaturzunahme für die Wintermonate (DJF), während *MM5* die stärkste Zunahme für die Sommermonate (JJA) ermittelt.
  - g. Alle vier Methoden stimmen darin überein, dass sie für die Sommermonate eine Abnahme des Niederschlags berechnen, jedoch mit unterschiedlichen Größenordnungen (-14% bis -69%). Grundsätzlich ist die Unsicherheit in der Berechnung von Niederschlagswerten und ihrer Änderungen deutlich größer als bei der Temperatur (siehe Kapitel 1.9).
  - h. Der GLOWA-Danube Trend der relativen Änderung des Winterniederschlags (DJF) bewegt sich in einem Intervall von -4.9% bis +47%.
  - i. Insgesamt liegen also die in GLOWA-Danube ermittelten und verwendeten Abweichungen für diese beiden Jahreszeiten bei über 50%. Auffallend sind die starken Niederschlagsänderungen, die mit der Methode *Fortschreibung* ermittelt wurden.
  - j. Zusätzlich berechnen alle vier Methoden unterschiedliche Jahresgänge der Trends. Dies zeigt deutlich die Notwendigkeit, mit Bandbreiten möglicher Änderungen in nachfolgenden Studien zu arbeiten, um die Unsicherheiten in der Bestimmung regionaler Klimaänderungsmuster ausreichend zu berücksichtigen.

## Literatur

**IPCC (2000):** *Special Report on Emissions Scenarios* [Nakicenovic, N. and Swart R. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.

**IPCC (2001):** *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.

**IPCC (2007):** *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen,

M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

**Jacob, D. (2001):** *A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin*. Meteorol. and Atmosph. Phys., 77, S. 61-73.

**Jacob, D., Göttel, H., Kotlarski, S., Lorenz, P., Sieck, K. (2008):** *Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland - Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland*. In: Umweltbundesamt (Hrsg.) (2008): *Climate Change* 11/08.